PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2014 VOLUME 5 ISSUE 1 PAGE 1

http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0114

EDITORIAL

Dear colleagues,

In February 2014, the 65th anniversary celebrations took place in the Institute of the Earth's Crust of Siberian Branch of RAS, which publishes Geodynamics & Tectonophysics. To commemorate the anniversary, the ICE Director Office presents 11 articles with reviews of scientific achievements of ICE in the past decade, as well as prospects for further development. This issue also contains five articles from other research institutions.

E.V. Sklyarov, Corresponding Member of RAS, Chief Editor of Geodynamics & Tectonophysics

ОТ РЕДАКЦИИ

Глубокоуважаемые коллеги!

В феврале текущего года организатор и издатель журнала Институт земной коры Сибирского отделения РАН отметил 65-летие со дня своего основания. В ознаменование значимого события дирекция института представила для опубликования в журнале серию из 11 статей, отражающих научные достижения коллектива за последние предъюбилейные годы и перспективы дальнейшего развития. Они представляют первую часть выпуска, после которой публикуются пять очередных статей, поступивших в редакцию из других научных учреждений.

Главный редактор, член-корреспондент РАН Е.В. Скляров



PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2014 VOLUME 5 ISSUE 1 PAGES 3-18

http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0115



ISSN 2078-502X

THE 65TH ANNIVERSARY OF THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST OF SB RAS: CURRENT STATUS AND LOOKING INTO THE FUTURE

D. P. Gladkochub, R. P. Dorofeeva

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: In February 2014, the Institute of the Earth's Crust of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences celebrated its 65th anniversary. As of 01 January 2014, there are 300 employees in its staff, including one Full Member of RAS, one Corresponding Member of RAS, 27 Doctors and 74 Candidates of Sciences. Postgraduate courses are taken by 33 young researchers. The Institute has 13 laboratories and the Analytical Centre to research recent endo- and exogeodynamics, geological environment and seismicity, mineral resources, underground water dynamics and geoecology, internal structure, paleogeodynamics, endogenic processes and fluid dynamics of the continental lithosphere.

From 2009 to 2013, the Institute has published 775 scientific papers in Russia and abroad, implemented 145 projects supported by grants from the Russian Foundation for Basic Research, 21 projects under the Fundamental Research Program of the RAS Presidium and the Earth Sciences Section of RAS, 27 integration projects of SB RAS, and 22 programs of fundamental studies of RAS. The Institute fulfilled more than 50 scientific research contracts with industrial companies in Siberia and several state contracts with governments of the RF regions. Educational research, science organization and international activities are successfully implemented. Renovation and retrofit replacement of equipment, instruments and tools is ensured.

A fitting testimony to scientific achievements of IEC SB RAS is that it ranks among leading research institutes in the Earth sciences in Russia and abroad, as confirmed by all the RAS performance indicators.

Key words: the Institute of the Earth's Crust of SB RAS, recent geodynamics, paleogeodynamics, seismic process, underground water dynamics, geoecology, fluid dynamics, Siberia.

Citation: *Gladkochub D.P., Dorofeeva R.P.* 2014. The 65th Anniversary of the Institute of the Earth's Crust of SB RAS: current status and looking into the future. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (1), 3–18. doi: 10.5800/GT-2014-5-1-0115.

Институту земной коры Сибирского отделения РАН 65 лет: современное состояние и взгляд в будущее

Д. П. Гладкочуб, Р. П. Дорофеева

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация: В феврале 2014 г. Институту земной коры Сибирского отделения Российской академии наук исполнилось 65 лет. На начало 2014 г. в институте трудится около 300 сотрудников, среди которых 1 действительный член РАН, 1 член-корреспондент РАН, 27 докторов и 74 кандидата наук. Обучение в аспирантуре проходят 33 будущих молодых ученых. В структуре института функционирует 13 лабораторий и Аналитический центр, сотрудники которых выполняют исследования по следующим основным научным направлениям: современная эндо- и экзогеодинамика, геологическая среда и сейсмический процесс, ресурсы, динамика подземных вод и геоэкология, внутреннее строение, палеогеодинамика, эндогенные процессы и флюидодинамика континентальной литосферы.

За период с 2009 по 2013 г. в институте опубликовано 775 статей в российских и зарубежных научных журналах, выполнено 145 грантов РФФИ, 21 проект по программам фундаментальных исследований Президиума РАН и Отде-

D.P. Gladkochub, R.P. Dorofeeva: The 65th Anniversary of the Institute of the Earth's Crust of SB RAS...

ления наук о Земле РАН, 27 интеграционных проектов СО РАН, 22 программы фундаментальных исследований РАН, заключено и успешно исполнено более 50 договоров НИОКР с крупными промышленными организациями Сибири, а также ряд государственных контрактов с правительствами субъектов РФ. В институте активно развивается научно-педагогическая, научно-организационная и международная деятельность, обновляется и модернизируется материально-техническая и приборно-аналитическая база.

По всем показателям, обозначенным в ходе реформы РАН в качестве основных критериев оценки результативности научных организаций, ИЗК СО РАН занимает достойное место среди институтов-лидеров страны и мира, выполняющих исследования в области наук о Земле.

Ключевые слова: Институт земной коры СО РАН, современная геодинамика, палеогеодинамика, сейсмический процесс, динамика подземных вод, геоэкология, флюидодинамика, Сибирь.

1. Введение

Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН) является одним из старейших институтов, образованных в системе Восточно-Сибирского филиала АН СССР (ВСФ АН СССР). Институт был создан согласно Распоряжениям Совета Министров СССР № 1138-р от 1 февраля 1949 г. и Президиума Академии наук СССР, Протокол № 3, § 8 от 24 февраля 1949 г. как Институт геологии ВСФ АН СССР (рис. 1). В 1957 г. Институт геологии ВСФ АН СССР (рис. 1). В 1957 г. Институт геологии был преобразован в Восточно-Сибирский геологический институт СО АН СССР, а в 1962 г. – в Институт земной коры, сначала СО АН СССР, а с 1991 г. СО РАН.

В годы активного освоения зоны БАМ численность сотрудников института составляла более 600 человек. В настоящее время (начало 2014 г.) в институте трудится около 300 сотрудников, среди которых 1 действительный член РАН, 1 член-корреспондент РАН, 27 докторов и 74 кандидата наук. Обучение в аспирантуре проходят 33 будущих молодых ученых (рис. 2).

В институте успешно развиваются научные школы, созданные выдающимися учеными СССР и России, в том числе основателями института: чл.-корр. АН СССР Н.А. Флоренсовым (неотектоника и геоморфология), чл.-корр. АН СССР М.М. Одинцовым (поисковая геология), чл.-корр. АН СССР В.П. Солоненко (сейсмогеология, инженерная геология), чл.-корр. АН СССР Е.В. Пиннекером (гидрогеология), академиком PAH Н.А. Логачевым (неотектоника, геология кайнозоя), академиком РАН Ф.А. Летниковым (флюидный режим литосферы), чл.-корр. РАН Е.В. Скляровым (петрология, палеогеодинамика), профессором А.А. Тресковым (сейсмология) (рис. 3).

В структуре института функционирует 13 лабораторий и Аналитический центр, сотрудники которых выполняют исследования по двум основным научным направлениям, закрепленным за ИЗК СО РАН согласно Постановлению Президиума РАН № 269 от 22.04.2008 г.:

1. Современная эндо- и экзогеодинамика. Геологи-

ческая среда и сейсмический процесс. Ресурсы, динамика подземных вод и геоэкология.

2. Внутреннее строение, палеогеодинамика, эндогенные процессы и флюидодинамика континентальной литосферы.

2. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ИЗК СО РАН И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РАЗВИТИЯ

Под проведение фундаментальных научных исследований по этим основным направлениям выстроена структура, укомплектован штат, сформирована приборно-аналитическая и материально-техническая база.

Стабильно высокие научные результаты, полученные в рамках перечисленных выше основных направлений фундаментальных исследований и существующих в институте научных школ, позволяют институту на протяжении последних 10 лет постоянно занимать лидирующие (первое и второе) места в рейтинге институтов Отделения наук о Земле СО РАН. По итогам прошедшей в 2012 г. аттестации ИЗК СО РАН был уверенно отнесен к институтам I категории.

В период с 2009 по 2013 г. в институте было опубликовано 625 статей в российских журналах и 149 – в зарубежных, в том числе в таких высокорейтинговых научных журналах, как «Science», «Precambrian Research», «Spectrochemica Acta», «Episodes», «Lithos», «Geology», «Tectonics», «Tectonophysics», «Quaternary Research», «Earth and Planetary Science Letters», «Geomorphology», «Journal of Asian Earth Sciences» и др. Кроме того, опубликовано 53 монографии, 24 учебных пособия, издано 7 карт и 5 путеводителей экскурсий.

За отчетный период в институте выполнялось 145 грантов РФФИ, 21 проект по программам фундаментальных исследований Президиума РАН и Отделения наук о Земле РАН, 27 интеграционных проектов СО РАН, 22 Программы фундаментальных исследований РАН.

Все эти показатели демонстрируют высокую научную активность сотрудников института и признание их работ в мировом научном сообществе.

1. Копия с копии. ПРЕЗИДИУМ АКАДЕМИИ НАУК СОЮЗА CCP постановление "24 " февраля 1949г г.Москва (Протокол № 3 Заседания Президиума <u>--8-п----)</u> §-Об организации Восточно-Сибирского филиала АН СССР(Распоряжения Совета Министров СССР № II38-р от I/II-I9491 Во исполнении распоряжения Совета Министров СССР от Іфевраля 1949 года № 1138 организовать Восточно-Сибирский филиал АН СССР в гор. Иркутске в составе Институа геологии, Института энергитики и химии, Биологического сектора и Географо-экономического сектора. Поручить Штатно-бюджетной комиссии определить размер ассигнований и штаты для вновь организуемого филиала. ПЕЧАТЬ: Пп. Президент Академии наук СССР академик -С.И.Вавилов Академика-секретаря N.O. Академии Наук СССР академик -В.П. Никитин С ПОДЛЕННЫМ ВЕРНО: Заведующий Протокольным отделом Секретариата Президиума Академии Наук СССР (В.М. Бориневская) 1 Копия верна: Зав. архивом

Рис. 1. Постановление Президиума АН СССР об организации Восточно-Сибирского филиала АН СССР, 1949 г.

Fig. 1. Decree of the Presidium of the USSR Academy of Sciences (1949): Establishment of the East Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences.



Рис. 2. Аспиранты института – наше будущее.

Fig. 2. Postgraduates of IEC – our future.

В связи с переходом в Федеральное агентство научных организаций (ФАНО) Российской Федерации в декабре 2013 г., институту утвержден перечень Государственных заданий на период 2014–2016 гг., финансирование которых будет осуществляться за счет средств госбюджета.

Наряду с выполнением этих госзаданий, сформулированных с учетом сложившихся в иституте научных коллективов и имеющейся приборно-аппаратурной базы, планируется открытие новых перспективных тем, актуальных в фундаментальном плане и имеющих существенную инновационную (прикладную) направленность, таких как:

1) термохронология с использованием U-Th-Pb-He метода для датирования неотектонических событий, определения возраста поднятия к поверхности магматических интрузий (и кимберлитовых тел), фиксации начала процессов диагенеза, сопряженного как с формированием низкотемпературных рудных месторождений, так и с преобразованием углеводородного вещества (кероген – нефть – газ) в осадочных бассейнах;

2) развитие нефтегазового направления в части изучения докембрийского нафтидогенеза (на базе созданной в ИЗК СО РАН в 2012 г. новой лаборатории геологии нефти и газа);

3) развитие методов сейсморазведки на акваториях Байкала и системы водохранилищ ангарского каскада;

4) разработка основ прогноза природно-климатических изменений на основе изучения многолетних рядов наблюдений за природными и социальными явлениями;

5) возрождение рудной тематики, связанной с изучением процессов рудогенеза, в том числе вопросов, касающихся формирования крупных и гигантских месторождений полезных ископаемых, таких как алмазы, Au, Cu, Ti, V, Cr, Fe, Mn, Ta, Nb, Zr, редкоземельные



Н.А. Флоренсов



М.М. Одинцов



В.П. Солоненко



Е.В. Пиннекер



Н.А. Логачев



Ф.А. Летников



Е.В. Скляров



А.А. Тресков

Fig. 3. Founders of scientific research fields of ICE.

Рис. 3. Основатели научных школ (направлений) института.



Рис. 4. Выполнение НИР несколькими лабораториями с ОАО «АЛРОСА – Нюрба».

Fig. 4. Studies implemented by laboratories of ICE jointly with OJSC ALRORA-Nyurba.

элементы и др.

Отдельное внимание в институте уделяется развитию внутренней (межлабораторной) кооперации и междисциплинарных научных исследований (рис. 4), имеющих приоритетное значение в системе целого ряда государственных программ, финансируемых на конкурсной основе.

В части ориентированных (прикладных) исследований институт высоко котируется в Сибири и в Российской Федерации в таких направлениях, как:

- изучение потенциальной алмазоносности юга Сибирской платформы;

- тектонофизический анализ закономерностей размещения месторождений полезных ископаемых;

- разработка рекомендаций по освоению месторождений полезных ископаемых;

- мониторинг безопасности среды обитания при изучении эманаций радона и торона;

- геоэкологические и инженерно-геологические исследования под проектируемые промышленные и инфраструктурные объекты;

- изучение сейсмичности Байкальского региона, в

том числе проведение микросейсмического районирования и мониторинга сейсмического риска на критически важных объектах РФ (каскад ангарских ГЭС, АЭХК и др.), а также на территории Монголии;

- изучение гидроминеральных ресурсов Сибири (рассолов, лечебных и минеральных вод);

- поиск источников водоснабжения для населенных пунктов и промышленных объектов Восточной Сибири.

Серьезные достижения в сфере прикладных исследований позволили институту выступать в качестве основного исполнителя в целом ряде масштабных НИР, среди которых необходимо упомянуть государственные контракты с правительством Иркутской области: «Научное обоснование генеральной схемы развития минерально-сырьевого комплекса Иркутской области на средне- и долгосрочную перспективу» (2011 год), «Стратегия развития минерально-сырьевого комплекса Иркутской области на средне- и долгосрочную перспективу» (2012 г.), «Оценка сейсмической надежности объекта капитального строительства "Общеобразовательная школа на 33 класса в г. Ангарске"» (2011 г.), «Составление карт сейсмического риска» (2013 г.), а также контракт на проведение аудита «Программы геологоразведочных работ Акционерной компании «АЛРОСА» на период до 2018 г.» (впервые в истории компании, крупнейшей в России и второй в мире по объемам добычи и поставки алмазов на мировые рынки).

Все упомянутые выше направления прикладной и инновационной деятельности будут активно развиваться для сохранения существующего баланса фундаментальных и прикладных исследований, выполняемых на базе ИЗК СО РАН. Результаты работ в области патентно-лицензионной (интеллектуальной) деятельности сотрудники института оформили в виде четырех патентов, а также десяти авторских свидетельств и зарегистрированных баз данных.

3. НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

На протяжении всей своей истории институт имел хорошо развитые связи с ведущими вузами Иркутска, в которых проводилась подготовка кадров по широкому спектру геологических специальностей. Подобная научно-педагогическая деятельность не теряет своей актуальности и активно развивается в настоящее время. С целью совершенствования системы подготовки кадров и объединения исследований вузовской и академической науки в институте был организован Научно-образовательный центр (НОЦ) «Геология и минеральные ресурсы Восточной Сибири» (2009 г.). В 2013 г. совместно с ИрГТУ был организован НОЦ «Комплексные геофизические, геологические и геохимические исследования» для реализации комплексных исследований института и инженерногеологических изысканий на территории региона, для выполнения работ по договорам с заказчиками работ.

Сотрудниками института, ведущими научную и преподавательскую деятельность, организованы совместные кафедры:

на базе Иркутского государственного университета (ИГУ):

- кафедра динамической геологии (зав. д.г.-м.н., проф. С.В. Рассказов),

- кафедра тектонофизики (зав. к.г.-м.н. С.А. Борняков),

- кафедра современной геодинамики (зав. к.г.-м.н. В.А. Саньков),

- кафедра общей и космической физики (совместно с ИСЗФ СО РАН);

на базе Национального исследовательского Иркутского государственного технического университета (НИ ИрГТУ):

- кафедра современной геодинамики и природных катастроф (рук. д.г.-м.н., проф. К.Г. Леви).

В 2014 г. на базе созданных в вузах Иркутска кафедр начали работать совместные лаборатории: - совместная лаборатория современных методов лабораторных исследований в динамической и инженерной геологии (ИЗК СО РАН – ИГУ, рук. д.г.-м.н., проф. С.В. Рассказов);

- совместная научно-исследовательская лаборатория «Тектонофизика и геодинамика рудных систем» (ИЗК СО РАН – ИрГТУ, рук. д.г.-м.н. К.Ж. Семинский):

- совместная лаборатория комплексирования геофизических методов (ИЗК СО РАН – ИрГТУ, рук. к.г.-м.н. Ю.А. Давыденко).

С целью создания нормативно-правовой базы для активного взаимодействия с вузами Иркутска институт подписал прямые договоры о сотрудничестве с Иркутским государственным университетом путей сообщения, с Российским государственным университетом физической культуры, спорта и туризма (РГУФК, Иркутский филиал), а также присоединился к Договору о сотрудничестве между Иркутским научным центром СО РАН и ИГУ.

Тесная связь ИЗК СО РАН с вузами закреплена выполнением ряда федеральных целевых программ (ФЦП). В 2013 г. на базе института под эгидой НОЦ ИЗК СО РАН был оборудован блок помещений для чтения лекций и проведения практических занятий со студентами. На этих же площадях предусмотрено размещение совместных кафедр и лабораторий (рис. 5).

Ученые института читают курсы лекций, принимают ют активное участие в работе экзаменационных комиссий геологического факультета ИГУ, диссертационных советов, работающих при вузах Иркутска, а также руководят дипломными проектами и регулярно организуют учебные практики для студентов. Благодаря активной научно-педагогической деятельности и пропаганде науки в студенческой среде, каждый год в институт приходят работать выпускники иркутских вузов, желающие посвятить себя научным исследованиям.

4. Международное сотрудничество

Развитие международной научной кооперации занимает важное место в научной и научно-организационной деятельности ИЗК СО РАН. Традиционно наиболее актуальным направлением международного сотрудничества для института является взаимодействие с научными и образовательными организациями Монголии. Для наращивания объемов совместных работ ИЗК СО РАН инициировал и реализовал создание стационара Эмээлт, расположенного вблизи г. Улан-Батора в Монголии (рис. 6). В краткосрочной перспективе этот стационар будет удовлетворять потребности большинства российско-монгольских экспедиций, выполняющих исследования в рамках совместного конкурса СО РАН и Академии наук Монголии.

Ученые института участвовали в 16 совместных



Рис. 5. Учебный класс для занятий со студентами на совместных кафедрах.

Fig. 5. Classroom.

международных проектах:

- с Национальным центром научных исследований Франции:

История мезозойского рельефа в районе Монголо-Охотского пояса (Сибирь): формирование, размер и деструкция (рук. к.г.-м.н. А.В. Аржанникова),

Геодинамика и эволюция палеоэкосистем (рук. к.г.-м.н. А.В. Аржанникова);

- с Национальной академией наук Украины:

Коллапс активных окраин андийского типа: данные по Антарктическому полуострову (Западная Антарктика) (*рук. д.г.-м.н. Д.П. Гладкочуб*),

Щелочные метасоматиты Приазовья и Прибайкалья и их рудоносность (рук. чл.-корр. РАН Е.В. Скляров);

- с Академией наук Монголии:

Сравнительное исследование напряженно-деформированного состояния литосферы Байкальской рифтовой зоны и Монголии по данным о динамических параметрах очагов землетрясений (рук. д.г.-м.н. *А.В. Ключевский*),

Новейшая геодинамика и сейсмогеодинамика литосферы Монголо-Байкальского региона (*рук. д.г.-м.н. К.Г. Леви*),

Новые данные о гидроминеральных ресурсах Монголо-Байкальского региона (*рук. д.г.-м.н. Б.И. Писарский*),

Современная геодинамика Хангай-Хэнтейского нагорья, Монголия (рук. д.г.-м.н. К.Г. Леви),

Сейсмическая опасность территорий освоения Монголо-Сибирского региона (рук. д.г.-м.н. В.И. Джурик) и др.;

- с Государственным фондом естественных наук Китая:

Совместные исследования геохимических и физических аспектов плавления глубинных уровней коры при формировании комплексов метаморфических ядер



Рис. 6. Стационар «Эмээлт», Монголия.

Fig. 6. Emeelt Station in Mongolia.

России и Китая (рук. чл.-корр. РАН Е.В. Скляров),

Совместные исследования зон внутриконтинентального растяжения и связанных с ними процессов в России и Китае (*рук. чл.-корр. РАН Е.В. Скляров*),

Тектонофизические закономерности активизации разломов и признаки подготовки сильных землетрясений в рифтовых системах Шаньси и Байкальской (*рук. д.г.-м.н. С.И.* Шерман);

- с Европейским институтом нелинейных исследований через транснациональное сотрудничество Consortium E.I.N.S.T.E.I.N. («ЭЙНШТЕЙН», Италия):

Сейсмотектоника юга Восточной Сибири (рук. к.г.-м.н. О.В. Лунина).

За прошедшие пять лет (2009–2013 гг.) сотрудники института выезжали в **341** зарубежную командировку, в 30 стран: Европы (Австрия – 21, Польша – 16, Франция –22, Болгария – 4, Италия – 3, Греция – 6, Венгрия – 3, Финляндия – 2 и др.); Азии (Монголия – 192, Китай – 27, Япония – 6, Вьетнам – 3, Сирия – 3, Индия – 2 и др.), Северной Америки (США – 2), Африки (Эфиопия – 3) и Австралии (1). За это же время в институт приезжали **146** раз зарубежные ученые из 23 стран: европейских (Польша – 26, Франция – 6, Италия – 6, Великобритания – 5, Германия – 5, Сербия – 3, Бельгия – 2, Израиль – 2 и др.), азиатских стран (Южная Корея – 2, Сирия – 2, Вьетнам – 3), США (3) и Австралии (1).

Поддержание международного уровня исследований в институте невозможно без развития научной кооперации с ведущими зарубежными научными центрами и организациями, поэтому отдельным приоритетом Программы развития ИЗК СО РАН является поддержка участия не только ведущих, но и молодых научных сотрудников в международных научных проектах, публикациях, совещаниях, экспедициях и других формах развития международной научной деятельности.

5. НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Помимо научных исследований и выполнения образовательных и просветительских функций, институт ведет активную научно-организационную деятельность, в частности организует и проводит многочисленные представительные всероссийские и международные научные совещания, которые собирают иногда более 100 участников со всех регионов страны, а также из стран дальнего и ближнего зарубежья. За прошедшие пять лет в ИЗК СО РАН было организовано 22 всероссийских и международных совещания. С целью сохранения и развития существующих в институте научных школ и традиций, отдельные мероприятия были посвящены памяти основателей и ведущих ученых ИЗК СО РАН:

2010 год – Всероссийский научный симпозиум с участием иностранных ученых «Кайнозойский континентальный рифтогенез», посвященный 80-летию со дня рождения ак. РАН Н.А. Логачева.

2011 год – Всероссийская конференция «Геология, тектоника, магматизм и алмазоносность Сибирской платформы», посвященная 100-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР М.М. Одинцова.

2012 год – XX Всероссийское совещание по подземным водам востока России, посвященное памяти чл.-корр. РАН Е.В. Пиннекера и 110-летию со дня рождения д.г.-м.н. В.Г. Ткачук – основателя геотермического направления в институте.

С 2004 г. на базе ИЗК СО РАН ежегодно проводится Всероссийское совещание «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса: от океана к континенту» (рис. 7).

Сотрудники института регулярно организовывают российско-монгольские конференции по астрономии и геофизике, которые проводится поочередно в ИЗК СО РАН, в Институте солнечно-земной физики СО РАН и в Исследовательском центре астрономии и геофизики Академии наук Монголии.

С периодичностью один раз в два года в институте проводится молодежная конференция «Строение литосферы и геодинамика», которая объединяет молодых ученых из различных регионов страны – от Карелии до Дальнего Востока. В 2013 г. состоялась уже XXV Всероссийская молодежная конференция, на которой присутствовало свыше 200 участников.

Кроме этого, среди наиболее значимых научных совещаний 2009–2013 гг. отметим следующие:

2009 год: Всероссийское совещание «Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия» (с участием иностранных ученых);

2010 год: Иркутский геоморфологический семинар «Теория геоморфологии и ее приложение в региональных и глобальных исследованиях» (с участием свыше 150 ученых);

2011 год: Международное научное совещание «Крупные магматические провинции Азии: мантийные плюмы и металлогения» (International Conference «Large Igneous Provinces of Asia: Mantle Plumes and Metallogeny») (рис. 8);

2012 год: Всероссийское совещание «Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные

процессы: результаты исследований на количественной основе» совместно с Всероссийской молодежной школой по современной геодинамике (рис. 9),

II Международная конференция «Геобайкал–2012» с геологическими экскурсиями (рис. 10);

2013 год: XI Совещание по международному проекту «3D геологические структуры и металлогения Северной, Центральной и Восточной Азии» и Международная полевая геологическая экскурсия на Монголо-Охотский складчатый пояс (Байкал и Монголия) (XI International Workshop «3D Geological Structures and Metallogeny of Northern, Central and Eastern Asia» and International Field Trip to the Mongol-Okhotsk Fold Belt, Baikal and Mongolia) (рис. 11),

III Международная конференция «Создание и использование искусственных участков на берегах и акватории водных объектов» с участием 22 научных и проектных организаций, а также 23 региональных и подведомственных представительств Росводресурсов,

IX международная школа-семинар «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород».

Проведение всероссийских и международных совещаний способствует расширению связей института с научными организациями России и зарубежных стран, а также позиционированию ИЗК СО РАН как структуры, способной на только выполнять научные исследования, но и организовывать международные мероприятия на самом высоком современном уровне.

6. Состояние и перспективы развития аналитической и материальнотехнической базы института

Институт земной коры СО РАН является комплексным институтом, в перечень основных направлений которого входят как геологические, так и геофизические методы исследований, а также изучение подземной гидросферы, вопросов геоэкологии и инженерной геологии. Подобная многопрофильность определяет специфику существующей материально-технической базы (МТБ) института и пути ее дальнейшего развития.

В период с 2009 по 2013 г. институт получил новое научное оборудование для развития этих основных направлений. Среди наиболее значимых позиций следует отметить:

1) многоканальный газовый масс-спектрометр ARGUS VI – специализированный прибор нового поколения для исследований изотопного состава аргона (природных – ⁴⁰Ar, ³⁸Ar, ³⁶Ar и образуемых при облучении образца быстрыми нейтронами в ядерном реакторе – ³⁹Ar, ³⁷Ar). Масс-спектрометр может использоваться для изучения более легких газов, например изотопов азота, и определения концентраций гелия-4 (рис. 12);

2) рентгенофлуоресцентный спектрометр с волно-



Рис. 7. Труды Всероссийского совещания «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса: от океана к континенту».

Fig. 7. Proceedings of the All-Russia Conference on Geodynamic Evolution of the Lithosphere of the Central Asian Mobile Belt: From Ocean to Continent.



Рис. 8. Геологическая экскурсия в рамках совещания «Крупные магматические провинции Азии: мантийные плюмы и металлогения», 2011 г.

Fig. 8. Geological excursion for participants of the Conference on Large Magmatic Provinces of Asia: Mantle Plumes and Metallogeny, 2011.



Рис. 9. Участники Всероссийской молодежной школы по современной геодинамике, 2012 г.

Fig. 9. Participants of the All-Russia Youth Workshop on Recent Geodynamics, 2012.



Рис. 10. Геологическая экскурсия Международной конференции «Геобайкал–2012».

Fig. 10. Geological excursion for participants of Geobaikal–2012 International Conference.



Рис. 11. Участники XI Совещания по международному проекту «3D геологические структуры и металлогения Северной, Центральной и Восточной Азии» и Международной полевой геологической экскурсии на Монголо-Охотский складчатый пояс (Байкал и Монголия), 2013 г.

Fig. 11. Participants of the 11th Conference on the International Project on 3D Geological Structures and Metallogeny of Northern, Central and Eastern Asia and the International Field Geological Excursion to the Mongol-Okhotsky folded belt located in the Baikal region and Mongolia, 2013.

вой дисперсией S8 TIGER (Bruker, Германия) — для количественного рентгенофлуоресцентного определения малых содержаний 20 элементов в горных породах разнообразного состава;

3) рентгенофлуоресцентный спектрометр с полным внешним отражением S2 PICOFOX (Bruker Nano GmbH), который позволяет определять очень малые содержания элементов в различных материалах: природной и водопроводной воде, напитках (лимонад, чай, кофе, минеральные воды, алкогольные напитки), нефти, нефтепродуктах и других средах и материалах. Опробована уникальная методика определения большой группы элементов в молоке (18 элементов), определения содержаний 20 элементов в суспензиях образцов горных пород;

4) рентгеновский дифрактометр ДРОН-3 – спектрофотометр применяется для определения Fe₂O₃общ, MnO, CaO, MgO, K₂O, Na₂O, Li, Rb и Sr;

5) спектрофотометрический комплекс Genesys 10S

(Thermo Fisher Scientific, CША) – комплекс обеспечивает возможность определения содержаний SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, FeO, P₂O₅;

6) многоэлектродные электроразведочные станции «Скала-48» для проведения малоглубинной электротомографии;

7) радиометр «Barasol», используемый для измерения радона в почве;

8) нивелир Trimble DINI 0.3 в комплектации для использования при проведении GPS-измерений на геодинамических полигонах;

9) малогабаритная буровая установка МГБУ-400 «Термит» (рис. 13);

10) научно-исследовательское судно «Геолог» (рис. 14).

Запущена в тестовом режиме первая очередь «чистых комнат» для подготовки проб к изучению изотопии Sr и Nd, а также U-Pb датирования цирконов (впервые в CO PAH).



Рис. 12. Многоканальный газовый масс-спектрометр ARGUS VI.

Fig. 12. ARGUS VI multi-channel gas mass spectrometer.

Кроме этого, в целевую Программу развития МТБ РАН в качестве приоритетов развития материальнотехнической базы ИЗК СО РАН заявил две основные позиции:

1) строительство и оснащение геодинамического полигона «Южный Байкал» с геоэкологической обсерваторией;

2) строительство и оснащение комплексного геолого-геофизического стационара «Бугульдейка» с палеомагнитной обсерваторией.

Реализация намеченных мероприятий по развитию МТБ позволит обеспечить научным результатам, получаемым в ИЗК СО РАН, высокий современный уровень, а самому институту сохранить лидерские позиции в российских и международных рейтингах организаций, проводящих исследования в области наук о Земле.

7. ВЗГЛЯД В БЛИЖАЙШУЮ (ДО 70-ЛЕТНЕГО ЮБИЛЕЯ) ПЕР-СПЕКТИВУ

Завершая обзор основных результатов ИЗК СО РАН, достигнутых к 65-летию (за отчетный период 2009–2013 гг.) и планов института на ближайшую перспективу, хотелось бы кратко остановиться на вызовах, перед которыми в настоящее время поставлены все академические институты Российской Федерации. Как известно, начавшаяся в 2013 г. реформа Российской академии наук в качестве основных критериев оценки научных организаций поставила во главу угла такие показатели, как количество и качество научных публикаций, средний возраст научных сотрудников, обеспеченность коллективов современным оборудованием, участие институтов в выполнении крупных российских и международных проектов. По всем этим показателям ИЗК СО РАН занимает достойное место среди институтов-лидеров страны, ведущих исследования в области наук о Земле.

Очевидно, что определенная корректировка научных направлений и структуры института будет неизбежна для повышения его международной конкурентоспособности и дальнейшего развития в быстро изменяющемся мире. Для того, чтобы успешно пройти этот этап, удержать и усилить те позиции, которые обеспечены многолетним трудом целых поколений исследователей, работавших в ИЗК СО РАН, необходимо уже сейчас больше внимания уделять качеству проводимых исследований, их востребованности в мировом научном сообществе и в экономике государства, развитию международных связей, сохранению и расширению штата высококлассных специалистов, нарациванию приборно-аппаратурной базы, вовлечению в научный процесс молодых ученых, аспирантов и



- Рис. 13. Малогабаритная буровая установка МГБУ-400 «Термит».
- **Fig. 13.** *Termit MGBU-400* small-sized drilling rig.



- **Рис. 14.** Научно-исследовательское судно «Геолог».
- Fig. 14. RS Geolog.

студентов, которые будут определять развитие института в средне- и долгосрочной перспективе.

Следующее пятилетие станет решающим в адаптации академических институтов к требованиям ФАНО и мировой научной среды, построенной на принципах жесткой конкуренции. От того, как институты (в том числе ИЗК СО РАН) подготовятся и пройдут эти испытания, напрямую зависит их выживание и дальнейшая судьба. Цитируя известного политического деятеля второй половины XX века, хотелось бы завершить статью его знаменитым лозунгом, актуальность которого для института сейчас несомненна как никогда ранее: «Цели ясны, задачи определены – за работу, товарищи!».



Гладкочуб Дмитрий Петрович, докт. геол.-мин. наук, директор института Институт земной коры СО РАН 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия ⊠ e-mail: dima@crust.irk.ru

Gladkochub, Dmitry P., Doctor of Geology and Mineralogy, Director of the Institute Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS 128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia ⊠ e-mail: dima@crust.irk.ru



Дорофеева Раиса Петровна, канд. геол.-мин. наук, ученый секретарь Институт земной коры СО РАН 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия Тел.: (3952)426900; e-mail: drf@crust.irk.ru

Dorofeeva, Raisa P., Candidate of Geology and Mineralogy, Secretary for Scientific Affairs Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS 664033, Irkutsk, Lermontov street, 128, Russia Tel.: (3952)426900; e-mail: drf@crust.irk.ru PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2014 VOLUME 5 ISSUE 1 PAGES 19-39

http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0116

ISSN 2078-502X

THE EVOLUTION OF THE SIBERIAN CRATON, PETROGENESIS AND DIAMOND POTENTIAL OF THE MANTLE MAGMATIC SYSTEMS

P. I. Dorogokupets, K. N. Egorov

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: The article reviews the history, main scientific fields and major results of the studies performed by the Laboratory of Petrology, Geochemistry and Ore Genesis and the Laboratory of Geology and Magmatism of Ancient Platforms.

Key words: craton, mantle, diamond, kimberlite, basic rock, thermodynamics.

Citation: *Dorogokupets P.I., Egorov K.N.* 2014. The evolution of the Siberian craton, petrogenesis and diamond potential of the mantle magmatic systems. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (1), 19–39. doi:10.5800/GT-2014-5-1-0116.

ЭВОЛЮЦИЯ СИБИРСКОГО КРАТОНА, ПЕТРОГЕНЕЗИС И АЛМАЗОНОСНОСТЬ МАНТИЙНЫХ МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

П. И. Дорогокупец, К. Н. Егоров

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация: Рассмотрена история, основные научные направления и основные научные результаты исследований за период 2009–2013 гг. в лаборатории петрологии, геохимии и рудогенеза и лаборатории геологии и магматизма древних платформ.

Ключевые слова: кратон, мантия, алмаз, кимберлит, базит, термодинамика.

1. Введение

Изучением эволюции Сибирского кратона, в том числе условий образования, петрогенезиса, флюидного режима и алмазоносности мантийных магматических систем, в ИЗК СО РАН занимаются две специализированные лаборатории – лаборатория петрологии, геохимии и рудогенеза (ЛПГР) и лаборатория геологии и магматизма древних платформ (ЛГМДП) под научным руководством академика Ф.А. Летникова.

Научное сотрудничество лабораторий осуществляется в проекте НИР «Эволюция Сибирского кратона; условия образования, петрогенезис, флюидный режим и алмазоносность мантийных магматических систем», финансируемом из госбюджета. Эти исследования отвечают Приоритетному направлению развития фундаментальной науки в РФ № VIII.72 «Рудообразующие процессы, их эволюция в истории Земли, металлогенические эпохи и провинции и их связь с развитием литосферы. Условия образования и закономерности размещения полезных ископаемых».

2. ЛАБОРАТОРИЯ ПЕТРОЛОГИИ, ГЕОХИМИИ И РУДОГЕНЕЗА

Лаборатория была организована Ф.А. Летниковым в 1965 г. на базе лаборатории экспериментальной петрографии и минералогии. С 2006 г. лабораторию возглавляет д.г-м.н. П.И. Дорогокупец. К наиболее значимым достижениям лаборатории во второй половине XX в. относится уникальный банк газовых хроматографических анализов горных пород в возрастном интервале от кайнозоя до раннего архея. Опубликовано 17 монографий по флюидному режиму в литосфере. Опубликована монография «Термодинамика минералов и минеральных равновесий». Академиком Ф.А. Летниковым опубликована монография «Синергетика геологических процессов».

2.1. ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

В настоящее время (начало 2014 г.) в лаборатории петрологии, геохимии и рудогенеза работает 15 сотрудников, в том числе академик РАН (рис. 1), 1 доктор и 8 кандидатов наук (рис. 2).

2.2. Основные научные направления

В ЛПГР проводятся комплексные исследования эндогенных флюидных систем и их влияния на процессы минералообразования, выплавления магм, перенос и концентрирование рудных элементов, формирование рудных и нерудных месторождений в пределах Сибирской платформы и ее складчатого обрамления. Комплексность этих исследований заключается в следующем:

1) использовании современных аналитических методов (газовая хроматография, рамановская спектроскопия, электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, термический анализ, атомно-силовая и сканирующая электронная микроскопия и другие методы анализа),

2) экспериментальном исследовании флюидизированных силикатных и рудных систем при высоких давлениях и температурах,

3) численном физико-химическом моделировании флюидных систем и минеральных парагенезисов на основе специально разработанной термодинамики высокобарных минералов,

4) разработке уравнений состояния веществ и минералов для термодинамических условий, соответствующих мантии Земли.



Рис. 1. Академик Ф.А. Летников.

Fig. 1. Academician F.A. Letnikov.

В течение последних пяти лет основным направлением исследований ЛПГР было изучение роли глубинных флюидных систем в формировании внутриплитных магматических комплексов; метасоматитов и метаморфитов во внутриразломных структурно-вещественных комплексах; условий образования, петрогенезиса, флюидного режима и алмазоносности мантийных магматических систем.

2.3. Основные научные достижения

На основании изучения эндогенных флюидных систем, проявленных в зонах глубинных разломов, сделан вывод о флюидной гетерогенности подстилающего астеносферного слоя и наличии здесь автономных флюидных систем. В одних случаях это восстановленные высокоуглеродные флюиды, в других – щелочные высокофтористые или бороносные системы с высоким содержанием редких и радиоактивных элементов. Проявление автономных флюидных систем наиболее характерно для докембрийских средних массивов, границ древних платформ и складчатого обрамления, заложенного на докембрийском основании. Проведено сопоставление 22 редких и рассеянных элементов из карбонатитов Дубравского массива ультраосновных щелочных пород и из графит-алмазных концентратов месторождения Кумды-Куль (Кокчетавская глыба, Северный Казахстан). Оба эти объекта приурочены к Чаглинскому глубинному разлому и сформировались в близком временном интервале. Полученные геохимические данные подчеркивают генетическое родство этих двух глубинных высокоуглеродистых флюидных систем: окисленной (карбонатиты) и восстановленной (графит-алмазная минерализация во внутриразломном



Рис. 2. Сотрудники лаборатории петрологии, геохимии и рудогенеза (слева направо): Н.В. Сизых, Т.С. Соколова, академик Ф.А. Летников, к.г-м.н. М.В. Марчук, к.г-м.н. Ю.Б. Данилова, Л.В. Баранова, к.г-м.н В.Б. Савельева, д.г-м.н. П.И. Дорогокупец – зав. лабораторией, Л.И. Меньшагина, к.г-м.н. Л.А. Иванова, А.В. Левин, к.г-м.н. В.Я. Медведев, к.г-м.н. Б.С. Данилов.

Fig. 2. The staff of the Laboratory of Petrology, Geochemistry and Ore Genesis (left to right): N.V. Sizykh, T.S. Sokolova, F.A. Letnikov, M.V. Marchuk, Yu.B. Danilova, L.V. Baranova, V.B. Savelieva, P.I. Dorogokupets (Head of the Laboratory), L.I. Men'shagina, L.A. Ivanova, A.V. Levin, V.Ya. Medvedev, B.S. Danilov.

пространстве) [Letnikov, 2009; Letnikov et al., 2010].

Проведена количественная оценка термодинамических параметров главных компонентов мантийного флюида до глубины 1000 км. Рассчитано приращение энтальпии (теплосодержания) газов при их подъеме с глубины 1000 км в верхнюю мантию и земную кору. Наибольшей энергетической емкостью по сравнению с другими газами обладает водород, что и обусловливает высокую степень энергетического воздействия на породы и флюиды собственно водородных систем [Letnikov et al., 2011, 2013].

В Северном Казахстане (Кокчетавская глыба) выявлены гранитные магматические системы, сформировавшиеся в одних случаях в результате воздействия на алюмосиликатную породную матрицу высокофтористых (топазовые граниты и онгониты), а в другом случае высокоборных (эльваны) флюидных систем. Взаимоотношения топазовых гранитов с ранее образованными жильными и дайковыми телами в массиве Тотогуз (Северный Казахстан) показывают, что процесс внедрения гранитоидной магмы, из которой затем образовались топазовые граниты, был несколько оторван во времени от послемагматического этапа становления гранитов третьей фазы [Levin, Letnikov, 2010; Turkina et al., 2011; Letnikov, Levin, 2013].

Изучение гранитов приморского комплекса PR₁ в Западном Прибайкалье показало, что их формирование связано с глубокой дифференциацией больших объемов известково-щелочных магм, что обусловило кристаллизацию на заключительных этапах лейкогранитов, обогащенных летучими и гранитофильными редкими элементами, перспективных в отношении обнаружения оловянного оруденения грейзенового типа. На основании U-Pb датирования (SHRIMP-II) показано, что в Хамар-Дабанском и Бельско-Китойском террейнах Центрально-Азиатского подвижного пояса на



Рис. 3. Галускинит (Gal) и срастания павловскиита (Pav) с деллаитом (Del) в кальциооливиновом (Ca-ol) скарне Бирхинского массива.

Fig. 3. Galuskinit (Gal) and concretions of pavlovskiite (Pav) and dellaite (Del) in the calcium-olivine (Ca-Ol) scarn of the Birkhinsky massif.

границе с Сибирским кратоном наряду с позднеордовикской эпохой гранитоидного магматизма проявилась каменноугольная эпоха гранито- и пегматитообразования, отражающая тектоно - магматическую активизацию Главного Саянского разлома. Изучение щелочных метасоматитов Главного Саянского разлома позволило охарактеризовать данные метасоматиты как потенциально перспективные на обнаружение Nb-Zr-TR (+Th, U, Be) оруденения. Изучение геохимии и минералогии гранитов и пегматитов аинского комплекса в пределах Ольхонского террейна Pz1 позволило выделить новый для Прибайкалья тип пегматитов фтор-тантал-иттриевого минерагенического ряда с комплексной (Y-Nb-Ta-W-Cs-Sn) минерализацией. В Западном Прибайкалье в скарнах на контакте с габброидами Бирхинского массива открыты новые минералы – павловскиит Ca₈(SiO₄)₂(Si₃O₁₀) и галускинит Ca₇(SiO₄)₃(CO₃) (рис. 3) [Savel'eva, Karmanov, 2010; Savel'eva, Bazarova, 2012; Savel'eva et al., 2011, 2012; Armbruster et al., 2011; Lacis et al., 2011; Galuskin et al., 2012; Gfelleer et al., 2013].

Впервые выполнено описание графитсодержащих травертинов, ассоциирующих с гейзеритами и образующих самостоятельные жилы среди отложений ольхонской серии (Западное Прибайкалье). Для графитов из гейзеритов Прибайкалья установлена новая, ранее неизвестная в природных образцах, модификация углерода – α-карбин, который находится в парагенетической ассоциации с графитом и битумоидами. Изучен состав и строение углеродного вещества метасоматитов Тункинского разлома (юго-восточная часть Восточного Саяна). Установлено, что в составе УВ присутствуют битумоиды – РУВ. РУВ углеродсодер-



Рис. 4. Кристаллы фаялита на поверхности кварца (*A*, *Б*) и кварцевых выделений в лейкократовом граните (*B*, *Г*).

Fig. 4. Fayalite crystals on the surface of quartz (A, B) and quarts emissions in leucocratic granite (B, Γ).

жащих пород Тункинского разлома представлен в основном линейными углеводородами [Shumilova, Danilova, 2009; Shumilova et al., 2011; Danilova et al., 2012].

Экспериментально показано, что при температуре 500 °С и давлении 1000 атм основным фактором, влияющим на образование различных модификаций медистого золота в системе H₂O – NH₃, является количество вводимой в систему воды: до 10 % – образуются кубические фазы; до 50 % - тетрагональные. Установлено, что Si и Fe переносятся восстановленным флюидом в термоградиентных системах в присутствии NaCl как в гидротермальных, так и в безводных условиях с образованием фаялита на кварце и железосодержащих держателях. Форма огранки новообразованного фаялита зависит от состава субстрата, по которому он развивается (рис. 4, 5). Экспериментально показано влияние режима декомпрессии на перераспределение рудных и петрогенных элементов при самоорганизации гранитного расплава. Открыт новый минерал – владимиривановит [Marchuk et al., 2009; Ivanova et al., 2010; Letnikov et al., 2012; Sapozhnikov et al., 2012].

На основе одновременной оптимизации данных ударных экспериментов, ультразвуковых, рентгеновских, дилатометрических и термохимических измерений в диапазоне температур от ~100 К до температуры плавления и до давлений в несколько мегабар с использованием модифицированного формализма построены уравнения состояния алмаза, MgO, Ag, Al, Au, Cu, Mo, Nb, Pt, Ta, W. Уточнена калибровка рубиновой шкалы давлений [Р(ГПа) = $1870 \cdot \Delta \lambda / \lambda_0 (1 + 6 \cdot \Delta \lambda / \lambda_0)$] (рис. 6). Новые одновременные измерения объема Au, Pt, MgO и B2-NaCl были использованы для перекрестной проверки полученных уравнений состояния. Построенные уравнения состояния девяти металлов,



Рис. 5. Кристаллы фаялита на железосодержащих держателях образцов (*A*–*Г*).

Fig. 5. Fayalite crystals on ferriferous clamps $(A-\Gamma)$.

алмаза, периклаза, B2-NaCl являются взаимосогласованными между собой и с рубиновой шкалой давлений [Dorogokupets et al., 2012; Sokolova et al., 2013]. Они используются при изучении P-V-T свойств твердых веществ и минералов в широкой области температур и давлений [*Litasov et al.*, 2013].

Летников Ф.А., 2010 год – национальная экологическая премия «Экомир» за коллективную монографию «Экология человека в изменяющемся мире» в номинации «Экологическая наука и технологии».

Летников Ф.А., 2011 год – памятная медаль, посвященная 350-летию г. Иркутска; Медаль Президиума Сибирского отделения, посвященная 80-летию со дня рождения В.А. Коптюга.

2.4. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЛАБОРАТОРИИ

Для решения одной из важнейших задач петрологии – реконструкции процессов преобразования литосферной мантии в разных сегментах Сибирского кратона – нужно активно внедрять современные аналитические методы: атомно-абсорбционный, экстракционно-атомно-абсорбционный анализы, масс-спектрометрию с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS), а также спектральный и рентгенофлуоресцентный анализы для изучения микроэлементного состава интересующих типов пород и минералов. В экспериментальных исследованиях следует повысить температурные пределы до 1200 °С при давлениях порядка 0.4 ГПа, что вполне возможно при сравнительно небольших финансовых затратах. В лаборатории в течение послед-



Рис. 6. Разница между современными калибровками рубиновой шкалы [Holzapfel, 2003, 2005, 2010; Dorogokupets, Oganov, 2003, 2007; Dewaele et al., 2004 b, 2008; Chijioke et al., 2005; Syassen, 2008] и классической рубиновой шкалой [Mao et al., 1986].

Fig. 6. Differences between recent calibrations of the ruby scale [*Holzapfel*, 2003, 2005, 2010; *Dorogokupets*, *Oganov*, 2003, 2007; *Dewaele et al.*, 2004b, 2008; *Chijioke et al.*, 2005; *Syassen*, 2008] and the classical ruby scale [*Mao et al.*, 1986].

них лет активно разрабатываются уравнения состояния веществ и минералов. Тесное сотрудничество с К.Д. Литасовым (ИГМ СО РАН) позволяет использовать при разработке уравнений состояния минералов новые оригинальные экспериментальные измерения свойств минералов до давления 30 ГПа и температуры до 2000 К.

3. ЛАБОРАТОРИЯ ГЕОЛОГИИ И МАГМАТИЗМА ДРЕВНИХ ПЛАТФОРМ

3.1. ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Лаборатория геологии и магматизма древних платформ создана в 1971 г. на базе кабинета геологии и петрологии кимберлитов и алмазных месторождений. С 1971 по 1991 г. лабораторию возглавлял д.г.-м.н. Б.М. Владимиров (рис. 7). С 1991 г. заведующим лабораторией является кг.-м.н. К.Н. Егоров. Сегодня в составе лаборатории (2014 г.) 17 сотрудников, из них 4 доктора и 3 кандидата наук (рис. 8).

Основными приоритетными направлениями фундаментальных исследований лаборатории являются: 1) состав, строение и эволюция кратонизированных областей Сибирской платформы; 2) структурно-вещественная типизация алмазоносных магматитов и конвергентных им пород, образующих генетические ряды в составе кимберлитовых, лампроитовых, карбонатитовых, щелочно-ультраосновных и щелочно-базальтоидных комплексов; 3) геолого-минералогическое районирование алмазоносных территорий югозападной части Сибирской платформы с целью создания теоретических основ прогноза и поисков коренной и россыпной алмазоносности.

3.2. Основные научные достижения за 2009-2013 гг.

К главным достижениям лаборатории в XX и в начале XXI в. можно отнести: 1) прогнозирование и открытие в пределах юга Сибирской платформы алмазоносных лампроитов Ингашинского поля, а также россыпных проявлений алмазов и древних промежуточных коллекторов алмазов; 2) открытие Маконского кимберлитового поля с промышленной коренной и россыпной алмазоносностью в Лесной Гвинее (Западная Африка); 3) открытие нового минерала в кимберлитах – земкорита и первые находки пяти минералов для кимберлитов мира: журавскита, бассанита, гексагидрита, содалита, ферробрусита; 4) двухтомный коллективный монографический труд «Геология и генезис алмазных месторождений», за который Б.М. Владимиров удостоен Государственной премии СССР.

Важнейшие научные достижения лаборатории за пять предыдущих лет (2009–2013 гг.) приведены ниже.

Впервые выявлены минералого-геохимические и



Рис. 7. Заведующий лабораторией геологии и магматизма древних платформ в 1971–1991 гг. д.г.-м.н. Борис Михайлович Владимиров.

Fig. 7. B.M. Vladimirov, Doctor of Geology and Mineralogy, Head of the Laboratory of Geology and Magmatism of Ancient Platforms from 1971 to 1991.

изотопно-геохимические признаки глубинных восстановленных углеродистых флюидных систем, преобразующих мантийную литосферу Сибирского кратона с формированием метасоматически переработанного субстрата, из которого впоследствии генерируются высокофлюидизированные кимберлитовые расплавы. Активное изотопно-геохимическое преобразование мантийной литосферы Сибирского кратона происходило на ранней стадии среднепалеозойского кимберлитового цикла. В этот период из астеносферных расплавов, активизированных в процессе подъема плюма, шел поток восстановленных горячих флюидов, которые экстрагировали ряд главных и редких элементов из пород и минералов литосферной мантии (рис. 9). Процессы изменения низов мантийной литосферы фиксируются значительным облегчением изотопов О2 в составе минералов перидотитов при активном воздействии флюидно-расплавных систем на границе литосфера-астеносфера в период кимберлитообразования. В мантийной литосфере Сибирского кратона проявлены два крупных этапа метасоматизма, которые привели к существенной химической и геохимической модификации ее первичного вещества. В первый этап процесс носил равновесный характер и был связан с образованием графита и алмаза, источником углерода которых были высокоплотные сверхкритические силикат-карбонатные флюиды-расплавы, а также углерод, выделявшийся из твердого раствора в первичных минералах. Силикат-карбонатные флюиды-расплавы вбирали в себя наиболее растворимые макро- и микро-



Рис. 8. Коллектив лаборатории геологии и магматизма древних платформ 2013 г. Слева направо, верхний ряд: С.Е. Глушенкова, д.г.-м.н. Н.И. Акулов, д.г.-м.н. А.И. Мельников, д.г.-м.н. А.И. Киселев, к.г.-м.н. К.Н. Егоров – зав. лабораторией, к.г.-м.н. Д.А. Кошкарев. Средний ряд: С.В. Тележников, О.А. Кузнецова, М.Г. Карнаушенко, И.А. Калашникова, Е.В. Антипин. Нижний ряд: Ю.А. Минаева, С.П. Сумкина, В.Г. Семенова, д.г.-м.н. Л.В. Соловьева, Г.В. Орлова, Т.М. Леви.

Fig. 8. The staff of the Laboratory of Geology and Magmatism of Ancient Platforms in 2013 (left to right): 1st row: Yu.A. Minaeva, S.P. Sumkina, V.G. Semenova, L.V. Solovjeva, G.V. Orlova, T.M. Levi; 2nd row – S.V. Telezhnikov, O.A. Kuznetsova, M.G. Karnaushenko, I.A. Kalashnikova, E.V. Antipin; 3rd row – S.E. Glushenkova, N.I. Akulov, A.I. Mel'nikov, A.I. Kiselev, K.N. Egorov (Head of the Laboratory), and D.A. Koshkarev.

элементы и осуществляли интенсивный метасоматизм мантийной литосферы кратона. По времени этот процесс протекал одновременно с кратонизацией мантийной литосферы Сибирской платформы. Второй этап метасоматизма мантийной литосферы Сибирской платформы происходил на ранней стадии среднепалеозойского алмазообразующего цикла. В предкимберлитовый метасоматический этап кристаллизация основного объема алмазов связывается с реакциями окисления восстановленных флюидов, поступающих из астеносферных расплавов, на геохимических окислитовных барьерах в зонах деформации мантийной литосферы [Solovyeva et al., 2010, 2012].

Впервые выявлены и сопоставлены составы мантийных источников расплавов двух крупнейших совмещенных провинций базальтового магматизма: пермо-триасовой Сибирской и девонской Вилюйской, а также локально проявленных кимберлитов и других магматических пород, сформировавшихся на флангах раннемеловой крупной изверженной провинции Высокой Арктики (HALIP) (рис. 10). Пространственное совмещение разновозрастных магматических ареалов дало уникальную возможность для сопоставления состава источников расплавов, последовательно проявившихся под одним и тем же литосферным сегментом. Глубинные источники всех разновозрастных магматических ареалов, продукты которых оказались совмещенными в северо-восточной части Сибирского кратона, имеют различные изотопно-геохимические составы (рис. 11). Локальный апвеллинг плюма под областями с утоненной литосферой Сибирского кратона вследствие высокого температурного градиента со-



Рис. 9. Модель флюидно-магматического преобразования астеносферных слоев и литосферной мантии Сибирского кратона в период среднепалеозойского кимберлитообразующего цикла.

Fig. 9. The model of fluid-magmatic transformation of the asthenosphere layers and the lithospheric mantle of the Siberian craton in the Middle Paleozoic kimberlite cycle.

провождался более высокой степенью адиабатического плавления и появлением базальтовых расплавов, образующих магматические очаги и субаэральный вулканизм. Прекращение подъема плюма под архейскими террейнами с мощной тугоплавкой литосферой происходило на более глубинных уровнях. Здесь из-за повышенного давления вещество плюма подвергалось более низкой степени частичного плавления. В этих условиях образование кимберлитовой магмы было связано с участием в плавлении относительно холодных периферических частей латерально растекающейся головы плюма и метасоматически обогащенной кратонной литосферы. Пространственно-временная сопряженность кимберлитовых и базитовых магм относится к пограничной области перехода от толстой кратонной литосферы архейских террейнов к областям относительно тонкой литосферы палеопротерозойских орогенных поясов, испытавшей последующее утонение в результате мезо- и неопротерозойского рифтинга

в пределах Сибирского кратона. Последовательность магматизма в пределах Якутской алмазоносной провинции от массовых территориально широких проявлений базитов к ограниченным полям алмазоносных кимберлитов связана с уменьшением термальной активности плюма во времени и заглублением уровней магмообразования, а также с плавлением фрагментов деламинированной литосферы, погруженных в головную часть плюма [Kiselev et al., 2010, 2012; Egorov et al., 2010].

В пределах южной окраины Сибирского кратона выполнены первые оценки состава и геохимической специфики магматических источников, алмазоносности и геодинамических условий формирования продуктов разнотипного полихронного (R, V, Pz) высококалиевого мантийного магматизма. На территории Восточного Присаянья выделено несколько этапов внедрения алмазоносных лампроитов и кимберлитов: мезопротерозой (средний рифей, около 1200 млн лет),



Рис. 10. Расположение пермо-триасовых и девонских магматических ассоциаций в пределах восточной части Сибирского кратона (на врезке показано распространение траппов в пределах Сибирского кратона).

Fig. 10. Locations of the Perm-Triassic and Devonian magmatic associations within the limits of the eastern part of the Siberian craton (the insert shows trapp areas within the limits of the Siberian craton).

неопротерозой (венд, около 630 млн лет) и средний палеозой (девон, около 370 млн лет) (рис. 12). Существование двух (среднерифейской и среднепалеозойской) эпох тектономагматической активности, сопровождающейся формированием алмазоносных лампроитовых и кимберлитовых тел в пределах южной окраины Сибирской платформы, подтверждается наличием «древних» докембрийских и фанерозойских типов алмазов в россыпях р. Бирюса и Ингашет (рис. 13, 14). Полученные данные свидетельствуют о том, что уже 2.1–2.0 млрд лет назад в литосферной мантии южной окраины Сибирского кратона в ходе плюм-литосферного взаимодействия сформировались метасоматизированные области, обогащенные некогерентными элементами и способные генерировать разнообразные калиевые магматиты. Модельный возраст $T_{Nd}(DM)$ обогащения мантийных источников алмазоносных лампроитов, лампроитоидов и потенциально алмазоносных слюдяных кимберлитов варьируется от 2.1 до 1.8 млрд лет и совпадает по времени с коллизией архейских и раннепротерозойских террейнов южной окраины Сибирского кратона. Следует особо подчеркнуть,



Рис. 11. Эпсилон Nd(T) – эпсилон Sr(T) диаграмма для кимберлитов, траппов и долеритов Вилюйской рифтовой системы.

1 – позднемезозойские кимберлиты; 2 – траппы восточной окраины Тунгусской синеклизы; 3 – траппы Норильского района; 4 – девонские долериты и кимберлиты Мирнинского кимберлитового поля; 5 – тренд вариаций составов траппов восточной окраины Тунгусской синеклизы; 6 – тренд вариаций составов позднемезозойских кимберлитов Оленекского поднятия. Квадраты 1, 2, 3 – глубинные источники траппов, девонских долеритов и позднемезозойских кимберлитов соответственно.

Fig. 11. The epsilon Nd(T) – epsilon Sr(T) diagram for kimberlites, trapps and dolerites of the Viluj rift system.

1 – the Late Mesozoic kimberlites; 2 – trapps at the eastern margin of the Tunguska syncline; 3 – trapps of Norilsk region; 4 – the Devonian dolerites and kimberlites of the Mirny kimberlite field; 5 – trends of trapp composition variations for the eastern part of the Tunguska syncline; 6 – trends of composition variations of the Late Mesozoic kimberlites of the Olenyok uplift. Boxes 1, 2, and 3 show deep sources of trapps, the Devonian dolerites and Late Mesozoic, respectively.

что алмазоносные и потенциально алмазоносные породы южной окраины Сибирского кратона имеют общие изотопно-геохимические признаки, резко отличные от бесперспективных слюдяных пикритов и щелочных пород белозиминского комплекса Присаянья, что является надежным прогностическим критерием коренных источников алмазов [*Egorov et al., 2010*].

На основе обобщения многолетних результатов комплексного картирования структурно-тектонического околотрубочного пространства и внутреннего строения кимберлитового комплекса месторождения алмазов трубки «Удачная» (1979–2009 гг.) выделены три этапа структурно-вещественной эволюции всего рудного узла в целом. Первый этап проявления кимберлитового магматизма в районе трубки «Удачная» связан с формированием мощной северо-восточной системы разрывных нарушений, пространственно контролирующей большинство дотрубочных кимберлитовых жил и сателлитные «слепые» кимберлитовые тела (рис. 15). На втором этапе происходило внедрение основного объема кимберлитовых фаз трубки «Удачная» в условиях растяжения на фоне пульсационного развития сдвиговых смещений по северо-восточному разлому (рис. 15). С третьим этапом связана пермо-триасовая активизация северо-западной системы разломов и внедрение позднепалеозойских-раннемезозойских даек долеритов и в последующем жилы калиевых трахитов мелового возраста (рис. 16). По изотопному составу жильных кимберлитов (єNd = 4.2, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr(t) = 0.7050) их мантийный источник соответствует умеренно деплетированной мантии. Модельный возраст T_{Nd}(DM) обогащения мантийного источника кимберлита равен 651 млн лет. Сформированные на более позднем этапе слюдяные кимберлиты имеют обогащенный мантийный источник (εNd = 0.2, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr(t) = 0.7078) с модельным возрастом, равным 924 млн лет. Следует подчеркнуть, что на геохимические и изотопно-геохимические характеристики различных геолого-промышленных типов кимберлитов трубки «Удачная» заметно влияют рассолы второго водоносного горизонта месторождения. В целом, образование основного объема кимберлитов в виде отдельных трубок, жил или самостоятельных фаз внедрения произошло во второй этап кимберлитового магматизма Далдынского кимберлитового поля. Процессами эрозии были уничтожены главным образом незначительные объемы малопро-



Рис. 12. Схема размещения калиевых ультрабазитов и базитов в пределах юго-западной окраины Сибирского кратона.

1 – фанерозойский осадочный чехол; 2 – раннедокембрийские гранитогнейсовые комплексы (БГ – Бирюсинская глыба, БГК – Бельско-Китойская глыба, ШВ – Шарыжалгайский выступ); 3 – отложения Хамсаринского синклинория (кембрий-карбон); 4 – грабены раннего протерозоя Урикско-Туманшетской перикратонной зоны (І – Урикско-Ийский, ІІ – Туманшетский); 5 – гранитогнейсовый вал (нижнепротерозойский саянский комплекс); 6 – вулканогенно-осадочные образования нижнерифейской рифтогенной структуры; 7 – карагасская серия Присаянского прогиба (верхний рифей); 8 – оселковая серия Присаянского прогиба (венд); 9 – алмазоносные лампроиты р. Ингаши (средний рифей); 10 – кимберлиты р. Ярма (венд); 11 – щелочные ультраосновные породы и карбонатиты зиминского комплекса (верхний рифей – венд); 12 – ультракалиевые трахиты (верхний рифей); 13 – лампроитоиды Присаянского прогиба (средний девон); 14 – слюдяные пикриты р. Туманшет (средний рифей); 15 – места находок алмазов; 16 – крупнейшие разломы.

Fig. 12. Locations of potassium ultra-basic and basic rocks within the limits of the south-western margin of the Siberian craton.

1 – the Phanerozoic sedimentary cover; 2 – the Early Pre-Cambrian granite-gneiss complexes ($B\Gamma$ – Biryusa rock, $B\Gamma K$ – Belsko-Kitoy rock, IIIB – Sharyzhalgai horst); 3 – deposits of the Khamsara syncline (Cambrian–Carbon); 4 – the Late Proterozoic grabens of the Urik-Tumanshet pericraton zone (I – Yrik-Ijsky, II – Tumanshetsky); 5 – granite-gneiss embankment (the Low Proterozoic Sayansky complex); 6 – volcanogenic-sedimentary formations of the Low Riphean riftogenic structure; 7 – Karagasskaya series of the Prisayansky trough (Upper Riphean); 8 – Osel-kovaya series of the Prisayansky trough (Vendian); 9 – diamond-bearing lamproites of the Ingashi river (Middle Riphean); 10 – kimberlites of the Yarma river (Vend); 11 – alkaline ultra-basic rocks and carbonatites of the Ziminsky complex (Upper Riphean – Vend); 12 – ultra-potassium trachytes (Upper Riphean); 13 – lamproitoids of the Prisayansky trough (Middle Devonian); 14 – mica picrites of the Tumanshet river (Middle Riphean); 15 – sites where diamonds were found; 16 – largest faults.



Рис. 13. Морфогенетические особенности алмазов октаэдрического габитуса из Ингашетской россыпи (среднепалеозойский кимберлитовый коренной источник якутского типа).

Fig. 13. Specific morphogenetic features of diamonds of the octahedral habitus from the Ingeshet placer (Middle Paleozoic kimberlitic ore body of the Yakutian type).

дуктивных интрузивных разновидностей кимберлитов первого этапа, которые создавали небольшие ореолы рассеяния минералов-спутников и не могли образовывать промышленно-алмазоносные россыпи в Далдынском поле [Egorov, Melnikov, 2013; Kopylova et al., 2013].

В пределах самого крупного коренного месторождения алмазов Якутии – кимберлитовой трубки «Юбилейная» – выделены четыре геолого-технологических типа руд, которые представлены порфировыми кимберлитами, кимберлитовыми брекчиями и двумя разновидностями автолитовых кимберлитовых брекчий (рис. 17). По данным изучения керновых проб эксплоразведки и выхода коммерческой продукции промышленной фабрики впервые установлено, что различные типы руд в трубке «Юбилейная» отличаются между собой не только по общему содержанию алмазов, но и по его ситовым характеристикам. В трубке «Юбилейная» надежно устанавливается увеличение содержания и одновременно крупности алмазов от ранних фаз внедрения кимберлитов к более поздним. На верхних и средних горизонтах центральной, а также западной части месторождения высокопродуктивные автолитовые брекчии часто выполняют мощные инъекции между крупными ксенолитами осадочных пород и забалансовыми кимберлитовыми рудами. Подобная геологическая ситуация приводит к необходимости оперативного пересмотра сортности руд, их селективной выемки и постоянного контроля по оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения. Полученные данные по алмазоносности геолого-технологических типов руд используются при выборе технологических схем обогащения и методов извлечения алмазов, обеспечивающих максимальную степень их сохранности [Koshkarev et al., 2010].

Детальный анализ перспектив на обнаружение коренной алмазоносности юго-западной части Сибирской платформы с использованием комплексных геолого-геофизических, структурно-тектонических и минерагенических материалов позволил выделить блоки алмазоносной и потенциально алмазоносной мантийной литосферы в региональных прогнозных структу-



Рис. 14. Морфогенетические особенности алмазов додекаэдрического габитуса из Ингашетской россыпи (докембрийский лампроитовый или кимберлитовый архангельского типа коренной источник).

Fig. 14. Specific morphogenetic features of diamonds of the dodecahedral habitus from the Ingeshet placer (Pre-Cambrian lamproitic or kimberlitic ore body of the Arkhangelsk type).



б





Рис. 15. Первый (*a*) и второй (*б*) этапы формирования разрывных нарушений и кимберлитового комплекса месторождения алмазов трубки «Удачная».

1–4 – типы кимберлитов трубки «Удачная-Западная»; 5–8 – типы кимберлитов трубки «Удачная-Восточная»; 9 – «слепые» сателлитные кимберлитовые тела; 10 – кимберлитовые жилы; 11 – дайки долеритов и трахитов; 12 – рифы осадочных пород; 13 – разрывные нарушения; 14 – абс. отметки эксплуатационных горизонтов.

Fig. 15. First (*a*) and second (6) stages of faulting and formation of the kimberlitic complex of the Udachnaya diamond pipe deposit.

1-4 – types of kimberlites of the Western Udachnaya pipe; 5-8 – types of kimberlites of the Eastern Udachnaya pipe; 9 – 'blind-type' satellite kimberlitic bodies; 10 – kimberlitic veins; 11 – dykes of dolerites and trachytes; 12 – sedimentary rock stacks; 13 – faults; 14 – absolute elevations of production horizons.

31



Рис. 16. Третий этап формирования разрывных нарушений и внедрение позднепалеозойских-раннемезозойских даек долеритов, жилы (Ж–5) калиевых трахитов мелового возраста в районе трубки «Удачная» (условные обозначения см. на рис. 15, *a*, *б*).

Fig. 16. The third stage of faulting and intrusion of the Late Paleozoic-Early Mesozoic dykes of dolerites, and veins (X-5) of the Carboniferous potassium trachytes in the area of the Udachnaya pipe (see the legend in Fig. 9, *a*, *b*).

рах – минерагенических алмазоносных зонах (рис. 18). Алмазный потенциал минерагенических зон охарактеризован с точки зрения наличия кимберлитового и лампроитового магматизма, а также россыпных проявлений алмазов, которые служат критериями для обоснованного прогнозирования алмазоносных коренных источников различных геолого-генетических типов. Результаты комплексного изучения состава, морфологии и характера распределения индикаторных минералов и алмазов на юге Сибирской платформы позволяют считать, что для каждой из выделенных минерагенических зон существуют и/или прогнозируются самостоятельные коренные источники алмазов и их минералов-спутников, резко отличных друг от друга по вещественно-индикационным признакам. Для оценки коренной алмазоносности юга Сибирской платформы

впервые использован редкоземельный состав пиропов из алмазоносных лампроитов Ингашинского поля и древних ореолов рассеяния минералов-спутников алмаза Тангуй-Чукшинской и Мурской площади. В пределах этих площадей прогнозируются среднепалеозойские алмазоносные кимберлитовые тела, типоморфные минералы которых образуют локальные ореолы в терригенных отложениях раннекарбонового возраста [Koshkarev et al., 2010; Egorov et al., 2012].

Впервые в пределах северо-восточного обрамления Сибирской платформы установлен новый тип коренных источников алмазов, представленный осадочновулканогенными отложениями карнийского яруса верхнего триаса. По комплексу вещественно-индикационных признаков алмазоносные породы относятся к туффитам с литокластами гиалобазальтов, трахиба-



Рис. 17. Геологическое строение верхних (+455) и средних (+350) горизонтов трубки «Юбилейная».

1 – крупные ксенолиты вмещающих осадочных пород; 2 – ксенолитонасыщенные кимберлитовые брекчии (количество ксенолитов от 25 до 80 об. %); 3 – кимберлитовые брекчии с содержанием ксенолитов менее 25 об. %; 4 – афировые и шлирово-такситовые кимберлиты; 5 – порфировые кимберлиты; 6 – автолитовые кимберлитовые брекчии промежуточной фазы внедрения; 7 – автолитовые кимберлитовые брекчии поздней фазы внедрения.

Fig. 17. Geology of the top (+455) and medium (+350) horizons of the Yubileynaya pipe.

1 - large xenoliths of host sedimentary rocks; 2 - xenolith-saturated kimberlitic breccia (xenolith content from 25 to 80 % of the volume);

3 – kimberlitic breccia with xenolith contents below 25 % of the volume; 4 – aphyric and schlieren-taxite kimberlites; 5 – porphyritic kimberlites;

6 – autholith kimberlitic breccia of the intermediate phase of intrusion; 7 – autholith kimberlitic breccia of the late phase of intrusion.

зальтов, сцементированных преимущественно железистым хлоритом, гидрослюдой, анальцимом, ярозитом. Петрогеохимический состав туффитов не позволяет однозначно идентифицировать их с известными промышленно алмазоносными магматическими породами. Туффиты характеризуются высоким содержанием пиропов, хромитов, а также ураганными концентрациями несортированных алмазов (более 10 кар/м³). Среди алмазов отмечается повышенное количество кристаллов V и VII разновидности с легким изотопным составом углерода. В результате размыва нетрадиционного коренного источника алмазов сформированы современные промышленные россыпные месторождения северо-восточной части Сибирской платформы [*Grakhanov et al., 2010*].

Установлены вещественные признаки новой импактной структуры на юге Сибирской платформы в виде локализованного ареала распространения неизношенных обломков шлакоподобных пород ударнометаморфогенной природы. Среди обломков импактитов выделены витрокластические и литовитрокластические разновидности зювитов. Витрокластические разновидности представлены стекловатым матриксом, включающим скелетные, дендритовидные образования армолколита, а также обособления кремнийсодержащего титаномагнетита. Сферические выделения самородного железа обнаружены почти во всех армолколитсодержащих стеклах зювитов (рис. 19). Отличительной особенностью витрокластических зювитов является присутствие в них редких сферул самородного алюминия и отсутствие ильменита. Область распространения обломков зювитов совпадает с Игинтейской купольно-кольцевой морфоструктурой центрального типа размером 22×27 км. Вещественные и геологоструктурные признаки кольцевой структуры Ангаро-Удинского междуречья свидетельствуют о возможном взрыве крупного космического объекта (кометы, астероида) над территорией юго-западной части Сибирской платформы. Судя по морфологическим признакам обломков зювитов и геологическому строению территории Ангаро-Удинского междуречья, данное катастрофическое природное явление могло произойти начиная с юрского времени до неогена. Таким образом, на рубеже мезозоя и кайнозоя могли произойти глобальные события, которые способствовали изменению эволюционной линии жизни, в частности на



Рис. 18. Расположение алмазоносных минерагенических зон и прогнозируемых площадей на юге Сибирской платформы.

I – современная граница распространения чехла платформы; 2 – Саяно-Байкальская полициклическая складчатая область; 3 – архейские кратоны Сибирской платформы: Бирюсинско-Ангаро-Оленекский (БАОК), Байкитский (БК); 4 – контуры алмазоносных субпровинций: Якутской (Я), Ангаро-Тунгусской (АТ), Присаянской (П), Байкитской (Б); 5 – алмазоносные минерагенические зоны: Присаянская (П), Удино-Тунгусская (УТ), Лено-Тунгусская (ЛТ), Вилюйско-Мархинская (ВМ); 6 – Ангаро-Вилюйская алмазоносная минерагеническая зона (АВ); 7 – кимберлитовые и лампроитовые поля: 1 – Мирнинское кимберлитовое среднепалеозойское, 2 – Чадобецкое и 3 – Тайгино-Тарыдакское кимберлитовые мезозойские, 4 – Ингашинское лампроитовое верхнепротерозойское; 8 – ультраосновные интрузии и карбонатиты Белозиминского комплекса венда; 9 – прогнозируемые перспективные площади, адекватные кимберлитовому или лампроитовому полю: 1 – Ингашетская, 2 – Тангуй-Удинская, 3 – Андочинская, 4 – Чукшинская, 5 – Бирюсинско-Чунская, 6 – Мурская, 7 – Магдонская, 8 – Илимская, 9 – Тубинская, 10 – Тушамская, 11 – Верхнекатангская, 12 – Чангильская, 13 – Икская, 14 – Немуйская, 15 – Алтыбская, 16 – Ереминская, 23 – Шушукская, 24 – Хушмуканская. Интегрированные контуры геологических образований платформенного чехла: 10 – площади, сложенные отложениями рифея – нижнего палеозоя (до силура включительно); 11 – площади распространения образований девона и карбона; 12 – площади, сложенные преимущественно отложениями перми, мезозоя, кайнозоя.

Fig. 18. Locations of diamond-bearing minerogenic zones and forecasted areas in the southern part of the Siberian platform.

1 – current boundary of the platform cover; *2* – Sayan-Baikal polycyclic folded area; *3* – Archean cratons of the Siberian platform (BAOK - Biryusa-Angara-Olenyok, <math>BK- Baykit); *4* – contours of diamond-bearing sub-provinces ($\Re - Yakutian, AT - Angara-Tungusskaya, \Pi - Prisayan-skaya, <math>B - Baykitskaya$); *5* – diamond-bearing minerogenic zones ($\Pi - Prisayanskaya, YT - Udino-Tungusskaya, JIT - Lena-Tugusskaya, BM - Vilujsko-Markhinskaya$); *6* – Angara-Vilujskaya diamond-bearing minerogenic zone (AB); *7* – kimberlitic and lamproitic fields: 1 – Mirny kimberlitic field (Middle Paleozoic), *2* – Chadobetskoe and 3 – Tagino-Tarydakskoe kimberlitic fields (Mesozoic), *4* – Ingashinskoe lamproitic field (Upper Proterozoic); *8* – ultrabasic intrusions and carbonatites of the Beloziminsky complex (Vend); *9* – forecasted promising areas that are adequate to a kimberlitic / lamproitic field: 1 – Ingashetskaya, *2* – Tanguy-Udinskaya, *3* – Andochinskaya, *4* – Chukshinskaya, *5* – Biryusa-Chunskaya, *6* – Murskaya, *7* – Magdonskaya, *8* – Ilimskaya, *9* – Tubinskaya, *10* – Tushamskaya, *11* – Verkhnekatangskaya, *12* – Changilskaya, *13* – Ikskaya, *14* – Nemuyskaya, *15* – Altybskaya, *16* – Ereminskaya, *17* – Verkhechonskaya, *18* – Verkhekochemskaya, *19* – Nizhnekochemskaya, *20* – Verkheapkinskaya, *21* – Nizhneapkinskaya, *22* – Tarydakskaya, *23* – Shushukskaya, *24* – Khushmukanskaya. Integrated contours of geological formations of the platform cover: *10* – areas composed of the Riphean – Late Paleozoic (to Silurian, inclusively) formations; *11* – areas where the Devonian and Carbon formations are abundant; *12* – areas that are mainly composed of the Permian, Mesozoic and Cenozoic formations.

Сибирской платформе, когда в результате падения серии гигантских астероидных тел произошло Великое мезозойское вымирание, коренным образом изменившее видовой состав биоты планеты [Egorov et al., 2010].

В 2011 г. проведена конференция при значительной поддержке администрации института, посвященная 100-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР М.М. Одинцова – одного из основателей и бессменно-го (1954–1976 гг.) руководителя Института геологии Восточно-Сибирского филиала АН СССР – Института земной коры СО АН СССР, награжденного орденами Ленина (1963 г., 1971 г.) и орденом Трудового Красно-го Знамени (1975 г.).

В 2011 г. К.Н. Егоров получил благодарность губернатора Иркутской области. В 2012 г. А.И. Киселев награжден медалью им. М.В. Ломоносова, К.Н. Егоров – медалью к 350-летию г. Иркутска, Л.В. Соловьева, Г.В. Орлова награждены медалью к 75-летию Иркутской области.

3.3. ПЕРСПЕКТИВЫ

В ближайшей перспективе (до 2020 г.) лаборатория планирует развивать следующие научные направления, имеющие актуальность и востребованность в научном мире: 1) петрология, минералогия и эволюция мантийной литосферы древних кратонов, происхождение алмазов и их коренных и россыпных месторождений; 2) закономерности размещения и условия формирования эндогенных и экзогенных алмазоносных формаций на древних платформах; 3) создание научных основ прогноза и поисков промышленной алмазоносности юго-запада Сибирской платформы на базе разработки моделей лампроитовых, кимберлитовых полей и коренных месторождений алмазов.

Необходимость расширения минерально-сырьевой базы алмазодобывающей промышленности в России требует опережающего научно-методического обеспечения алмазопоисковых работ на новых территориях со сложной геологической обстановкой. Одной из первоочередных задач лаборатории является разработка оригинальных и адаптация существующих прогнознопоисковых технологий к регионам с нетрадиционными коренными источниками алмазов. Для этого необходимо продолжать всестороннее изучение процессов кратонизации литосферы древних платформ, причин и механизмов генерации и последующей эволюции кимберлитовых и лампроитовых расплавов, а также процессов кристаллизации природных алмазов и закономерностей размещения их коренных и россыпных месторождений.

P.I. Dorogokupets, K.N. Egorov: The evolution of the Siberian craton...



а

б

в

-6

30µn



Рис. 19. Цифровые изображения обломков витрокластических (а, б) и литовитрокластических (в) разновидностей зювитов в обратно рассеянных электронах.

Fig. 19. Digital photos of fragments of vitroclastic (a, b) and lithovitroclastic (b) suevites in backscattered electrons.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Armbruster T., Lazic B., Gfeller F., Galuskin E.V., Galuskina I.O., Savelyeva V.B., Zadov A.E., Pertsev N.N., Anowski P.D. 2011. Chlorine content and crystal chemistry of dellaite from the birkhin gabbro massif, Eastern Siberia, Russia. *Mineralogical Magazine* 75 (2), 379–394. http://dx.doi.org/10.1180/minmag.2011.075.2.379.
- Danilova Yu.V., Shevchenko S.G., Klyba L.V., Danilov B.S., 2012. Composition of soluble carbonaceous material from rocks of the Arshan tectonic zone (southeastern part of the Eastern Sayan). *Geochemistry International* 50 (2), 185–192. http://dx.doi.org/10.1134/S001670291202005X.
- Dorogokupets P.I., 2010. P-V-T equations of state of MgO and thermodynamics. Physics and Chemistry of Minerals 37 (9), 677–684. http://dx.doi.org/10.1007/s00269-010-0367-2.
- Dorogokupets P.I., Sokolova T.S., Danilov B.S., Litasov K.D., 2012. Near-absolute equations of state of diamond, Ag, Al, Au, Cu, Mo, Nb, Pt, Ta, and W for quasi-hydrostatic conditions. *Geodynamics & Tectonophysics* 3 (2), 129–166. http://dx. doi.org/10.5800/GT-2012-3-2-0067.
- *Egorov K.N., Andryushchenko L.G., Karnaushenko M.G.,* 2010. The first discovery of impactites from a new astroblem within the South-Western Siberian platform. *Doklady Earth Sciences* 432 (2), 737–741. http://dx.doi.org/10.1134/S10 28334X1006005X.
- *Egorov K.N., Kiselev A.I., Menshagin Yu.V., Minayeva Yu.A.*, 2010. Lamproites and kimberlites of Prisayanye: composition, sources, diamond potential. *Doklady Earth Sciences* 435 (2), 1670–1675. http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X101202 51.
- *Egorov K.N., Kiselev A.I., Yarmoluk V.V., Nikiforova A.V.,* 2011. Composition and sources of magmatism of the Vilyui Middle Paleozoic rift area and the problem of combination of its basic rock and kimberlite derivatives. *Doklady Earth Sciences* 436 (1), 76–82. http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X11010144.
- Egorov K.N., Melnikov A.I., 2013. Structural-compositional evolution of the kimberlite bodies system from the Udachnaya pipe. Rudy i metally 1, 53–59 (in Russian) [Егоров К.Н., Мельников А.И. Структурно-вещественная эволюция системы кимберлитовых тел трубки «Удачная» // Руды и металлы. 2013. № 1. С. 53–59].
- *Egorov K.N., Solovyeva L.V., Koshkarev D.A.,* 2012. Rare element composition of pyropes from lamproites and ancient dispersion halo of the South-Western Siberian platform. *Doklady Earth Sciences* 443 (2), 496–501. http://dx.doi.org/10. 1134/S1028334X12040125.
- Galuskin E.V., Gfeller F., Savelyeva V.B., Armbruster T., Lazic B., Galuskina I.O., Többens D.M., Zadov A.E., Dzierzanowski P., Pertsev N.N., Gazeev V.M., 2012. Pavlovskyite Ca₈(SiO₄)₂(Si₃O₁₀): A new mineral of altered silicatecarbonate xenoliths from the two Russian type localities, Birkhin massif, Baikal Lake area and Upper Chegem caldera, North Caucasus. American Mineralogist 97 (4), 503–512. http://dx.doi.org/10.2138/am.2012.3970.
- Gfeller F., Armbruster T., Galushkin E.V., Galushkina I.O., Lazic B., Savelyeva V.B., Zadov A.E., Dzierżanovski P., Gazeev V.M., 2013. Crystal chemistry and hydrogen bonding of rustumite Ca₁₀(Si₂O₇)₂(SiO₄)(OH)₂Cl₂ with variable OH, Cl, F. American Mineralogist 98 (2–3), 493–500. http://dx.doi.org/10.2138/am.2013.4257.
- Grakhanov S.A., Smelov A.P., Egorov K.N., Golubev Yu.K., 2010. Sedimentary-volcanogenic nature of coarse-grained sediments of the Carnian stage of the North-Eastern Siberian platform – a new type of the primary diamond sources. Otechestvennaya geologia 6, 3–13 (in Russian) [Граханов С.А., Смелов А.П., Егоров К.Н., Голубев Ю.К. Осадочновулканогенная природа грубообломочных отложений карнийского яруса северо-восточного обрамления Сибирской платформы – нового типа коренных источников алмазов // Отечественная геология. 2010. № 6. С. 3–13].
- Hultquist G., Szakálos P., Graham M.J., Belonoshko A.B., Sproule G.I., Gråsjö L., Dorogokupets P., Danilov B., Astrup T., Wikmark G., Chuah G.-K., Eriksson J.-C., Rosengren A., 2009. Water Corrodes Copper. Catalysis Letters 132 (3–4), 311–316. http://dx.doi.org/10.1007/s10562-009-0113-x.
- Ivanova L.A., Marchuk M.V., Medvedev B.Y., 2010. Experimental investigation of the fayalite forming in the fluid H₂O-H₂-NH₃. Zapiski RMO 139 (3), 115–121 (in Russian) [Иванова Л.А., Марчук М.В., Медведев В.Я. Экспериментальное исследование образования фаялита во флюиде H₂O-H₂-NH₃ // Записки РМО. 2010. Т. 139. № 3. С. 115–121].
- *Kiselev A.I., Ernst R.E., Yarmolyuk V.V., Egorov K.N.* 2012. Radiated rifts and dyke swarms of the middle Paleozoic Yakutsk plume of eastern Siberian craton. *Journal of Asian Earth Sciences* 45 (2), 1–16. http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes. 2011.09.004.
- *Kiselev A.I., Yarmoluk V.V., Kolodeznikov I.I.,* 2010. Comparative characteristics of the Middle Paleozoic and Late Riphean plume magmatism of the Siberian platform (based on the isotopic-geochemical results of the Sette-Daban basic rocks study). *Doklady Earth Sciences* 430 (1), 70–77. http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X10010010.
- *Kopylova M.G., Kostrovitsky S.I., Egorov K.N.* 2013. Salts in southern Yakutian kimberlites and the problem of primary alkali kimberlite melts. *Earth Science Reviews* 119, 1–16. http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.01.007.
- Коshkarev D.A., Egorov K.N., Karpenko M.A., Makovchuk I.V., 2010. The main parameters of the diamond potential of geologo-technological types of kimberlite ores from the largest diamond deposit of Yakutia (Yubileinaya pipe). Rudy i metally 4, 27–35 (in Russian) [Кошкарев Д.А., Егоров К.Н., Карпенко М.А., Маковчук И.В. Основные параметры алмазоносности геолого-технологических типов кимберлитовых руд крупнейшего месторождения алмазов Якутии (трубка Юбилейная) // Руды и металлы. 2010. № 4. С. 27–35].
P.I. Dorogokupets, K.N. Egorov: The evolution of the Siberian craton...

- Коshkarev D.A., Egorov K.N., Slagoda Ye.A., Denisenko Ye.P., 2010. Lower Carboniferous pyrope-bearing sediments of the Angara-Uda interfluve and problem of the primary diamond potential within the Southern Siberian platform. Regionalnaya geologia i metallogenia 41, 82–92 (in Russian) [Кошкарев Д.А., Егоров К.Н., Слагода Е.А., Денисенко Е.П. Нижнекарбоновые пиропсодержащие отложения Ангаро-Удинского междуречья и проблема коренной алмазоносности юга Сибирской платформы // Региональная геология и металлогения. 2010. № 41. С. 82–92].
- Lacis B., Armbruster T., Savelyeva V.B., Zadov A.E., Pertsev N.N., Dzierżanovski P., 2011. Galuskinite, Ca₇(SiO₄)₃(CO₃), a new skarn mineral from the Birkhin gabbro massif, Eastern Siberia, Russia. *Mineralogical Magazine* 75 (5), 2631–2648. http://dx.doi.org/10.1180/minmag.2011.075.5.2631.
- Letnikov F.A., 2009. Autonomous fluid systems of the continental crust. Doklady Earth Sciences 427 (2), 947–949. http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X09060130.
- Letnikov F.A., Danilov B.S., Dorogokupets P.I., 2011. Energy parameters of deep fluid systems. Doklady Earth Sciences 437 (2), 548–551. http://dx.doi.org/ 10.1134/S1028334X11040210.
- *Letnikov F.A., Ivanova L.A., Medvedev V.Ya., Kuznetsov K.E.*, 2012. Experimental study of the self-organization process of a fluidized granite melt under decompression. *Doklady Earth Sciences* 443 (2), 506–508. http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X12040150.
- Letnikov F.A., Kotov A.B., Degtyarev K.E., Sal'nikova E.B., Levchenkov O.A., Shershakova M.M., Shershakov A.V., Rizvanova N.G., Makeev A.F., Tolkachev M.D., 2009. Silurian granites of northern Kazakhstan: U-Pb age and tectonic position. Stratigraphy and Geological Correlation 17 (3), 275–282. http://dx.doi.org/10.1134/S0869593809030034.
- *Letnikov F.A., Letnikova A.F., Danilov B.S.,* 2013. Relationship between the Heat and Chemical Energies of Components in Deep Fluid Systems. *Doklady Earth Sciences* 453 (2), 1234–1236. http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X13120106.
- *Letnikov F.A., Levin A.V.,* 2013. Geochemical correlation between dykes of topaz granites and elvans (Kokchetav block, Northern Kazakhstan). *Doklady Earth Sciences* 448 (1), 58–60. http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X13010054.
- Letnikov F.A., Zayachkovskii A.A., Letnikova A.F., 2010. On the geochemical specialization of deep-seated high-carbonaceous systems. Doklady Earth Sciences 433 (1), 962–965. http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X10070251.
- *Levin A.V., Letnikova A.F.,* 2010. Tournaline granite of the Kumdykol graphite-diamond deposit. *Doklady Earth Sciences* 435 (2), 1637–1640. http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X10120184.
- Litasov K.D., Dorogokupets P.I., Ohtani E., Fei Y., Shatskiy A., Sharygin I.S., Gavryushkin P.N., Rashchenko S.V., Seryotkin Y.V., Higo Y., Funakoshi K., Chanyshev A.D., Lobanov S.S., 2013. Thermal equation of state and thermodynamic properties of molybdenum at high pressures. Journal of Applied Physics 113, 093507. http://dx.doi.org/10.1063/1.4794127.
- Litasov K.D., Gavryushkin P.N., Dorogokupets P.I., Sharygin I.S., Shatskiy A., Fei Y., Rashchenko S.V., Seryotkin Y.V., Higo Y., Funakoshi K., Ohtani E., 2013. Thermal equation of state to 33.5 GPa and 1673 K and thermodynamic properties of tungsten. Journal of Applied Physics 113, 133505. http://dx.doi.org/10.1063/1.4799018.
- Litasov K.D., Sharygin I.S., Shatskii A., Gavryushkin P.N., Dorogokupets P.I., Sokolova T.S., Ohtani E., Dymshits A.M., Alifirova T.A. 2013. P–V–T Equations of state for iron carbides Fe₃C and Fe₇C₃ and their relationships under the conditions of the Earth's mantle and core. *Doklady Earth Sciences* 453 (2), 1269–1273. http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X 13120192.
- Litasov, K.D., Sharygin I.S., Dorogokupets P.I., Shatskiy A., P.N. Gavryushkin P.N., Sokolova T.S., Ohtani E., Li J., Funakoshi K., 2013. Thermal equation of state and thermodynamic properties of iron carbide Fe₃C to 31 GPa and 1473 K. Journal Geophysical Research: Solid Earth 118, 5274–5284. http://dx.doi.org/10.1002/2013JB010270.
- Litasov K.D., Shatskiy A., Gavryushkin P.N., Sharygin I.S., Dorogokupets P.I., Dymshits A.M., Ohtani E., Higo Y., Funakoshi K., 2013. P-V-T equation of state of siderite to 33 GPa and 1673 K. Physics of the Earth and Planetary Interiors 224, 83– 87. http://dx.doi.org/10.1016/j.pepi.2013.07.011.
- Sapozhnikov A.N., Kaneva E.V., Cherepanov D.I., Suvorova L.F., Levitsky V.I., Ivanova L.A., Reznitsky L.Z., 2012. Vladimirivanovite, Na₆Ca₂[Al₆Si₆O₂₄](SO₄,S₃,S₂,Cl)₂·H₂O, a new mineral of sodalite group. *Geology of Ore Deposits* 54 (7), 557–564. http://dx.doi.org/10.1134/S1075701512070070.
- Savel'eva V.B., Bazarova E.P., 2012. The Early Proterozoic Primorskii complex of rapakivi granites (western Cisbaikalia): Geochemistry, crystallization conditions, and ore potential. *Russian Geology and Geophysics* 53 (2), 147–168. http://dx. doi.org/10.1016/j.rgg.2011.12.012.
- Savel'eva V.B., Bazarova E.P., Karmanov N.S., 2011. Accessory minerals from the Primorsky rapakivi granite complex, West Baikal Region. *Geology of Ore Deposits* 53 (8), 708–722. http://dx.doi.org/10.1134/S1075701511080149.
- Savel'eva V.B., Karmanov N.S., 2010. Quartz-albite-microcline metasomatic rocks in the main Sayan faault zone: evolution of metasomatism and composition of accessory minerals. *Geology of Ore Deposits* 52 (4), 302–321. http://dx.doi.org/ 10.1134/S1075701510040057.
- Savel'eva V.B., Presnyakov S.L., Lepekhina E.N., Larionov A.N., Bazarova E.P., 2012. Principle stages of granite and pegmatite formation in the southeastern part of the Main Sayan Fault. Doklady Earth Sciences 442 (1), 49–55. http://10.1134/ S1028334X12010291.
- *Shumilova T.G., Danilova Yu.V.,* 2009. New genetic type of graphite in connection with travertines. *Doklady Earth Sciences* 428 (1), 1171–1173. http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X09070290.

- Shumilova T.G., Danilova Yu.V., Gorbunov M.V., Isaenko S.I., 2011. Natural monocrystalline α-carbyne. Doklady Earth Sciences 436 (1), 152–154. http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X11010314.
- Sokolova T.S., Dorogokupets P.I., Litasov K.D., 2013. Self-consistent pressure scales based on the equations of state for ruby, diamond, MgO, B2–NaCl, as well as Au, Pt, and other metals to 4 Mbar and 3000 K. *Russian Geology and Geophysics* 54 (2), 181–199. http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2013.01.005.
- Solov'eva L.V., Yasnygina T.A., Egorov K.N. 2012. Metasomatic parageneses in deep-seated xenoliths from pipes Udachnaya and Komsomol'skaya-Magnitnaya as indicators of fluid transfer through the mantle lithosphere of the Siberian craton. *Russian Geology and Geophysics* 53 (12), 1304–1323. http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2012.10.004.
- Solovyeva L.V., Yasnygina T.A., Koroluk V.N., Egorov K.N., 2010. Geochemical evolution of deep fluids in the mantle lithosphere of the Siberan craton during the Middle Paleozoic kimberlite cycle. *Doklady Earth Sciences* 434 (2), 1330–1336. http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X10100090.
- *Turkina O.M., Letnikov F.A., Levin A.V.,* 2011. Mesoproterozoic granitoids of the Kokchetav microcontinent basement. *Doklady Earth Sciences* 436 (2), 176–180. http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X11020103.





Дорогокупец Петр Иванович, докт. геол.-мин. наук, зав. лабораторией петрологии, геохимии и рудогенеза Институт земной коры СО РАН 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия e-mail: dor@crust.irk.ru

Dorogokupets, Peter I., Doctor of Geology and Mineralogy, Head of Laboratory of Petrology, Geochemistry and Ore Genesis Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS 128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia e-mail: dor@crust.irk.ru

Егоров Константин Николаевич, канд. геол.-мин. наук, зав. лабораторией геологии и магматизма древних платформ Институт земной коры СО РАН 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия e-mail: egorov@crust.irk.ru

Egorov, Konstantin N., Candidate of Geology and Mineralogy, Head of Ancient Platforms Geology & Magmatism Laboratory, Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS 128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia e-mail: egorov@crust.irk.ru PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2014 VOLUME 5 ISSUE 1 PAGES 41-80

http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0117



ISSN 2078-502X

THE DEEP STRUCTURE AND PALEOGEODYNAMICS OF SIBERIA AND CENTRAL ASIA IN STUDIES OF THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST, SB RAS (2009–2013)

D. P. Gladkochub, E. Kh. Turutanov

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: The deep structure and paleogeodynamics of the Siberian craton and the Central Asian folded belt are studied by two specialized laboratories of the Institute of the Earth's Crust, SB RAS – the Laboratory of Complex Geophysics and the Laboratory of Paleogeodynamics. A variety of modern geophysical methods is applied. Surface wave tomography is focused on determination of 3D velocity structure of the upper mantle. Seismic, gravimetric and electrical surveys are aimed at studies of structures of the crust and the upper mantle. Geothermic parameters of the lithosphere in Central Asia are measured. In search for mineral resources, new geophysical prospecting technologies are developed. Quality paleogeodynamics reconstructions require a proper understanding of the structural evolution of the Siberian craton and the Central Asian folded belt. Researches in this scientific field are conducted by the Laboratory of Paleogeodynamics. Besides, the Laboratory studies new minerals and conditions of their formation. Some of the scientific research projects are jointly implemented by the two laboratories, and research results are regularly published in Russia and abroad.

Key words: deep structure, tectonics, paleogeodynamics, Siberian craton, Central Asian folded belt, upper mantle, crust, surface wave tomography, gravimetric method, electrical survey, geodynamic reconstructions.

Citation: *Gladkochub D.P., Turutanov E.Kh.* 2014. The deep structure and paleogeodynamics of Siberia and Central Asia in studies of the Institute of the Earth's Crust, SB RAS (2009–2013). *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (1), 41–80. doi:10.5800/GT-2014-5-1-0117.

Глубинное строение и палеогеодинамика Сибири и Центральной Азии в работах Института земной коры СО РАН (2009–2013 гг.)

Д. П. Гладкочуб, Е. Х. Турутанов

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация: Изучением глубинного строения и палеогеодинамики Сибирского кратона и Центрально-Азиатского складчатого пояса занимаются две специализированные лаборатории ИЗК СО РАН: лаборатория комплексной геофизики и лаборатория палеогеодинамики. Использование геофизических методов в рамках данной тематики ориентировано на определение трехмерной скоростной структуры верхней мантии методом поверхностно-волновой томографии, изучение строения земной коры и верхней мантии сейсмическими, гравиметрическими и электроразведочными методами, измерение геотермических параметров литосферы Центральной Азии и разработку новых технологий поиска месторождений полезных ископаемых. Выполнение качественных палеогеодинамических реконструкций требует расшифровки сценария становления структуры Сибирского кратона и Центрально-Азиатского складчатого пояса. Исследованием этой проблемы занимаются сотрудники лаборатории палеогеодинамики. Отдельным направлением в данной лаборатории является изучение новых минералов и выяснение условий их образования. Сотрудни-

D.P. Gladkochub, E.Kh. Turutanov: The deep structure and paleogeodynamics of Siberia and Central Asia...

ки лабораторий ведут скоординированные научные исследования, результаты которых активно публикуются в ведущих российских и зарубежных научных изданиях.

Ключевые слова: глубинное строение, тектоника, палеогеодинамика, Сибирский кратон, Центрально-Азиатский складчатый пояс, верхняя мантия, земная кора, поверхностно-волновая томография, гравиметрический метод, электроразведка, геодинамические реконструкции.

1. Введение

Объединение научных коллективов двух лабораторий в рамках общей научной тематики продиктовано тем обстоятельством, что современное глубинное строение земной коры, наблюдаемое в геофизических полях, во многом обусловлено тектоническими процессами далекого геологического прошлого, которые являются предметом изучения специалистов в области палеогеодинамики.

Успешное научное сотрудничество двух этих лабораторий реализуется в рамках общей тематики (проекта) НИР, обозначенной как «Глубинное строение и геодинамическая эволюция южного фланга Сибирского кратона и прилегающих областей Центрально-Азиатского складчатого пояса», финансируемой из госбюджета. В общероссийском плане эти исследования отвечают Приоритетному направлению развития фундаментальной науки в РФ № VIII.66. «Геодинамические закономерности вещественно-структурной эволюции твердых оболочек Земли».

Каждая лаборатория, вовлеченная в общую тематику, имеет свою историю, основные научные направления, методы исследования и наиболее значимые научные достижения. Сотрудники лабораторий ведут скоординированную научно-организационную деятельность и имеют определенные заслуги, признаваемые на уровне как региона, так и всей страны. Эти вопросы будут детально рассмотрены далее в тексте статьи.

2. ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ СИБИРИ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ (ЛАБОРАТОРИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ГЕОФИЗИКИ)

Лаборатория комплексной геофизики создана в 1970 г. для выполнения научно-исследовательских работ с целью изучения строения коры и мантии центральной части Азии комплексом геофизических методов, включая сейсмические, гравиметрические, электро-, магнитометрические и геотермические. Основателем и руководителем лаборатории с 1970 по 2008 г. был д.г.-м. н., профессор, заслуженный деятель науки РФ Ю.А. Зорин (рис. 1). Основными задачами лаборатории являются получение новых фундаментальных знаний по теме: «Строение и термический режим земной коры и мантии под тектонически активными регионами центральной части Азии» и применение их в практике. Коллектив лаборатории – 17 человек, в том числе 3 доктора и 7 кандидатов наук (рис. 2).

Основные направления деятельности лаборатории:

 определение трехмерной скоростной структуры верхней мантии центральной части Азии методом поверхностно-волновой томографии;

 изучение строения земной коры и верхней мантии Байкало-Монгольского региона комплексом геофизических методов;

 изучение геотермических параметров литосферы центральной части Азии;

 – разработка новых технологий поиска месторождений полезных ископаемых.

Аппаратурно-приборная база лаборатории состоит из гравиметров ГНУ-К2, оптических микробарометров, измерителей теплофизических свойств горных пород и минералов, кондуктометра «Эксперт-002», вольтметров, сейсмометров.

Далее представлены основные научные достижения лаборатории за 2009–2013 гг. (по направлениям).



Рис. 1. Профессор Ю.А. Зорин.

Fig. 1. Prof. Yu.A. Zorin.



Рис. 2. Сотрудники лаборатории комплексной геофизики.

Нижний ряд (слева направо): Н.В. Татомир, к.ф.-м.н. О.А. Соловей, к.ф.-м.н. В.М. Кожевников, к.ф.-м.н. А.И. Середкина; средний ряд: д.г.-м.н. В.А. Голубев, Л.Р. Шеломенцева, к.г.-м.н. Е.Х. Турутанов – заведующий лабораторией, д.г.-м.н. В.И. Мельникова, к.ф.-м.н. В.А. Рогожина, д.г.-м.н. В.В. Мордвинова, А.Б. Бадуев; верхний ряд: М.А. Хритова, к.г.-м.н. Н.А. Радзиминович.

Fig. 2. The Laboratory of Complex Geophysics.

1st row – N.V. Tatomir, O.A. Solovei, A.I. Seredkina; 2nd row – V.A. Golubev, L.R. Shelomentseva, E.Kh. Turutanov (Head of the Laboratory), V.I. Mel'nikova, V.A. Rogozhina, V.V. Mordvinova, A.B. Baduev; 3rd row – M.A. Khritova, N.A. Radziminovich.

2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ СКОРОСТНОЙ СТРУКТУРЫ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ АЗИИ МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНО-ВОЛНОВОЙ ТОМОГРАФИИ

Эти исследования выполнены по данным дисперсии фазовых скоростей основной моды волн Рэлея на участках между парами регистрирующих станций. Исходными материалами при этом служили записи волн Рэлея от землетрясений каналами LHZ широкополосных станций GSN азиатских сетей IRIS с цифровой регистрацией сейсмических сигналов. Эпицентры выбранных землетрясений с магнитудами, равными 6.0 и более, в подавляющем большинстве случаев располагались на значительном удалении от регистрирующих станций – в пределах бассейнов и на островах Тихого, Индийского и Атлантического океанов, а также в прибрежных зонах Северной, Центральной и Южной Америки. Эпицентральные расстояния при этом изменялись от 7000 до 15000 км, и глубина исследований среды, соответственно, близка к 600–650 км [Кожевников, Соловей, 2010]. Полученные дисперсионные кривые групповых и фазовых скоростей были использованы в качестве исходных данных при восстановлении трехмерной скоростной структуры верхней мантии Азии методом поверхностно-волновой томографии. В общем случае всего было получено 12 карт для глубин от 50 до 600 км с шагом по глубине 50 км и двумерные скоростные разрезы, пересекающие основные тектонические структуры исследуемой области. Некоторые карты распределения скоростей волн S приведены на (рис. 3). На основе полученных трехмерных моделей распределения скоростей поперечных волн в верхней мантии Азии были построены двумерные скоростные пересекающие основные тектонические разрезы, структуры континента и отражающие особенности глубинного строения верхней мантии региона (рис. 4).

На основании анализа результатов картирования и двумерных скоростных разрезов сделано заключение,



4.00 4.05 4.10 4.15 4.20 4.25 4.30 4.35 4.40 4.45 4.50 4.55 4.60 4.65 4.70 4.75 4.80 4.85 4.90 4.95 5.00 5.05 5.10 5.15 5.20 5.25 5.30 5.35 5.40 5.45 5.50 5.55 5.60 5.65 5.70 5.75 5.80 5.85 5.95

Рис. 3. Некоторые карты распределения скоростей поперечных сейсмических волн в мантии области исследования.

Н – глубина соответствующей сферической поверхности, белый пунктир – границы области исследований.

Fig. 3. Sample maps showing patterns of transversal seismic wave velocities in the mantle in the area under study.

H – depth of the corresponding spherical surface. The area under study is marked by the white contour.

что верхняя мантия центральной части Азии характеризуется неоднородностью глубинного строения на всем интервале исследуемых глубин. Наиболее существенные по перепаду сейсмических скоростей неоднородности наблюдаются в пределах верхних 400 км мантии. Толщина литосферы при этом варьируется в широких пределах – от приблизительно 50–60 км под тектонически активными высокогорными регионами Южной Сибири и Западной Монголии до 200-250 км под Сибирской платформой. Наличие низкоскоростных слоев и включений на глубинах порядка 400 км, а также высокоскоростных включений в пределах транзитной зоны на востоке и юго-востоке области исследования может быть обусловлено совокупностью эндогенных процессов, проявившихся в мантии центральной части Азии, включая воздействие глубинных плюмов [Кожевников, Соловей, 2010]. В пользу такого вывода свидетельствуют и результаты глобальной сейсмической томографии, базирующиеся на невязках

времен пробега продольных сейсмических волн, полученные другими исследователями.

2.2. Изучение строения земной коры и верхней мантии Байкало-Монгольского региона комплексом геофизических методов

2.2.1. Исследования с помощью телесейсмических записей

Данные исследования выполнены с использованием сейсмической сети эксперимента PASSCAL 1991–1992 и MOBAL-2003 [Мордвинова, Артемьев, 2010]. Для каждой сейсмостанции рассчитаны одномерные скоростные модели Vs(h) от поверхности до глубины 70 км, а на их базе построены три скоростных разреза, пересекающие Байкальскую впадину (рис. 5), и модель трехмерной скоростной структуры Южно-Байкальского района. Построенные модели свидетельствуют о локальном утонении земной коры под Южной Байкаль-



Рис. 4. Скоростные разрезы волн S.

Н – расстояние от земной поверхности, горизонтальная ось – расстояние от средних точек профилей.

Fig. 4. Profiles of wave velocity, S.

H – distance to the ground surface. Distances from medium points of the profile are shown at the horizontal axis.



Рис. 5. Двумерные скоростные разрезы, построенные по результатам инверсии приемных функций для района Байкальского рифта и смежных регионов.

А – субширотный профиль; *Б* – субмеридиональный профиль по 7 станциям (1992 г.); *В* – субмеридиональный профиль Братск– Иркутск–Улан-Батор–Ундуршил. Наклон разрезов, учитывающий горизонтальный масштаб, равен углу падения (20 град.) сейсмических лучей в зондируемой толще.

Fig. 5. 2D velocity cross-sections constructed from results of receiving function inversion for the Baikal rift and neighbouring regions.

A – sublatitudinal profile; B – submeridional profile (7 stations, 1992); B – submeridional profile Bratsk–Irkutsk–Ulaan Baatar–Undurshil. The cross-sections are inclined with regard to the horizontal scale at the dip angle of seismic waves in the sounded beds (20 degrees).



Рис. 6. Связь поверхностных геологических структур с распределением скорости S волн на глубине 39 км. *1* – сбросы, *2* – надвиги.

Fig. 6. Relationship between surface geological structure and the pattern of wave velocity, S at the depth of 39 km.

1 - normal faults; 2 - thrusts.

ской впадиной до 34-36 км (рис. 5, станция 62), в то время как толщина коры под ее горным окружением достигает 46-50 км и даже более (под хребтами Хамар-Дабан). Понижение скоростей сейсмических волн в верхах мантии, которое обычно связывают с подъемом астеносферы, в основном приурочено к областям с наиболее толстой корой. Судя по полученным двумерным и трехмерным моделям, астеносферные выступы достигают подошвы коры не под Байкальской впадиной, а юго-восточнее, под горными хребтами, высота которых превышает 1000 м (рис. 5). Слои пониженной скорости обнаружены как под Байкальской рифтовой зоной, так и под складчатыми областями Забайкалья и Монголии, а также под Сибирской платформой. На рис. 6 показан горизонтальный срез (карта) распределения скоростей для глубины 39 км. Именно на этой глубине под Сибирской платформой и озером Байкал, судя по результатам исследований, начинается мантия, скорости которой существенно выше коровой, а южнее, под складчатыми областями, низкими скоростями проявляет себя утолщенная кора.

Исследования показали, что в земной коре скорости растут неравномерно, обнаруживая структуру с явно выраженными слоями пониженной скорости. Глубина коры на северо-западе БРЗ – 36–37 км, при этом четко проявляется контрастность коромантийной границы. Южнее, под Саянами и Тункинскими гольцами, подошва коры заглубляется примерно до 50 км. Ближе к Байкалу мантия поднимается до 39 км. А восточнее и севернее выявляется утонение коры до 36 км. Модель среды под Байкалом является самой сложной на всех глубинах. Здесь высокоскоростные включения подобны набору линз несколько меньшей кривизны, чем подъем подошвы коры под Байкалом. Неоднородность коры и мантии еще более резко проявляется в аномалиях скоростей ($V_S - V_{Sref}$)/ V_{Sref} (рис. 7), рассчитанных в процентах по отношению к референтному скоростному разрезу V_{Sref}(h). Наиболее интенсивные аномалии указывают на отличие от 40-километровой мощности коры референтной модели: положительные подкоровые аномалии подчеркивают относительно тонкую кору, отрицательные аномалии в низах коры принад-

D.P. Gladkochub, E.Kh. Turutanov: The deep structure and paleogeodynamics of Siberia and Central Asia...



Рис. 7. Аномалии скорости распространения S волн в среде и их геологическая интерпретация: сплошными линиями обозначены надвиги первого порядка; штрихами – надвиги второго порядка; пунктиром – границы различных блоков в коре; штрих-пунктиром – раздел Мохо; тонкими штрихами оконтурена низкоскоростная область в мантии.

Fig. 7. Anomalies in propagation of wave velocity, S in the medium, and geological interpretation of such anomalies. Solid lines show the 1^{st} order thrusts; dotted lines show the 2^{nd} order thrusts; the dot-and-dash line shows the Moho discontinuity; the low-velocity zone in the mantle is contoured by the thin dotted line.

лежат районам с земной корой толще 40 км.

Установлено, что скоростная структура земной коры БРЗ неравномерна, состоит из явно выраженных слоев пониженной скорости. Неоднородность коры и мантии наиболее резко проявляется в аномалиях скоростей ($V_S - V_{Sref}$)/ V_{Sref} . Скоростное строение мантии тоже сложное, величина аномалий варьируется от +5 до -5 % относительно стандартной модели Земли IASP91. Положительные значения соответствуют Сибирской платформе, отрицательные значения проявляются в мантии юго-восточной части исследуемого объема.

2.2.2. Исследования скоростной структуры по данным стационарной Байкальской сети

Для большинства станций Байкальской сети вдоль простирания Байкальской рифтовой системы рассчитаны одномерные V_s модели до глубины 70 км, на основании которых построены соответствующие скоростные разрезы (рис. 8). Верхний разрез состоит из блоков AB, BC и CD, нижний – из блоков ABE и EFD. Блоки сформированы одномерными Vs моделями для станций, наименее удаленных от направления простирания блока. Разрешение двумерной модели меняется



Рис. 8. Двумерный Vs разрез вдоль Байкальской рифтовой зоны.

Треугольниками отмечены позиции сейсмостанций. Изолинии в интервале скоростей от 2.0 до 4.6 км/с проведены с шагом 0.1 км/с.

Fig. 8. 2D profile Vs along the Baikal rift zone.

Triangles show locations of seismic survey stations. In the velocity range from 2.0 to 4.6 km/sec, isolines are spaced at 0.1 km/sec.

вдоль профиля в зависимости от межстанционного расстояния. В верхнем горизонте моделей низкие скорости соответствуют провисшей кровле земной коры во впадинах, заполненных осадками. Более высокие скорости относятся к межвпадинным перемычкам. Мощные низкоскоростные линзы до глубины 15 км и более могут соответствовать гранитоидам, развитым практически повсеместно вдоль рифта. Наиболее низкоскоростной является верхняя половина земной коры под Восточным Саяном (блок AB). Обращает на себя внимание высокоскоростной блок в средней части коры в районе Уояна (YOAN, блок CD), контактирующий с низкоскоростным, сложным по структуре блоком в верхней части коры. Участок Кумора–Уоян–Северомуйск – это один из редких пока случаев, когда относительная густота расположения стационарных сейсмостанций и направление используемых сейсмических лучей позволяют сравнить в деталях скоростные модели, полученные телесейсмическим и локальным методами (функции приемника и ГСЗ). В верхних 20 км изолинии V_S разреза практически повторяют изолинии V_P по ГСЗ. На глубине, где по серии отражающих площадок по данным ГСЗ–ОГТ предполагается довольно крутопадающий разлом, на Vs разрезе



Рис. 9. Карта толщины Ангаро-Витимского плутона.

1 – позднекайнозойские рифтовые впадины; 2 – надвиги; 3 – гранитоиды Ангаро-Витимского плутона; 4 – изолинии толщины гранитоидов.

Fig. 9. The Angara-Vitim pluton thickness map.

1 – Late Cenozoic rift basins; 2 – thrusts; 3 – granitoids of the Angara-Vitim pluton; 4 – granitoid thickness isolines.

блока CD есть соответствующий излом изолинии «3.6 км». Общей чертой в моделях *Vp* (ГСЗ) и *Vs* (функции приемника) является и выпуклый по направлению к дневной поверхности коромантийный раздел с пониженной скоростью под ним в первых километрах кровли мантии.

Вдоль интерпретационных профилей получена практически ровная граница Мохо (на глубине 40 км). При существующем расположении станций вдоль рифтовой зоны использованные сейсмические волны, как правило, не пересекают границы Мохо ни под плечами рифта с утолщенной корой, ни под рифтовыми впадинами, под которыми вероятны и утонение коры, и градиентный переход от мантии к коре [*Ананьин и др.*, 2009].

2.2.3. Исследования строения земной коры Байкало-Монгольского региона по гравиметрическим данным

Гравиметрическим методом исследованы отдельные рифтовые впадины региона и ряд интрузий кислого и основного состава [*Турутанов*, 2010, 2011а, 2011б, 2012а, 2012б]. В качестве примера рассмотрим объемную модель верхней части литосферного блока (см. рис. 7), в пределах которого расположена крупнейшая в мире позднепалеозойская—раннемезозойская Баргузино-Витимская внутриплитная магматическая область, известная как Ангаро-Витимский гранитоидный батолит [*Турутанов*, 20116].

По результатам исследований, с юга и востока (рис. 9) плутон обрамлен зоной гранитизации в форме пластины со средней мощностью (толщиной) около 2–3 км, вертикальные размеры которой лишь на отдельных участках достигают 10 км. Площадь проекции плутона на земную поверхность составляет около 200 тыс. км². При ширине, достигающей 250 км, он протягивается на расстояние около 750 км. Его вертикальная мощность (толщина) составляет в среднем 8–10 км, а у истоков рек Конкудеры и Мамакана достигает 30 км.

Конфигурация плутона в какой-то мере подчиняется сети крупных разломов, которые ограничивают тела гранитоидов. К участкам пересечения разломов тяготеют утолщения плутона, которые, как правило, имеют линейно вытянутую форму. Последние можно рассматривать как магмоподводящие каналы, уходящие на различную глубину. В целом же глубинная форма Ангаро-Витимского плутона в первом приближении может быть сопоставима с огромной пластиной со сложнопостроенной подошвой и субгоризонтальной кровлей. Отнесение плутона к какой-то определенной форме интрузивных тел затруднительно, хотя, судя по интерпретационным разрезам, она близка к лополитообразной. Изучение глубинной геометрии Ангаро-Витимского поля гранитоидов показало, что на фоне средней толщины земной коры рассматриваемого района в 40–45 км доля гранитоидов в ее вертикальном разрезе оказывается не столь существенной, как это можно предположить из геологических данных.

2.2.4. Исследование сейсмичности и напряженнодеформированного состояния земной коры сейсмоактивных территорий

Были изучены крупные последовательности землетрясений (магнитуды главных толчков *M*w=4.3–6.3) в районах Хойтогольской, Южнобайкальской, Кичерской, Верхнеангарской и Чарской рифтовых впадин, а также редкое и достаточно сильное Балейское землетрясение (*M*w=4.5) в Восточном Забайкалье [*Мельникова и др., 2009, 2011, 2013а, 2013б; Радзиминович и др., 2012; Имаева и др., 2012а, 2012б*]. Распределение в земной коре гипоцентров этих сейсмических событий еще раз подтвердило сейсмогенерирующую роль средней коры (16–18 км), а разрядка напряжений в очагах осуществлялась в соответствии с сейсмотектонической обстановкой районов их локализации и господствующего деформационного режима.

Для повышения качества оценок фокальных механизмов в Байкальском регионе внедрена и протестирована методика расчета тензора сейсмического момента по амплитудным спектрам поверхностных волн [*Ceредкина, Мельникова, 2013*]. В дальнейшем эта методика использовалась при изучении особенностей напряженно-деформированного состояния земной коры Азиатского континента, закономерностей в проявлении сейсмичности и исследовании его глубинной структуры.

Проведенными исследованиями установлено, что большинство сильных коровых землетрясений Южной Сибири, Западной Монголии и Северного Китая происходят при пониженных скоростях поперечных волн в нижней части коры и в верхней мантии этих регионов. Сильные землетрясения на северо-востоке Байкальской рифтовой зоны приурочены к районам с высоким (около 2 %) горизонтальным градиентом вариаций скоростей. Результаты комплексирования данных о глубинной структуре центральной части Азии и сейсмичности впервые показали, что в областях с низкоскоростной структурой верхней мантии преобладают сжимающие усилия, а в районах высокоградиентных скоростных аномалий – растягивающие [*Середки*на, 2013].

2.2.5. Сейсмогравиметрические исследования земной коры

Полученные результаты показали, что сейсмичность в регионе вызвана не физическими полями как таковыми, а непосредственно физико-геологической средой, в частности крупными плотностными неоднородностями, генерирующими эти поля. Плотностные же неоднородности характеризуются в основном вещественным составом и геометрическими особенностями слагающих их литологических комплексов, поэтому и искомые связи необходимо выявлять между сейсмичностью и указанными параметрами физикогеологической среды [Турутанов, 2011, 2012]. Достоверность предложенного подхода была проверена следующим образом (рис. 10). По результатам интерпретации гравиметрических и магнитометрических данных для Приольхонья составлена схема глубинного строения. Оказалось, что породы основного состава, геологические выходы которых картируются на побережье оз. Байкал, на глубине образуют крупный плутон, протяженность которого превышает 100 км при ширине, изменяющейся от 5 до 20 км. Плутон имеет сложную форму, а его нижняя граница расположена на глубине 4.0–7.5 км. По геофизическим данным [Турутанов, 2010, 20126], юго-восточная часть этого тела сброшена в акваторию озера на 0.5-5.0 км при формировании Байкальской впадины и скрыта под осадками и водой. На рассматриваемую схему нанесены эпицентры землетрясений начиная с восьмого энергетического класса. Для построения карты поля эпицентров землетрясений Приольхонья использованы также данные Байкальского филиала ГС СО РАН (http://www.seisbykl.ru). Кроме того, учтены эпицентры землетрясений, выявленные по палеосейсмическим данным, и по данным локальной сети сейсмических станций Бурятского филиала ГС СО РАН [Турутанов, 20126]. Если рассматривать ту часть основного плутона, которая по магнитометрическим данным располагается в фундаменте озера Байкал (рис. 10), то увидим, что от сопредельных участков фундамента Байкала она отличается минимальной сейсмичностью. Действительно, к юговостоку от контура проекции базитовых тел количество эпицентров значительно возрастает, а размеры участков «молчания» малы и соизмеримы с точностью определения местоположения эпицентров. К югозападу от предполагаемого окончания базитового плутона сейсмичность остается выше, чем в его пределах, хотя уровень ее несколько ниже, чем на юго-востоке.

На основе изучения глубинной геометрии интрузивных тел можно утверждать, что в распределении очагов землетрясений в Приольхонье наблюдается тенденция к уменьшению их числа на участках развития базитовых тел на побережье и под рыхлыми осадками на акватории озера Байкал. Предположительно



Рис. 10. Схема расположения эпицентров землетрясений и палеосейсмодислокаций Приольхонья.

1 – эпицентры землетрясений: а – К=16–14 по палеосейсмическим данным. Эпицентры землетрясений, зарегистрированных с 1962 по 1976 г.: б – К=17, в – К=16–14, г – К=13–8. Эпицентры землетрясений, зарегистрированных с 1994 по 2011 г.: д – К=13–8. Эпицентры землетрясений, зарегистрированных с 1962 по 1999 г.: е – К=13–10.5, ж – К=10.5–7.5, з – К=7.5–6.5; 2 – выходы на поверхность: А – Бугульдейского (Крестовского), Б – Бирхинского (Озёрского), В – Тажеранского (Улан-Нурского) и других массивов базитового состава; З – площадь проекции геологических тел базитового состава (по гравиметрическим данным) на земную и водную поверхности (по [*Туриранов, 2010, 2012*]); 4 – выходы гранитов; 5 – крупные разломы по геолого-геофизическим данным: а – на поверхности Земли, б – под водой.

Fig. 10. Locations of earthquake epicentres and paleoseismodislocations of the Priolkhonie, Irkutsk region, Russia.

1 – earthquake epicentres: a – K=16–14 according to paleoseismic data. Earthquake epicentres recorded from 1962 to 1976: б – K=17, в – K=16–14, г – K=13–8. Earthquake epicentres recorded from 1962 to 1999: e – K=13-10.5, ж – K=10.5-7.5, з – K=7.5-6.5; 2 – outcrops: A – Bugeldeika (Krestovsky), Б – Birkha (Ozersky), B – Tazheran (Ulan Nursky) and other massifs of basic rocks; 3 – square projections of geological bodies composed of basic rocks (according to gravimetric data) to the ground and water surfaces, according to [*Турутанов, 2010, 2012*]); 4 – granite outcrops; 5 – large faults according to geological and geophysical data: a – at surface faults, 6 – underwater faults.

это можно объяснить увеличением прочностных свойств коры при внедрении высокотемпературных магм основного состава.

2.3. ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ И ЕГО СВЯЗЬ С ГЛУБИНАМИ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Проведено сопоставление глубин гипоцентров с геотермическими данными для трех районов БРЗ, два из которых являются участками Байкальской впадины, третий находится к северо-востоку от нее в пределах Северо-Муйского хребта. Установлено, что глубины гипоцентров землетрясений в сравниваемых районах можно считать одинаковыми, так как они находятся в узких пределах – 2.0–21.2 км. Наблюдаемая в других частях Земли устойчивая взаимосвязь глубин землетрясений и теплового состояния глубинных недр позволяет надеяться, что и в сравниваемых районах БРЗ температура на глубинах 2.0-21.2 км должна быть одинаковой. Сделан вывод о несостоятельности геотермических моделей БРЗ, построенных путем экстраполяции на глубину близповерхностных (измеренных) значений теплового потока, не учитывающих перераспределение тепла подземными водами. Согласно ранее разработанным геотермическим моделям, крупная позднекайнозойская неглубокозалегающая базальтовая интрузия предполагалась и под Байкальской впадиной в районе дельты р. Селенга. Для проверки этой гипотезы было выполнено сопоставление тепловых и сейсмических данных по этому району. Результат использования двух сравниваемых геофизических полей доказал отсутствие этой гипотетической остывающей интрузии.

Результаты сопоставления геотермического и сейсмического полей БРЗ свидетельствуют, что кондуктивное тепловое поле верхней половины земной коры здесь, по-видимому, сильно искажено тепломассопереносом подземными водами. Это указывает на несостоятельность ранних геотермических моделей БРЗ, построенных путем экстраполяции на глубину измеренных близповерхностных величин теплового потока, содержащих эти искажения.

Кроме этого, в рамках «геотермального» направления завершены исследования термальной эволюции и современной геотермальной активности литосферы Центральной и Юго-Восточной Азии, по материалам которых составлены карты теплового потока и современной геотермальной активности литосферы [*Лысак*, 2009]. Показано, что разновозрастные геологические структуры изученной территории характеризуются различными этапами термальной эволюции и современной геотермальной активностью. Величины теплового потока варьируются от 25 до 150 мВт/м² и более со средним значением 58±11 мВт/м². Его аномально повышенные величины характерны для рифтовых зон, областей динамического влияния активных разломов, а также других структур растяжения, реже сжатия, земной коры. В западных и центральных районах Юго-Восточной Азии аномальные величины тепловых потоков наиболее вероятно связаны с вертикально поднимающимися литосферными и мантийными диапирами. Вариации геотермальной активности контролируются в основном «вращением» Ордосского блока, а также разрывами, подвижки по которым связаны с взаимодействием Индостанской и Евразийской литосферных плит. Показано, что интенсивность современной геотермальной активности в восточных районах Юго-Восточной Азии вызвана субдукцией Тихоокеанской плиты.

2.4. РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОИСКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Разрабатываемая в последние годы в лаборатории комплексной геофизики технология метода электромагнитного зондирования и вызванной поляризации (ЭМЗВП) предназначена для решения широкого круга задач малоглубинной рудной и нефтяной геофизики, таких, которые традиционными геофизическими методами в настоящее время решить почти невозможно [Агеенков и др., 2012; Давыденко и др., 2013]. Экспериментальный образец аппаратно-программного электроразведочного комплекса «Марс» (АПЭК «Марс») прошел успешную апробацию в Якутии, Приольхонье, и Монголии. Во время полевых испытаний в Якутии по восстановленным из первичных данных переходным процессам рядом с выходящей на дневную поверхность эталонной трубкой взрыва (объект 1) была обнаружена под мерзлыми озерными отложениями заверенная бурением трубка (объект 2), не выделявшаяся ранее (рис. 11). Технология ЭМЗВП и программное обеспечение для АПЭК «Марс» защищены патентом и двумя авторскими свидетельствами, полученными за последние два года.

Метод ЭМЗВП может быть использован в поиске и разведке кимберлитовых алмазоносных трубок, перекрытых излившимися базальтами (траппами), для выделения рудных тел (золото, платина, полиметаллы) в высокоомных средах, а также исследования криолитозоны в решении инженерных задач, в том числе изысканиях при строительстве трубопроводов применительно к условиям Крайнего Севера. Кроме этого, метод может быть востребован в поисках залежей углеводородов, комплексно с технологиями ЭМЗВП с ЗD сейсморазведкой.

Перспективы развития исследований в лаборатории комплексной геофизики связываются с использованием записей сейсмических волн на цифровых сейсмических станциях в комплексе с данными гравиметрии и геотермии с целью построения моделей глубинного строения литосферы и астеносферы центральной части Азии для выяснения механизма тектонических (в том числе сейсмогенерирующих) движений.



Рис. 11. Псевдоразрезы по электромагнитным данным вдоль линии, проходящей через две трубки взрыва.

Fig. 11. Pseudo-profiles according to electromagnetic data along the line (crossing two breccia pipes).

Для получения практических рекомендаций по выделению потенциально опасных в сейсмическом отношении зон и решения задач сейсмического районирования планируется дополнить традиционные методы изучения сейсмичности и напряженно-деформированного состояния земной коры сейсмоактивных территорий гравиметрическими данными. Изучение соотношения кондукции и конвекции в передаче тепла из глубоких недр Земли к ее поверхности внесет существенный вклад в определение термического режима литосферы и оценку роли глубинного тепла в тектонической активности конкретных регионов. Предполагается продолжить разработку новых перспективных электроразведочных методов поиска и разведки месторождений полезных ископаемых.

3. ПАЛЕОГЕОДИНАМИКА СИБИРИ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ (ЛАБОРАТОРИЯ ПАЛЕОГЕОДИНАМИКИ)

Свое современное название лаборатория палеогеодинамики получила 1986 г., после того как в единое научное подразделение были объединены две уже существовавшие в институте лаборатории: лаборатория тектоники (зав. лабораторией С.М. Замараев, 1968-1984 гг., В.Г. Беличенко, 1984–1986 гг.) и лаборатория геологии и металлогении докембрия (зав. лабораторией А.П. Шмотов, 1971–1986 гг.). Однако истоки лаборатории палеогеодинамики прослеживаются более чем на 60 лет в глубь истории института: сначала (1962 г.) в лабораторию тектоники и структурной геологии (зав. лабораторией Н.А. Флоренсов), далее (1955–1961 гг.) – в отдел региональной геологии (рук. Н.А. Флоренсов) и практически к моменту основания института (1951 г.), когда в его структуре был создан отдел общей геологии и полезных ископаемых (рук. Е.В. Павловский).

К наиболее значимым достижениям лаборатории во второй половине XX в. можно отнести обоснование рудной специфики обширных территорий Прибайкалья, разработку методики геологического картирования древних метаморфических толщ, составление серии литолого-палеогеографических карт и карт метаморфизма для территории Сибирской платформы и Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП), открытие крупноамплитудных надвигов на юге Сибирского кратона, разработку модели террейновой структуры Забайкалья, обнаружение на площади Сибирского кратона фрагментов древней (2.0 млрд лет) океанической коры (офиолитов и эклогитов), выявление в структуре забайкальского сегмента ЦАСП комплексов метаморфических ядер (КМЯ) и многое другое. Результаты этих исследований вошли в такие фундаментальные научные издания, как «Стратиграфия СССР» (1963 г.), «Геология СССР» (1961–1964 гг.), восьмитомная монография «Геология и сейсмичность зоны БАМ» (1983–1985 гг.), «Комплексы метаморфических ядер кордильерского типа» (1997 г.) и др.

В начале XXI в. при определяющей роли сотрудников лаборатории в рамках Федеральной целевой программы «Интеграция науки и высшей школы» была подготовлена и опубликована целая серия учебных пособий для вузов, включающая следующие издания: «Интерпретация геохимических данных», «Метаморфизм и тектоника», «Минералогия Восточной Сибири на пороге XXI века», «Методы структурного анализа полиметаморфических комплексов», «Геодинамические режимы формирования Центрально-Азиатского складчатого пояса». Один из этих учебников («Интерпретация геохимических данных») в последующем был переведен и издан в Монголии.

В настоящее время (начало 2014 г.) в лаборатории работает 26 человек, в том числе 1 член-корреспондент РАН, 7 докторов и 6 кандидатов наук (рис. 12).

Основные научные направления исследований лаборатории:

 процессы формирования континентальной литосферы Центральной Азии и их геодинамический контроль;



Рис. 12. Сотрудники лаборатории палеогеодинамики.

Первый ряд (слева направо): чл.-корр. РАН Е.В. Скляров, И.Г. Бараш, Т.В. Ляхова, Р.М. Ивченко, Е.Е. Бадашкова, Э.В. Бидаева, В.П. Киямова, А.В. Щербак, Т.А. Корнилова; второй ряд: к.г.-м.н. Е.И. Демонтерова, к.г.-м.н. Л.З. Резницкий, к.г.-м.н. Т.В. Донская, Н.А. Садовникова, к.г.-м.н. Н.К. Гелетий, Е.Н. Федерягина, Л.В. Фивейская, В.И. Конорев; третий ряд: к.г.-м.н. С.И. Школьник, д.г.-м.н. А.М. Мазукабзов д.г.-м.н. А.М. Станевич, З.Л. Мотова, к.г.-м.н. С.А. Анисимова, А.В. Коптева, д.г.-м.н. Д.П. Гладкочуб – зав. лабораторией, Е.А. Некрасова, четвертый ряд: И.К. Константинов, д.г.-м.н. А.В. Иванов, д.г.-м.н. В.К.Лапердин, В.П. Юрков.

Fig. 12. The staff of the Laboratory of Paleogeodynamics.

1st row – E.V. Sklyarov, I.G. Barash, T.V. Lyakhova, R.M. Ivchenko, E.E. Badashkova, E.V. Bidaeva, V.P. Kiyamova, A.V. Shcherbak, T.A. Kornilova; 2nd row – E.I. Demonterova, L.Z. Reznitsky, T.V. Donskaya, N.A. Sadovnikova, N.K. Gelety, E.N. Federyagina, L.V. Fiveiskaya, V.I. Konorev; 3rd row – S.I. Shkol'nik, A.M. Mazukabzov, A.M. Stanevich, Z.L. Motova, S.A. Anisimova, A.V. Kopteva, D.P. Gladkochub (Head of the Laboratory), E.A. Nekrasova; 4th row – I.K. Konstantinov, A.V. Ivanov, V.K. Laperdin, V.P. Yurkov.

 – становление структуры Сибирского кратона и Центрально-Азиатского складчатого пояса;

 – геодинамика области сочленения Сибирского кратона и Центрально-Азиатского складчатого пояса;

 новые минералы и их роль в реконструкции геодинамических режимов.

Сотрудники лаборатории, для выполнения исследований используют целый комплекс современных методов анализа минералов и горных пород, выполняя аналитические измерения как в Иркутске – на базе Байкальского аналитического ЦКП ИНЦ СО РАН, так и за рубежом – в Германии, Австралии, США, Китае и других странах. В лаборатории успешно эксплуатируется многоканальный газовый масс-спектрометр ARGUS VI. Этот специализированный прибор нового поколения используется для исследований изотопного состава аргона (природных – ⁴⁰Ar, ³⁸Ar, ³⁶Ar и образуемых при облучении образца быстрыми нейтронами в ядерном реакторе – ³⁹Ar, ³⁷Ar). Масс-спектрометр может использоваться для изучения более легких газов, например изотопов азота, и определения концентраций гелия-4. В эксплуатации прибор находится с мая 2012 г., и к настоящему времени на нем Ar/Ar методом было датировано более 100 геологических образцов, включая природные стандарты.



Рис. 13. Схема проявления корообразующих процессов в пределах основных структур южного фланга Сибирского кратона [*Gladkochub et al., 2009*].

Fig. 13. The scheme of the crust formation within the limits of the main structures comprising the southern flank of the Siberian craton [*Gladkochub et al.*, 2009].

Основные научные достижения лаборатории за 2009–2013 гг. (по направлениям):

3.1. ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ЛИТОСФЕРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ И ИХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

3.1.1. Проведены исследования изотопных систем Nd в интрузивных и метаморфических породах, слагающих основные террейны южной части Сибирского кратона. На основе полученных материалов сделан вывод об изотопной гетерогенности изученной территории и выделены основные рубежи проявления корообразующих процессов. Сделано предположение о том, что ранние (палео- и мезоархейские) уровни корообразующих процессов отражают стадию становления протоконтинентальных платформ (фрагментов протосиаля) (рис. 13), на которых в последующем накапливались неоархейские вулканогенно-осадочные и осадочные образования.

Таким образом, структура южной части кратона может быть охарактеризована как мозаика отдельных террейнов с архейским основанием, каждый из которых имеет собственную уникальную историю становления и раннего развития.

Объединение этих разрозненных террейнов в единую общую структуру кратона произошло в палеопротерозое (2.0–1.9 млрд лет), о чем свидетельствуют реликты палеопротерозойской ювенильной коры, обнаруженные в изученном регионе [*Gladkochub et al.*, 2009].

3.1.2. Впервые доказано присутствие архейских пород в пределах Акитканского складчатого пояса Сибирского кратона, разделяющего Алданский и Анабарский супертеррейны. Ранее считалось, что породы Акитканского складчатого пояса были сформированы исключительно на палеопротерозойском ювенильном основании. Мезоархейские разгнейсованные гранитоиды были изучены в пределах Байкальского выступа фундамента кратона (район мыса Хибелен). Исследованные гранитоиды представлены и гранитами. U-Pb датирование по циркону тоналитов показало, что они имеют возраст 2884±12 млн лет (TIMS метод). Было предложено два возможных варианта эволюции Акитканского складчатого пояса до коллизии Анабарского и Алданского супертеррейнов. Согласно первому варианту, Анабарский супертеррейн на временном рубеже ~2.0-2.1 млрд лет мог развиваться в режиме активной континентальной окраины, палеопротерозойские комплексы могли формироваться вдоль активной окраины, а мезоархейские гранитоиды в этом случае могли являться частью Анабарского супертеррейна. Согласно второму варианту, палеопротерозойские и архейские комплексы пород, выделяющиеся в Акит-



Рис. 14. Карта размещения базитовых интрузий на площади Сибирского кратона [Gladkochub et al., 2010].

Fig. 14. The map of basic rock intrusions in the territory of the Siberian craton [*Gladkochub et al.*, 2010].

канском складчатом поясе, до момента объединения Анабарского и Алданского супертеррейнов имели полностью автономное развитие и были вовлечены в единую структуру только в результате коллизии. Коллизия Анабарского и Алданского супертеррейнов произошла на временном рубеже ~1.9 млрд лет. Завершающей стадией этой коллизии явилось формирование постколлизионных образований с возрастом 1.87–1.84 млрд лет, широко представленных в структуре Акитканского складчатого пояса [Donskaya et al., 2009].

3.1.3. Создана карта докембрийского базитового магматизма Сибирского кратона (рис. 14) [*Gladkochub et al.*, *2010*]. В ходе работы над картой были получены следующие основные результаты:

1. Установлено, что в истории протерозойского базитового магматизма Сибири могут быть выделены три основных импульса (рис. 14), отвечающие позднему палеопротерозою, раннему мезопротерозою и неопротерозою. 2. Проявленный повсеместно на площади Сибирского кратона палеопротерозойский базитовый магматизм с возрастом около 1850 млн лет был обусловлен процессами постколлизионного растяжения, сменившего коллизионно-аккреционную стадию, ответственную за объединение разрозненных террейнов и супертеррейнов в единую структуру кратона.

3. Новые геохронологические данные, полученные для базитовых дайковых роев Байкальского выступа, Алдано-Станового и Анабарского щитов, позволили обосновать присутствие на площади Сибирского кратона крупной магматической провинции (КМП), возраст которой близок к 1750 млн лет [Гладкочуб и др., 2010].

4. Мезопротерозойский базитовый магматизм, проявленный на севере кратона (Анабарский щит – 1384±2 млн лет, Оленекский выступ – 1473±24 млн лет), по-видимому, был обусловлен широким развитием процессов внутриплитного растяжения, наиболее ярким проявлением (результатом) которых стало

D.P. Gladkochub, E.Kh. Turutanov: The deep structure and paleogeodynamics of Siberia and Central Asia...



Кол-во исчезнувших семейств

Рис. 15. Сопоставление времени вымирания морских организмов (горизонтальные серые полосы) с временем траппового магматизма в провинциях Эмейшань и Сибирских траппов.

Жирными и пунктирными вертикальными стрелками показаны интервалы базальтового магматизма в пределах этих провинций, установленные по данным U-Pb и ⁴⁰Ar/³⁹Ar датирования, соответственно. Столбиками показано количество вымерших семейств морских организмов во время каждого из трех событий массового вымирания.

Fig. 15. The marine organisms extinction time (grey horizontal lines) versus the trapp magmatism time in Emeishan Province, China and the Siberian trapps, Russia.

Thick and dotted vertical arrows show basalt magmatism intervals within the limits of the provinces under study, as established from U-Pb and 40 Ar/ 39 Ar datings, respectively. Columns show the number of extinct marine organisms during each of the three events of mass extinction.

заложение и раскрытие Уджинского авлакогена.

5. Присутствие мезопротерозойского базитового магматизма на востоке кратона (Сетте-Дабан) подтверждается единственной надежной датировкой (1339±54 млн лет), полученной Sm-Nd методом по апатиту, клинопироксену и валу породы, отражая локальный характер проявления базитовых комплексов мезопротерозоя на рассматриваемой территории.

6. Наиболее ранние процессы растяжения в неопротерозое (~1000 млн лет) проявились на востоке Алданской провинции (Учуро-Майский район), где они фиксируют ранние стадии рифтогенного раскола Родинии.

7. Наиболее масштабно процессы растяжения неопротерозойского времени проявлены на южном фланге кратона дайковыми роями с возрастом 740–800 млн лет. Эти базитовые интрузии являются свидетельствами продвинутой стадии рифтогенеза. 8. Индикаторов предвендского растяжения в Сибири значительно меньше. Эти события фиксируются, в частности, позднерифейскими ультраосновными щелочными породами Белозиминского (642 млн лет), Жидойского (632 млн лет) и Ингилийского (647 млн лет) массивов. Этот рубеж может рассматриваться как верхний возрастной предел рифтогенеза, закончившегося отделением Сибирского кратона от Родинии [Gladkochub et al., 2010].

3.1.4. На основании анализа новых и ранее опубликованных ⁴⁰Ar/³⁹Ar датировок, полученных для Провинции Сибирских траппов, показано, что базальты и их интрузивные аналоги внедрялись в результате двух коротких импульсов: в раннем (249–252 млн лет) и среднем (240 млн лет) триасе (рис. 15). Эти же пики характерны для внедрения других типов магм (меймечитов, лампроитов, сиенитов и гранитоидов).



Рис. 16а. Схемы хронологической последовательности геологических событий на площади Прибайкальского поднятия: ранее допускаемая и пересмотренная с учетом новых геохронологических данных.

Fig. 16a. Schemes of the chronological sequence of geological events in the territory of the Pribaikalian uplift (assumed earlier and reviewed with account of new geochronological data).



Рис. 16б. Схемы хронологической последовательности геологических событий на площади Присаянского поднятия: ранее допускаемая и пересмотренная с учетом новых геохронологических данных.

Fig. 166. Schemes of the chronological sequence of geological events in the territory of the Prisayan uplift (assumed earlier and reviewed with account of new geochronological data).



Рис. 17. U-Pb (< 1 млрд лет) Pb-Pb (> 1 млрд лет) гистограммы и кривые относительной вероятности возраста детритовых цирконов из неопротерозойских осадочных пород южной части Сибирского кратона.

а–в байкальская серия: *а* – голоустенская свита, б – улунтуйская свита, в – качергатская свита; *г* – ушаковская свита.

Fig. 17. Histograms U-Pb (< 1 billion years) and Pb-Pb (> 1 billion years) and curves of relatively probable ages detrital zircones from the Neoproterozoic sedimentary rocks of the southern part of the Siberian craton. The Baikal series.

a – Goloustenskaya suite, б – Uluntuiskaya suite, в – Kachergatskaya suite; г – Ushakovskaya suite.

О том, что это событие занимало продолжительный период времени, было известно и ранее, однако импульсность и совпадение базальтового и кислого магматизма показаны впервые. Показано, что пермотрасовый и среднетриасовый пики траппового (и сопутствовавшего) магматизма хорошо коррелируют с эпохами массовых вымираний, вызванных выбросами в атмосферу ядовитых метаморфогенных газов, образующихся при взаимодействии пластовых интрузий тел (силлов) с осадочными породами, богатыми органическими останками, нафтидами и солями. Сопоставление прецизионных результатов изотопного датирования траппов с палеонтологическими данными подтверждает эту гипотезу [*Ivanov et al.*, 2013].

3.2. СТАНОВЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ СИБИРСКОГО КРАТОНА И ЦЕН-ТРАЛЬНО-АЗИАТСКОГО СКЛАДЧАТОГО ПОЯСА

3.2.1. Синтез новых датировок и их применение для определения возрастных ограничений докембрийских

осадочных толщ Прибайкалья позволили выявить для региона глобальный по своей продолжительности перерыв (между ~1.7 и ~0.8 млрд лет) в эндогенной активности, а также отсутствие осадочных комплексов, отвечающих данному периоду геологической истории. На площади Присаянского поднятия аналогичный перерыв охватывает интервал времени около 1.1 млрд лет (между 1.85 и 0.75 млрд лет) (рис. 16а), а перерыв в осадконакоплении в отдельных разрезах (Бирюсинский и Шарыжалгайский блоки) даже превосходит эту оценку (рис. 16б).

Выявленный феномен позволил обосновать необходимость коренного переосмысления сценария развития южной части Сибирского кратона в докембрии, а также акцентировать внимание на глобальном по своим масштабам перерыве в эндогенной активности и осадочных разрезах юга Сибирского кратона. Этот перерыв охватывает практически весь объем рифея.

Амагматичность, отсутствие свидетельств метаморфического преобразования пород и их вовлеченно-



Рис. 18. Карта террейнов северного сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса (по [Gladkochub et al., 2013]).

Fig. 18. The map of terrains of the northern segment of the Central Asian folded belt according to [Gladkochub et al., 2013].

сти в какие-либо тектонические процессы на протяжении длительного (~1.70–0.70 млрд лет) периода истории могут быть обусловлены нахождением южной части Сибирского кратона во внутренних областях коллажа нескольких древних кратонов (суперконтинента). Таким образом, полученные для юга Сибири данные могут свидетельствовать в пользу возможности существования на Земле транспротерозойского суперконтинента, т.е. фрагмента Нуны (Колумбии) (объединявшего Сибирь, Лаврентию и Гренландию), трансформировавшегося в Родинию и распавшегося в позднем неопротерозое.

Практически полное отсутствие рифейских (доэдиакарских) осадочных толщ на юге Сибирского кратона может быть объяснено сносом обломочного материала с площади Присаянского и Прибайкальского поднятий на прилегающие шельфы, которые в последующем, на стадии распада Родинии и раскрытия



Рис. 19. Вариации нормированных к хондриту концентраций элементов платиновой группы и рения в матриксе ледниковых отложений оледенения Гаскье и постледниковых аргиллитах и карбонатах в сравнении с данными по осадкам пермотриасовой и мел-палеогеновой границ.

Приведен также диапазон нормированных концентраций Ir для постледниковых аргиллитов оледенений Стёрт и Мариноа, для которых предполагается режим «снежка». Цифрами в скобках указано число образцов, использованных для осреднения.

Fig. 19. Variations of chondrite-rated concentrations of platinum group elements and rhenium in the matrix of glacial deposits of Gasquier glaciation and post-glaciation argillites and carbonates in comparison with data on sediments at the Perm-Triassic and Cretaceous-Paleogenic boundaries.

See also the range of rated concentrations of Ir for post-glaciation argillites of Sturt and Marinoan glacial deposits with the assumed 'snow flurry' regime. Numbers in brackets show the number of samples referred to for averaging.

Палеоазиатского океана, оказались отчлененными от кратона и в настоящее время не могут быть надежно идентифицированы [*Gladkochub et al.*, 2010].

3.2.2. С целью изучения условий седиментогенеза на южной окраине Сибирского кратона, протекавшего на фоне распада Родинии, раскрытия и начальных стадий развития Палеоазиатского океана, были исследованы отложения байкальской и слюдянской серий позднего докембрия Прибайкалья. В рамках работ выполнено изучение U-Pb возраста (LA-ICP-MS) детритовых цирконов из терригенных пород байкальской серии и ушаковской свиты Западного Прибайкалья (рис. 17) и дана интерпретация источников обломочного материала для изученных осадочных толщ. Установлено, что возраст наиболее молодой группы детритовых цирконов, выделенных из отложений верхней части байкальской серии и ушаковской свиты, позволяет ограничить время седиментации этих толщ вендом. Выявлено отсутствие в большей части проанализированных проб детритовых цирконов мезопротерозойского возраста, что подтверждает гипотезу о существовании глобального по своей продолжительности (около 1 млрд лет) перерыва в эндогенной активности, проявившегося в пределах южного фланга Сибирского кратона на протяжении докембрийского этапа его развития. Сделан вывод о том, что обилие неопротерозойских цирконов в песчаниках из верхних горизонтов байкальской серии и ушаковской свиты может быть объяснено сокращением площади океанического бассейна в результате сближения кратона с микроконтинентами и островными дугами (рис. 18), существовавшими в пределах Палеоазиатского океана [Гладкочуб и др., 2013].

Определены концентрации элементов группы пла-



Рис. 20. Геологическое строение Джидинско-Хамардабанского района.

1 – кайнозойские отложения Тункинской рифтовой впадины; 2 – кайнозойские базальты; 3 – мезозойская осадочно-вулканогенная толща; 4 – позднепалеозойские (298 Ма) граносиениты и сиениты; 5 – ордовикские (478–495 Ма) гранитоиды; 6 – ордовикские диориты и габбро; 7 – кембрийские (505–540 Ма) тоналиты и гранодиориты; 8 – кембрийские габбро и диориты; 9 – венд-раннепалеозойские осадочные и осадочно-вулканогенные серии пород окраинного бассейна; 10 – венд-раннепалеозойские вулканогенные и осадочно-вулканогенные серии островной дуги; 11 – гипербазиты (фрагменты расчлененных офиолитов); 12 – венд-раннепалеозойский карбонатный чехол Тувино-Монгольского микроконтинента; 13 – Гарганская глыба (ранний докембрий); 14 – Сибирский кратон; 15 – надвиги; 16 – сбросы; 17 – разломы с неустановленной кинематикой; 18 – изограды ордовикского метаморфизма: *I – граната, II – сшлиманита – калиевого полевого шпата, V – гиперстена*; 19 – изограды кембрийского метаморфизма: *I – граната, II – ставролита и дистена, III – силлиманита*; 20 – предполагавшаяся ранее граница между Джидинской (к югу) и Хамардабанской (к северу) зонами.

Fig. 20. The geological setting of the Dzhida-Khamardabam region.

1 - Cenozoic deposits of the Tunka rift basin; 2 - Cenozoic basalts; 3 - Mesozoic sedimentary-volcanogenic bed; 4 - Late Paleozoic (298 Ma) granosienites and sienites; 5 - Ordovician (478-495) granitoides; 6 - Ordovician diorites and gabbro; 7 - Cambrian (505-540 Ma) tonalities and granodiorites; 8 - Cambrian gabbro and diorites; 9 - Vend-Early Paleozoic volcanogenic and sedimentary-volcanogenic series of rocks of the marginal basin; 10 - Vend-Early Paleozoic carbonate cover of the Tuva-Mongolian micro-continent; 13 - Gargan rock (Early Precambrian); 14 - Siberian craton; 15 - thrusts; 16 - normal faults; 17 - faults with unidentified kinematics; 18 - isogrades of the Ordovician metamorphism: I – garnet, II – stavrolite and andalusite, III – sillimanite; 20 - earlier assumed boundary between the Dzida (southward) and Khamardaban (northward) zones.



Рис. 21. Аэрокосмическая геологическая карта юго-западной части Ольхонского региона (Байкал). Зона Крестовский – Широкая. Ольхонский геодинамический полигон.

Fig. 21. The aero-space geological map of the south-western part of the Olkhon region (Baikal).

The Krestovsky–Shirokaya zone. The Olkhon geodynamic test area.

тины в отложениях голоустенской свиты байкальской серии (рис. 19), а именно в прослое аргиллитов, сформировавшемся во время резкого перехода от оледенения Гаскье к стадии постледникового теплого климата. В связи с тем, что типичных, с точки зрения гипотезы «Snowball Earth», повышенных концентраций космической пыли (маркирующейся повышенными концентрациями элементов платиновой группы) в исследуемых образцах обнаружено не было, был сделан вывод либо о кратком характере оледенения Гаскье, либо о его региональной распространенности [Ivanov et al., 2013].

3.2.3. Детально изучена геохимия метавулканитов Тункинского террейна (рис. 20), расположенного в



Рис. 22. Фотография и зарисовка по фотографии жилы бруситовых мраморов, прорывающей сиениты с тектонизированной дайкой субщелочных габбро (Тажеранский массив).

Fig. 22. A photo and a drawing based on the photo of the brucite marble vein cutting through syenites with the tectonic dyke of subalkaline gabbro in the Tazheran massif.



Рис. 23. Модель магматизма позднего палеозоя – раннего мезозоя в пределах южного фланга Сибирского кратона и в прилегающих областях ЦАСП.

1 – субдуцируемый слэб; 2 – вулканоплутонические ассоциации позднего палеозоя на площади ЦАСП; 3 – субдукционно обогащенные источники; 4 – вещество Сибирского суперплюма; 5 – поле развития раннемезозойских траппов (Ангаро-Тасеевская синеклиза); 6 – направление движения субдуцируемой плиты Монголо-Охотского океана; 7 – возраст магматических событий.

Fig. 23. The Late Paleozoic magmatism model of the southern flank of the Siberian craton and the neighbouring regions of the Central Asian folded belt (CAFB).

1 – subduction slab; 2 – Late Paleozoic volcano-plutonic associations in the territory of CAFB; 3 – sources saturated due to subduction; 4 – material of the Siberian super-plume; 5 – field where the Early Mesozoic trapps are developed (Angara-Taseevskaya syncline); 6 – movement direction of the subduction plate of the Mongol-Okhotsk Ocean; 7 – age of magmatic occurrences.

северо-восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса.

Установлено, что протолиты метавулканитов представлены рядом базальт-андезибазальт-андезит. Основная геохимическая особенность метавулканитов – различная степень обогащения несовместимыми элементами относительно N-MORB и отсутствие ярко выраженных аномалий по Nb, что позволяет классифицировать их как базальтоиды задуговых бассейнов. Происхождение первичных базальтовых магм связывается с частичным плавлением мантийного источника, близкого к шпинелевому перидотиту в области мантийного клина, метасоматически проработанного в связи с дегидратацией субдуцирующей океанической плиты и контаминированного при подплавлении дегидратированного слэба [Школьник и др., 2009].

3.2.4. Установлена близость геохимических составов метавулканитов, выявленных в центральной части Тункинских гольцов, к составам, имеющим бонинитовую и пикритовую специфику. Наличие базальтоидов как с выраженной отрицательной, так и с положительной Nb аномалией, а также совместное нахождение данных пород в разрезе с серпентинитами могут маркировать древнюю зону спрединга задугового бассейна в пределах Тункинского террейна. Предложены модели, объясняющие присутствие двух геохимически различающихся типов вулканитов. Один вариант – результат плавления двух исходных мантийных источников. Нельзя исключить также неодновременность образования высоко- и низкотитанистых вулканитов. Возможно, деплетированные вулканиты образовывались на более ранних стадиях, в период максимального раскрытия задугового бассейна с активным спредингом. Обогащенные разности вулканитов могли отвечать более поздним стадиям, когда обстановка спрединга (растяжения) сменилась субдукционной (сжатия), маркирующейся в вулканитах 1-й группы высокими содержаниями крупноионных литофильных и легких редкоземельных элементов относительно высокозарядных элементов и выраженными отрицательными Nb, Ti аномалиями. Нельзя полностью исключить и возможность их формирования в разных частях активной окраины с последующим тектоническим совмещением. Таким образом, с учетом одной из последних интерпретаций структуры Саяно-Байкальской складчатой области [Зорин и др., 2009], можно считать, что Тункинский террейн является составной частью задугового бассейна активной островодужной окраины, а примитивные высокомагнезиальные метавулканиты маркируют задуговый палеоспрединг [Школьник и др., 2011].

3.2.5. На примере Ольхонской коллизионной системы показана связь субщелочного мантийного магматизма со сдвиговой тектоникой при коллизионном тектогенезе. Характерной особенностью внедрения базитовых магм является их тесная ассоциация с салическими породами (граниты, сиениты) корового происхождения, что обусловило широкое проявление процессов минглинга. Для Ольхонской системы характерно широкое проявление комбинированных даек базитгранитного состава. Возраст этих даек составляет 463 млн лет. В пределах Тажеранского массива тела пластовой и конической формы тесно ассоциируют с сиенитами и карбоналитами (продуктами плавления коровых карбонатных толщ), являясь более поздними по отношению к безнефелиновым сиенитам и субсинхронными с нефелиновыми сиенитами и карбоналитами. Предполагается, что глубокопроникающие сдвиги дренируют мантию, обуславливая проникновение мантийных магм через «горячую» вязко-пластическую матрицу глубинных частей коры на поздних стадиях коллизионного процесса. Термальное состояние нижней коры способствует процессам ее частичного плавления и внедрения продуктов плавления в верхние горизонты вместе с базитами [Федоровский и др., 2010].

3.2.6. На основании детального картирования составлена карта масштаба 1:12500 юго-западной части Ольхонского региона (Зона Крестовский – Широкая) (рис. 21). Принципиально новыми результатами, отраженными на этой карте, являются: 1) выделение Бирхинской вулканоплутонической ассоциации с возрастом около 500 млн лет; 2) обоснование факта широкого распространения минглинга как в дайках, так и в более крупных телах; 3) доказательство широкого распространения инъекционных карбонатных и карбонатно-силикатных пород, к наиболее характерным представителям которых относятся зоны мраморного меланжа и жилы в магматических и метаморфических комплексах [*Скляров и др., 2012*].

3.2.7. В пределах Ольхонской коллизионной системы раннего палеозоя (Западное Прибайкалье) выделено два типа инъекционных карбонатных и карбонатносиликатных пород: синметаморфический мраморный меланж и жильные тела в амфиболитах, габброидах и сиенитах (рис. 22). Для мраморного меланжа характерно присутствие разноразмерных обломков силикатных пород (кристаллические сланцы, гнейсы, метагаббро, граниты). Жильные тела кальцитового, доломитового состава и карбонатно-силикатных пород характеризуются массивной текстурой и мелкозернистым строением. Нередко они ассоциируют с субсинхронными жилами гранитов и дайками долеритов, обнаруживая иногда признаки карбонатно-силикатного минглинга. Для этих жил предполагается внедрение порций карбонатного или карбонатно-силикатного состава на поздних стадиях синметаморфического тектогенеза. По своим изотопно-геохимическим и минералогическим характеристикам эти карбонатные породы отличаются от мантийных карбонатитов, и, скорее всего, их образование связано с плавлением осадочных карбонатных пород в нижней коре в присутствии водного флюида. Процессы сдвигового тектогенеза способствовали дренированию нижней коры и верхней мантии и обеспечивали поступление на верхние уров-



Рис. 24. Модель эволюции забайкальского сегмента ЦАСП в позднем палеозое – мезозое [Donskaya et al., 2013].

Fig. 24. The model of evolution of the Transbaikalian segment of CAFB in the Late Paleozoic – Mesozoic, according to [*Donskaya et al.*, 2013].

ни коры карбонатного материала в виде выплавок и вязко-пластических смесей, равно как и коровых гранитов, а также порций мантийных базитовых расплавов. Инъекционные карбонатные породы описаны и в других метаморфических комплексах, в том числе в каледонидах Норвегии и в пределах Гималайской коллизионной системы [*Скляров и др., 2013*].

3.3. Геодинамика области сочленения Сибирского кратона и Центрально-Азиатского складчатого пояса

3.3.1. Для южного фланга Сибирского кратона обосновано выделение трех основных этапов фанерозойского базитового магматизма. Установлено, что первое событие фиксируется дайками долеритов с возрастом около 500 млн лет, внедрение которых происходило на фоне аккреционно-коллизионных событий, связанных с начальными этапами становления Центрально-Азиатского складчатого пояса, когда на южном фланге Сибирского кратона, выступающем в качестве индентера, возникали области рассеянного растяжения, способствующие внедрению базитовых расплавов в верхние горизонты коры. Позднепалеозойский этап базитового магматизма фиксируется дайками с возрастом около 275 млн лет. Подобные дайки, в совокупности с несколько более древними (290 млн лет) вулканическими образованиями забайкальского сегмента ЦАСП, маркируют процессы растяжения, имевшие место в тылу активной окраины Сибирского континента на фоне субдукции под нее коры Монголо-Охотского океана. Трапповый магматизм раннего мезозоя на юге Сибирского кратона проявлен многочисленными базитовыми интрузиями Ангаро-Тасеевской синеклизы с возрастом 240-245 млн лет. Образование траппов происходило при взаимодействии вещества нижнематийного плюма с материалом слэба Монголо-Охотского океана.

Показано, что более молодой возраст траппов, по сравнению с вышерассмотренными базитами позднего палеозоя (290-275 млн лет), отражает прогрессирующее продвижение слэба под южной окраиной Сибирского кратона (в северо-западном направлении в современных координатах), прекратившееся, по-видимому, после достижения слэбом области распространения вещества Сибирского суперплюма (рис. 23). Сделано предположение о том, что отсутствие последующих магматических событий на юге Сибирского кратона обусловлено тем, что после раннемезозойской активизации произошла окончательная консолидация литосферы рассматриваемого фрагмента кратона, препятствующая развитию в его пределах условий растяжения, благоприятных для внедрения базитовых интрузий [Гладкочуб и др., 2010].

3.3.2. Синтез геологических, геохимических и геохронологических данных по магматическим образованиям как основного, так и кислого состава в пределах северного сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса позволяет предложить следующую геодинамическую модель развития активной континентальной окраины с варьирующимся во времени наклоном погружающегося океанического слэба и влиянием горячей точки мантии (рис. 24) [Donskaya et al., 2013].

В девоне, после завершения раннепалеозойских орогенных событий, началось пологое погружение океанического слэба под венд-раннепалеозойскую окраину Сибирского континента.

Ранне-позднекарбоновый период характеризуется сменой режима растяжения на сжатие, что привело к формированию складчато-надвиговых деформаций, развитию дуплекс-структур и в завершение – к утолщению континентальной коры. На этой стадии произошло формирование автохтонных биотитовых гранитов Ангаро-Витимского батолита в утолщенной континентальной коре.

Позднекарбоновый – раннепермский этап характеризуется деструкцией океанического слэба с откатом его в сторону желоба. В результате этого возникли условия для растяжения континентальной литосферы и проникновения мантийного вещества в верхние горизонты коры. В течение этого периода был сформирован основной объем гранитоидов Ангаро-Витимского батолита, а также щелочные гранитоиды, вулканиты и многочисленные дайки основного и кислого состава Западно-Забайкальского пояса. Формирование магматических образований этого этапа может быть связано с растяжением в пределах утолщенной континентальной коры.

Позднепермский – позднетриасовый период характеризуется разнообразным интрузивным и эффузивным магматизмом над погружающейся под нормальным углом зоной субдукции. Позднепермские – среднетриасовые известково-щелочные гранитоиды Хангайского батолита и позднетриасовые известково-щелочные гранитоиды Хентейского батолита были внедрены вблизи Монголо-Охотской сутуры, в то время как щелочные гранитоиды и бимодальные вулканические серии формировались во внутренней части континента в условиях растяжения над разрушающимся слэбом.

Юрский период характеризуется значительным уменьшением магматической активности в пределах северного сегмента ЦАСП. Возможно, это связано с прекращением субдукции океанической коры Монголо-Охотского океана в западной части океанического бассейна.

Раннемеловой период характеризуется закрытием Монголо-Охотского океана в его восточной части. В Забайкалье и Северной Монголии в течение этого временного интервала начался коллапс Монголо-Охотского орогена и формирование комплексов метаморфических ядер.

3.3.3. Получены результаты, позволяющие определить время проявления основных тектонических пере-



Рис. 25. Байкальская рифтовая система и сопредельные регионы.

Fig. 25. The Baikal rift system and neighbouring regions.

строек в Байкальской рифтовой зоне (рис. 25). Выявлен ранее не описанный эпизод воздымания и расчленения рельефа, имевший место около 20 млн лет назад. Весьма вероятно, что современная структура речной сети на юго-западе Байкальской рифтовой системы начала формироваться именно в результате этого тектонического эпизода. Лавы с возрастом ~8 млн лет в Западном Прихубсугулье заполняли хорошо выраженные речные палеодолины, которые впоследствии были разнесены на разные гипсометрические уровни при вертикальных тектонических движениях по рифтокон-

тролирующим разломам. Таким образом, формирование Хубсугульской рифтовой впадины началось после этого эпизода вулканизма.

Сделан вывод о том, что, несмотря на то, что раннемиоценовые лавы на сегодняшний день находятся на вершинах гор, в момент излияния они заполняли речные долины глубиной не менее 100 м [*Ivanov*, *Demonterova*, 2009].

3.3.4. Получена наиболее полная запись тектонической истории по изучению осадочных кернов, отобранных с подводного Академического хребта в ходе



Рис. 26. Изменение условий осадконакопления на подводном Академическом хребте в результате его воздымания и углубления впадин [*Ivanov*, *Demonterova*, 2009].

Fig. 26. Changes of sedimentation conditions at the underwater Academic ridge which result from its uplift and deepening of basins, according to [*Ivanov*, *Demonterova*, 2009].



Рис. 27. Кристаллическая структура оксиванита.

Октаэдры со штриховкой (M1O₆) заселены 3-валентными катионами, октаэдры без штриховки (M2O₆) заселены 3- и 4-валентными катионами.

Fig. 27. The crystalline structure of oxivanite.

Hatched octahedrons (M1O₆) host three-valence cations; unhatched octahedrons (M2O₆) host three- and four-valence cations.

проекта «Байкал-бурение». В этой записи отчетливо видны три тектонических события, произошедшие около 7, 5 и 0.1 млн лет назад. Первое из них характеризуется увеличением скорости осадконакопления, что, по-видимому, связано с ростом гор, сопутствующим разрастанию рифта от его исторического центра в районе Южно-Байкальской впадины на фланги (рис. 26). В это время, очевидно, началось формирование Хубсугульской впадины. Второе событие, наоборот, маркируется практически двукратным снижением скорости осадконакопления. Столь резкое снижение скорости осадконакопления может быть объяснено своеобразным расположением подводного Академического хребта, с которого отобраны осадочные керны. Второе тектоническое событие отражает смену от стадии «медленного» к стадии «быстрого» рифтогенеза. Третье, наиболее позднее, событие фиксируется по изменению изотопного состава диатомовых и терригенных осадков. Рост ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr отношений связан с увеличением поступления терригенного вещества в озеро в результате увеличения скорости эрозии при росте гор, ускорившемся из-за таяния ледников. Этот рост гор, в частности, привел к прекращению стока из озера Байкал через палеореку Манзурка в реку Лена и появлению современного стока через реку Ангара. По данным термолюминесцентного датирования манзурских осадков в районе поселка Косая Степь сток из Байкала в Лену происходил еще в позднем плейстоцене, приблизительно 100 тыс. лет назад. Таким образом, по данным изучения времени щелочно-базальтовых извержений, положения датированных лав в палео- и современном рельефе, а также анализа скорости осадконакопления во впадинах и состава осадков в Байкальской рифтовой системе фиксируется четыре основных тектонических перестройки – около 20, 7, 5 и 0.1 млн лет назад [Ivanov, Demonterova, 2009].

3.4. НОВЫЕ МИНЕРАЛЫ И ИХ РОЛЬ В РЕКОНСТРУКЦИИ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ

3.4.1. Открыт новый минерал – оксиванит (рис. 27), который получил одобрение Комиссии по новым минералам РМО и утвержден Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации Международной минералогической ассоциации (IMA 2008-044). Решена кристаллическая структура оксиванита и оксиванита-бердесинскиита. Установлено, что она аналогична структуре синтетического высокотемпературного V₃O₅ и подобна структурам синтетических Fe₂TiO₅, CrTi₂O₅, Ti₃O₅, Cr₂TiO₅. Эту структуру можно представить как плотнейшую гексагональную упаковку атомов кислорода, в которой 3/5 октаэдрических интерстиций заселены трех- и четырехвалентными катионами (V^{3+} и V^{4+} в V_3O_5). Связанные ребрами катионсодержащие октаэдры образуют тройные цепочки, вытянутые по [010]. Стержень цепочек составляют октаэдры М1, образующие общие входящие углы и общие ребра с незначительно наклоненными прилегающими октаэдрами M2. Позиции M1 оккупируются трехвалентными, а позиции M2 – трех- и четырехвалентными катионами. В структурном типе оксиванита и бердесинскиита цепочки складываются в лестничноподобную (ступенчатую) конструкцию. Связь цепочек реализуется через общие плоскости прилегающих октаэдров M2 с образованием общих углов с плоскостями октаэдров M1. Лестнично-подобная, ступенчатая морфология связанных цепочек ответственна за моноклинную симметрию оксиванита [Armbruster et al., 2009].

3.4.2. В метаморфических породах слюдянского комплекса Южного Прибайкалья открыт новый минерал купрокалининит CuCr₂S₄ (утвержден КНМ ММА, меморандум 2010-008). Купрокалининит относится к редкой в природе группе минералов, так называемым халькогенидным шпинелям, в которых кислород замещен селеном, теллуром или серой. В последнем случае подгруппа выделяется как сульфошпинели. Особенно редки хромовые сульфошпинели. Купрокалининит – третья хромовая сульфошпинель, открытая в земных породах (рис. 28). При редкости в природе, халькогенидные шпинели интенсивно синтезируются и изучаются в физике и химии твердых тел, поскольку отличаются большим диапазоном и сильной взаимосвязью оптических, магнитных и электрических свойств (ферри-, ферро- и антиферромагнетики, полупроводники, металлы, сверхпроводники). Тиохромат меди, природным аналогом которого является купрокалининит, выделяется среди других сульфошпинелей необычным сочетанием ферромагнетизма с металлической проводимостью, что стабильно привлекает внимание исследователей [Резницкий и др., 2010].

3.4.3. Установлено, что клинопироксены Cr-Vсодержащих параметаморфических пород слюдянского кристаллического (гранулитового) комплекса представлены тройной серией твердых растворов диопсид CaMgSi₂O₆ – космохлор NaCrSi₂O₆ – наталиит NaVSi₂O₆, включающей наряду с тройными смесями бинарные изоморфные ряды. Из них наиболее детально проанализирован непрерывный ряд диопсид-космохлор в диапазоне от Di_{100} до Kos_{94} (Cr_2O_3 30.83 мас. %) (рис. 29). Непрерывный, без разрыва смесимости полный ряд установлен впервые. На основании реакционных взаимоотношений эсколаита с диопсидом сделан вывод, что образование космохлора и высокохромистых членов ряда произошло за счет метаморфического эсколаита в связи с привносом натрия после этапа прогрессивного метаморфизма. Низкая скорость диффузии (амобильность) хрома обусловила незавершенность реакций образования космохлора, неоднородность состава зерен клинопироксенов и совместное присутствие в породах разных членов ряда диопсидкосмохлор. Следовательно, хромистость клинопироксена в метаморфитах лимитируется не непосредственно Р-Т-параметрами процесса и ограниченной





Fig. 28. Ratios between the three chrome sulfospinels common for the Earth rocks.



Рис. 29. Компонентный состав Cr-V-содержащих клинопироксенов слюдянского комплекса (мол. %).

A – соотношение наталиитового, космохлорового и диопсидового миналов. Б – ряд диопсид-космохлор. В – диапазоны диопсид-космохлор, установленные в отдельных монокристальных зернах.

Fig. 29. Composition of Cr-V-bearing clinopyroxenes of the Slyudyanka complex (mol. %).

A – ratio between nataliite, cosmochlore and diopside minals. E – diopside-cosmochlore row. B – diopside-cosmochlore ranges revealed for individual and single-crystal grains.



Рис. 30. Тройные диаграммы для подсистемы Al-V-Cr, показывающие положение окси-хромдравита в позициях Z (*a*) и Y (*b*).

Fig. 30. Triple diagrams for Al-V-Cr subsystem showing the position of oxi-chromedravite in positions Z (*a*) and Y (*b*).



Рис. 31. Зональный кристалл Al-Cr-V-окси-турмалина, иллюстрирующий переходы от окси-ванадиум-дравита к хром- и алюминий-доминантным окси-турмалинам.

Fig. 31. A zonal crystal of Al-Cr-V-oxi-turnaline that illustrates transition from oxi-vanadium-dravite to chrome- and aluminum-dominant oxi-turnalines.

взаимной растворимостью твердого раствора диопсид– космохлор, а кинетическими факторами. Анализ литературных данных по другому типу метаморфических пород, высокобарным, преимущественно апоультрабазитовым, обнаруживает подобный механизм образования космохлора и космохлорсодержащих клинопироксенов – замещение магматического хромита при привносе натрия [*Резницкий и др., 2011*].

3.4.4. В метаморфических породах слюдянского комплекса открыт новый минерал из группы турмалина окси-хромдравит NaCr₃(Cr₄Mg₂)(Si₆O₁₈)(BO₃)₃(OH)₃O. Его отличительными особенностями является преобладание хрома в структурных позициях Y и Z и кислорода в позиции W (рис. 30) [*Bosi et al.*, 2012].

3.4.5. На основе монокристальных рентгеноструктурных исследований произведено уточнение структуры ванадиодравита. В соответствии с новой классификацией и по согласованию с Комиссией по новым минералам и названиям новых минералов изменена формула и уточнено название: окси-ванадиумдравит Na(V₃)(V₄Mg₂)Si₆O₁₈(BO₃)₃(OH)₃O (рис. 31). Из этой же серии окси-турмалинов изучен новый турмалин – железосодержащий хромо-алюмино-повондраит. В окситурмалинах реализуется гетеровалентный компенсационный изоморфизм Mg + O \leftrightarrow Cr,V + OH. Турмалины этого типа являются индикаторами кислородного режима (оксибарометрами) [*Bosi et al.*, 2013a, 2013b].

Перспективы развития лаборатории видятся как в сохранении и совершенствовании методик, которые уже успешно реализуются на базе института, так и в

освоении новых передовых наработок. Среди приоритетов в этом направлении может быть отмечено развитие термохронологии с использованием U-Th-Pb-He метода для датирования неотектонических событий, определения возраста поднятия к поверхности магматических интрузий (и кимберлитовых тел), фиксации начала процессов диагенеза, сопряженного с формированием низкотемпературных рудных месторождений.

Отдельное внимание в работах лаборатории будет уделяться возрождению рудной тематики, направленной на изучение процессов рудогенеза, в том числе ответственных за формирование крупных и гигантских месторождений полезных ископаемых. Как известно, формирование подобных месторождений неразрывно связано как с глубинными процессами, так и с конкретными геодинамическими обстановками (режимами). В связи с этим, изучение вопросов, касающихся геодинамического контроля формирования и размещения месторождений полезных ископаемых на площади Сибирского кратона и в пределах Центрально-Азиатского складчатого пояса, представляется перспективным направлением, способным укрепить баланс между фундаментальными исследованиями и инновационными направлениями, развиваемыми в лаборатории палеогеодинамики.

Всего за период с 2009 по 2013 г. по теме НИР опубликовано 10 монографий, 4 карты, 32 статьи в зарубежных и 80 статей в российских научных журналах. Перечень основных публикаций приводится ниже.

4. Список основных работ по теме НИР «Глубинное строение и геодинамическая эволюция южного фланга Сибирского кратона и прилегающих областей Центрально-Азиатского складчатого пояса», опубликованных лабораториями комплексной геофизики и палеогеодинамики в 2009–2013 гг.

4.1. Монографии

- Байкаловедение: Учебник для студентов естественнонаучных специальностей университетов в 2 кн. Раздел в монографии: Гладчочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Донская Т.В. Глава 4. Геологическое строение и геодинамика Прибайкалья. Новосибирск: Наука, 2012. Кн. 1. 468 с. С. 301–335.
- Бямба Ж., Арвисбаатар Н., Турутанов Е.Х. Глубинное строение Монголии // Геология Монголии. Т. IV. Тектоника литосферных плит. Улаанбаатар: Изд-во АДМОН, 2009. С. 403–425 (Глава в монографии на монгольском языке. 1-е издание).
- Бямба Ж., Арвисбаатар Н., Турутанов Е.Х. Глубинное строение Монголии // Геология Монголии. Т. IV. Тектоника литосферных плит. Улаанбаатар: Изд-во АДМОН, 2012. С. 403–425 (Глава в монографии на монгольском языке. 2-е издание).
- Имаева Л.П., Мельникова В.И., Имаев В.С., Козьмин Б.М., Мельников А.И., Гриб Н.Н. Эволюция сейсмотектонических процессов северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2012. 232 с.
- Никольский Ф.В., Анисимова С.А., Титоренко Т.Н., Гелетий Н.К. Региональная тектоника. Морфология и генезис складчатой структуры Байкало-Патомского нагорья и Приленского плато: Учебное пособие. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного университета, 2013. 72 с.
- *Скляров Е.В., Дорофеева Р.П.* Институт земной коры: люди, события, даты, 1949–2009. Иркутск, ИЗК СО РАН, 2009. 672 с.
- *Турутанов Е.Х.* Строение кайнозойских впадин северо-восточного и юго-западного окончаний Байкальской рифтовой системы по гравиметрическим данным. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2010. 167 с.
- *Турутанов Е.Х.* Морфология базитовых интрузий Ольхонского региона по гравимагнитным данным (Западное Прибайкалье). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. 208 с.
- *Турутанов Е.Х.* Морфология мезозойских гранитных плутонов Монголии по гравиметрическим данным. Иркутск: Изд-во ИрГТУ. 2012. 223 с.
- Чароит. Сиреневое чудо Сибири. Иллюстрированное научно-популярное издание. Иркутск: Изд-во Петрографика, 2013. 192 с.

4.2. Карты

- Скляров Е.В. (отв. ред.), Федоровский В.С. (отв. ред.), Мазукабзов А.М., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Лавренчук А.В., Старикова А.Е., Агатова А.Р., Котов А.Б. Аэрокосмическая геологическая карта юго-западной части Ольхонского региона (Байкал). Зона Крестовский – Широкая. Ольхонский геодинамический полигон. М.: Группа компаний А1 TIS, 2012.
- Федоровский В.С. (отв. ред.), Мазукабзов А.М., Скляров Е.В., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Лавренчук А.В., Изох А.Э., Агатова А.Р., Котов А.Б. Аэрокосмическая геологическая карта юго-западной части зон Черноруд и Томота Ольхонского региона (Байкал). Ольхонский геодинамический полигон. М.: Группа компаний А1 TIS, 2012.
- Федоровский В.С., Скляров Е.В., Мазукабзов А.М., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Лавренчук А.В., Изох А.Э., Агатова А.Р., Котов А.Б. Аэрокосмическая геологическая карта северо-восточной части Приольхонья (Байкал). Зоны Нутгей и Оргойта-Змеиная падь. Ольхонский геодинамический полигон. М.: Группа компаний А1 TIS, 2011.
- Федоровский В.С., Скляров Е.В., Мазукабзов А.М., Котов А.Б., Каргополов С.А., Лавренчук А.В., Старикова А.Е. Геологическая карта массива Тажеран. М.: Группа компаний А1 TIS, 2009.

4.3. СТАТЬИ В ЗАРУБЕЖНЫХ РЕФЕРИРУЕМЫХ ЖУРНАЛАХ

- Anisimova S.A., Gelety N.K., Anisimov A.Y., Dol'nik T.A., de Boisgrollier T., 2012. Sedimentary Precambrian deposits in southwestern Transbaikalia (Siberia): phytoliths content, lateral correlations and geodynamics. Global Geology 15 (3), 85–96.
- Armbruster T., Galuskin E.V., Reznitsky L.Z., Sklyarov E.V., 2009. X-ray structural investigation of the oxyvanite (V₃O₅) berdesinskiite (V₂TiO₅) series: V⁴⁺ substituting for octahedrally coordinated Ti⁴⁺. European Journal of Mineralogy 21 (4), 885–891. http://dx.doi.org/10.1127/0935-1221/2009/0021-1951.
- Armbruster T., Lazic B., Reznitsky L.Z., Sklyarov E.V., 2013. Kyzylkumite, Ti₂V³⁺ O₅(OH): new structure type, modularity and revised formula. *Mineralogical Magazine* 77 (1), 33–44. http://dx.doi.org/10.1180/minmag.2013.077.1.04.
- Blanko D., Kravchinsky V.A., Konstantinov K.M., Kabin K., 2013. Paleomagnetic dating of Phanerozoic kimberlites in Siberia. Journal of Applied Geophysics 88, 139–153. http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.11.002.
- Bosi F., Reznitskii L.Z., Sklyarov E.V., 2013. Oxy-vanadium-dravite, NaV₃(V₄Mg₂)(Si₆O₁₈)(BO₃)₃(OH)₃O: Crystal structure and redefinition of the "vanadium-dravite" tourmaline. *American Mineralogist* 98, 501–505. http://dx.doi.org/10.2138/am.2013.4243.
- *Bosi F., Reznitskii L., Skogby H.,* 2012. Oxy-chromium-dravite, NaCr₃(Cr₄Mg₂)(Si₆O₁₈) (BO₃)₃(OH)₃O, a new mineral species of the tourmaline supergroup. *American Mineralogist* 97, 2024–2030. http://dx.doi.org/10.2138/am.2012.4210.
- Bosi F., Skogby H., Hålenius U., Reznitskii L.Z., 2013. Crystallographic and spectroscopic characterization of Fe-bearing chromo-alumino-povondraite and its relations with oxy-chromium-dravite and oxy-dravite. *American Mineralogist* 98, 1557–1564. http://dx.doi.org/10.2138/am.2013.4447.
- Courtillot V., Kravchinsky V.A., Quidelleur X., Renne P.R., Gladkochub D.P., 2010. Preliminary dating of the Viluy traps (Eastern Siberia): Eruption at the time of Late Devonian extinction events? Earth and Planetary Science Letters 300, 239–245. http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2010.09.045.
- Daoudene Y., Gapais D., Ledru P., Cocherie A., Hocquet S., Donskaya T.V., 2009. The Ereendavaa Range (north-eastern Mongolia): an additional argument for Mesozoic extension throughout eastern Asia. International Journal of Earth Sciences 98, 1381–1393. http://dx.doi.org/10.1007/s00531-008-0412-2.
- de Boisgrollier T., Petit C., Fournier M., Leturmy P., Ringenbach J.-C., San'kov V.A., Anisimova S.A., Kovalenko S.N., 2009. Palaeozoic orogeneses around the Siberian craton: Structure and evolution of the Patom belt and foredeep. *Tectonics* 28, TC1005. http://dx.doi.org/10.1029/2007TC002210.
- Didenko A.N., Vodovozov V.Yu., Pisarevsky S.A., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Mazukabzov A.M., Stanevich A.M., Bibikova E.V., Kirnozova T.I., 2009. Palaeomagnetism and U-Pb dates of the Palaeoproterozoic Akitkan Group (South Siberia) and implication for the pre-Neoproterozoic tectonics. Geological Society of London Special Volume «Palaeoproterozoic Supercontinents and Global Evolution» 23, 224–241. http://dx.doi.org/10.1144/SP323.7.
- Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Pisarevsky S.A., Poller U., Mazukabzov A.M., Bayanova T.B., 2009. Discovery of Archaean crust within the Akitkan orogenic belt of the Siberian craton: new insight into its architecture and history. Precambrian Research 170, 61–72. http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2008.12.003.
- Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Ivanov A.V., 2013. Late Paleozoic Mesozoic subduction-related magmatism at the southern margin of the Siberian continent and the 150 million-year history of the Mongol-Okhotsk Ocean. Journal of Asian Earth Science 62, 79–97. http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.07.023.

D.P. Gladkochub, E.Kh. Turutanov: The deep structure and paleogeodynamics of Siberia and Central Asia...

- Gladkochub D., Donskaya T., 2009. Overview of geology and tectonic evolution of the Baikal-Tuva area. Biosilica in Evolution, Morphogenesis, and Nanobiology (W.E.G. Müller and M.A. Grachev, eds.), Marine Molecular Biotechnology 47, 7–26. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-88552-8_1.
- Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Reddy S.M., Poller U., Bayanova T.B., Mazukabzov A.M., 2009. Palaeoproterozoic to Eoarchaean crustal growth in southern Siberia: a Nd-isotope synthesis. Geological Society of London, Special Volume «Palaeoproterozoic Supercontinents and Global Evolution» 23, 127–143. http://dx.doi.org/10.1144/SP323.6.
- Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Wingate M.T.D., Mazukabzov A.M., Pisarevsky S.A., Sklyarov E.V., Stanevich A.M., 2010. A one-billion-year gap in the Precambrian history of the southern Siberian Craton and the problem of the Transproterozoic supercontinent. American Journal of Sciences 310, 812–825. http://dx.doi.org/10.2475/09.2010.03.
- Gladkochub D.P., Pisarevsky S.A., Donskaya T.V., Ernst R.E., Wingate M.T.D., Söderlund U., Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Hamilton M.A., Hanes J.A., 2010. Proterozoic mafic magmatism in Siberian craton: An overview and implications for paleocontinental reconstruction. Precambrian Research 183, 660–668. http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2010. 02.023.
- Ivanov A.V., Demonterova E.I., 2009. Tectonics of the Baikal rift deduced from volcanism and sedimentation: A review oriented to the Baikal and Hovsgol Lake systems. Biosilica in Evolution, Morphogenesis, and Nanobiology (W.E.G. Müller and M.A. Grachev, eds.), Marine Molecular Biotechnology 47, 27–54. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-88552-8_2.
- Ivanov A.V., Gladkochub D.P., Deverchere J., Ernst R.E., 2013. Introduction to special issue: Geology of the Lake Baikal region. Journal of Asian Earth Sciences 62, 1–3. http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.12.010.
- Ivanov A.V., He H., Yan L., Ryabov V.V., Shevko A.Y., Palesskii S.V., Nikolaeva I.V., 2013. Siberian Traps Large Igneous Province: Evidence for two flood basalt pulses around the Permo-Triassic boundary and in the Middle Triassic, and contemporaneous granitic magmatism. *Earth-Science Reviews* 122, 58–76. http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04. 001.
- Ivanov A.V., He H., Yang L., Nikolaeva I.V., Palesskii S.V., 2009. ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of intrusive magmatism in the Angara-Taseevskaya syncline and its implication for duration of magmatism of Siberian Traps. *Journal of Asian Earth Sciences* 35, 1–12. http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2008.11.006.
- Ivanov A.V., Mazukabzov A.M., Stanevich A.M., Palesskiy S.V., Kozmenko O.N., 2013. Testing the snowball Earth hypothesis for the Ediacaran. Geology 41, 787–790. http://dx.doi.org/10.1130/G34345.1.
- Jolivet M., T. De Boisgrollier, Petit C., Fournier M., Sankov V.A., Ringenbach J.-C., Byzov L., Miroshnichenko A.I., Kovalenko S.N., Anisimova S.V., 2009. How old is the Baikal Rift Zone? Insight from apatite fission track thermochronology. *Tectonics* 28, TC3008. http://dx.doi.org/10.1029/2008TC002404.
- Kovach V., Salnikova E., Wang K-L., Jahn B-M., Chiu H-Y., Reznitskiy L., Kotov A., Iizuka Y., Chung S-L., 2013. Zircon ages and Hf isotopic constraints on sources of clastic metasediments of the Slyudyansky high-grade complex, southeastern Siberia: Implication for continental growth and evolution of the Central Asian Orogenic Belt. Journal of Asian Earth Sciences 62, 18–36. http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.08.008.
- Kravchinsky V.A., Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Harbert W.P., 2010. Paleomagnetism of the Precambrian Eastern Sayan rocks: Implications for the Ediacaran-Early Cambrian paleogeography of the Tuva-Mongolian composite terrane. *Tectonophysics* 486 (1–4), 65–80. http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2010.02.010.
- Li Z.X., Bogdanova S.V., Collins A.S., Davidson A., De Waele B., Ernst R.E., Fitzsimons I.C.W., Fuck R.A., Gladkochub D.P., Jacobs J., Karlstrom K.E., Lu S., Natapov L.M., Pease V., Pisarevsky S.A., Thrane K., Vernikovsky V.A., 2009. How not to assemble a Precambrian supercontinent. A reply to J.D.A. Piper. Precambrian Research 174, 208–214. http://dx.doi. org/10.1016/j.precamres.2009.06.007.
- Pisarevsky S.A., Gladkochub D.P., Konstantinov K.M., Mazukabzov A.M., Stanevich A.M., Murphy J.B., Tait J.A., Donskaya T.V., 2013. Konstantinov I.K. Paleomagnetism of Cryogenian Kitoi mafic dykes in South Siberia: Implications for Neoproterozoic paleogeography. Precambrian Research 231, 372–382. http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2013.04. 007.
- Powerman V., Shatsillo A., Coe R., Zhao X., Gladkochub D., Buchwaldt R., Pavlov V., 2013. Palaeogeography of the Siberian platform during middle Palaeozoic Times (~450–400Ma): new palaeomagnetic evidence from the Lena and Nyuya rivers. *Geophysical Journal International* 194, 1412–1440. http://dx.doi.org/10.1093/gji/ggt197.
- Radziminovich N.A., Gileva N.A., Melnikova V.I., Ochkovskaya M.G., 2013. Seismicity of the Baikal rift system from regional network observations. Journal Of Asian Earth Sciences 62, 146–161. http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2012. 10.029.
- Rojas-Agramonte Y., Kröner A., Demoux A., Xia X., Wang W., Donskaya T., Liu D., Sun M., 2011. Detrital and xenocrystic zircon ages from Neoproterozoic to Palaeozoic arc terranes of Mongolia: Significance for the origin of crustal fragments in the Central Asian Orogenic Belt. Gondwana Research 19 (3), 751–763. http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2010.10.004.
- Safonova I., Seltman R., Gladkochub D., Kim J., Komiya T., Kroener A., Schulmann K., Sun M., Xiao W., 2011. A new concept of continental construction in the Central Asian orogenic belt (compared to actualistic examples from the Western Pacific). Episodes 34 (3), 186-196.
- Wang T., Zheng Y., Zhang J., Zeng L., Donskaya T., Guo L., Li J., 2011. Pattern and kinematic polarity of late Mesozoic extension in continental NE Asia: perspectives from metamorphic core complexes. *Tectonics* 30, TC6007. http://dx.doi.org/ 10.1029/2011TC002896.
- Wingate M.T.D., Pisarevsky S.A., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Konstantinov K.M., Mazukabzov A.M., Stanevich A.M., 2009. Geochronology and paleomagnetism of mafic igneous rocks in the Olenek Uplift, northern Siberia: Implications for

Mesoproterozoic supercontinents and paleogeography. *Precambrian Research* 170, 256–266. http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2009.01.004.

4.4. СТАТЬИ В РОССИЙСКИХ РЕФЕРИРУЕМЫХ ЖУРНАЛАХ

- *Ivanov A.V.*, 2010. Deep-level geodynamics: boundaries of the process according to geochemic and petrologic data. *Geodynamics & Tectonophysics* 1 (1), 87–102.
- *Reznitsky L.Z., Sklyarov E.V., Armbruster T., Suvorova L.F., Ushchapovskaya Z.F., Kanakin S.V.,* 2013. Kyzylkumite: A finding in the Southern Baikal Region, Russia and Refinement of Its Crystal Chemical Formula. *Geology of Ore Deposits* 55 (8), 107–120.
- Reznitsky L.Z., Sklyarov E.V., Armbruster T., Ushchapovskaya Z.F., Galuskin E.V., Polekhovsky Yu.S., Barash I.G., 2010. Oxyvanite, V₃O₅, a New Mineral Species and the Oxyvanite–Berdesinskiite V₂TiO₅ Series from Metamorphic Rocks of the Slyudyanka Complex, Southern Baikal Region. Geology of Ore Deposits 52 (7), 1–10.
- *Sklyarov E.V., Rasskazov S.V., Yasnygina T.A.,* 2010. Cenozoic Continental Rifting Symposium dedicated to the memory of Academician N.A. Logatchev, Irkutsk, Russia, June 7–11, 2010. *Geodynamics & Tectonophysics* 1 (3), 322–329.
- Stanevich A.M., Mashchuk I.M., Mazukabzov A.M., Postnikov A.A., Kornilova T.A., 2010. The southern fragment of the Siberian craton: "landscape" history over two billion years. *Geodynamics & Tectonophysics* 1 (1), 103–118.
- Агеенков Е.В., Давыденко Ю.А., Фомицкий В.А. Влияние неосевого расположения приемной и питающей электрических линий на результаты дифференциально-нормированного метода электроразведки // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 1. С. 150–157.
- Ананьин Л.В., Мордвинова В.В. Строение земной коры и верхов мантии вдоль Байкальской рифтовой системы по телесейсмическим данным // Доклады АН. 2012. Т. 444. № 4. С. 440–443.
- Ананьин Л.В., Мордвинова В.В., Гоць М.Ф., Канао М., Суворов В.Д., Татьков Г.И., Тубанов Ц.А. Скоростное строение коры и верхней мантии Байкальской рифтовой зоны по долговременным наблюдениям широкополосных сейсмостанций // Доклады АН. 2009. Т. 428. № 2. С. 211–214.
- Басов А.Д., Черных Е.Н. О наблюдении среднесрочного предвестника землетрясения в Иркутске // Физика Земли. 2010. № 1. С. 80–89.
- Бахмутов В.Г., Гладкочуб Д.П., Шпира В.В. Возрастная позиция, геодинамическая специфика и палеомагнетизм меловых палеоценовых интрузивных комплексов западного побережья Антарктического полуострова и Аргентинских островов // Геофизический журнал. 2013. № 2. С. 22–31.
- Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Вингейт М.Т.Д., Мазукабзов А.М., Писаревский С.А., Корнилова Т.А. Изотопное датирование гибридных пород из зон эндоконтакта как способ выяснения возраста внедрения базитов (южный фланг Сибирского кратона) // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 11. С. 1714–1730.
- Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Иванов А.В., Эрнст Р., Мазукабзов А.М., Писаревский С.А., Ухова Н.А. Фанерозойский базитовый магматизм южного фланга Сибирского кратона и его геодинамическая интерпретация // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 9. С. 1222–1239.
- Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Федоровский В.С., Мазукабзов А.М., Ларионов А.Н., Сергеев С.А. Ольхонский метаморфический террейн Прибайкалья: раннепалеозойский композит фрагментов неопротерозойской активной окраины // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 571–588.
- Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Эрнст Р., Мазукабзов А.М., Скляров Е.В., Писаревский С.А., Вингейт М., Седерлунд У. Базитовый магматизм Сибирского кратона в протерозое: обзор основных этапов и их геодинамическая интерпретация // Геотектоника. 2012. № 4. С. 28–41.
- Гладкочуб Д.П., Костровицкий С.И., Донская Т.В., ДеВаэле Б., Мазукабзов А.М. Возраст цирконов из алмазоносных лампроитов Восточного Саяна как индикатор известных и ранее не установленных эндогенных событий на юге Сибирского кратона // Доклады АН. 2013. Т. 450. № 5. С. 567–572.
- Гладкочуб Д.П., Костровицкий С.И., Донская Т.В., Мазукабзов А.М., ДеВаэле Б. Возраст цирконов из алмазоносных лампроитов Восточного Саяна как индикатор известных и ранее не установленных эндогенных событий на юге Сибирского кратона // Доклады АН. 2013. Т. 450. № 5. С. 567–572.
- Гладкочуб Д.П., Николь Г., Станевич А.М., Мазукабзов А.М., Скляров Е.В., Писаревский С.А., Донская Т.В., Тайт Дж. Возраст и источники вещества позднедокембрийских осадочных толщ Южного Прибайкалья: результаты U-Pb (LA-ICP-MS) датирования детритовых цирконов // Доклады АН. 2013. Т. 450. № 3. С. 318–322.
- Гладкочуб Д.П., Писаревский С.А., Мазукабзов А.М., Седерлунд У., Скляров Е.В., Донская Т.В., Эрнст Р.Е., Станевич А.М. Первые свидетельства палеопротерозойского постколлизионного базитового магматизма в Присаянском выступе фундамента Сибирского кратона // Доклады АН. 2013. Т. 450. № 4. С. 440–444.
- Гладкочуб Д.П., Писаревский С.А., Эрнст Р., Донская Т.В., Седерлунд У., Мазукабзов А.М., Хейнс Дж. Крупная магматическая провинция (КМП) с возрастом ~1750 млн лет на площади Сибирского кратона // Доклады АН. 2010. Т. 430. № 5. С. 654–657.
- Гладкочуб Д.П., Станевич А.М., Мазукабзов А.М., Донская Т.В., Писаревский С.А., Николь Г., Мотова З.Л., Корнилова Т.А. Ранние этапы развития Палеоазиатского океана: данные по LA-ICP-MS датированию детритовых цирконов из позднедокембрийских толщ южного фланга Сибирского кратона // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 10. С. 1472–1490.

D.P. Gladkochub, E.Kh. Turutanov: The deep structure and paleogeodynamics of Siberia and Central Asia...

- Гладкочуб Д.П., Станевич А.М., Травин А.В., Мазукабзов А.М., Константинов К.М., Юдин Д.С., Корнилова Т.А. Уджинский мезопротерозойский палеорифт (север Сибирского кратона): новые данные о возрасте базитов, стратиграфии и микрофитологии // Доклады АН. 2009. Т. 425. № 5. С. 642–648.
- Голубев В.А. Геофизические данные об отсутствии позднекайнозойских мантийных интрузий в земной коре под Байкальской впадиной // Доклады АН. 2009. Т. 426. № 2. С. 235–239.
- *Голубев В.А.* Тепловое поле и глубины очагов землетрясений Байкальской рифтовой зоны // Доклады АН. 2010. Т. 433. № 5. С. 641–644.
- Гордиенко И.В., Ковач В.П., Елбаев А.Л., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Резницкий Л.З., Яковлева С.З., Анисимова И.В. Возраст и условия формирования коллизионных гранитоидов Джидинской зоны Центрально-Азиатского складчатого пояса, Юго-Западное Забайкалье // Петрология. 2012. Т. 20. № 1. С. 45–65.
- Давыденко Ю.А., Давыденко А.Ю., Куприянов И.С., Пестерев И.Ю., Попков П.А., Слепцов С.В., Яковлев С.В. Эффект интеграции робастного регрессионного анализа с инверсией для переходных процессов в методе срединного градиента при изучении трубок взрыва на Анабарском щите // Записки горного института. 2013. Т. 200. С. 28–33.
- Демонтерова Е.И., Иванов А.В., Карманов Н.С. Базальтовые игнимбритоподобные породы вулкана Сайхан (Северо-Западный Хангай, Монголия) // Вулканология и сейсмология. 2009. № 4. С. 44–52.
- Демонтерова Е.И., Иванов А.В., Резницкий Л.З., Беличенко В.Г., Хунг Ц.Х., Чунг С.Л., Иизука Йо., Ванг К.Л. История формирования Тувино-Монгольского массива по данным U–Pb-датирования методом LA-ICP-MS детритовых цирконов из песчаника дархатской серии (Западное Прихубсугулье, Северная Монголия) // Доклады АН. 2011. Т. 441. № 3. С. 358–362.
- Добрецов Н.Л., Буслов М.М., Де Граве Й., Скляров Е.В. Взаимосвязь магматических, осадочных и аккреционноколлизионных процессов на Сибирской платформе и ее складчатом обрамлении // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 10. С. 1451–1471.
- Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Пресняков С.Л., Баянова Т.Б. Палеопротерозойские гранитоиды чуйского и кутимского комплексов (юг Сибирского кратона): возраст, петрогенезис и геодинамическая природа // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 3. С. 371–389.
- Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Федоровский В.С., Мазукабзов А.М., Чо М., Чонг В., Ким Дж. Синметаморфические гранитоиды (~490 млн лет) – индикаторы аккреционной стадии в эволюции Ольхонского террейна (Западное Прибайкалье) // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 10. С. 1543–1561.
- Зорин Ю.А., Скляров Е.В., Беличенко В.Г., Мазукабзов А.М. Механизм развития системы островная дуга задуговый бассейн и геодинамика Саяно-Байкальской складчатой области в позднем рифее – раннем палеозое // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 3. С. 209–226.
- Иванов А.В. Взаимодействие мантийных расплавов с корой при их подъеме к поверхности: причина и следствие // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т. З. № 1. С. 19–26.
- Иванов А.В., Демонтерова Е.И. Растяжение в Байкальском рифте и глубина формирования базальтовых магм // Доклады АН. 2010. Т. 435. № 4. С. 510–515.
- Имаева Л.П.,. Мельникова В.И., Имаев В.С. Сейсмотектоническая деструкции земной коры северо-восточного фланга Байкальской рифтой зоны // Доклады АН. 2012. Т. 443. № 4. С. 492–494.
- Кожевников В.М., Соловей О.А. Трехмерная модель мантии Центральной Азии по данным фазовых скоростей волн Рэлея // Вулканология и сейсмология. 2010. № 4. С. 30–39.
- Константинов К.М., Томшин М.Д., Гладкочуб Д.П., Васильева А.Е. Палеомагнитные и петрогеохимические исследования раннемезозойских базитов бассейна р. Уджа (северо-восток Сибирской платформы) // Литосфера. 2012. № 3. С. 80–98.
- Котов А.Б., Мазукабзов А.М., Сковитина Т.М., Великославинский С.Д., Сорокин А.А., Сорокин А.П. Структурная эволюция и геодинамическая позиция Гонжинского блока (Верхнее Приамурье) // Геотектоника. 2013. № 5. С. 48–60.
- Котов А.Б., Мазукабзов А.М., Сковитина Т.М., Сорокин А.П., Великославинский С.Д., Сорокин А.А. Структурная эволюция Гонжинского блока Аргун-Идермегского супертеррейна Центрально-Азиатского складчатого пояса // Доклады АН. 2013. Т. 448. № 5. С. 563–566.
- Левицкий В.И., Резницкий Л.З., Сальникова Е.Б., Левицкий И.В., Котов А.Б., Бараш И.Г., Яковлева С.З., Анисимова И.В., Плоткина Ю.В. Возраст и происхождение Китойского месторождения силлиманитовых сланцев (Восточная Сибирь) // Доклады АН. 2010. Т. 431. № 3. С. 386–391.
- Лысак С.В. Термальная эволюция, геодинамика и современная геотермальная активность литосферы Китая // Геология и геофизика. 2009. Т. 40. № 9. С. 1058–1071.
- Мазукабзов А.М., Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Падерин И.П. Геодинамика Западно-Забайкальского сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса в позднем палеозое // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 615–628.
- Мазукабзов А.М., Скляров Е.В., Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Федоровский В.С. Комплексы метаморфических ядер Забайкалья: обзор // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2. № 2. С. 95–125.
- *Мельникова В.И., Гилева Н.А., Арефьев С.С., Быкова В.В., Середкина А.И.* Култукское землетрясение 2008г. с *M*_w=6.3 на юге Байкала: напряженно-деформированное состояние очаговой области по данным об афтершоках // *Физика Земли.* 2013. № 4. С. 1–15.

- Мельникова В.И., Гилева Н.А., Имаев В.С., Радзиминович Я.Б., Тубанов Ц.А. Особенности сейсмических активизаций Среднего Байкала в 2008 – 2011 годах // Доклады АН. 2013. Т. 453. № 6. С. 1–6.
- *Мельникова В.И., Гилева Н.А., Масальский О.К., Радзиминович Я.Б., Радзиминович Н.А.* К вопросу об условиях генерации сильных землетрясений в Южном Байкале // Доклады АН. 2009. Т. 429. № 3. С. 1–5.
- Мельникова В.И., Радзиминович Я.Б., Гилева Н.А., Радзиминович Н.А., Папкова А.А. Балейское землетрясение 6 января 2006 г.: отражение современной тектонической активности Восточного Забайкалья // Доклады АН. 2011. Т. 437. № 6. С. 828–832.
- Мордвинова В.В., Артемьев А.А. Трехмерная модель юга Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий по объемным волнам // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 6. С. 887–904.
- Наговицин К.Е., Станевич А.М., Корнилова Т.А. Стратиграфическое положение и возраст комплекса TAPPANIA содержащих протерозойских ископаемых биот Сибири // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 11. С. 1531–1538.
- Немеров В.К., Станевич А.М., Развозжаева Э.А., Будяк А.Е., Корнилова Т.А. Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах Байкало-Патомского региона // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 729–747.
- Патон М.Т., Иванов А.В., Фиорентини М.Л., МакНаугтон Н.Ж., Мудровская И., Резницкий Л.З., Демонтерова Е.И. Позднепермские и раннетиасовые магматические импульсы в Ангаро-Тасеевской синклинали, Южно-Сибирские траппы и их возможное влияние на окружающую среду // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 9. С. 1298–1309.
- Радзиминович Н.А., Очковская М.Г. Выделение афтершоковых и роевых последовательностей землетрясений Байкальской рифтовой зоны // Geodynamics & Tectonophysics. 2013. Т. 4. № 2. С. 169–186.
- Радзиминович Я.Б., Мельникова В.И., Середкина А.И., Гилева Н.А., Радзиминович Н.А., Папкова А.А. Землетрясение 6 января 2006 г. (Мw=4.5): редкий случай проявления сейсмической активности в Восточном Забайкалье // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 10. С. 1430–1444.
- Резницкий Л.З., Скляров Е.В., Армбрустер Т., Ущаповская З.Ф., Галускин Е.В., Полеховский Ю.С., Бараш И.Г. Новый минерал оксиванит V₃O₅ и изоморфный ряд оксиванит–бердесинскиит V₂TiO₅ в метаморфических породах слюдянского комплекса (Южное Прибайкалье) // Записки РМО. 2009. № 3. С. 70–81.
- Резницкий Л.З., Скляров Е.В., Галускин Е.В. Непрерывный изоморфный ряд диопсид-космохлор CaMgSi₂O₆– NaCrSi₂O₆ в метаморфических породах слюдянского комплекса // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 1. C. 51–65.
- Резницкий Л.З., Скляров Е.В., Ущаповская З.Ф., Суворова Л.Ф., Полеховский Ю.С., Дзержановский П., Бараш И.Г. Купрокалининит CuCr₂S₄ – новая сульфошпинель из метаморфических пород слюдянского комплекса (Южное Прибайкалье) // Записки РМО. 2010. № 6. С. 65–75.
- Резницкий Л.З., Скляров Е.В., Армбрустер Т, Суворова Л.Ф., Ущаповская З.Ф., Канакин С.В. Кызылкумит: находка в Южном Прибайкалье (Россия), уточнение кристаллохимической формулы // Записки РМО. 2013. № 2. С. 107– 120.
- Резницкий Л.З., Травин А.В., Беличенко В.Г., Школьник С.И., Бараш И.Г., Летникова Е.Ф. ⁴⁰Аг/³⁹Аг возраст полифациального метаморфизма осадочно-вулканогенных толщ Тункинских Гольцов (Восточный Саян) // Доклады АН. 2013. Т. 448. № 6. С. 684–688.
- Сапожников А.Н., Канева Е.В., Черепанов Д.И., Суворова Л.Ф., Левицкий В.И., Иванова Л.А., Резницкий Л.З. Владимиривановит Na₆Ca₂[Al₆Si₆O₂₄](SO₄,S₃,Cl)₂·H₂O – новый минерал из группы содалита // Записки РМО. 2011. № 5. С. 36–45.
- Середкина А.И. Скоростные неоднородности земной коры и верхней мантии и сейсмические структуры центральной части Азии: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Иркутск. 2013. 22 с.
- Середкина А.И., Мельникова В.И. Тензор сейсмического момента прибайкальских землетрясений по поверхностным волнам // Доклады АН. 2013. Т. 451. № 1. С. 91–94.
- Скляров Е.В., Солотчина Э.П., Вологина Е.Г., Игнатова Н.В., Изох О.П., Кулагина Н.В., Склярова О.А., Солотчин П.А., Столповская Н.В., Ухова Н.Н., Федоровский В.С., Хлыстов О.М. Детальная летопись климата голоцена из карбонатного разреза соленого озера Цаган-Тырм (Западное Прибайкалье) // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 3. С. 303–328.
- Скляров Е.В., Федоровский В.С., Котов А.Б., Лавренчук А.В., Мазукабзов А.М., Левицкий В.И., Сальникова Е.Б., Старикова А.Е., Яковлева С.З., Анисимова И.В., Федосеенко А.М. Карбонатиты в коллизионных обстановках и квазикарбонатиты Ольхонской коллизионной системы // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 12. С. 1405–1423.
- Скляров Е.В., Федоровский В.С., Котов А.Б., Лавренчук А.В., Мазукабзов А.М., Старикова А.Е. Инъекционные карбонатные и силикатно-карбонатные комплексы в коллизионных системах на примере Западного Прибайкалья, Россия) // Геотектоника. 2013. № 3. С. 58–77.
- Станевич А.М., Мазукабзов А.М., Корнилова Т.А., Максимова Е.Н. Минерализованная микробиота улунтуйской свиты неопротерозоя // Литология и полезные ископаемые. 2012. № 1. С. 98–107.
- Станевич А.М., Максимова Е.Н., Корнилова Т.А., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Донская Т.В. Микрофоссилии арымасской и дебенгдинской свит рифея Оленекского поднятия: возраст и предполагаемая природа // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2009. № 1. С. 45–58.

D.P. Gladkochub, E.Kh. Turutanov: The deep structure and paleogeodynamics of Siberia and Central Asia...

- *Турутанов Е.Х.* Ангаро-Витимский батолит: форма и размеры по гравиметрическим данным // Доклады АН. 2011. Т. 440. № 6. С. 815–818.
- *Турутанов Е.Х.* Состав и морфология крупных плотностных неоднородностей земной коры фактор влияния на сейсмическую активность // Отечественная геология. 2012. № 3. С. 66–72.
- Федоровский В.С., Скляров Е.В. Ольхонский геодинамический полигон (озеро Байкал): аэрокосмические данные высокого разрешения и геологические карты нового поколения // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1. № 4. С. 331–418.
- Федоровский В.С., Скляров Е.В., Изох А.Э., Котов А.Б., Лавренчук А.В., Мазукабзов А.М. Сдвиговый тектогенез и щелочно-базитовый магматизм в коллизионной системе каледонид Западного Прибайкалья // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 682–700.
- Школьник С.И., Бараш И.Г., Беличенко В.Г., Летникова Е.Ф. Высокоглиноземистые венд-кембрийские отложения Тункинских гольцов (Восточный Саян) // Доклады АН. 2011. Т. 436. № 2. С. 253–257.
- Школьник С.И., Беличенко В.Г., Резницкий Л.З. Высокомагнезиальные пикрит-базальтовые ассоциации Тункинского террейна (Байкало-Хубсугульский регион) как индикатор спрединга окраинного бассейна // Геология и геофизика. 2013. № 2. С. 203–218.
- Школьник С.И., Беличенко В.Г., Резницкий Л.З., Бараш И.Г. Фрагмент зоны задугового палеоспрединга в Тункинском террейне // Доклады АН. 2011. Т. 436. № 1. С. 109–113.
- Школьник С.И., Резницкий Л.З., Бараш И.Г. Возможность диагностики задуговых палеобассейнов по высокоградным ортометаморфитам (на примере основных кристаллосланцев Слюдянского кристаллического комплекса, Южное Прибайкалье) // Геохимия. 2011. № 12. С. 1253–1257.
- Школьник С.И., Резницкий Л.З., Беличенко В.Г., Бараш И.Г. Геохимия, вопросы петрогенезиса и геодинамическая типизация метавулканитов Тункинского террейна (Байкало-Хубсугульский регион) // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 9. С. 1013–1024.
- Шохонова М.Н., Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Падерин И.П. Палеопротерозойские базальтоиды Северо-Байкальского вулканоплутонического пояса Сибирского кратона: возраст и петрогенезис // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 8. С. 1049–1072.



Гладкочуб Дмитрий Петрович, докт. геол.-мин. наук, директор института Институт земной коры СО РАН 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия ⊠ e-mail: dima@crust.irk.ru

Gladkochub, Dmitry P., Doctor of Geology and Mineralogy, Director of the Institute Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS 128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia ⊠ e-mail: dima@crust.irk.ru



Турутанов Евгений Хрисанфович, канд. геол.мин.наук, зав. лабораторией комплексной геофизики Институт земной коры СО РАН 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия Teл.: 8(3952)428792; email: tur@crust.irk.ru

Turutanov, Evgeni Kh., Candidate of Geology and Mineralogy, Head of Laboratory of integrated Geophysics Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS 128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia Tel.: 8(3952)428792; email: tur@crust.irk.ru PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2014 VOLUME 5 ISSUE 1 PAGES 81-100

http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0118



ISSN 2078-502X

PERIODIZATION OF RECENT AND LATE PLEISTOCENE – HOLOCENE GEODYNAMIC AND PALEOCLIMATIC PROCESSES

S. V. Rasskazov, K. G. Levi

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: Based on comparative analyses of spatial and temporal patterns of high- and medium-potassic basaltic eruptions in the Central Mongolia and marine survey records of Sr isotopes, it is revealed that the start of the recent geodynamic stage in the Central Mongolia correlates with the starting point of its global manifestation, which gives an evidence of a close relationship between magmatic occurrences in the region under study and processes of global convergence. The magmatic occurrences are considered as representing the recent geodynamic evolution of the past 90 Ma with milestones of ~66, 40–37, ~32 and 17–15 Ma ago. Global changes, except those ~32 Ma ago, are shown in marine records of Sr isotopes. The Late Plestocene – Holocene natural and climate setting is reconstructed from radiocarbon datings of various geological and paleobiological objects. Changes of the natural environment and climate of the Northern hemisphere are plotted with account of strong magma eruptions, attacks of asteroids and meteorites, changes of lithological compositions of sedimentary complexes and species compositions of fauna at the given time interval.

Key words: Cenozoic, Central Asia, geochronology, cyclicity, volcanism, paleoclimate.

Citation: *Rasskazov S.V., Levi K.G.* 2014. Periodization of recent and Late Pleistocene – Holocene geodynamic and paleoclimatic processes. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (1), 81–100. doi:10.5800/GT-2014-5-1-0118.

ПЕРИОДИЗАЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ И ПОЗДНЕПЛЕЙСТОЦЕН-ГОЛОЦЕНОВЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ И ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

С. В. Рассказов, К. Г. Леви

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация: Приведены результаты исследований, выполненных в лаборатории изотопии и геохронологии и лаборатории кайнозоя ИЗК СО РАН в рамках проектов СО РАН: ИМП № 77 «Изучение закономерностей проявления опасных природных процессов в исторически обозримом прошлом для разработки основ прогноза их поведения на ближайшие десятилетия» (РК 01201282598) и Пр. VIII.69.1. «Факторы, определяющие изменение среды и климата Центральной Азии в кайнозое». На основе сравнительного анализа пространственно-временного распределения высокои умеренно калиевых базальтовых извержений в Центральной Монголии и морских записей изотопов Sr выявлено соответствие начала новейшего геодинамического этапа в Центральной Монголии точке отсчета его глобального выражения, свидетельствующее о тесной связи магматических событий региона с глобальными процессами конвергенции. Эти магматические события рассматриваются как представительные для новейшей геодинамической эволюции литосферы за последние 90 млн лет, в ходе которой определена важнейшая роль рубежей ~66, 40–37, ~32 и 17–

Rasskazov S.V., Levi K.G.: Periodization of recent and Late Pleistocene – Holocene geodynamic and paleoclimatic processes

15 млн лет назад. Происходившие глобальные изменения, за исключением рубежа ~32 млн лет назад, запечатлены в морских записях изотопов Sr. Из анализа радиоуглеродного датирования различных геологических и палеобиологических объектов восстановлена природно-климатическая обстановка позднего плейстоцена и голоцена. Построена кривая, отражающая изменения природной среды и климата Северного полушария с учетом проявления мощных вулканических извержений и астероидно-метеоритных атак, изменение литологического состава осадочных комплексов и видового состава фауны на заданном временном интервале.

Ключевые слова: кайнозой, Центральная Азия, геохронология, изотопы, цикличность, вулканизм, палеоклимат.

1. Введение

По проблеме периодизации геодинамических и палеоклиматических процессов проводятся систематические исследования в лаборатории изотопии и геохронологии (рис. 1) и в лаборатории кайнозоя (рис. 2). В первой получены новые результаты при изучении вулканизма новейшего геодинамического этапа, во второй – при изучении различных палеоклиматических процессов позднего плейстоцена и голоцена.

Лаборатория неотектоники и геоморфологии (ныне – лаборатория кайнозоя) ИЗК СО РАН была создана в 1968 г. членом-корреспондентом АН СССР Н.А. Флоренсовым. С 1973 г. ее возглавлял академик Н.А. Логачев, а с 1986 г. – д.г.-м.н. Г.Ф. Уфимцев. Сотрудники лаборатории были активными участниками создания 15-томной монографии «История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока», и трое из них – Н.А. Флоренсов, Н.А. Логачев и О.М. Адаменко – были удостоены в 1978 г. Государственной премии СССР. Г.Ф. Уфимцев в 1994 г. за труды по географии Азии награжден Русским географическим обществом золотой медалью им. Н.М. Пржевальского. Лабораторией выполнены монографические обобщения по мезокайнозойской тектонике юга Восточной Сибири, морфотектонике и морфолитодинамике Байкальской рифтовой зоны, новейшей тектонике востока России, Внутренней Азии и Евразии в целом. В настоящее время научные исследования коллектива лаборатории проводятся в рамках Междисциплинарного интеграционного проекта фундаментальных исследований СО РАН № 77 «Изучение закономерностей проявления опасных природных процессов в исторически обозримом прошлом для разработки основ прогноза их поведения на ближайшие десятилетия» (РК 01201282598), призванных решать проблемы глобальных и региональных природно-климатических изменений, а также в области геологии и стратиграфии четвертичных отложений рифтовых долин Восточной Сибири. Лаборатория выполняет роль координационного центра в деятельности Ассоциации геоморфологов России, а ее сотрудники проводят совместные научные исследования с коллегами из Улан-Удэ, Новосибирска, Барнаула, Москвы и Санкт-Петербурга, с учеными Италии, Англии, Канады, Китая, ведут преподавательскую деятельность в Иркутском госпедуниверситете и Иркутском госуниверситете.

В 1996 г. группа сотрудников лаборатории неотектоники и геоморфологии объединилась с изотопной группой Аналитического центра ИЗК СО РАН в лабораторию изотопии и геохронологии. Изотопную группу возглавлял д.г.-м.н., профессор геохимии С.Б. Брандт, который в 1970–1980-х гг. организовал измерения возраста пород калий-аргоновым, а затем – рубидий-стронциевым и свинец-свинцовым методами. В 1999 г. лаборатория изотопии и геохронологии явилась базовой для приобретения масс-спектрометра с термической ионизацией фирмы Finnigan MAT (модель 262) первого прибора Байкальского аналитического центра коллективного пользования за счет инвестиционного кредита Немецкого банка. Лабораторией проводились работы по темам: «Источники магм в эволюции кайнозойских континентальных рифтовых систем» (1996 г.), «Изотопно-геохимическое и геохронологическое обоснование геодинамических моделей» (1997–1998 гг.), «Реконструкция палеогеодинамических обстановок Центрально-Азиатского складчатого пояса (северо-восточный сегмент); изотопно-геохимическое и геохронологическое обоснование геодинамических моделей» (1999–2001 гг.); «Геодинамические и термохронологические модели по изотопно-геохимическим данным» (2002-2003 гг.); «Магматизм, литогенез и сравнительная геохронология мезокайнозоя Внутренней и Восточной Азии» (2004-2006 гг.); «Эволюция седиментогенеза, биоценозов, магматизма и рудообразования в мезозое и кайнозое Внутренней и Восточной Азии» (2007–2009 гг.), «Изучение вулканизма, осадконакопления и экосистем Азии для обоснования рубежей важнейших структурных перестроек позднего мезозоя и кайнозоя» (2010-2012 гг.). В рифтовых системах Байкальской, Восточно-Африканской и Рио-Гранде выполнялись совместные проекты с учеными США (Массачусетский технологический институт, Смитсоновский институт, Геологическая служба, другие организации), Бельгии (Брюссельский университет, Королевский музей Центральной Африки), Монголии (Исследовательский центр по астрономии и геофизике МАН), Китая (Институт геологии и геофизики КАН). Проводились работы на континентальной окраине Восточной Азии и в Тянь-Шане. Поддерживались



Рис. 1. Лаборатория изотопии и геохронологии.

Первый ряд: к.х.н. А.П. Чебыкин, Е.Н. Воднева, к.г.-м.н. А.М. Ильясова, д.г.-м.н. С.В. Рассказов – зав. лабораторией. Второй ряд: К.В. Ершов, к.г.-м.н. Т.А. Ясныгина, к.г.-м.н. И.С. Чувашова, к.г.-м.н. Н.Н. Фефелов. Третий ряд: М.Е. Маркова, Н.В. Заруднева, к.г.-м.н. Е.В. Саранина, Т.В. Рассказова, С.С. Бранд.

Fig. 1. The staff of the Laboratory of Isotopy and Geochronology.

1st row – A.P. Chebykin, E.N. Vodneva, A.M. Il'yasova, S.V. Rasskazov (Head of the Laboratory); 2nd row – K.V. Ershov, T.A. Yasnygina, I.S. Chuvashova, N.N. Fefelov; 3rd row – M.E. Markova, N.V. Zarudneva, E.V. Saranina, T.V. Rasskazova, S.S. Brand

контакты с сотрудниками институтов СО и ДВО РАН, а также с геологами «Бурятгеолкома» и других научных и производственных организаций.

2. НОВЕЙШАЯ ГЕОДИНАМИКА И ВУЛКАНИЗМ

Геоморфологический подход к анализу тектонических движений земной поверхности способствовал выделению в геотектонике особой дисциплины «неотектоника» [*Николаев*, 1949]. Предметом ее исследований явились новейшие тектонические события, в результате которых были созданы основные черты современного рельефа. Возраст новейших тектонических движений большинством геоморфологов принимался как неоген-четвертичный, но фактически в разных районах мира рельеф формировался с юры, начала кайнозоя, олигоцена, миоцена или квартера. Неоднозначность временного аспекта в понятии «неотектоника» отражена в картах новейшей тектоники Сибири и Дальнего Востока со скользящим возрастом активизации тектонических движений [Логачев и др., 1981; Геология..., 1984; Леви, 1991, 2008].

По аналогии с понятием «новейший этап», используемым в геотектонике, может использоваться понятие «новейший» для обозначения соответствующего этапа в геодинамике как обусловленного действием сил, определивших единую эволюционную последовательность процессов на Земле, которые привели к ее современному состоянию [*Pacckaзoв*, *Чувашова*, 2013а, 20136].

Среди геодинамических процессов особо выделяется вулканизм. Характер эволюции этого процесса в кайнозое Азии оценивался по временному распределе-



Рис. 2. Лаборатория кайнозоя.

Первый ряд: д.г.-м.н. Леви К.Г. – зав. лабораторией, Н.В. Тирских, к.г.-м.н. Т.М. Сковитина, к.г.-м.н. Е.Г. Вологина, В.А. Мишарина, Е.Г. Полякова. Второй ряд: к.г.-м.н. И.М. Мащук, к.г.-м.н. А.О. Фролов, к.г.-м.н. Н.В. Кулагина, Т.И. Храмцова, к.г.-м.н. Г.П. Черняева. Третий ряд: д.г.-м.н. Г.А. Карнаухова, И.В. Шибанова, к.г.-м.н. А.А. Щетников, О.Н. Шестакова, к.б.н. Е.В. Верхозина. Четвертый ряд: к.г.-м.н. И.А. Филинов, А.В. Сизов, А.С. Козырев, к.г.-м.н. А.М. Клементьев.

Fig. 1. The staff of the Laboratory of the Cenozoic.

1st row – K.G. Levi (Head of the Laboratory), N.V. Tirskikh, T.M. Skovitina, E.G. Vologina, V.A. Misharina, E.G. Polyakova; 2nd row – I.M. Mashchuk, A.O. Frolov, N.V. Kulagina, T.I. Khramtsova, G.P. Chernyaeva; 3rd row – G.A. Karnaukhova, I.V. Shibanova, A.A. Shchetnikov, O.N. Shestakova, E.V. Verkhozina; 4th row – I.A. Filinov, A.V. Sizov, A.S. Kozyrev, A.M. Klementiev

нию K-Ar и ⁴⁰Ar/³⁹Ar датировок вулканических пород разных территорий, но без учета возможных изменений характера образования магматических расплавов в мантии и коре [Рассказов и др., 2000; Рассказов, 2002; Ярмолюк и др., 1994, 1995, 2007]. Другой подход к исследованию характера периодичности заключался в изучении источников магм в их общей эволюции с резким отличием от источников, действовавших в ходе предшествующих магматических процессов. В качестве представительной региональной новейшей эволюционной последовательности рассматривалось пространственно-временное распространение извержений высоко- и умереннокалиевых базальтовых магм в Центральной Монголии [Чувашова и др., 2010; Рассказов и др., 2012]. Независимая информация о глобальной эволюции Земли обеспечивалась изотопным составом

Sr мирового океана. Поступление Sr в морскую воду в тот или иной период времени отражало соотношение материала из коровых (обогащённых радиогенным ⁸⁷Sr) и мантийных (обеднённых этим изотопом) источников. Региональное и глобальное проявление новейшего геодинамического этапа во временном интервале последних 90 млн лет рассматривается нами в первой части настоящей работы как один из результатов, полученных в лаборатории изотопии и геохронологии ИЗК СО РАН в рамках реализации Программы VIII.69.1.

В фанерозое насчитывается большое число эпизодов массового и малого обновления органического мира, но только семь из них привлекают повышенное внимание: 1) конец ордовика, 2) поздний девон (граница франкского и фаменского веков), 3) граница пер-



Рис. 3. Изгиб главного тренда вариаций ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr в морской воде от раннего-среднего к позднему фанерозою, соответствующий точке отсчета новейшего глобального геодинамического этапа ~90 млн лет назад.

Показаны эпизоды извержений ультрамагнезиальных лав (MgO=18–32 мас. %). Серым прямоугольником нанесен интервал извержений лав крупной Таримской магматической провинции, в которых содержания MgO не превышали 12 мас. %. Интервал вулканизма в этой провинции соответствует начальному эпизоду пермо-триасового нарушения главного тренда. Использована линия морских записей ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr из работы [*McArthur et al., 2001*]. Обзор использованных данных приведен в работах [*Pacckaзoв, Чувашова, 2013а, 20136*].

Fig. 3. The curvature of the main trend of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr variations in sea water from the Early-Middle and Late Phanerozoic, which corresponds to the estimated starting point of the recent global geodynamic stage (~90 Ma).

Period of ultra-magnesia lava eruptions are shown (MgO = 18–32 %, mass.). The grey triangle shows the lava eruption period of the large Tarimskaya magmatic province, where MgO content did not exceed 12 % (mass.). The volcanism period in the given province corresponds to the initial stage of the Perm-Triassic disruption of the major trend. The marine records of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr published in [*McArthur et al., 2001*] are used. The analyzed data are reviewed in [*Paccka306, Yy8aulo8a, 2013a, 20136*].

ми и триаса (P–T), 4) конец триаса, 5) граница мела и палеогена (K–T), 6) конец эоцена и, наконец, 7) рубеж плейстоцена и голоцена [*Xaun, 2003; Ward, 2006*].

Три последних эпизода относятся к новейшему геодинамическому этапу. Эпизод обновления органического мира рубежа плейстоцена-голоцена, на который обратил внимание В.Е. Хаин, важен для понимания современной геодинамической и климатической обстановки на Земле. В качестве причин «Великих вымираний» растений и животных во главу угла выносятся несколько – активизация вулканизма с массовыми излияниями лав и выбросами ядовитых газов и вулканического пепла в атмосферу, мощные импактные события от падения на земную поверхность астероидов и кометных ядер и экологические причины, связанные с изменением кормовых цепей в животном мире. Наилучшим образом может быть охарактеризована климатическая периодизация позднего плейстоцена и голоцена.

2.1. Определение рубежей новейшего геодинамического этапа

На морской Sr-изотопной шкале [*McArthur et al., 2001*] выделен главный тренд вариаций ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr с изгибом на рубеже ~90 млн лет, принятый в качестве поворотного пункта в переходе от геодинамического этапа раннего и среднего фанерозоя к этапу позднего фанерозоя. На ранне-среднефанерозойском этапе главному тренду соответствуют максимальные значения ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr во временных интервалах 305–285, 245–205, а также ~125 и ~100 млн лет назад, на позднефанерозойском – максимальные значения ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr в интервалах 85–65 и <15 млн лет назад. На обоих этапах фанерозоя наклоны обозначенных временных отрезков линий морских записей ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr согласованы с наклоном линии главного тренда (рис. 3).

По данным из работы [*McArthur et al., 2001*], максимальные отношения ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr в морской воде составляли ~410 млн лет назад величину 0.7088, а в интервале 500–490 млн лет назад достигали значений 0.70915, т.е. находились на уровне, близком к современному 87 Sr/ 86 Sr. В свете интерпретации изотопного состава Sr с выделением главного тренда основную стабилизирующую роль в эволюции Земли играло осаждение в составе карбонатов мирового океана континентального стронция, а относительные отклонения от него с понижением 87 Sr/ 86 Sr отражали наложенный процесс контаминации морской воды мантийным стронцием. Отношение 87 Sr/ 86 Sr главного тренда снизилось в период от 500 до 100 млн лет назад от 0.70915 до 0.70740. Затем это отношение главного тренда с 85 млн лет назад до настоящего времени возросло от 0.7074 до 0.7092.

Эпизод около 90 млн лет назад примечателен извержениями коматиитов о-ва Горгона. Подобные магмы из источников обедненного типа были характерны для ранних стадий эволюции Земли, и их проявление на о. Горгона – уникальное событие для временного интервала последнего миллиарда лет [Arndt et al., 2008]. Ультрамагнезиальные магмы из источников обогащенного типа – меймечиты – имели более широкое распространение в истории Земли.

Имеется ряд независимых фактов, которые можно интерпретировать в пользу различий между геодинамическими обстановками раннего-среднего и позднего фанерозоя. Переход между этими обстановками сопровождался глобальной перестройкой кинематики литосферных плит и глубинного режима геодинамо.

Позднефанерозойские рубежи морских записей ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr (~90, 65, 40–37 и 17–15 млн лет назад) отчетливо обозначены в магматической активности и тектонических перестройках разных регионов. Так, магматизм окраинно-континентального Восточно-Сихотэ-Алинского пояса начинался около 90 млн лет назад и завершился около 65 млн лет назад. В Юго-Западной Японии этим же временным диапазоном ограничивалась эксгумационная активность пояса Санбагава, сопровождавшаяся магматизмом пояса Риоке [*Rasskazov*, *Taniguchi, 2006*].

Незначительные изменения ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr в интервале 66–37 млн лет назад соответствовали интервалу Индо-Азиатской коллизии и среднеэоценовой структурной перестройке. Главный тренд, нарушенный Индо-Азиатской коллизией и другими процессами, восстанавливался в интервале 37–15 млн лет назад, подобно тому как восстанавливался главный ранне-среднефанерозойский тренд. В раннем и среднем фанерозое нарушение главного тренда осуществлялось подпиткой мантийным материалом с нисходящими значениями ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr морских записей, а в дальнейшем роль этой подпитки нивелировалась. В позднем фанерозое фаза подпитки с нисходящими значениями ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr отсутствовала, а осуществлялось только увеличение этих отношений.

Изгибы Sr-изотопной кривой около 65 и 37 млн лет

назад приблизительно совпадают с крупными импактными событиями. Первое сопровождалось великим вымиранием биоты, второе – малым вымиранием [Ward, 2006]. Первое событие широко известно благодаря глобальному распространению иридиевой аномалии в осадочных отложениях на К-Т-границе, связанной с образованием импактного кратера Чиксулуб на п-ове Юкотан в Мексике [Rasskazov et al., 2010; and references therein]. Второе событие менее известно. С ним связывается образование импактных кратеров: Попигайского в Сибири (∅ ≈ 100 км), залива Чезапик, атлантическая окраина США (∅ ≈ 90 км), Уанапитей, Канада ($\emptyset \approx 7.5$ км) Логойск, Белоруссия ($\emptyset \approx 17$ км) и Мистастин, Канада (∅ ≈ 28 км). Датировки импактных событий находятся в интервале 35.5–35.7 млн лет [Koeberl et al., 1996; Glass, 2002; Sanford, 2003].

Характер импульсов раннего-среднего фанерозоя объясняется повышением в океанской воде роли изотопно-обеднённого мантийного материала. Мантийный материал мог поступать благодаря увеличению скорости спрединга океанского дна, размыву океанических плато и других сооружений и т.д. Сейчас невозможно составить полное представление о вкладе в изотопный баланс Sr эндогенных и экзогенных процессов. Важно подчеркнуть наличие этого вклада и эпизодический переход в состояние, соответствовавшее главному тренду. Около 90 млн лет назад динамика мантийных и коровых процессов изменилась. Теперь поступление изотопно-обеднённого мантийного материала уже не имело самостоятельного значения, а получило существенное распространение растворение в океанской воде корового материала, выраженное в последовательном возрастании ¹⁷Sr/⁸⁶Sr. Это нарастание было прервано Индо-Азиатской коллизией и другими процессами. В дальнейшем в океанской воде растворялся вновь преимущественно коровый материал с высоким ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr.

2.2. Выражение геодинамической периодичности в пространственно-временном распределении извержений высоко- и умереннокалиевых базальтовых лав в Центральной Монголии

2.2.1. Смена магматизма около 90 млн лет назад

В разных районах Азии находятся мантийные и коровые магматические породы фанерозоя. Преобладают продукты плавления континентальной коры. Террейны, сложенные породами корового генезиса, разделены шовными зонами сомкнувшихся берегов Урало-Монгольского, Туркестанского, Солонкерского палеоокеанов и Монголо-Охотского залива Тихого океана. На протяжении большей части фанерозоя роль коровых источников в геологических структурах Азии была существенной и резко снижалась около 90 млн лет назад. Начиная с этого времени мантийные выплавки стали преобладать, а коровые проявлялись эпизодически [Rasskazov, Taniguchi, 2006; Рассказов и др., 2012;



Рис. 4. Пространственное распределение вулканических полей позднего мела и кайнозоя в Центральной Монголии.

1–2 – вулканические поля двух возрастных интервалов: 1 – 91–32 млн лет Гобийской системы (УЦХ – Улан-Цаб-Худукское, Б – Булганское, ДД – Даланзадгадское, МГ – Мандалгобийское, УШ – Ундэршилское, АШ – Алтан-Ширэ, АБ – Арц-Богдское, Н – Ноёнское, Х – Хурмэнское, ДВ – Дурвэлджин), 2 – <32 млн лет Хангайской системы (ДО – Долино-Озерское, БД – Байдарикское, ДБ – Дзабханское, М – Мурэнское, Ц – Цэцэрлэгское, ХТ – Хойт-Тамирское, ВО – Верхнеорхонское, ВЧ – Верхнечулутынское, ТЧ – Тарят-Чулутынское, УН – Угей-Нурское, НО – Нижнеорхонское, ХН – Хануйское, С – Селенгинское, ТГ – Тэсийн-Гольское); 3 – орогенная провинция; 4 – пограничная провинция орогена [*Корина, 1982*]; 5 – шов закрывшегося палеоокеана (УМ – Урало-Монгольского, СЛ – Солонкерского, шов монголо-охотской части Палеопацифика, протягивающийся с востока до Хангайского орогена, на рис. не показан); 6 – государственная граница Монголии.

Fig. 4. The spatial pattern of the Late Cretaceous and Cenozoic volcanic fields of the Central Mongolia.

1-2 – volcanic fields if two ages: 1 - 91-32 Ma, Gobi system (УЦХ – Ulan-Tsab-Khuduk, Б – Bulgan, ДД – Dalanzasgad, МГ – Mandalgobi, УШ – Undershil, АШ – Altan-Shira, АБ – Arts-Bogd, H – Noyon, Х – Khurman, ДВ – Durvalgin), 2 - 32 Ma, Khangay system (ДО – Dolina-Ozerskoe, БД – Baidarik, ДБ – Dzabkhan, М – Muren, Ц – Tsetserlag, ХТ – Khoit-Tamir, BO – Verkhneorkhon, BЧ – Verkhnechulutyn, ТЧ – Taryat-Chulutyn, УН – Ugei-Nur, HO – Nizhneorkhon, ХН – Khanuy, С – Selenga, ТГ – Teisiyn-Gol); 3 – orogenic province; 4 – marginal province of the orogen [*KopuHa*, *1982*]; 5 – suture of the closed ocean (УМ – Ulal-Mongolian, СЛ – Solonkersky; the figure does not include the suture of the Mongol-Okhotsk part of the Paleo Pacific from the east towards the Khangai orogen); 6 – the state border of Mongolia.

Рассказов, Чувашова, 2012]. По единообразному мантийному характеру источников магматизм последних ~90 млн лет на территории Азии может рассматриваться в качестве процесса новейшего геодинамического этапа и, таким образом, отличаться от предшествующего ранне-среднефанерозойского магматизма с мантийно-коровым характером источников.

2.2.2. Цикличность высоко- и умереннокалиевого мантийного магматизма в последние ~90 млн лет

Вулканизм последних 90 млн лет Центральной Азии развивался неравномерно в пространстве и вре-

мени. Вулканические извержения мигрировали на десятки, а иногда первые сотни километров. В Центральной Монголии различаются Гобийская и Хангайская системы вулканических полей с возрастными интервалами, соответственно, 91–32 и менее 32 млн лет (рис. 4). Особенности пространственно-временной эволюции вулканизма Центральной Монголии отражены в вариациях концентраций калия и К/Na отношений [Чувашова и др., 2010; Рассказов и др., 2012].

Рубеж около 90 млн лет назад обозначен сменой высококалиевых лав умереннокалиевыми в р-не хр. Арц-Богд Южной Гоби. Высокое содержание калия (К=3.35 мас. %) и высокое калинатровое отношение



Рис. 5. Временные вариации калия в вулканических породах позднего мела и кайнозоя Центральной Монголии.

Таблица датировок [*Pacckaзов и др., 2012; Свидетельство..., 2013*]. Нижнее ограничение новейших геодинамических процессов обозначено датировкой 94.4±2.2 млн лет латита с содержанием K=3.35 мас. % из района хр. Арц-Богд [*Enkhtuvshin, 1995*].

Fig. 5. Variation of potassium with time in the Late Cretaceous and Cenozoic volcanic rocks of the Central Mongolia.

The datings are published in [*Paccka3oe u dp., 2012; Csudemenьcmeo..., 2013*]. The lower limit of the recent geodynamic processes is 94.4±2.2 Ma in datings of latite (K=3.35 %, mass.) from the area of the Arts-Bogd ridge, according to [*Enkhtuvshin, 1995*].

(K₂O/Na₂O=1.2) определено в латите, излившемся около 94 млн лет назад. Для латитов и ассоциирующихся с ними шошонитов и трахибазальтов характерны низкие содержания MgO (1.4–3.1 мас. %), высокие Ba/Sr (1.2–1.4), повышенные начальные изотопные отношения стронция (до 0.70533) и низкие – неодима (до 0.512250) [Enkhtuvshin, 1995]. Такие характеристики отражают происхождение расплавов из коровых источников. В позднемеловых лавах Южной Гоби, извергнутых во временном интервале 91-71 млн лет назад, измерены умеренные концентрации калия (К = =1.4–1.7 мас. %) при повышенных содержаниях MgO (до 8.5 мас. %), сравнительно низкие Ba/Sr (0.52–0.73), широкие диапазоны начальных отношений изотопов Sr и Nd – от обогащенных (относительно примитивный мантии) до обедненных [Ярмолюк и др., 2007]. Эти характеристики сопоставляются с характеристиками кайнозойских лав, производных преимущественно мантийных источников [Рассказов и др., 2012].

По вариациям концентраций калия в позднемеловых и кайнозойских лавах различаются шесть временных интервалов вулканизма: 1) позднемеловой (91–71 млн лет назад), 2) палеоцен-среднеэоценовый (66–43 млн лет назад), 3) среднеэоценовый-раннеолигоценовый (41–31 млн лет назад), 4) олигоцен-раннемиоценовый (32–21 млн лет назад), 5) миоценовый (20–11 млн лет назад) и 6) позднемиоценовый-четвертичный (<10 млн лет назад). Первые три интервала рассматриваются как события Гобийской вулканической системы, последние три – Хангайской (рис. 5).

Рассредоточенный базальтовый магматизм палеоцена – среднего эоцена, умереннокалиевый по составу, был отделен от предшествовавшего и более позднего магматических интервалов эпизодами извержений базальтов 66–65 и ~43 млн лет назад с относительно низкой концентрацией калия (0.5–1.5 мас. %). Высококалиевые лавы начали извергаться с 41 млн лет назад. Группы высоко- и умереннокалиевых базальтов были частично разделены во времени.

Периодичность проявлений высоко- и умереннокалиевых лав с течением времени менялась. За фазой извержений высококалиевых лав хр. Арц-Богд ~19.6



Рис. 6. Соотношения извержений высоко- и умереннокалиевых лав Центральной Монголии во временном интервале 23.4–2.1 млн лет назад.

Таблица датировок [*Pacckaзoв и др., 2012; Свидетельство..., 2013*]. По датировкам пород разных вулканических полей обозначены циклы высоко- и умереннокалиевого магматизма с квазипериодичностью, соответственно, 4.5 и 7.0 млн лет.

Fig. 6. Ratios between eruptions of high- and medium-potassic basaltic eruptions in the Central Mongolia in the time interval of 23.4–2.1 Ma ago.

The datings are published in [*Paccka306 u dp., 2012; CBudementembol..., 2013*]. Based on datings of rocks from various volcanic fields, cycles of high- and medium-potassic magmatism are shown in the quasi-periodical patterns of 4.5 and 7.0 Ma, respectively.

млн лет назад через 4 млн лет следовали извержения лав ~15.6 млн лет назад с концентрацией калия ~2.7 мас. % на Долино-Озерском поле. Извержения на нем продолжались до 12.2 млн лет назад с относительным повышением калия до 3.3 мас. %, сопровождаясь извержениями лав Байдарикского поля интервала 13-11 млн лет назад с более высокой концентрацией калия (3.4–3.6 мас. %). На Байдарикском поле эта вулканическая фаза предварялась и сменялась фазами извержений умереннокалиевых лав, соответственно ~15.6 и ~7.0 млн лет назад, а на Угей-Нурском поле, наоборот, фаза извержений умереннокалиевых лав ~9.6 млн лет назад предварялась и сменялась фазами извержений высококалиевых лав, соответственно, 15.5-14.2 и ~7.4 млн лет назад. Подобным образом концентрации калия варьировались в противофазе в

лавах хр. Восточный Хангай и Орхон-Селенгинского среднегорья. Извержениями умереннокалиевых базальтов на Улан-Цаб-Худукском, Цэцэрлэгском и Верхнечулутынском вулканических полях обозначились более длительные магматические квазипериоды порядка 7 млн лет (рис. 6).

Умереннокалиевый вулканизм Цэцэрлэгского поля продолжался с 17.0 до 9.7 млн лет назад при относительном повышении концентраций калия, согласованном во времени с началом высококалиевого вулканизма Долино-Озерского и Угей-Нурского полей 15.6– 15.5 млн лет назад. Это вызвано эффектом наложения процессов высококалиевого магматизма на ход эволюции умереннокалиевых расплавов, что свидетельствует о частичной согласованности эволюции мантийных процессов с быстрым эпизодическим воспроизводст-



Рис. 7. Переход от извержений Верхнечулутынского и Тарят-Чулутынского вулканических полей в интервале 9.6–2.1 млн лет назад с согласованными цикличными вариациями калия в лавах (циклы I–III с квазипериодичностью 2.5 млн лет) к извержениям на Тарят-Чулутынском поле (циклы I–IV с квазипериодичностью 0.3–0.7 млн лет).

Таблица датировок [Рассказов и др., 2012; Свидетельство..., 2013].

Fig. 7. Transition from eruptions of the Verkhnechulutyn and Taryat-Chulutyn volcanic fields in the interval of 9.6–2.1 Ma ago with cyclic variations of potassium in lavas (cycles I, II and III with quasi-periodicity of 2.5 Ma) which are correlated with eruptions at the Taryat-Chulutyn volcanic field (cycles I, II, III and IV with quasi-periodicity of 0.3–0.7 Ma).

The datings are published in [Рассказов и др., 2012; Свидетельство..., 2013].

вом высококалиевых магм и замедленным, продолжительным – умереннокалиевых.

В интервале 10-2 млн лет назад временные вариации калия в базальтах Верхнечулутынского и Тарят-Чулутынского полей были согласованы между собой с квазипериодичностью 2.5 млн лет. На Тарят-Чулутынском поле эта квазипериодичность выражена в фазах извержений высококалиевых лав ~7.1 и 4.6–3.8 млн лет назад. На Верхнечулутынском поле высококалиевые лавы неизвестны. Лавы умереннокалиевого состава, излившиеся в интервале 9.6-8.0 млн лет назад, составляли вулканический цикл, предшествовавший извержениям Тарят-Чулутынского поля, а лавы интервалов 5.5-4.0 и 2.6-2.1 млн лет назад обозначали финальные фазы извержений с минимальными концентрациями калия двух других циклов. Квазипериодичность 2.5 млн лет характерна для вулканической деятельности в Байкальской рифтовой зоне и на континентальной окраине Восточной Азии [*Pacckaзов и др.*, 2000; *Pacckaзов*, 2002; *Rasskazov*, *Taniguchi*, 2006]. В последние 2 млн лет извержения на Верхнечулутынском поле не возобновлялись, а фазы высококалиевых извержений Тарят-Чулутынского поля выстраивались в четыре цикла с квазипериодичностью 0.3–0.7 млн лет. Два последних включали, кроме высококалиевых, лавы умереннокалиевого состава (рис. 7).

3. Поздний плейстоцен и голоцен

Достоверных данных об извержениях вулканов в интервале последних 400 тыс. лет нет. Самые древние датированные извержения вулканов Атитлан (87–84 тыс. лет назад) и Тоба (77–69 тыс. лет назад) вызвали существенные похолодания за счет выбросов пепла в атмосферу. Однако в похолодания внесли свой вклад и



Рис. 8. Вариации выделившейся энергии при космических бомбардировках в антропогене и иридиевые аномалии.

Fig. 8. Variations in the released energy cosmic bombardments in the Quaternary and the iridium anomaly.

падения астероидов и ядер комет (рис. 8). Исходные данные для этого рисунка были заимствованы их каталога [Задонина и др., 2007]. В течение прошедших 2 млн лет Земля подвергалась космическим бомбардировкам мощностью $E = 10^{18} - 10^{21}$ Дж 12 тыс. лет назад, 30 тыс. лет назад, 100 тыс. лет назад и трижды в раннем плейстоцене. Более детально мы рассмотрим природно-климатические изменения в позднем плейстоцене и голоцене, в периоде, события которого достаточно надежно датированы.

3.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРИОДИЗАЦИИ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Одним из аспектов исследований лаборатории кайнозоя ИЗК СО РАН является изучение природноклиматических изменений в историческом и доисторическом прошлом. Эти работы проводятся в целях прогноза предстоящих изменений и обеспечения устойчивого развития социума. В основу этого направления положены представления о солнечно-земных связях. В последние годы многие исследователи опираются на представления о роли орбитальных параметров Земли в формировании тех или иных природно-климатических обстановок – циклы М. Миланковича [1939]. Однако современные представления о причинах глобальных изменений все больше склоняются к существенной роли Солнца в преобразовании климата планеты. Остановимся на этом вопросе, используя сведения о развитии процессов на основе радиоуглеродного датирования геологических и биологических объектов. База данных для подобных построений опубликована [*Радиоуглеродная хронология..., 2010, 2011*]. Из-за краткости очерка мы не будем здесь обсуждать технологию статистического анализа данных, а приведем лишь модели, построенные по его результатам.

Мы уже упомянули, что на природно-климатическую ситуацию влияет изменение орбитальных параметров Земли: прецессии - когда происходит изменение наклона земной оси с периодом около 21-23 тыс. лет, меняющей сезонную амплитуду интенсивности солнечного потока на Северном и Южном полушариях Земли; нутации – определяющие вековые колебания угла наклона земной оси к плоскости эклиптики с периодом около 41 тыс. лет, и, наконец, долгопериодические колебания эксцентриситета орбиты Земли с периодом около 110 тыс. лет. Периодические потепления и похолодания, вызванные этими вариациями, определяют термином «циклы М. Миланковича», на которые часто ссылаются при оценках природно-климатических изменений в геологической истории Земли [1939]. Однако с их помощью очень трудно, а точнее просто невозможно, объяснить «тонкую климатическую структуру» геологических и геоархеологических разрезов конца позднего плейстоцена и голоцена (таблица). Можно предположить, что здесь не обходится без участия вариаций солнечной активности.

На рис. 9 приведены модельные кривые изменения по времени этих параметров, полученные путем суммирования гармоник относительно эпохи максимального потепления в позднем плейстоцене (Казанцевское время – около 125 тыс. лет назад). Из него видно, что именно наложение циклов М. Миланковича на вариа-

Климатическая периодизация позднего плейстоцена и голоцена

Climatatic periodization of the Late Pleistocene and Holocene

¹⁴ С-время	Сибирь	Аравия	¹⁴ С-время
2.5 тыс. – 0 лет назад	Субатлантик	Современная аридизация	3 тыс. – 0 лет назад
4.5–2.5 тыс. лет назад	Суббореал	Ослабление аридизации	3–4 тыс. лет назад.
8.0–4.5 тыс. лет назад	Атлантик – тепло, встречаются зерна винограда	Начало современной аридизации	6 тыс. лет назад
9.5–8.0 тыс. лет назад	Бореал	Трансгрессия Данкирка	4–7 тыс. лет назад
11.0–9.5 тыс. лет назад	Аллеред+	Аридная фаза ?	10–7 тыс. лет назад
	Предбореал	Гумидная фаза	12–10 тыс. лет назад

ГОЛОЦЕН ↑ ПОЗЛНИЙ ПЛЕЙСТОПЕН ↓

14-10 тыс. лет назад Поздний Сартан 12.8 тыс11.5 тыс. лет назад – эпоха гидроката- сгроф, «остановка» гольфстрима – тепло в Сибири и холодно в Европе Жестокая аридизация 17–12 тыс. лет назад 16.0–14.5 тыс. лет назад Средний Сартан-2 17–12 тыс. лет назад 18–16 тыс. лет назад Средний Сартан-2 - 18–16 тыс. лет назад Средний Сартан-2 - 21–18 тыс. лет назад Раний Сартан-2 - 21–18 тыс. лет назад Раний Сартан-1 - 24–21 тыс. лет назад Раний Сартан-1 - 30–24 тыс. лет назад Каргинское время – Липовское-Новоселовское потепление - 33–30 тыс. лет назад Каргинское время – Коношельское похолодание - 43–33 тыс. лет назад Каргинское время – Коношельское похолодание - 45–43 тыс. лет назад Каргинское время – раннее похолодание - 50–45 тыс. лет назад Каргинское время – раннее потепление - 10–50 тыс. лет назад Ермаковское оледенение - ари 10 тыс. лет назад Казанцевское межледниковье -		позднинизниет	удын •			
16.0–14.5 тыс. лет назад Средний Сартан-2 18–16 тыс. лет назад Средний Сартан-1 21–18 тыс. лет назад Ранний Сартан-2 – холодно и сухо 24–21 тыс. лет назад Ранний Сартан-1 – холодно и влажно 30–24 тыс. лет назад Каргинское время – Липовско-Новоселовское потепление 33–30 тыс. лет назад Каргинское время – Коношельское похолодание 43–33 тыс. лет назад Малохетский оптимум 45–43 тыс. лет назад Каргинское время – раннее похолодание 50–45 тыс. лет назад Каргинское время – раннее потепление 110–50 тыс. лет назад Брмаковское оледенение 110 тыс. лет назад Казанцевское межледниковье	14–10 тыс. лет назад	Поздний Сартан 12.8 тыс.–11.5 тыс. лет назад – эпоха гидроката- строф, «остановка» Гольфстрима – тепло в Сибири и холодно в Европе	Жестокая аридизация	17–12 тыс. лет назад		
18–16 тыс. лет назад Средний Сартан-1 21–18 тыс. лет назад Ранний Сартан-2 – холодно и сухо 24–21 тыс. лет назад Ранний Сартан-1 – холодно и влажно 30–24 тыс. лет назад Каргинское время – Липовско-Новоселовское потепление 33–30 тыс. лет назад Каргинское время – Коношельское похолодание 43–33 тыс. лет назад Малохетский оптимум 45–43 тыс. лет назад Каргинское время – раннее потепление 50–45 тыс. лет назад Каргинское время – раннее потепление 110–50 тыс. лет назад Каргинское время – раннее потепление 110–50 тыс. лет назад Каргинское время – раннее потепление 110–50 тыс. лет назад Каргинское время – раннее потепление 110 – 50 тыс. лет назад Каргинское время – раннее потепление до 110 тыс. лет назад Казанцевское межледниковье	16.0–14.5 тыс. лет назад	Средний Сартан-2				
21–18 тыс. лет назад Ранний Сартан-2 – холодно и сухо Семиаридная фаза (саванновая) 36–17 тыс. лет назад 30–24 тыс. лет назад Каргинское время – Липовско-Новоселовское потепление Семиаридная фаза (саванновая) 36–17 тыс. лет назад 33–30 тыс. лет назад Каргинское время – Коношельское похолодание Аридная фаза Аревнее 36 тыс. лет назад 43–33 тыс. лет назад Малохетский оптимум Аридная фаза Древнее 36 тыс. лет назад 45–43 тыс. лет назад Каргинское время – раннее похолодание Аридная фаза Древнее 36 тыс. лет назад 50–45 тыс. лет назад Каргинское время – раннее потепление Семиаридная фаза Древнее 36 тыс. лет назад 110–50 тыс. лет назад Каргинское время – раннее потепление Семиаридная фаза Древнее 36 тыс. лет назад 110–50 тыс. лет назад Каргинское время – раннее потепление Семиаридная фаза Древнее 36 тыс. лет назад 110 тыс. лет назад Каранцевское оледенение Семиаридная фаза Семиаридная фаза 110 тыс. лет назад Казанцевское межледниковье Семиаридная фаза Семиаридная фаза	18–16 тыс. лет назад	Средний Сартан-1				
24–21 тыс. лет назад Ранний Сартан-1 – холодно и влажно Семиаридная фаза (саванновая) 36–17 тыс. лет назад 30–24 тыс. лет назад Каргинское время – Липовско-Новоселовское потепление Каргинское время – Коношельское похолодание Каргинское время – Коношельское похолодание 33–30 тыс. лет назад Малохетский оптимум Аридная фаза Древнее 36 тыс. лет назад 45–43 тыс. лет назад Каргинское время – раннее похолодание Аридная фаза Древнее 36 тыс. лет назад 50–45 тыс. лет назад Каргинское время – раннее потепление Каргинское время – раннее потепление Каргинское время – раннее потепление 110–50 тыс. лет назад Ермаковское оледенение Казанцевское межледниковье Казанцевское межледниковье	21–18 тыс. лет назад	Ранний Сартан-2 – холодно и сухо				
30–24 тыс. лет назад Каргинское время – Липовско-Новоселовское потепление 33–30 тыс. лет назад Каргинское время – Коношельское похолодание 43–33 тыс. лет назад Малохетский оптимум Аридная фаза 45–43 тыс. лет назад Каргинское время – раннее похолодание 50–45 тыс. лет назад Каргинское время – раннее потепление 110–50 тыс. лет назад Ермаковское оледенение до 110 тыс. лет назад Казанцевское межледниковье	24–21 тыс. лет назад	Ранний Сартан-1 – холодно и влажно	Семиаридная фаза (саванновая)	36–17 тыс. лет назад		
33–30 тыс. лет назад Каргинское время – Коношельское похолодание 43–33 тыс. лет назад Малохетский оптимум Аридная фаза Древнее 36 тыс. лет назад 45–43 тыс. лет назад Каргинское время – раннее похолодание 50–45 тыс. лет назад Каргинское время – раннее потепление 110–50 тыс. лет назад Ермаковское оледенение до 110 тыс. лет назад Казанцевское межледниковье	30–24 тыс. лет назад	Каргинское время – Липовско-Новоселовское потепление				
43–33 тыс. лет назад Малохетский оптимум Аридная фаза Древнее 36 тыс. лет назад 45–43 тыс. лет назад Каргинское время – раннее похолодание 50–45 тыс. лет назад Каргинское время – раннее потепление 110–50 тыс. лет назад Ермаковское оледенение до 110 тыс. лет назад Казанцевское межледниковье	33–30 тыс. лет назад	Каргинское время – Коношельское похолодание				
45-43 тыс. лет назадКаргинское время – раннее похолодание50-45 тыс. лет назадКаргинское время – раннее потепление110-50 тыс. лет назадЕрмаковское оледенениедо 110 тыс. лет назадКазанцевское межледниковье	43–33 тыс. лет назад	Малохетский оптимум	Аридная фаза	Древнее 36 тыс. лет назад		
50–45 тыс. лет назад Каргинское время – раннее потепление 110–50 тыс. лет назад Ермаковское оледенение до 110 тыс. лет назад Казанцевское межледниковье	45–43 тыс. лет назад	Каргинское время – раннее похолодание				
110–50 тыс. лет назад Ермаковское оледенение до 110 тыс. лет назад Казанцевское межледниковье	50–45 тыс. лет назад	Каргинское время – раннее потепление				
до 110 тыс. лет назад Казанцевское межледниковье	110–50 тыс. лет назад	Ермаковское оледенение				
	до 110 тыс. лет назад	Казанцевское межледниковье				



Рис. 9. Модельные кривые вариаций солнечной активности SA, орбитальных параметров Земли CM на фоне вариаций относительных скоростей образования ¹⁰Ве и отложения Ir за 125–150 тыс. лет назад.

Fig. 9. Model curves showing variations of solar activity (SA) and orbital parameters of the Earth (CM) against variations of relative velocities of ¹⁰Be formation and Ir deposition for 125–150 thousand years.



Рис. 10. Вариации концентрации ¹⁴С и ¹⁰Ве в связи с изменениями долговременной солнечной активности.

Fig. 10. Variations of ¹⁴C and ¹⁰Be concentrations due to changes of the long-term solar activity.

ции солнечной активности обеспечивает те климатические ритмы, которые в настоящее время выделяются стратиграфами в исследуемом интервале времени. Явным показателем вариаций солнечной активности являются вариации концентраций космогенных изотопов ¹⁴С и ¹⁰Ве. Их концентрации находятся в противофазе к максимумам солнечной активности и потому могут служить источником сведений о характере природноклиматических изменений на Земле (рис. 10).

Очевидно, что нельзя считать модельную кривую SA на рис. 9 совершенно достоверной, так как не удалось выявить более длительные гармоники, которые характеризовали хотя бы половину длины имеющегося ряда данных. Но это объективность, с которой приходится считаться. Дело в том, что ¹⁴С-хронология после примерно 30 тыс. лет назад содержит разрывы, которые, скорее, внесут различного рода искажения, чем уточнят ситуацию. Интерпретация рис. 9, с одной стороны, позволяет выявить известные главные климатические таксоны позднего плейстоцена и голоцена, а с другой – показать, что они (эти таксоны) внутренне неоднородны в результате изменения солнечной активности, ответственной за инсоляцию земной поверхности.

Несомненный интерес, в плане интерпретации рис. 11, представляют кривые, характеризующие вариации

количества пыли, выпавшей на поверхность ледниковых щитов Гренландии и Антарктиды, и отклонения от средней температуры, вычисленные по данным об изменении концентрации дейтерия ΔD. Интересным фактом является повышение содержания пылеватых частиц в керне льда со станции «Dye-3» в Гренландии (рис. 11) [Лавиолетт, 2008], образующих продолжительные по времени аномалии в интервале времени 70-60 и 37-15 тыс. лет назад. Аналогичные аномалии обнаруживаются в ледовом керне под ст. «Восток» в Антарктиде (рис. 12) [Борисова, 2007]. Концентрация пыли во льду не совпадает по времени ни с какими существенными космическими атаками и иридиевыми аномалиями, обычно сопровождающими их. Это может свидетельствовать в пользу повышения концентрации пыли в связи с усилением турбулентности атмосферы на фоне похолодания, мощными засухами в Африке 70-60 тыс. лет назад и аридизацией климата в Сартанскую эпоху. Синхронность же проявления аномалий говорит о том, что эти явления носили явно глобальный характер.

Поскольку изменения орбитальных параметров Земли являются периодическими, то регулярно возникают достаточно продолжительные эпохи, когда они оказывают кумулятивное влияние на климатические изменения. На рис. 13 показаны модельные вариации



Рис. 11. Вариации концентрации пыли в ледовом керне со станции «Dye-3» в Гренландии [Лавиолетт, 2008].





Рис. 12. Вариации приращения температуры воздуха Δ*T* °C и концентрации пыли в ледовом керне со станции «Восток» в Антарктиде [*Борисова, 2007*].

Fig. 12. Variations of air temperature increase, ΔT (°C) and dust concentrations in the ice core samples from Vostok Station in Antarctica [*Bopucosa*, 2007].





Рис. 14. Сопоставление реконструированных по величине концентрации ¹⁴С в кольцах деревьев значений чисел солнечных пятен SN [*Solanki et al., 2004*] (внизу) и модельной кривой (вверху), отражающих вариации солнечной активности для последних 11 тыс. лет.

Данные на кривой [Solanki et al., 2004] сглажены 100-летним (пунктир) и 500-летним окном.

Fig. 14. Comparison of sunspot numbers (SN) reconstructed from ¹⁴C concentrations in annual wood growth rings, according to [*Solanki et al., 2004*] (bottom), and the model curve (top), which show variation of solar activity for the past 11 thousand years.

The data on the curve from [Solanki et al., 2004] are fit in the 100-year (dotted line) and 500-year windows.

солнечной активности SA (красное поле) и орбитальных параметров Земли CM (сплошная коричневая линия). Сюда же помещены сведения об иридиевых аномалиях (см. рис. 9), мощнейших извержениях вулканов с эксплозивным индексом VEI ≥ 7–8 и традиционных природно-климатических таксонах.

При построении модельных кривых (рис. 13) временной ряд был сокращен до 90 тыс. лет назад, поскольку в интервале 67–78 тыс. лет назад в природноклиматических изменениях Северного полушария наступил кризис – катастрофическая засуха в Африке, которая привела к грандиозному вымиранию популяции *Homo sapiens* и миграции ее остатков в Евразию. Считают, что около 80 тыс. лет назад кроманьонцы проникли на Аравийский п-ов, а оттуда в Индию и на Восточно-Европейскую равнину. Последовательные извержения вулканов Атитлан и Тоба привели к затяжному похолоданию за счет выбросов в атмосферу продуктов вулканических извержений, которые существенно снизили инсоляцию земной поверхности и способствовали развитию длительных похолоданий при благоприятных для этого обстоятельствах – изменении орбитальных параметров Земли и снижении солнечной активности на длительные сроки, превышающие по продолжительности известные минимумы Оорта, Вольфа, Шперера, Маундера и т.д. Немаловажную роль в этом сыграли и космические бомбардировки, способствовавшие замутнению атмосферы пылью от взрывов и дымом возникавших при этом пожаров.

На рис. 14 приведен график, заимствованный из работы [Solanki et al., 2004], реконструирующий вариации числа солнечных пятен по концентрации ¹⁴С в кольцах деревьев за последние 11 тыс. лет.

Визуальное сравнение кривых на рис. 13, различных по своей структуре и способам построения, показывает их сходство в общих чертах. Известно, что кривая [Solanki et al., 2004] построена с 10-летним разрешением. Возможности данного исследования были ограничены лишь 100-летним разрешением, но главное состоит в том, что сравнение кривых говорит о приемлемости предложенного подхода к анализу данных радиоуглеродного датирования для оценки длительных солнечных ритмов и удовлетворительном согласии этих ритмов с климатической периодичностью в позднем плейстоцене и голоцене.

Таким образом, анализ радиоуглеродных датировок геологических и биологических объектов позволяет реконструировать с должной детальностью периодичность смены природно-климатических обстановок в позднем плейстоцене – голоцене, но нуждается в детализации. Такая детализация возможна лишь при тщательном анализе исторических хронологий тех или иных природных явлений с целью среднесрочного и долгосрочного прогноза природных изменений в ближайшие десятилетия, что и выполняется в настоящее время [*Гелиогеодинамика..., 2012, 2013*].

3.2. ФАУНА КРУПНЫХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ В БАЙКАЛЬСКОЙ СИБИРИ*

Важный аспект в исследовании природно-климатических изменений — изучение и временная привязка ископаемой голоценовой фауны и характерных особенностей среды ее обитания, что приводило к возникновению природных кризисов и вымиранию главным образом мегафауны позднего плейстоцена. Это региональный аспект, без изучения которого невозможны глобальные реконструкции природно-климатических обстановок.

На территории Юго-Западного Прибайкалья были обнаружены ископаемые материалы из опорных разрезов позднего неоплейстоцена (последние 50 тыс. лет). Весь объем собранных коллекций позволил отобрать образцы для радиоуглеродного датирования как самих разрезов, так и конкретных видов плейстоценовой фауны. В опорных разрезах отложений впадин Тункинской рифтовой долины были выделены фаунистические ассоциации [Щетников и др., 2013] для разных этапов развития природной обстановки. Наиболее богатыми по видовому составу являются фауны второй половины каргинского времени – зактуйская и зангисанская. В абсолютном летоисчислении они датируются в пределах 33-36 тыс. лет назад и включают мамонта шерстистого, носорога шерстистого, два вида лошадей, кулана, благородного оленя, косулю, дзерена, антилопу винторогую и крокуту пещерную. Значительные перспективы для изучения фауны этого отрезка позднего неоплейстоцена обещает комплексное исследование геоархеологического объекта Туяна. Уже сейчас здесь выявлено присутствие остатков двенадцати видов крупных млекопитающих, составляющих единый комплекс.

Уникальным объектом является разрез Славин Яр, где фаунистические остатки обнаружены на разных стратиграфических уровнях. Наиболее богато здесь представлен восьмиметровый уровень (мамонт шерстистый, кулан, носорог шерстистый, благородный олень), имеющий радиоуглеродный возраст 37790± ±310 лет назад. На глубине 11 м залегает следующий костеносный слой с радиоуглеродной датой 45810± ±4070 лет назад, здесь были найдены кости мамонта и косули. Интересна находка на глубине 18-19 м остатков Ursus arctos и Equus sp. По стратиграфическому положению в разрезе этот костеносный слой вероятнее всего был сформирован в самом начале каргинского потепления (около 57 тыс. лет назад). Славиноярская фаунистическая ассоциация датирована в широких пределах первой половиной каргинского времени. Таким образом, мамонтовый (или позднепалеолитический) комплекс Тункинского рифта расчленяется на несколько разновозрастных фаун. Каргинские фауны имеют своеобразные особенности, сближающие регион с Западным Забайкальем: обилие шерстистого носорога, присутствие дзерена, кулана и грацильной лошади. Имеются и локальные черты – это значительное количество благородного оленя и косули. Экологический анализ фауны позволяет говорить о существенных отличиях тункинских фаунистических ассоциаций от ассоциаций сартанского времени. Известные данные о возрасте и фауне стоянки Мальта позволяют охарактеризовать ее как преимущественно тундровую [Ермолова, 1978]. Фауны каргинского термохрона Тункинской долины являются в основе степными. Материалы по фауне сартанского криохрона Тункинского рифта также были датированы радиоуглеродным методом. Датировки свидетельствуют об обитании шерстистого носорога и пещерного льва позже максимума сартанского криохрона. И хотя палеонтологические остатки сартанского возраста в Тункинской впадине разрозненны и малочисленны, состав фауны (пещерная кошка, шерстистый носорог, лошадь, первобытный бизон, северный олень) не противоречит широким возможностям корреляций на юге Восточной Сибири, тем более что Олхинское плато не могло являться значительной преградой для крупных млекопитающих.

Продолжается работа по изучению палеонтологических материалов, получаемых археологическими экспедициями на территории Приангарья и Забайкалья. Эти материалы укладываются в широкий хронологический диапазон – от верхнего эоплейстоцена (Засухино) до позднего голоцена (средневековые объекты). Основной массив данных приходится также на финал неоплейстоценовой эпохи. По результатам изу-

^{*} Раздел подготовлен А.М. Клементьевым и А.В. Сизовым.

чения фаунистических ассоциаций бассейна реки Уда была предложена реконструкция ландшафтных обстановок этого района Забайкалья [Клементьев, 2011]. В тесном сотрудничестве с иркутскими археологами ведется работа по интерпретации палеофаунистических материалов Приангарья. Были изучены многолетние сборы костных остатков каргинского времени, что позволило реконструировать природные условия на территории Иркутского амфитеатра на рубеже XXX тысячелетия [Клементьев, 2013]. Значительно пополнились сведения о фауне сартанского криохрона благодаря изучению материалов объектов Мост – Левый Берег, Советская-1, Щапово-2. Объемные фаунистические коллекции многослойных объектов голоцена (Усть-Хайта, Бугульдейка-2, Лиственничный, Усть-Ёдарма-2, Усть-Кеуль-1) позволяют выйти на подробные характеристики развития фауны в течение последних 12 тысяч лет. В частности, установлено присутствие в фауне раннего голоцена первобытного бизона и ископаемой лошади – как в Южном, так и в Северном Приангарье. Точные сроки их вымирания неизвестны, но костные останки крупного бизона определены в неолитических комплексах Братского водохранилища. Присутствие первобытного быка датировано на берегах Южного Байкала поздним неолитом. Самые поздние, средневековые, комплексы фаунистических остатков, в комплексе с археологическими данными, позволяют проводить хозяйственные реконструкции жизни населения. В частности, особенности видового состава домашних млекопитающих и промысловых видов позволили установить скотоводческую

основу хозяйства населения рубежа I–II тыс. н.э. [Клементьев, Николаев, 2013].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ пространственно-временного распределения высоко- и умереннокаливых базальтовых извержений в Центральной Монголии и морских записей изотопов Sr выявил соответствие начала новейшего геодинамического этапа этой территории точке отсчета его глобального выражения. Такое соответствие свидетельствует о тесной связи магматических событий Центральной Монголии с глобальными процессами конвергенции и позволяет рассматривать их в качестве представительных для новейшей геодинамической эволюции последних 90 млн лет, в ходе которой определена важнейшая роль рубежей ~66, 40–37, ~32 и 17–15 млн лет назад. Происходившие глобальные изменения, за исключением рубежа ~32 млн лет назад, запечатлены в морских записях изотопов Sr.

Восстановлена природно-климатическая периодизация позднего плейстоцена – голоцена на основе анализа радиоуглеродных датировок геологических и палеобиологических объектов в Северном полушарии. Построена модельная кривая, отражающая изменения природной среды и климата с учетом вариаций солнечной активности, циклов М. Миланковича, проявления мощных вулканических извержений, астероиднометеоритных атак и изменения видового состава региональной фауны на заданном временном интервале.

5. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- *Борисова О.К.* Изменения растительности и климата умеренных широт Южного полушария за последние 130 000 лет (в сопоставлении с Северным полушарием): Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М., 2007. 48 с.
- *Гелиогеодинамика*: Природные аспекты глобальных солнечных минимумов. В 3 т. Т. 1, кн. 1 / К.Г. Леви, Н.В. Задонина, С.А. Язев, В.И. Воронин, М.М. Наурзбаев, Р.М. Хантемиров. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2012. 511 с.
- *Гелиогеодинамика*: Природные аспекты глобальных солнечных минимумов. В 3 т. Т. 1, кн. 2 / К.Г. Леви, Н.В. Задонина. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2012. 667 с.
- *Гелиогеодинамика*: Природные аспекты глобальных солнечных минимумов. В 3 т. Т. 1, кн. 3 / К.Г. Леви, Н.В. Задонина. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. 727 с.
- *Гелиогеодинамика*: Природные аспекты глобальных солнечных минимумов. В 3 т. Т. 1, кн. 4 / К.Г. Леви, Н.В. Задонина. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. 607 с.
- Геология и сейсмичность зоны БАМ. Неотектоника / С.И. Шерман, К.Г. Леви, В.В. Ружич, В.А. Саньков, Ю.И. Днепровский, С.В. Рассказов. Новосибирск: Наука, 1984. 207 с.
- Ермолова Н.М. Териофауна долины Ангары в позднем антропогене. Новосибирск: Наука, 1978. 222 с.
- Задонина Н.В., Леви К.Г., Язев С.А. Космические опасности геологического и исторического прошлого Земли. Анализ временных рядов. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007. 77 с.
- *Клементьев А.М.* Ландшафты бассейна реки Уды (Забайкалье) в позднем неоплейстоцене (по фауне крупных млекопитающих): Автореф. ... канд. геогр. наук. Иркутск, 2011. 21 с.
- Клементьев А.М. Фауны позднекаргинского времени Иркутского амфитеатра // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Геоархеология. Этнология. Антропология». 2013. № 1 (2). С. 30–43.
- Клементьев А.М., Николаев В.С. Археозоологическая характеристика поселения Тоток (Южное Приангарье, Сибирь) // Зоологический журнал. 2013. Т. 92. № 9. С. 1088–1097.

- Корина Н.А. Хангайское нагорье // Геоморфология Монгольской народной республики. Труды Совместной Советско-Монгольской научно-исследовательской экспедиции. Вып. 28. М.: Наука, 1982. С. 87–108.
- Лавиолетт П. Лед и Огонь. История глобальных катастроф. М.: Вече, 2008. 508 с.
- Леви К.Г. Неотектонические движения в сейсмоактивных зонах литосферы. Новосибирск: Наука, 1991. 166 с.
- Леви К.Г. Карта неотектоники северо-восточного сектора Азии. Иркутск: ГП «475 Военно-топографическая фабрика», 2008.
- Леви К.Г., Задонина Н.В., Язев С.А., Воронин В.И. Современная геодинамика и гелиогеодинамика. Учебное пособие. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2012. 539 с.
- *Логачев Н.А., Шерман С.И., Леви К.Г.* О принципах и методике составления карты новейшей тектоники Сибири // Методические рекомендации к Атласу тектонических карт и опорных профилей Сибири. Новосибирск, 1981. С. 12–20.
- *Миланкович М.* Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.–Л.: ГОНТИ-НКТП, 1939. 247 с.
- *Николаев Н.И.* Новейшая тектоника СССР (Труды комиссии по изучению четвертичного периода). М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1949. 342 с.
- Радиоуглеродная хронология природных и социальных феноменов Северного полушария. В 3 т. Т. 1 / К.Г. Леви, Н.В. Задонина, С.А. Язев. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2010. 715 с.
- Радиоуглеродная хронология природных и социальных феноменов Северного полушария. В 3 т. Т. 2 / К.Г. Леви, Н.В. Задонина, С.А. Язев. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2011. 527 с.
- Радиоуглеродная хронология природных и социальных феноменов Северного полушария. В 3 т. Т. 3 / К.Г. Леви., Н.В. Задонина, С.А. Язев. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2011. 847 с.
- Рассказов С.В. Ритмы позднекайнозойского вулканизма юго-восточной части Евразиатской плиты // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. З. Природные и социальные сферы как части окружающей среды и как объекты воздействий. М.: Янус–К, 2002. С. 184–189.
- Рассказов С.В., Логачев Н.А., Брандт И.С., Брандт С.Б., Иванов А.В. Геохронология и геодинамика позднего кайнозоя (Южная Сибирь – Южная и Восточная Азия). Новосибирск: ВО Наука. Сибирское отделение, 2000. 288 с.
- Рассказов С.В., Чувашова И.С. Кайнозойские динамические экстремумы в эпизодах извержений коровых выплавок в орогенных и рифтовых структурах Азии // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Вып. 10. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. Т. 2. С. 51–54.
- Рассказов С.В., Чувашова И.С. Глобальное и региональное выражение новейшего геодинамического этапа // Бюллетень МОИП. Отд. геологический. 2013а. Т. 88. Вып. 4. С. 21–35.
- Рассказов С.В., Чувашова И.С. Новейшая мантийная геодинамика Центральной Азии. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013б. 308 с.
- Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2013620655 Кайнозойские вулканические породы Азии. База данных по химическому и изотопному составу / С.В. Рассказов, Т.А. Ясныгина, И.С. Чувашова, М.Е. Маркова – Заявка № 20113620317. Зарегистрировано в Реестре баз данных 27 мая 2013 г.
- Хаин В.Е. Основные проблемы современной геологии. М.: Научный мир, 2003. 348 с.
- Чувашова И.С., Рассказов С.В., Брандт С.Б. Цикличные вариации калия в позднекайнозойских лавах Центральной Монголии // Известия ИГУ. Серия наук о Земле. 2010. Т. З. № 1. С. 159–176.
- Щетников А.А., Клементьев А.М., Сизов А.В., Филинов И.А., Семеней Е.Ю. Новые данные о возрасте неоплейстоценовых отложений Тункинской рифтовой долины (Юго-Западное Прибайкалье) по результатам ¹⁴С датирования фауны крупных млекопитающих // Доклады АН. 2013. Т. 449. № 2. С. 199–204.
- Ярмолюк В.В., Иванов В.Г., Коваленко В.И., Самойлов В.С. Динамика формирования и магматизм позднемезозойскокайнозойской Южно-Хангайской горячей точки мантии (Монголия) // Геотектоника. 1994. № 5. С. 28–45.
- Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Иванов В.Г. Внутриплитная позднемезозойская кайнозойская вулканическая провинция Центральной Восточной Азии – проекция горячего поля мантии // Геотектоника. 1995. № 5. С. 41–67.
- Ярмолюк В.В., Кудряшова Е.А., Козловский А.М., Саватенков В.М. Позднемеловой раннекайнозойский след Южно-Хангайской горячей точки мантии // Вулканология и сейсмология. 2007. № 1. С. 3–31.
- Arndt N., Lesher C.M., Barnes S.J. Komatiite. Cambridge University Press, 2008. 458 p.
- *Enkhtuvshin H.* A petrological study on the Late Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks of the Mongolian Plateau: Master thesis. Shimane University, 1995. 119 p.
- *Glass B.P.* Upper Eocene impact ejecta/spherule layers in marine sediments // Chemie der Erde Geochemistry. 2002. V. 62. Nº 3. P. 173–196. http://dx.doi.org/10.1078/0009-2819-00017.
- Koeberl C., Poag C.W., Reimold W.U., Brandt D. Impact origin of Chesapeake Bay structure and the source of North Ameri-

Rasskazov S.V., Levi K.G.: Periodization of recent and Late Pleistocene – Holocene geodynamic and paleoclimatic processes

can tektites // Science. 1996. V. 271. P. 1263–1266. http://dx.doi.org/10.1126/science.271.5253.1263.

- McArthur J.M., Howarth R.J., Bailey T.R. Strontium isotope stratigraphy: LOWESS version 3: best fit to the marine Srisotope curve for 0–509 Ma and accompanying look-up table for deriving numerical age // Journal of Geology. 2001. V. 109. P. 155–170. http://dx.doi.org/10.1086/319243.
- Rasskazov S.V., Brandt S.B., Brandt I.S. Radiogenic isotopes in geologic processes. Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 2010. 306 p.
- Rasskazov S., Taniguchi H. Magmatic response to the Late Phanerozoic plate subduction beneath East Asia. CNEAS Monograph Series No. 21. Tohoku University, Japan, 2006. 156 p.
- Sanford W. Heat flow and brine generation following the Chesapeake Bay bolide impact // Journal of Geochemical Exploration. 2003. V. 78–79. P. 243–247.
- Solanki S.K., Usoskin I.G., Kromer B., Schüssler M., Beer J. Unusually active Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years // Nature. 2004. V. 431. № 7012. P. 1084–1087. http://dx.doi.org/10.1038/nature02995.

Ward P.D. Out of thin air: dinosaurs, birds, and Earth's ancient atmosphere. The National Academic Press, 2006. 296 p.





Рассказов Сергей Васильевич, докт. геол.-мин. наук, профессор, зав. лабораторией Институт земной коры СО РАН 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия Тел. (3952)511659; ⊠ e-mail: rassk@crust.irk.ru Иркутский государственный университет, геологический факультет, зав. кафедрой динамической геологии

Rasskazov, Sergey V., Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Head of Laboratory Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS 128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia Tel. +7(3952)511659; ⊠ e-mail: rassk@crust.irk.ru Head of the Department of Dynamic Geology, Geological Faculty, Irkutsk State University

Леви Кирилл Георгиевич, докт. геол.-мин. наук, профессор, зам. директора института по науке Институт земной коры СО РАН 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия Тел. (3952)424562; e-mail: levi@crust.irk.ru

Levi, Kirill G., Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Deputy Director Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS 128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia Tel. +7(3952)424562; e-mail: levi@crust.irk.ru PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2014 VOLUME 5 ISSUE 1 PAGES 101-114

http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0119



ISSN 2078-502X

PHYSICAL AND CHEMICAL METHODS OF RESEARCHING ROCKS AND MINERALS IN THE ANALYTICAL CENTRE OF THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST, SB RAS

A. G. Revenko

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: The article presents the information on organizing the studies of chemical and mineral compositions of rocks at the Analytical Centre of the Institute of the Earth's Crust, SB. It describes its main scientific fields and capabilities of laboratory equipment available in the Centre to study rock samples. The past major scientific achievements are given in brief. Scientific results from 2009 to 2013 are presented in a more detail, and a corresponding list of publications is included.

Key words: atomic absorption, atomic emission, X-ray diffraction, X-ray fluorescence, spectrophotometric and thermal methods of analysis, inductively coupled plasma-mass spectrometry.

Citation: *Revenko A.G.* 2014. Physical and chemical methods of researching rocks and minerals in the Analytical Centre of the Institute of the Earth's Crust, SB RAS. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (1), 101–114. doi: 10.5800/GT-2014-5-1-0119.

ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И МИНЕРАЛОВ В АНАЛИТИЧЕСКОМ ЦЕНТРЕ ИЗК СО РАН

А. Г. Ревенко

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация: Представлена информация об организации исследований химического и минерального состава горных пород в ИЗК СО РАН. Охарактеризованы научные направления, развиваемые в Аналитическом центре. Рассмотрены возможности аппаратуры, используемой в настоящее время для изучения геологических образцов. Кратко изложены основные научные достижения прошлых лет и более подробно – научные достижения за период с 2009 по 2013 г., перспективы развития лаборатории. Приведен список основных публикаций сотрудников АЦ.

Ключевые слова: атомно-абсорбционный, атомно-эмиссионный, масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой, рентгеноструктурный, рентгенофлуоресцентный, спектрофотометрический и термический методы анализа.

1. Введение

Изучение вещественного состава геологических образцов – горных пород, руд и минералов, природных вод – требует привлечения комплекса химических и физических методов. Для решения этой задачи в Институте земной коры СО РАН в 50-е годы прошлого века были созданы группы аналитической химии (рук. В.С. Лебедева) и физических методов анализа (атомноэмиссионный спектральный анализ и рентгенография, рук. А.И. Черненко [Скляров, Дорофеева, 2009]), первоначально при отделе петрографии (рук. И.В. Белов [Скляров, Дорофеева, 2009]). В 1962 г. создан отдел аналитических лабораторий (лаборатория физических методов исследования, зав. А.И. Черненко, и химикоаналитическая лаборатория, зав. Г.Н. Кащеев [Скляров, Дорофеева, 2009]). В 1972 г. организована лаборатория изотопии и геохронологии (зав. С.Б. Брандт [Скляров, Дорофеева, 2009]), вошедшая в 1974 г. в состав объединенной лаборатории физических методов исследования, изотопии и геохронологии (зав. до 1988 г. С.Б. Брандт, с 1988 г. – А.Г. Ревенко). Лаборатория химических методов исследования (зав. с 1971 г. по 1995 г. Ю.И. Сизых [Скляров, Дорофеева, 2009]) в 1995 г. вошла в состав лаборатории физических и химических методов исследования горных пород и минералов (зав. А.Г. Ревенко). В 1996 г. из последней выделена в качестве самостоятельного структурного подразделения лаборатория изотопии и геохронологии (зав. С.В. Рассказов [Скляров, Дорофеева, 2009]).

В 1998 г. на базе аналитических подразделений института создан единый Аналитический центр (зав. А.Г. Ревенко). Опыт применения некоторых физических и химических методов для исследования горных пород и минералов, а также полученные результаты исследований представлены в обзорных работах и монографиях [Васильев, 1969; Васильев, Нахмансон, 1986; Ревенко, 1994, 1996; Ревенко и др., 1996]. В настоящей работе рассмотрено современное состояние Аналитического центра и важнейшие результаты, полученные с 2009 г. по настоящее время.

2. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ, РАЗВИВАЕМЫЕ В АНАЛИТИЧЕСКОМ ЦЕНТРЕ

Научное направление: разработка комплексных аналитических методов для решения фундаментальных геологических и экологических задач и обеспечение геологических исследований аналитическими данными.

Основные задачи АЦ – определение элементного и минерального состава горных пород, руд, осадков и других природных и техногенных материалов. Для этих целей применяются методики количественного анализа, разработанные в АЦ, методики HCAM, а также методики, опубликованные в научной литературе. Контроль правильности применяемых методик обеспечивается использованием стандартных образцов химического состава (СО). АЦ располагает большой коллекцией СО геологических материалов (более 150 наименований).

3. МЕТОДЫ АНАЛИЗА, ПРЕДСТАВЛЕННЫЕ В АНАЛИТИЧЕСКОМ ЦЕНТРЕ

- Рентгеноструктурный метод анализа (PCA)
- Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА)
- Атомно-абсорбционный метод анализа (ААА)
- Спектрофотометрический метод анализа
- Атомно-эмиссионный анализ (АЭА)

• Метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (МС ИСП)

• Термический анализ

• Гравиметрический, титриметрический и потенциометрический методы.

В настоящее время (начало 2014 г.) в Аналитическом центре работают 26 человек, в том числе 2 доктора и 4 кандидата наук (фото).

3.1. Рентгенографические исследования

В начальный период эти работы имели чисто аналитические цели, а именно идентификацию минералов по порошковым дифракционным дебаеграммам путем сопоставления полученных рентгенографических данных со справочными. Однако уже в ту пору были публикации о рентгеновских исследованиях минералов и велась целенаправленная работа по применению методов рентгеновской дифракции (Е.К. Васильев).

Начало систематическим рентгеноструктурным исследованиям было положено алмазной тематикой, интенсивно разрабатываемой в институте. В этой связи в 1954 г. начаты рентгенографические исследования и массовые анализы спутников алмазов: гранатов, оливинов, пикроильменитов и др. Для выполнения массовых анализов гранатов разработана экспрессная методика определения параметров элементарной ячейки гранатов, обеспечивающая достаточную точность. С этой целью была сконструирована специальная приставка – держатель образцов, которая устанавливалась в стандартную рентгеновскую камеру. Были построены графики для определения параметров ячейки и усовершенствованы диаграммы, позволяющие оценивать изоморфный состав гранатов по совокупности показателей преломления, удельного веса и параметров элементарной ячейки анализируемого образца. Благодаря этим методическим разработкам из общей массы проанализированных образцов выделялись те, в которых преобладающим минералом был пироп.

На базе накопленных и систематизированных результатов анализов гранатов и их статистической обработки Е.К. Васильевым была подготовлена и в



Коллектив Аналитического центра.

Слева направо, верхний ряд: к.г.-м.н. Н.Н. Ухова, М.М. Самойленко, Т.С. Андреева, А.В. Наумова, В.В. Щербань, С.Н. Роголева, Г.И. Юсупова. Средний ряд: Т.В. Попова, к.г.-м.н. Т.Ю. Черкашина, Е.Г. Колтунова, М.Н. Рубцова, Л.В. Воротынова, Н.Н. Володина. Нижний ряд: С.В. Пантеева, Т.А. Ташлыкова, к.г.-м.н. С.И. Штельмах, Н.В. Нартова, Г.В. Бондарева, д.т.н. А.Г. Ревенко – зав. Аналитическим центром, Н.Ю. Царева.

The staff of the Analytical Centre (left to right).

1st row – S.V. Panteeva, T.A. Tashlykova, S.I. Shtel'makh, N.V. Nartova, G.V. Bondareva, A.G. Revenko (Head of the Analytical Centre), N.Yu. Tsareva; 2nd row – T.V. Popova, T.Yu. Cherkashina, E.G. Koltunova, M.N. Rubtsova, L.V. Vorotynova, N.N. Volodina; 3rd row – N.N. Ukhova, M.M. Samoilenko, T.S. Andreeva, A.V. Naumova, V.V. Shcherban', S.N. Rogoleva, G.I. Yusupova.

1966 г. защищена кандидатская диссертация: «Применение корреляционного анализа при изучении изоморфизма в оливинах и гранатах» (позже изданная в виде монографии [*Bacunbee*, 1969]).

Рентгенографическое изучение изоморфных смесей получило дальнейшее развитие в работах рентгенографической группы, которая сформировалась во второй половине 1960 г. с приходом З.Ф. Ущаповской. Основная задача группы – проведение массовых анализов природных минеральных смесей, качественного рентгенофазового анализа и идентификации минералов по порошковым дифракционным данным. Освоенные и усовершенствованные методики позволили определять степень упорядоченности атомов в полевых шпатах и ее связь с генезисом образцов, параметры ячейки карбонатов, диагностировать разновидности некоторых минералов в пределах группы.

Важнейшее направление – рентгенографическое изучение новых минералов, которые открывают геологи института. Их порошковые дифракционные диаграммы и параметры элементарной ячейки, отражающие уникальность кристаллической структуры, являются фундаментальными данными и выступают в качестве характеристики справочного стандарта. В этой работе ведущая роль принадлежит 3.Ф. Ущаповской. С ее участием открыто около двух десятков новых минералов. В 2009–2013 гг. это оксиванит V_3O_5 и его изоморфный ряд оксиванит-бердесинскит V_2TiO_5 [*Peзницкий и др., 2009*], купрокалининит CuCr₂S₄ – новая сульфошпинель из метаморфических пород Слюдян-

ского комплекса [*Резницкий и др., 2010*]. Большой объем работ выполняется по диагностике новых образований, получаемых при проведении экспериментальных исследований в лаборатории петрологии, геохимии и рудогенеза.

Успешное рентгенографическое изучение вещественного состава природных и синтетических смесей невозможно без базы данных справочных стандартов порошковых дифракционных спектров чистых кристаллических фаз. Работа по ее созданию велась с момента образования рентгенографической группы, в ней участвовали практически все ее сотрудники. Так, при изучении редкометалльных пегматитов Восточного Саяна было изучено более 30 фосфатов. Для их идентификации в 1974 г. сформирован «Рентгеновский определитель фосфатов» [Васильев и др., 1974]. Ведущая роль в этой работе принадлежала Г.М. Кашаевой, которая впервые в СССР установила новые фосфаты: лауэит, штрунцит и митридатит. Создание «Рентгенографического определителя оловосодержащих минералов» [Васильев, Васильева, 1977] обусловлено работами геологов института по оловянной тематике. Эти определители были первыми ласточками, затем такая работа стала проводиться систематически. Начиная с 1956 г. сотрудники группы собирали, обрабатывали и систематизировали порошковые дифракционные данные минералов, которые извлекались из текущей литературы, а также аналогичные данные, полученные в лаборатории. Эти материалы с 1982 г. ежегодно сводились в обзоры-отчеты «Рентгенографический определитель минералов». Было подготовлено 22 таких обзора, в т.ч. [Васильев, Васильева, 1980; Васильев, Евсюнин, 1997]. В определителях обеспечена полнота и унификация приводимых сведений. Е.К. Васильев обеспечивал подготовку и представление порошковых дифракционных данных, главным образом новых минералов, в Международную картотеку порошковых данных чистых кристаллических фаз (PDF). По неполным данным в Международную (Американскую) картотеку было включено более сотни подготовленных им наименований порошковых дифракционных стандартов. С 1987 г. Международный центр дифракционных данных подтверждал включение стандартов в картотеку сертификатами.

Следует выделить работы по рентгенографии глинистых минералов и их смесей. Эта работа первоначально проводилась в рамках лаборатории литологии и осадочных месторождений Г.М. Кашаевой, которая внесла значительный вклад в методические и прикладные исследования этой специфической группы силикатов. Длительное время рентгенографическим изучением глинистых минералов грунтов занималась также Т.А. Сутурина. В настоящее время рентгенографические исследования глинистых минералов продолжают Т.С. Филева, М.Н Рубцова и Д.С. Суворова, используя новые методики [Акулов и др., 1996; Кашик и др., 2001; Рященко и др., 2002; Рубцова, Акулова, 2013а;

Рубцова, 2013б; Suvorova, Rubtsova, 2013].

В разное время сотрудники группы занимались монокристальными структурными исследованиями. Эти исследования получили новый импульс и привлекли внимание специалистов с приходом в группу в 1993 г. В.Г. Евсюнина. Ему совместно с А.А. Кашаевым, А.Н. Сапожниковым и др. удалось определить кристаллические структуры трех минералов – одинцовита, триклинного и ромбического лазурита, являющихся новыми структурными типами неорганических соединений, и уточнить параметры пяти кристаллических структур новых и малоизученных минералов: хромфиллита, Тіделиита, К-баритолампрофиллита, калиевого батисита и гаюина [Расцветаева и др., 1995а, 1995б, 1997; Евсюнин и др., 1996, 1997; Конев и др., 1996]. Анализ кристаллических структур вышеперечисленных минералов позволил сделать следующие выводы:

– в структуре одинцовита обнаружена уникальная упаковка одиночных шестичленных [Si₆O₁₈] колец симметрии в двух взаимно перпендикулярных направлениях; кольца вместе с Ве-тетраэдрами и Ті-октаэдрами образуют трехмерный каркас с каналами, по осям которых располагаются катионы К, между каналами – катионы Na и Ca;

– в структуре триклинного лазурита обнаружена модуляция атомов Al и Si, так что эти атомы смещаются из содалитовых положений, образуя вдоль оси Z две поперечные и одну продольную волны модуляции. Смещение по оси X хорошо описывается синусоидальной функцией. Триклинная симметрия обусловлена разворотом тетраэдров, упорядочением Al и Si, катионным и анионным упорядочением, систематическим искажением длин связей;

– в хромфиллите, изоструктурном мусковиту, вхождение в октаэдрическую позицию Сг вызывает увеличение размера заполненного октаэдра и уменьшение размера пустого октаэдра. Тетраэдрическая сетка образована двумя типами близких друг к другу по форме и размерам тетраэдров, вытянутых вдоль нормали к плоскости спайности;

 – размер межпакетного катиона в лампрофиллитах оказывает влияние только на межслоевое расстояние, оставляя практически неизменными характеристики трехслойного пакета;

– в ряду делиит $K_2 Zr Si_6 O_{15}$ – даванит $K_2 Ti Si_6 O_{15}$ среднее расстояние катион-анион в октаэдре и параметр ячейки *b* прямо пропорционально зависят от содержания титана в этой октаэдрической позиции.

По материалам проведенных исследований В.Г. Евсюниным в 1997 г. защищена кандидатская диссертация на тему: «Кристаллические структуры новых и малоизученных силикатов со слюдо-, пиросмалито- и армстронгитоподобными мотивами».

Подводя итог ретроспективному обзору деятельности рентгенографической группы, отметим следующие результаты.

1. Создана база данных порошковых дифракцион-

ных стандартов «Минералы», включающая три монографии-справочника и 22 машинописных обзора «Рентгенографический определитель минералов» для идентификации минералов и поиска/выбора вероятных кристаллических фаз при ручном и автоматизированном рентгенофазовом анализе.

2. Осуществлена расшифровка и уточнение кристаллических структур ряда минералов, в том числе и открытых геологами института новых минеральных видов. В ходе работ с участием сотрудников лаборатории выявлены новые минералы: тажеранит, азопроит, калининит, наталиит, земкорит, флоренсовит, хлормагалюминит, олекминскит, ольхонскит, магнезиокулсонит, одинцовит, хромфиллит, «Бираит-Се», ванадиодравит, батисивит, оксиванит, купрокалининит. Также идентифицирован ряд редчайших, представляющих вторую-третью находку в мире, например, гарронит, фресноит, паральстонит, перлиалит, денисовит и др. Два минерала названы в честь выдающихся ученых Н.А. Флоренсова (флоренсовит) и М.М. Одинцова (одинцовит). Минерал земкорит назван в честь нашего института.

3. Выполняются текущие рентгенофазовые анализы в интересах лабораторий института (проанализировано более 12 000 проб). Результаты исследований опубликованы в различных отечественных и зарубежных изданиях и докладывались на всероссийских и международных конференциях и конгрессах.

Оборудование. Рентгеновский дифрактометр D8 Advance (Bruker, Германия), позволяющий обрабатывать рентгенограммы в программах Eva, Topas, входит в состав ЦКП Иркутского научного центра СО РАН, установлен в ИГХ СО РАН; дифрактометр ДРОН-3 с персональным компьютером (автоматизированы измерения и расшифровка рентгенограмм); рентгеновские аппараты УРС-55а.

3.2. Рентгенофлуоресцентный анализ

Применение рентгенофлуоресцентного метода анализа (РФА) в институте началось после ввода в эксплуатацию в марте 1989 г. рентгеновского аналитического комплекса: сканирующего рентгеновского спектрометра VRA-30 фирмы Карл Цейсс, Германия. На первом этапе были разработаны методики определения 11 элементов: V, Cr, Co, Ni, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb и Ba. Основное внимание уделялось выбору способа пробоподготовки, оптимальных условий измерения интенсивностей аналитических линий (изменяли потенциал рентгеновской трубки от 20 до 50 кВ и материал ее анода - Cr, Rh, W; время и кратность измерения интенсивностей линий и фона) и способам оценки и учета взаимных влияний элементов [Ревенко, 1989]. В представленную на анализ первую партию проб (110 образцов) входили ультраосновные (дуниты, горнблендиты и серпентениты), основные (габбро, диабазы) и кислые (граниты) горные породы, а также песчаники и хлорититы. Оперативное проведение анализа проб, отобранных геологами в мае 1989 г., позволило учесть полученные результаты и скорректировать программу исследований повторного выезда на полевые работы в августе того же года. Большой вклад в разработку методик РФА на начальном этапе исследований внесли В.М. Новиков, Г.П. Петрова и Е.В. Худоногова [*Ревен*ко, 1989, 1994, 1996а, 19966; *Ревенко и др.*, 1990].

Рентгенофлуоресцентным методом в конце 90-х годов прошлого века определяли содержания следующих элементов: Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni (спектрометр CPM-25); P, S, Cl, K, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Ga, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ba, La, Ce, Pb, Th, U (спектрометр VRA-30). При выборе способа анализа для отдельных элементов в конкретных типах горных пород использовали возможности теоретического моделирования взаимных влияний элементов на ЭВМ. Для оценки взаимных влияний элементов и выбора стандартных образцов (СО), для калибровки теоретически оценивали интенсивности рентгеновской флуоресценции используемых для анализа линий и рассеянного излучения. Расчет выполнялся с помощью программы, опробованной ранее в работах А.Л. Финкельштейна и др. В качестве стандарта использован образец эссекситового габбро СГД-1А. В период до 2000 г. были рассчитаны поправочные коэффициенты для ряда аналитических линий в некоторых магматических, метаморфических и осадочных горных породах [Ревенко, 1994]. В дальнейшем такие оценки потребовались при разработке методики рентгенофлуоресцентного определения содержаний ряда элементов в фосфоритах и вмещающих породах, так как исследуемым образцам свойственны очень широкие диапазоны изменения содержаний (B %): SiO₂ 1.3–89.0, CaO 1.9–45.1, P₂O₅ 0.1–31.9, MgO 1.2-21.2, Al₂O₃ 0.1-10.5, Fe₂O₃ 0.1-5.9. Для большинства аналитических линий отмечено существенное влияние химического состава проб, значения І^{отн} для AlK_{α} лежат в пределах между $I^{\text{отн}}$ для MgK_{α} и SiK_{α} ; $I^{\text{отн}}$ для L_{β_1} -линий Ва и Се, а также L_{α} для La и Nd близки к $I^{{}^{{}_{0TH}}}$ для VK_, $I^{{}_{0TH}}$ для K_-линий Rb, Y, Zr, Nb и PbL_{\beta1} близки к І^{отн} ZnK_a и SrK_a [Худоногова и др, 2001; Cherkashina et al., 2009]. Аналогичные оценки выполнены для растительных материалов и угля, редкоземельных руд, новых стандартных образцов горных пород, почв и отложений, флюоритов, обсидианов и материалов культурного наследия из стекла и керамики [Revenko, 2002, 2010; Ревенко, 2009, 2013; Zuzaan et al., 2013].

По материалам проведенных исследований А.Г. Ревенко в 1994 г. опубликована монография [*Ревенко*, *1994*], а в 1995 г. защищена докторская диссертация на тему: «Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ природных материалов».

За период с 2009 г. по настоящее время выполнены следующие разработки:

– Для рентгеновского спектрометра S8 TIGER фирмы Bruker разработаны методики количественного рентгенофлуоресцентного определения малых содержаний 20 элементов в горных породах разнообразного состава. В качестве излучателей применяли прессованные таблетки с подложкой из борной кислоты и таблетки, для которых анализируемый материал перед прессованием смешивали со связующим веществом (ваксой) в соотношении 5:1. При определении содержаний ряда элементов вносились поправки на наложение излучения линий, имеющих длины волн, близкие к длинам волн определяемых элементов. В методиках реализован способ стандарта фона в сочетании с уравнением линейной множественной регрессии (использовали интенсивности К_α-линий породообразующих элементов Si, Fe и Ca). Сделана оценка метрологических характеристик разработанных методик. Пределы обнаружения для выбранных условий анализа составили (ppm): для Со, Ga, Ni, Cu – 0.6–1.0; для S, Cl, K, Sc, Ti, V, Cr, Zn, Sn, Nd – 1.4–5.0; для P, Mn, Ba, La, Ce - 5.5-8.0.

- Разработана методика количественного рентгенофлуоресцентного определения Sr, Rb, U, Th и Pb в горных породах карбонатного состава. Измерения выполнены с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра с волновой дисперсией S8 TIGER (Bruker Nano GmbH, Германия). Излучатели прессовали из порошковой пробы массой 5 г с использованием связующего вещества (воск) в соотношении 5:1. Время измерения интенсивностей излучения аналитических линий и фона для Sr и Rb составило (с) 60 и 30, для U - 350 и 300, для Th - 200 и 100, для Pb - 100 и 50, соответственно. В качестве аналитических использовались К_а-линии Sr и Rb и L_а-линии U, Th и Pb. Значения пределов обнаружения элементов С_{тіп} оценены с помощью Зσ-критерия. Величину σ_{хол}, характеризующую разброс результатов определения интенсивности фона от холостой пробы, рассчитывали по результатам повторных измерений 10 излучателей, полученных путем прессования диоксида кремния на подложке из борной кислоты. Пределы обнаружения составили (ppm): для Rb и Sr – 3, Pb – 0.8, Th – 1.5 и U – 2. Коэффициенты вариации, характеризующие внутрилабораторную прецизионность, составили (в %) 2.5, 11, 11.2, 3.4 и 6.3 для Rb, Sr, U, Pb и Th, соответственно.

– Разработана методика рентгенофлуоресцентного определения малых содержаний тантала для горных пород различного типа. Измерения выполнены с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра с волновой дисперсией S8 TIGER. Излучатели прессовали из порошковой пробы массой 1-2 г с использованием полуавтоматического гидравлического пресса НЕRZOG HTP-40. Выбраны оптимальные условия для возбуждения и регистрации характеристического излучения Та и фоновых позиций: потенциал – 50 кВ, сила тока – 55 мА, А1–фильтр на пути первичного излучения толщиной 500 мкм, кристалл-анализатор LiF (220), коллиматор с угловой расходимостью – 0.17°, время измерения аналитической линии и фона 200 и 100 с, соответственно. Пределы обнаружения Та, рассчитанные с использованием интенсивностей рассмотренных линий TaL_{α} и TaL_{β} , составили 3.1 и 2.6 ppm, соответственно. В качестве аналитической линии использована $TaL_{\beta 1}$ -линия. Для точного определения содержания Та учтен вклад постороннего излучения в экспериментальную интенсивность аналитической линии. Проведенные метрологические исследования для разработанной методики показали, что систематическая составляющая погрешности оказалась незначимой, а точность определения содержаний Та соответствует требованиям, предъявляемым к методикам III категории точности. Выполнено количественное определение концентрации Та в гранитных пегматитовых образцах [*Суворова и др., 2014*].

– Разработана методика определения Rb, Sr, Cs, Ba и Pb в полевых шпатах из малых навесок массой 50 мг методом рентгенофлуоресцентного анализа с полным внешним отражением (РФА ПВО). Предварительно 0.05 г порошка горной породы смешивали с 2.5 мл 1 % водного раствора Triton X-100, добавляли стандартный раствор Se и готовили суспензии с последующим нанесением их на кварцевый отражатель и высушиванием. Рассчитанные значения пределов обнаружения определяемых элементов для спектрометра S2 PICOFOX составили 1–15 мг/кг [Черкашина и др., 2012; Cherkashina et al., 2013].

– Разработана методика РФА с полным внешним отражением (РФА ПВО) для определения содержаний элементов в суспензиях из порошковых геологических образцов. Процедура приготовления излучателей в форме суспензии проста и не требует использования реактивов, которые могут вносить дополнительные погрешности в подготовку проб. В качестве подложки выбраны кварцевые отражатели. Проведены исследования по выбору оптимальных условий приготовления и измерения излучателей. Для выбранных условий значения пределов обнаружения в суспензиях СО горных пород для спектрометра S2 PICOFOX (Bruker Nano GmbH) составили 1-6 ppm, что сопоставимо с C_{\min} , полученными для спектрометра с волновой дисперсией S4 Pioneer. Выполнен эксперимент по схеме однофакторного дисперсионного анализа для оценки отдельных составляющих погрешности методики анализа. Погрешность приготовления излучателей (V_{ПП}) оказалась незначимой на фоне погрешностей измерения и обработки спектров. Коэффициент вариации, характеризующий воспроизводимость измерения интенсивностей аналитических линий, составляет 2–12 % для Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, Sr, Y, Ce, Pb, Th, U [Пантеева и др., 2011].

– Разработана методика определения S, Cl, K, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Ba и Pb в пресных водах на рентгеновском спектрометре с ПВО S2 PICOFOX. Для приготовления излучателя в пробу объемом 1 мл вводили 20 мкл стандартного раствора Ga (Merck) с концентрацией 10 мг/л, перемешивали, а

затем аликвоту 10 мкл наносили на кварцевую подложку-отражатель диаметром 30 мм, после высушивания которой выполняли измерение спектра (1000 с). Для улучшения однородности распределения материала пробы поверхность отражателя покрывали гидрофобной жидкостью – раствором силикона в изопропаноле (Serva), что снижало погрешность приготовления излучателей для элементов с Z≤20 в 2–5 раз. Пределы обнаружения для Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr, и Pb – 0.5–2.0 мкг/л; для S, Cl, K, Ca и V – 2-4 мкг/л; Ва – 5-10 мкг/л. Коэффициент вариации, характеризующий внутрилабораторную прецизионность, в зависимости от содержания аналита, составляет для S, Cl, Zn, As, Se, Br – 3–10 %; K, Ca, Sr – 2–5 %; V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Rb, Ba, Pb – 6–25 %. Для контроля правильности результатов анализа использовали многоэлементный стандартный раствор поверхностных вод. Для ряда проб результаты РФА сопоставлены с данными, полученными методами «мокрой» химии и ИСП-МС [Пашкова, Ревенко, 2013a; Pashkova et al., 2013].

– Разработана методика рентгенофлуоресцентного определения Cl, K, Ca, Br и Sr в рассолах (минерализация 200–350 г/л) на спектрометре РФА ПВО S2 PICOFOX (Bruker Nano GmbH). Показано, что при РФА ПВО высокоминерализованных проб излучатель не соответствует критерию «тонкого» слоя, поэтому перед проведением анализа пробы разбавляли в 100 раз 1%-ным раствором поверхностно-активного вещества Triton X-100, что снизило влияние поверхностной плотности излучателя на результаты РФА ПВО, а также позволило избежать неравномерного распределения аналитов и внутреннего стандарта из-за кристаллизации солей. Для приготовления излучателей от разбавленной пробы отбирается аликвота 1 мл, добавляется 10 мкл раствора Ga (1 г/л). После перемешивания 10 мкл полученного раствора наносится на кварцевый отражатель, поверхность которого покрыта раствором силикона в изопропаноле, и высушивается. Для выбранных условий пробоподготовки рассчитанный по схеме однофакторного дисперсионного анализа коэффициент вариации, характеризующий воспроизводимость измерения аналитического сигнала, составил 1-2 %; коэффициент вариации, характеризующий погрешность приготовления излучателей, - 3-5 %. Для контроля правильности результатов РФА ПВО использовали результаты химического анализа с титриметрическим и спектрофотометрическим окончанием. Расхождения между результатами определения Cl, K, Ca, Вг и Sr методиками РФА ПВО и химического анализа составили менее 10 % [Пашкова, Ревенко, 2013б; Pashkova et al., 2013].

В отчетный период сотрудниками АЦ подготовлены и защищены кандидатские диссертации: С.И. Штельмах (2010 г.) на тему «Распределение микроэлементов в дисперсных грунтах ключевых участков юга Восточной Сибири (инженерно-геологические и геоэкогические аспекты)», Т.Ю. Черкашиной (2010 г.) на тему «Геохимия фосфоритов юга Сибири и севера Монголии» и Г.В. Пашковой (2011 г.) на тему «Изучение источников погрешностей и разработка недеструктивных методик рентгенофлуоресцентного анализа молочных продуктов».

В период с 2009 г. по настоящее время опубликован ряд обзорных работ, в которых рассмотрены особенности применения РФА для исследования различных материалов [Игнатова и др., 2011; Пашкова, 2010; Пашкова и др., 2011; Ревенко, 2010, 2011а, 2011б, 2012, 2013а, 2013б; Смагунова и др., 2014; Шишелова и др., 2009; Revenko, 2012; Smagunova, Pashkova, 2013]. Публикация [Ревенко, Евсюнин, 2013] посвящена юбилею Е.К. Васильева.

Оборудование. Рентгеновский спектрометр с волновой дисперсией S8 TIGER (Bruker, Германия), входит в состав ЦКП Иркутского научного центра СО РАН, установлен в ИЗК СО РАН; рентгеновский спектрометр с волновой дисперсией S4 PIONEER (Bruker, Германия), входит в состав ЦКП Иркутского научного центра СО РАН, установлен в ИГХ СО РАН; рентгеновский спектрометр с ПВО настольного типа S2 PICOFOX (Bruker, Германия), входит в состав ЦКП Иркутского научного центра СО РАН, установлен в ИЗК СО РАН; полуавтоматический гидравлический пресс HERZOG HTP-40 (Германия).

3.3. Атомно-эмиссионный анализ

Основная задача группы атомно-эмиссионного анализа – проведение массовых качественных и количественных анализов образцов различных горных пород и минералов. Помимо этого, активно разрабатывались новые методики для геологов института. Так, в связи с алмазной тематикой института в 1957–1958 гг. разработана методика диагностики пиропов и пикроильменитов по количественному содержанию Mg и Cr (А.И. Черненко, Т.И. Елизарьева). В это же время разработаны методики определения Rb и Cs в различных породах и минералах (Т.И. Елизарьева), элементов группы Fe (А.И. Кузнецова) и Pb, Sn, Zn (Э.Я. Огнева) и др.

При исследовании в институте закономерностей формирования месторождений Au остро встал вопрос об определении малых содержаний Au (10⁻⁷÷10⁻⁸ %) в образцах горных пород. Разработка спектрохимической методики количественного определения содержаний Au в осадочно-метаморфических породах велась сотрудниками трех лабораторий: лаборатории рудных формаций и металлогении, физических методов исследования горных пород и минералов, а также аналитической химии минералов и горных пород (В.А. Буряк, А.И. Черненко, Ю.И. Сизых, Л.Д. Русина, Р.М. Клячина, Т.П. Волынец, Т.И. Елизарьева). Полученные данные использовались в изучении закономерностей формирования золотоносных месторождений и геохимии Au. На базе полученных результатов анализов ос-

Число элементоопределений, выполненных различными методами в Аналитическом центре ИЗК СО РАН

Statistics of determinations	of el	lements b	y various	methods in	the	Institute of	f the	e Earth's	Crust,	SB F	RAS
------------------------------	-------	-----------	-----------	------------	-----	--------------	-------	-----------	--------	------	-----

Период	XA	ЭСА	РФА	ICP-MS	Bcero
1991–1995 гг.,	8970	3627	11534	_	24331
среднее за год, в %	37.7	14.9	47.4		100
1996–2000 гг.,	12633	6727	7011	-	26371
среднее за год, в %	47.9	25.5	26.6		100
2001	10868	8744	6310	5454	31376
2002	12656	8360	6150	10014	37180
2003	22580	8948	5347	7125	44000
2004	19019	12690	11399	11600	54708
2005	16107	7723	20640	10400	54870
Среднее за год,	16246	9293	9969	8919	44427
в %	36.6	20.9	22.4	20.1	100
2006	14142	5946	22634	8350	51070
в %	27.7	11.6	44.3	16.4	100
2007	18371	2914	23770	12860	57915
в %	31.7	5.0	41.0	22.2	100
2008	20538	4000	29026	15594	69158
в%	29.7	5.8	42.0	22.5	100
2009	18162	5746	27478	6010	57396
в %	31.6	10.0	47.9	10.5	100
2010	20330	5102	35080	5320	65832
2010, в %	30.9	7.6	53.4	8.1	100
Среднее за год,	18309	4742	27598	9627	60274
в %	30.4	7.9	45.7	16.0	100
2011	21974	5339	22862	12318	62493
в %	35.2	8.5	36.6	19.7	100
2012	23576	4748	10782	14696	53802
в %	43.8	8.8	20.0	27.3	100
2013	22196	6744	15950	7120	52010
в %	42.65	13.0	30.7	13.65	100

новных и ультраосновных пород [*Грудинин и др.*, 1974; *Грудинин и др.*, 1977] Т.И. Елизарьевой в 1978 г. защищена кандидатская диссертация на тему «Закономерности распределения элементов группы железа (Ni, Co, Cr, V, Ti) в базитах и гипербазитах Байкальской горной области».

Новые задачи возникли в связи с анализом пиритов, кальциевых минералов и карбонатных пород, а также в связи с необходимостью определения кларковых содержаний Au, Pt и Pd. В этот период в лаборатории разработаны следующие методики [Брандт и др., 1981; Фефелов и др., 1989; Шаров и др., 1991, 1995]: химико-спектральное определение малых содержаний Au, Pt и Pd (Т.И. Елизарьева, Ю.И. Сизых, P.М. Клячина, Л.Г. Ефремова); определение элементов группы железа и Pb в пиритах, определение Pb в апатитах и элементов группы Fe, Cu и Zr в гранатах и биотитах для изучения минерального состава монофракций (В.А. Русакова); определение Cu и элементов группы Fe в карбонатах и фосфоритах (В.В. Щербань).

Помимо выполнения текущих анализов группа постоянно участвовала в аттестации СО горных пород, почв, илов.

В 2012–2013 гг. в группе ЭСА проведена модернизация спектрографа ДФС-13 – установлен многоканальный анализатор атомно-эмиссионных спектров МАЭС, заменивший фотокассету и выполняющий преобразование оптического изображения спектра в электрические сигналы с последующим преобразованием в цифровые коды и вводом в компьютер.

Преимущества анализатора МАЭС: более широкий диапазон спектральной чувствительности; более широкий динамический диапазон; получение результатов анализа в реальном времени; развитый программный сервис, позволяющий исключить ошибки, возникающие при ручной обработке результатов измерения, облегчить труд аналитиков и повысить производительность анализов примерно на 20 %.

Группа АЭА в настоящее время выполняет количественное определение Be, Pb, Sn, Zn, Ba, Sr, Co, Ni, Sc, V, Cr, Cu и Мо в горных породах и минералах с использованием методик НСАМ. Элементы разделены на три группы для совместного определения по наличию удобных аналитических линий и особенностям их атомизации в дуговом источнике: 1) Ва, Sr, Co, Ni, Sc, V, Cr, Mo, Cu; 2) Pb, Sn, Zn и 3) Be. На анализ принимаются истертые до -200 меш (0,074 мм) пробы. При определении элементов одной группы навеска должна быть не менее 150 мг, а для определения всех 13 элементов – не менее 450 мг. Диапазон определяемых концентраций (ppm): Ва, Sr – 50–3000, Со, Sc – 2–500, Ni, Cu – 1–4000, V – 2–1000, Cr – 6–4000, Mo – 1–500, Be – 0,3–200, Pb, Sn – 1–1000, Zn – 10–1000. Допустимые среднеквадратичные относительные отклонения S_{max} не более 30 %.

Оборудование. Дифракционные спектрографы ДФС-8 и модернизированный ДФС-13 (установлены многоканальный анализатор атомно-эмиссионных спектров МАЭС (ВМК – Оптоэлектроника, г. Новосибирск) и универсальный генератор «Везувий-З»).

3.4. Химические методы анализа

Систематическое выполнение анализов началось в 1954 г. Анализы выполняли аналитики В.С. Лебедева, Т.А. Лахно, А.Г. Таскина. В разное время в химгруппе работали такие первоклассные аналитики, как Л.В. Комарова, Л.Д. Русина, Р.М. Клячина, К.Ф. Дмитриева, Г.В. Бондарева, В.М. Новиков, Ю.И. Сизых, А.И. Курбатова. В настоящее время их эстафету приняли М.М. Самойленко, Н.Н. Ухова, Н.Ю. Царева, Т.В. Попова, Е.Г. Колтунова. Более 30 лет поддерживают жизнедеятельность химгруппы лаборанты Г.И. Юсупова и С.Н. Роголева. В практической деятельности группы кроме текущих анализов всегда уделялось большое внимание освоению и внедрению современных методов анализа, направленных на решение следующих проблем: повышение точности и экспрессности анализа [Юферова и др., 1997]; анализ новых объектов [Конев и др., 1969, 1970; Егоров и др., 1988; Летников и др., 1996; Скляров и др., 2007]; расширение круга определяемых элементов; освоение современных методов анализа [Ухова и др., 2010].

В общей сложности аналитиками химгруппы разработано и освоено более 50 аналитических методик. С приходом В.М. Новикова (1975 г.) в группе интенсивно внедрялись методы эмиссионной и атомно-абсорбционной спектрофотометрии пламени. Освоены и успешно применяются методики атомно-абсорбционного определения Са, Mg, Mn, Sr, Fe, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Au. На базе спектрометра ДФС-12 собрана высокочувствительная установка для определения щелочных элементов. По чувствительности определения Li, Rb и Cs она превосходила многие заводские приборы. Удачное сочетание обычных спектрофотометрических методов с методами атомной абсорбции позволило усовершенствовать схему полного химического анализа горных пород и минералов [*Сизых*, 1985]. В отработке схемы принимали участие В.М. Новиков, Г.В. Бондарева, Г.А. Кравченко, А.И. Курбатова, О.В. Агалакова. Эта схема оказалась экспрессной и требовала существенно меньшую навеску, а главное, обладала большей точностью определения содержаний ряда элементов. Метрологическая оценка разработанной схемы показала, что при соблюдении рекомендованных условий анализа сумма определяемых компонентов находится в пределах (100±0.5) %, что соответствует уровню высокоточного арбитражного анализа.

Важное место в деятельности химгруппы занимают работы, связанные с определением благородных металлов. Ю.И. Сизых и А.И. Черненко с соавторами разработали (1971 г.) спектрохимический метод определения кларковых содержаний Аи в горных породах. Данным методом аналитики Р.М. Клячина, Л.Д. Русина, Т.И. Елизарьева и Т.П. Волынец выполнили несколько тысяч определений Au, которые легли в основу аналитических данных, использованных в докторской диссертации В.А. Буряка, лауреата Ленинской премии за открытие золоторудного месторождения «Сухой Лог». В дальнейшем методика определения Аи была усовершенствована. В 1977 г. вместо концентрирования Au соосаждением на теллуре применили более простой экстракционный способ концентрирования органическим сульфидом. Необходимость определения кроме Au других благородных металлов привела к разработке новой комбинированной методики, основанной на сорбционном концентрировании Au, Pt и Pd кремнийорганическим сорбентом ПСТМ-3.

В настоящее время химгруппа состоит из 8 человек, обеспечена необходимым оборудованием и способна решать сложные аналитические задачи. Основной специализацией группы с самого ее основания является силикатный анализ – определение содержаний SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, FeO, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, Р₂О₅, H₂O⁻, CO₂, ППП (потери при прокаливании). Кроме этого определяются содержания F, S, Sr, Li, Rb в горных породах, минералах, рудах, почвах. Применяемая в настоящее время схема силикатного анализа является сочетанием классических и физико-химических методов определения породообразующих оксидов с применением атомно-абсорбционного и спектрофотометрического анализа. Результаты исследования некоторых типов горных пород представлены в работах [Кузнецова и др., 2004; Кузнецова, Сизых, 2004; Сизых Вал.И. и др., 2004а, 2004б; Шаров, Сизых 2007а, 2007б; Рященко и др., 2011а, 2011б; Гладкочуб и др., 2010; Скляров и др., 2010; Ryashchenko et al., 2011; Солотчина и др., 2013].

С использованием результатов анализов образцов грунта Байкальского региона Н.Н. Уховой в 2007 г. защищена кандидатская диссертация на тему «Хими-

ческий состав и физико-химические свойства дисперсных грунтов как критерий их инженерно-геологической оценки (на примере опорных разрезов юга Восточной Сибири)». Совместно с научным руководителем по материалам проведенных исследований ею опубликована монография [*Рященко*, *Ухова*, 2008].

Оборудование. Атомно-абсорбционный спектрофотометр SOLAAR M6 (Thermo Elemental, INTERTECH Corporation, США), применяется для определения Fe_2O_{3o6iii} , MnO, CaO, MgO, K₂O, Na₂O, Li, Rb и Sr, и спектрофотометрический комплекс Genesys 10S (Thermo Fisher Scientific, США) – определение SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, FeO, P₂O₅.

3.5. МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМОЙ

Главными достоинствами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (МС ИСП) как метода для геохимического анализа являются его многоэлементность, высокая чувствительность, скорость, широкий диапазон измерения концентраций элементов, возможность определения до 40 элементов из малой навески образца.

С 2001 г. в АЦ внедрена методика количественного определения содержаний Sc, Ga, Ge, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Sn, Cs, Ba, P3Э, Hf, Ta, W, Pb, Th, U в минералах и горных породах различного состава с помощью метода МС ИСП [*Panteeva et al., 2003; Савельева и др., 2003; Пантеева и др., 2008; Пантеева, 2009*]. Пределы обнаружения определяемых элементов находятся в диапазоне 0.0001–1 ррт. Для выполнения анализа требуется не менее 100 мг истертой в порошок пробы с размером частиц – 200 меш (0.074 мм).

Выбор способа разложения исследуемых образцов зависит от их предполагаемого химического и минералогического состава. Для горных пород ультраосновного, основного и среднего состава, а также осадочных пород используется методика открытого кислотного разложения. Для подготовки к анализу кислых и трудновскрываемых горных пород и минералов применяется усовершенствованная методика сплавления с метаборатом лития.

Оборудование. Квадрупольный масс-спектрометр Agilent 7500се (Agilent Technologies Inc., США), входит в состав ЦКП Иркутского научного центра СО РАН, установлен в Лимнологическом институте СО РАН.

3.6. Термический анализ

Термический анализ используется для следующих целей [Ревенко и др., 1996б; Савельева и др., 1992; Базарова и др., 2011]:

1) для определения качественного фазового состава минеральных смесей и горных пород;

2) для идентификации минералов по термическим

эффектам;

3) для определения потери веса образцов при нагревании до 1000–1200 °C.

Оборудование. Дериватограф Q-1500, Венгрия.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Динамика выполнения анализов образцов горных пород различными методами за период с 1991 г. иллюстрируется данными, приведенными в таблице. Первые результаты для рентгенофлуоресцентного метода анализа получены в 1989 г. (1100 эл./опр.), а уже в 1990 г. выполнено 10 000 эл./опр. Общий спад 1993-1994 гг. обусловлен известными причинами (резкое уменьшение финансирования экспедиционных работ, что привело к существенному снижению количества исследуемых проб; сокращение штата, неполный рабочий день, отсутствие финансирования комплектующих и расходных материалов, разработка и освоение методик исследования не анализируемых ранее в лаборатории типов горных пород). Общее улучшение показателей в 1996-2000 гг. и в последующие годы показывает возможности Аналитического центра адаптироваться и выполнять свои основные задачи в сложных и постоянно изменяющихся условиях «окружающей среды». Тем не менее необходимо обратить внимание на существенное снижение числа элементоопределений, выполняемых рентгенофлуоресцентным методом анализа начиная с 1997 г. Основная причина этого спада – износ спектрометров (год выпуска VRA-30 – 1988, СРМ-25 – 1990), что в условиях отсутствия бюджетного финансирования приобретения комплектующих и расходных материалов не позволяло оперативно их ремонтировать.

С 1970 г. и по настоящее время АЦ является участником аттестационных исследований вновь создаваемых в нашей стране стандартных образцов химического состава горных пород и других природных образований. В общей сложности проанализировано более 80 образцов. Предполагается и в дальнейшем принимать активное участие в аттестационных анализах, так как это уникальная возможность объективно оценивать качество своей работы, сопоставляя результаты получаемых аналитиками АЦ аттестационных анализов с паспортными (аттестованными) содержаниями.

Высокий профессиональный уровень специалистов и надежность выполняемых, с использованием разработанных методик, анализов неоднократно подтверждены участием аналитиков в выполнении аттестационных определений химического состава новых СО горных пород, золы каменного угля, донных отложений и почв. С 2001 г. АЦ участвует в программе Международного профессионального тестирования аналитических геохимических лабораторий GeoPT «An International Proficiency Test for Analytical Geochemistry Laboratories» [Пантеева, 2008, 2009].
5. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Акулов Н.И., Кашик С.А., Мазилов В.Н., Филева Т.С. Коры выветривания южного побережья озера Байкал // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 10. С. 82–87.
- Базарова Е.П., Гутарева О.С., Кононов А.М., Ущаповская З.Ф., Нартова Н.В., Осинцев А.В. Минералы пещеры Охотничья (Байкальский регион, Иркутская область) // Спелеология и карстология. 2011. № 7. С. 5–14.
- Брандт С.Б., Елизарьева Т.И., Конев А.А. и др. Об изотопном составе Nd и Sr в щелочно-ультраосновных карбонатитовых комплексах Сибири и MHP // Доклады АН СССР. 1981. Т. 260. № 2. С. 466–469.
- Васильев Е.К. Применение корреляционного анализа при изучении изоморфизма в оливинах и гранатах. М.: Наука, 1969. 104 с.
- Васильев Е.К., Васильева Н.П. Рентгенографический определитель оловосодержащих минералов. Новосибирск: Наука, 1977. 77 с.
- Васильев Е.К., Васильева Н.П. Рентгенографический определитель карбонатов. Новосибирск: Наука, 1980. 143 с.
- Васильев Е.К., Евсюнин В.Г. Рентгенографический определитель минералов (по данным 1995–1996 годов). Отчет ИЗК СО РАН. Иркутск, 1997. 112 с.
- Васильев Е.К., Кашаева Г.М., Ущаповская З.Ф. Рентгенографический определитель минералов (класс фосфатов). М.: Наука, 1974. 206 с.
- Васильев Е.К., Нахмансон М.С. Качественный рентгенофазовый анализ. Новосибирск: Наука, 1986. 195 с.
- Васильев Е.К., Сизых Ю.И., Черненко А.И. Исследования горных пород и минералов физическими и химическими методами // Геология и геофизика Восточной Сибири (Информационный сборник № 2). Иркутск, 1971. С. 205–213.
- Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Иванов А.В., Эрнст Р., Мазукабзов А.М., Писаревский С.А., Ухова Н.Н. Фанерозойский базитовый магматизм южного фланга Сибирского кратона и его геодинамическая интерпретация // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. С. 1223–1239.
- Грудинин М.И., Елизарьева Т.И., Забоева Н.В. Особенности химизма основных и ультраосновных пород Байкальской горной области // Геохимия. 1977. № 4. С. 542–549.
- Грудинин М.И., Прудовский Э.Л., Елизарьева Т.И. Формации основных и ультраосновных пород Байкальской горной области // Известия АН СССР, серия геологическая. 1974. № 10. С. 40–48.
- Евсюнин В.Г., Сапожников А.Н., Расцветаева Р.К., Кашаев А.А. Кристаллическая структура высококалиевого гаюина из Ариссия (Италия) // Кристаллография. 1996. Т. 41. № 4. С. 659–662.
- Евсюнин В.Г., Сапожников А.Н., Кашаев А.А., Расцветаева Р.К. Кристаллическая структура триклинного лазурита // Кристаллография. 1997. Т. 42. № 6. С. 1014–1021.
- *Егоров К.Н., Ущаповская* 3.Ф., *Сизых Ю.И.* и др. Земкорит новый карбонат из кимберлитов Якутии // Доклады АН СССР. 1988. Т. 301. № 1. С. 188–193.
- Игнатова Ю.А., Еритенко А.Н., Ревенко А.Г., Цветянский А.Л. Рентгенофлуоресцентный анализ твердотельных плёнок и покрытий // Аналитика и контроль. 2011. Т. 15. № 2. С. 126–140.
- Кашик С.А., Ломоносова Т.К., Филева Т.С. Генетические типы глинистых минералов в донных отложениях южной котловины озера Байкал // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 1–2. С. 164–174.
- Конев А.А., Кашаев А.А., Лебедева В.С., Ущаповская З.Ф. Азопроит новый минерал из группы людвигита // ЗВМО. 1970. Т. 99. Вып. 2. С. 225–232.
- Конев А.А., Кашаев А.А., Ущаповская З.Ф., Лебедева В.С. Тажеранит новый кальций-титан-циркониевый минерал // Доклады АН СССР. 1969. Т. 186. № 4. С. 917–920.
- Конев А.А., Расцветаева Р.К., Евсюнин В.Г. и др. Титанистый делиит с Мурунского массива // ЗВМО. 1996. № 1. С. 81–88.
- Кузнецова О.В., Коржова Е.Н., Смагунова А.Н., Мухетдинова А.В., Томилова О.А., Сизых Ю.И. Сопоставление результатов атомно-абсорбционного и рентгенофлуоресцентного определения металлов в атмосферных аэрозолях // Журнал аналитической химии. 2004. Т. 59. № 1. С. 46–51.
- *Кузнецова Л.Г., Сизых Ю.И.* К вопросу о природе скаполита в редкометалльных пегматитах Сангилена // Доклады *АН.* 2004. Т. 395. № 5. С. 655–660.
- Летников Ф.А., Савельева В.Б., Аникина Ю.В., Смагунова М.М. Высокоуглеродистые тектониты новый тип концентрирования золота и платины // Доклады АН. 1996. Т. 347. № 6. С. 795–798.
- Пантеева С.В. Особенности определения содержаний ряда элементов в горных породах различного состава методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и рентгенофлуоресцентного анализа // Аналитика и контроль. 2009. Т. 13. № 4. С. 184–192.
- Пантеева С.В., Черкашина Т.Ю., Ревенко А.Г., Финкельштейн А.Л. Оценка возможности применения рентгеновского спектрометра с полным внешним отражением S2 PICOFOX для анализа горных пород // Аналитика и контроль. 2011. Т. 15. № 3. С. 344–352.

A.G. Revenko: Physical and chemical methods of researching rocks and minerals...

- Пантеева С.В., Черкашина Т.Ю., Худоногова Е.В., Ревенко А.Г. Определение содержаний редкоземельных и ряда рассеянных элементов в монгольских стандартных образцах программы GeoPT при помощи методов ИСП МС и РФА // Вестник ИрГТУ. 2008. № 3 (35). С. 167–174.
- *Пашкова Г.В.* Рентгенофлуоресцентный анализ молока и основанных на нем продуктов // Аналитика и контроль. 2010. Т. 14. № 1. С. 4–15.
- Пашкова Г.В., Ревенко А.Г. Выбор условий проведения анализа природных вод на рентгеновском спектрометре с полным внешним отражением // Аналитика и контроль. 2013а. Т. 17. № 1. С. 10–20.
- Пашкова Г.В., Ревенко А.Г. Рентгенофлуоресцентное определение элементов в воде с использованием спектрометра с полным внешним отражением // Аналитика и контроль. 2013б. Т. 17. № 2. С. 122–140.
- Пашкова Г.В., Смагунова А.Н., Финкельштейн А.Л. Возможности рентгенофлуоресцентного анализа молочных продуктов с помощью спектрометра с полным внешним отражением // Химия в интересах устойчивого развития. 2011. № 3. С. 295–304.
- Расцветаева Р.К., Евсюнин В.Г., Кашаев А.А. Кристаллическая структура нового природного К, Na, Ca титанобериллосиликата // Кристаллография. 1995а. Т. 40. № 2. С. 253–257.
- Расцветаева Р.К., Евсюнин В.Г., Конев А.А. Кристаллическая структура К-баритолампрофиллита // Кристаллография. 1995б. Т. 40. № 3. С. 517–519.
- Расцветаева Р.К., Пущаровский Д.Ю., Конев А.А., Евсюнин В.Г. Кристаллическая структура К-содержащего батисита // Кристаллография. 1997. Т. 42. № 5. С. 837–840.
- Ревенко А.Г. Рентгенофлуоресцентное определение содержаний следовых элементов в образцах горных пород // Тезисы докладов II Всесоюзного совещания по РСА. Иркутск, 1989. С. 190.
- Ревенко А.Г. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ природных материалов. Новосибирск: Наука. Сиб. издательская фирма, 1994. 264 с.
- Ревенко А.Г. Применение рентгенофлуоресцентного анализа в геологии // Применение рентгеновских лучей в науке и технике. Иркутск: ИГУ, 1996. С. 68–77.
- Ревенко А.Г. Учет взаимных влияний элементов при рентгеноспектральных исследованиях материалов культурного наследия из стекла // Аналитика и контроль. 2009. Т. 13. № 1. С. 4–22.
- Ревенко А.Г. Особенности методик анализа геологических образцов с использованием рентгенофлуоресцентных спектрометров с полным внешним отражением (TXRF) // Аналитика и контроль. 2010. Т. 14. № 2. С. 42–64.
- *Ревенко А.Г.* Развитие рентгенофлуоресцентного анализа в России в 1991–2010 годах // *Журнал аналитической химии.* 2011а. Т. 66. № 11. С. 1174–1187.
- Ревенко А.Г. К 40-летию журнала «X-Ray Spectrometry» // Аналитика и контроль. 2011б. Т. 15. № 4. С. 370–377.
- *Ревенко А.Г.* Развитие рентгенофлуоресцентного анализа в России в 1991-2010 годах // Очерки Российской аналитической химии / Авторы-составители Ю.А. Золотов, В.К. Карандашев. Гл. 6 «Методы анализа». М.: Курс, 2012. С. 372–399.
- Ревенко А.Г., Брандт С.Б., Лепин В.С., Фефелов Н.Н., Тьков А.В., Васильев Е.К., Ущаповская З.Ф., Сизых Ю.И., Брандт И.С., Петрова Г.П., Заруднева Н.В., Тихонова Г.А., Сутурина Т.А., Филева Т.С., Масловская М.Н., Евсюнин В.Г., Нартова Н.В., Русакова В.А., Щербань В.В., Ясныгина Т.А. Исследование и выбор оптимальных условий реализации физических и химических методов изучения горных пород и минералов // Литосфера Центральной Азии. Новосибирск: Наука, 1996. С. 99–107.
- Ревенко А.Г., Евсюнин В.Г. Юбилей учёного // Аналитика и контроль. 2012. Т. 16. № 4. С. 447-448.
- Ревенко А.Г. Публикации по рентгенофлуоресцентному анализу в журнале «Аналитика и контроль» // Аналитика и контроль. 2013а. Т. 17. № 1. С. 27–32.
- Ревенко А.Г. Применение стандартных образцов сравнения при рентгенофлуоресцентном анализе геологических проб // Стандартные образцы. 2013б. № 4. С. 3–11.
- Резницкий Л.З., Скляров Е.В., Армбрустер Т., Ущаповская З.Ф. и др. Новый минерал оксиванит V₃O₅ и его изоморфный ряд оксиванит-бердесинскит V₂TiO₅ в метаморфических породах Слюдянского комплекса (Южное Прибайкалье)» // ЗРМО. 2009. № 3. С. 70–81.
- Резницкий Л.З., Скляров Е.В., Армбрустер Т., Суворова Л.Ф., Ущаповская З.Ф., Канакин С.В. Кызылкумит: находка в Южном Прибайкалье (Россия), уточнение кристаллохимической формулы // Записки РМО. 2013. № 2. С.107–120.
- Резницкий Л.З., Скляров Е.В., Ущаповская З.Ф., Суворова Л.Ф., Полеховский Ю.С., Дзержановский П., Бараш И.Г. Купрокалининит CuCr₂S₄ – новая сульфошпинель из метаморфических пород Слюдянского комплекса (Южное Прибайкалье) // ЗВМО. 2010. № 6. С. 65–75.
- Рубцова М.Н. Инженерно-геологическая оценка эоловых отложений Прибайкалья // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXV Всерос. молод. конф. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2013б. С. 128–129.
- Рубцова М.Н., Акулова В.В. Эоловые отложения Чарской впадины: инженерно-геологические и геоэкологические аспекты // Сергеевские чтения. Вып. 15. М.: РУДН, 2013а. С. 80–84.
- Рященко Т.Г., Ухова Н.Н. Химический состав дисперсных грунтов: возможности и прогнозы (юг Восточной Сибири). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2008. 131 с.

- Рященко Т.Г., Ухова Н.Н., Штельмах С.И. Сравнительный анализ геохимических особенностей лёссовых пород юга Восточной Сибири и Беларуси // Отечественная геология. 2011а. № 2. С. 82–87.
- Рященко Т.Г., Ухова Н.Н., Штельмах С.И., Белянина Н.И., Белянин П.С. Гипотезы формирования бурых суглинков Приморья: ретроспектива и новый взгляд (Дальний Восток России) // Тихоокеанская геология. 2011б. Т. 30. № 3. С. 81–94.
- Рященко Т.Г., Хмелевская И.М., Ухова Н.Н., Данилова М.В., Филева Т.С. Комплексные исследования состава, микростроения и свойств тиксотропных глин (площадка нефтегазоносной скважины в районе г. Биробиджана) // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и мет. геол. иссл-й: Сб. избр. трудов н.-т. конф. Иркутск: Изд-во ИрГТУ. 2002. С. 80–85.
- Савельева В.Б., Зырянов А.С., Пантеева С.В. Редкоземельные элементы в кварц-мусковитовых метасоматитах Приморского разлома (Западное Прибайкалье) // Геохимия. 2003. № 1. С. 70–82.
- Савельева В.Б., Медведева Т.И., Нартова Н.В., Русакова В.А. Везувианы Озерского массива // ЗВМО. 1992. № 5. С. 72–81.
- Савельева В.Б., Медведева Т.И., Петрова Г.П., Русакова В.А. Мелилитовые скарны Крестовского массива (Западное Прибайкалье) // ЗВМО. 1996. № 3. С. 24–37.
- Секерин А.П., Меньшагин Ю.В., Лепин В.С., Ревенко А.Г. Высококалиевые пикритобазальты Иркутского Присаянья // Доклады АН. 1992. Т. 325. № 4. С. 799–802.
- Сизых Вал.И., Сизых Вит.И., Сизых Ю.И. Новый прожилково-вкрапленный золото-медно-молибден-порфировый тип оруденения на Алиинском рудном участке в Забайкалье // Доклады АН. 2004а. Т. 395. № 2. С. 236–240.
- Сизых Вал.И., Сизых Вит.И., Сизых Ю.И., Ершов В.В. Прожилково-вкрапленный золото-медно-молибденпорфировый тип оруденения на Алиинской рудоносной площади, Восточное Забайкалье // Руды и минералы. 2004б. № 3. С. 45–50.
- Сизых Ю.И. Комплексная схема химического анализа горных пород и минералов. Отчет. Иркутск: ИЗК СО АН СССР, 1985. 61 с.
- *Скляров Е.В., Дорофеева Р.П.* Институт земной коры. Люди, события, даты (1949–2009) / Отв. ред. В.Г. Беличенко. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. 672 с.
- Скляров Е.В., Солотчина Э.П., Вологина Е.Г., Изох О.П., Кулагина Н.В., Орлова Л.А., Склярова О.А., Солотчин П.А., Столповская В.Н., Ухова Н.Н. Климатическая история голоцена Западного Прибайкалья в карбонатной осадочной летописи озера Холбо-Нур // Геохимия. 2010. Т. 431. № 5. С. 668–674.
- Скляров Е.В., Федоровский В.С., Склярова О.А, Сковитина Т.М, Данилова Ю.В., Орлова Л.А., Ухова Н.Н. Гидротермальная активность в Байкальской рифтовой зоне: горячие источники и продукты отложений палеотерм // Доклады АН. 2007. Т. 412. № 2. С. 1–5.
- Смагунова А.Н., Ревенко А.Г. Развитие отечественного рентгенофлуоресцентного анализа (по материалам совещаний) // Журнал аналитической химии. 2014. Т. 69. № 3. С. 316–332.
- Солотчина Э.П., Скляров Е.В., Солотчин П.А., Вологина Е.Г., Склярова О.А., Ухова Н.Н. Голоценовая осадочная летопись озера Большое Алгинское, Западное Забайкалье: связь с палеоклиматом // Доклады АН. 2013. Т. 449. № 1. С. 80–86.
- Суворова Д.С., Худоногова Е.В., Ревенко А.Г. Разработка методики рентгенофлуоресцентного определения содержаний Та в горных породах разнообразного состава // Аналитика и контроль. 2014. Т. 18. № 1. С. 23–30.
- Ухова Н.Н., Сизых Ю.И., Ревенко А.Г. Метрологическая оценка методики определения содержания щелочных элементов в образцах горных пород на атомно-абсорбционном спектрофотометре «SOLAAR M» // Тез. докл. Съезда аналитиков России «Аналитическая химия – новые методы и возможности», М.: HCAX PAH, 2010. С. 301–302.
- Фефелов Н.Н., Антипин В.С., Заруднева Н.В., Елизарьева Т.И., Брандт С.Б. Изотопный состав свинца калишпатов мезозойских интрузий Забайкалья // Доклады АН СССР. 1989. Т. 305. № 2. С. 434–438.
- Худоногова Е.В., Черкашина Т.Ю., Ревенко А.Г. Опыт применения РФА при определении следовых элементов в фосфоритах // Аналитика и контроль. 2001. Т. 5. № 4. С. 409–416.
- Черкашина Т.Ю., Летникова Е.Ф. Применение аналитических методов для геохимических исследований фосфоритов севера Монголии // Вестник ИрГТУ. 2012. № 6. С. 59–65.
- Черкашина Т.Ю., Пантеева С.В., Финкельштейн А.Л., Макагон В.М. Определение Rb, Sr, Cs, Ba, Pb в калиевых полевых шпатах из малых навесок методом рентгенофлуоресцентного анализа с полным внешним отражением // Аналитика и контроль. 2012. Т. 16. № 3. С. 305–311.
- Шаров В.Н., Сизых Ю.И. Метапелиты Валюхтинской свиты-индикаторы рифейской остаточной коры выветривания (Патомское нагорье) // Литология и полезные ископаемые. 2007а. № 1. С. 18–24.
- Шаров В.Н., Сизых Ю.И. Петрохимия метаморфизованных песчаных пород Патомского нагорья и реконструкция их первичного состава // Литология и полезные ископаемые. 2007б. № 3. С. 321–332.
- Шаров В.Н., Фефелов Н.Н., Заруднева Н.В., Русакова В.А., Брандт С.Б. Рb-Pb датирование кристаллических сланцев Мамского синклинария (Байкало-Патомское нагорье) // Доклады АН СССР. 1991. Т. 319. № 1. С. 209–212.
- Шаров В.Н., Фефелов Н.Н., Заруднева Н.В., Снытко А.В., Русакова В.А. Рb-Pb датирование высокоглиноземистых

A.G. Revenko: Physical and chemical methods of researching rocks and minerals...

кристаллических сланцев и возраст пуриольской свиты (Патомское нагорье, Сибирь) // Доклады АН. 1995. Т. 341. № 1. С. 524–526.

Шишелова Т.И., Ревенко А.Г., Созинова Т.В. Рентгеновские лучи. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. 112 с.

Юферова Е.В., Смагунова А.Н., Сизых Ю.И. Вариации сигнала контрольного опыта при атомно-абсорбционном определении Zn в слабоминерализованных водах // *Журнал аналитической химии.* 1997. Т. 52. № 9. С. 905–907.

Akulov N.I., Rubtsova M.N. Aeolian deposits of rift zones // Quaternary International. 2011. V. 234. № 1–2. P. 190–201.

- *Cherkashina T.Yu., Khudonogova E.V., Revenko A.G., Letnikova E.F.* Application of the background standard method for the determination of Rb, Sr, Y, Zr, and Nb contents in phosphorites by x-ray fluorescence // *X-Ray Spectrometry.* 2009. V. 38. № 2. P. 144–151.
- *Cherkashina T.Yu., Panteeva S.V., Finkelshtein A.L., Makagon V.M.* Determination of Rb, Sr, Cs, Ba, and Pb in K-feldspars in small sample amounts by total reflection X-ray fluorescence // X-Ray Spectrometry. 2013. V. 42. № 4. P. 207–212.
- Panteeva S.V., Gladkochoub D.P., Donskaya T.V., Markova V.V., Sandimirova G.P. Determination of 24 trace elements in felsic rocks by inductively coupled plasma mass spectrometry after lithium metaborate fusion // Spectrochimica Acta. 2003. V. 58B. № 2. P. 341–350.
- Pashkova G.V., Revenko A.G., Finkelshtein A.L. Study of factors affecting the results of natural water analyses by total reflection X-ray fluorescence // X-Ray Spectrometry. 2013. V. 42. № 6. P. 524–530.
- Revenko A.G. X-ray fluorescence analysis of rocks, soils and sediments // X-Ray Spectrometry. 2002. V. 31. № 3. P. 264–273.
- *Revenko* A.G. Estimation and account for matrix effects in studying glass materials of cultural heritage by X-ray spectral analysis // *X-Ray Spectrometry*. 2010. V. 39. № 1. P. 63–69.
- *Revenko A.G.* On the 40th anniversary of the journal X-Ray Spectrometry // X-Ray Spectrometry. 2012. V. 41. № 3. P. 117–124.
- Revenko A., Hoffmann P. Editorial Russian/Mongolian Special issue of XRS // X-Ray Spectrometry. 2010. V. 39. № 1. P. 1–2.
- *Revenko A.G., Petrova G.P., Novikov V.M.* Determination of minor and trace element in geological samples by x-ray fluorescence spectrometry // Proc. 11 CANAS conf. on anal. atomic spectr. Moscow, 1990. P. 421.
- Ryashchenko T.G., Akulova V.V., Ukhova N.N. Processes of loess lithogenesis during the Pleistocene Holocene, southeast Siberia // Quaternary International. 2011. V. 240. № 1–2. P. 150–155.
- Smagunova A.N., Pashkova G.V. Choice of optimal conditions for X-ray fluorescence analysis of milk products with varying fat content // X-Ray Spectrometry. 2013. V. 42. № 6. P. 546–551.
- Suvorova D., Rubtsova M. Clay minerals as a stability criterion of soils // Глины, глинистые минералы, слоистые материалы CMLM2013. СПб.: «Фалкон Принт», 2013. С. 77.
- Zuzaan P., Bolortuya D., Davaa S., Revenko A.G. Estimation of applicability of scattered radiation for XRF // Аналитика и контроль. 2013. Т. 17. № 4. С. 376–381.



Ревенко Анатолий Григорьевич, докт. техн. наук, зав. Аналитическим центром Институт земной коры СО РАН 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия ⊠ e-mail: xray@crust.irk.ru

Revenko, Anatoliy G., Doctor of Technical Sciences, Head of the Analytical Centre Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS 128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia ⊠ e-mail: xray@crust.irk.ru PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2014 VOLUME 5 ISSUE 1 PAGES 115-133

http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0120



ISSN 2078-502X

FAULTING OF THE LITHOSPHERE IN THE CENTRAL ASIA AND ACCOMPANYING PROCESSES: TECTONOPHYSICAL APPROACH

K. Zh. Seminsky

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: The article describes the history, the staff, researches and scientific activities of the Laboratory of Tectonophysics of the Institute of the Earth's Crust, which are focused on problems of faulting in the lithosphere. The Laboratory was established 35 years ago. The article reviews the major results of scientific research projects implemented from 2009 to 2013. The main objects of the complete cycle of tectonophysical studies were the zone-block structure of the lithosphere in the Central Asia, fault tectonics, stress fields, mechanisms of formation and seismicity of the Baikal rift zone, emanation activity of crustal faults, regimes of displacements at fault segments etc. It is shown that the team of the Laboratory views its scientific prospects in development of comprehensive models of inter-block zone of destruction, taking into account regular fault patterns and regularities of accompanying processes (such as seismic, emanation and other types of activity) which are predetermined by such fault patterns.

Key words: tectonophysics, faults, blocks, stress field, deformation, destruction, physical modeling, Baikal rift zone, intermountain basins, seismicity, radon.

Citation: *Seminsky K.Zh.* 2014. Faulting of the lithosphere in the Central Asia and accompanying processes: tectonophysical approach. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (1), 115–133. doi:10.5800/GT-2014-5-1-0120.

РАЗЛОМООБРАЗОВАНИЕ В ЛИТОСФЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ И СОПУТСТВУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ: ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД

К. Ж. Семинский

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация: В статье представлены сведения об истории, кадровом составе, научной и научно-организационной деятельности лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН, проводящей в течение 35 лет исследования разломообразования в литосфере. Основная часть статьи посвящена результатам научных работ 2009–2013 гг., в процессе которых сотрудники лаборатории провели полный цикл тектонофизических исследований. Их главными объектами были зонно-блоковая структура литосферы Центральной Азии, разломная тектоника, поля напряжений, механизм формирования и сейсмичность Байкальской рифтовой зоны, эманационная активность разломов земной коры, режим смещений на их фрагментах и другие. Показано, что научные перспективы лаборатории тектонофизики связаны с разработкой комплексных моделей межблоковых деструктивных зон, в основе которых лежат особенности разломного строения, а содержательную часть составляют обусловленные ими закономерности проявления сопутствующих процессов (сейсмическая, эманационная и другие виды активности).

Ключевые слова: тектонофизика, разломы, блоки, поле напряжений, деформации, деструкция, физическое моделирование, Байкальская рифтовая зона, межгорные впадины, сейсмичность, радон.

1. Введение

Изучением процесса разломообразования в литосфере с позиций механики разрушения в Институте земной коры СО РАН занимается лаборатория тектонофизики, которой в 2014 г. исполняется 35 лет. В настоящее время исследования осуществляются в рамках приоритетного направления фундаментальных исследований СО РАН «Катастрофические эндогенные и экзогенные процессы, включая экстремальные изменения космической погоды: проблемы прогноза и снижения уровня негативных последствий» и программы «Тектонофизика современных геодинамических процессов как основа прогноза природных катастроф во внутриконтинентальных условиях». Лаборатория выполняет самостоятельные исследования по проекту НИР «Разломообразование в литосфере Центральной Азии и опасные сопутствующие процессы: тектонофизический подход», финансируемому из госбюджета.

2. ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Решение об организации лаборатории тектонофизики было принято на заседании Ученого совета ИЗК СО РАН в июне 1979 г. Ее первым заведующим был избран д.г.-м.н. С.И. Шерман. Кроме него в составе лаборатории первых лет ее деятельности активно работали К.Г. Леви, С.А. Борняков, В.А. Саньков, Ю.И. Днепровский, В.Ю. Буддо, В.А. Трусков, А.А. Бабичев и другие сотрудники. Им удалось создать тектонофизические основы исследований Байкальской рифтовой зоны, которые, базируясь на геологическом материале о ее строении, отличались существенной новизной и оригинальностью. Этому способствовало начало постановки физических экспериментов по разломообразованию с соблюдением условий подобия. Исследование взаимоотношений численных характеристик параметров разломов в сочетании с физическим и математическим моделированием стало новым направлением работ лаборатории тектонофизики. В 1982–1985 гг. оно было усилено в кадровом отношении за счет прихода в коллектив К.Ж. Семинского, А.Н. Адамовича, А.И. Мирошничеко и А.С. Гладкова. В течение нескольких лет плодотворной деятельности исследования лаборатории вышли на новый уровень: их объектом стали тектонофизические закономерности формирования разломной сети разного масштаба, включая и литосферный. В 1995 г. из лаборатории тектонофизики выделилась группа исследователей, на базе которой была организована лаборатория современной геодинамики во главе с д.г.-м.н. К.Г. Леви. В свою очередь коллектив лаборатории тектонофизики пополняется новыми сотрудниками, среди которых А.В. Черемных, О.В. Лунина, И.А. Потехина, а впоследствии – А.А. Бобров, Ю.П. Бурзунова,

А.В. Андреев и другие. В 2004 г. д.г.-м.н. К.Ж. Семинский сменил профессора С.И. Шермана на посту заведующего. Создаваемое в течение предыдущих 25 лет основное направление работ лаборатории сохранилось, обогатившись новыми веяниями, вызванными расширением тектонофизических исследований, в том числе в сфере практической геологии. Этому способствует переход в 2013 г. в лабораторию тектонофизики группы сейсмопрогноза (В.В. Ружич, Е.А. Левина, Е.И. Пономарева). В настоящее время коллектив лаборатории сбалансирован по возрасту и опыту проведения тектонофизических исследований. Он состоит из 27 человек, в т.ч. 3 докторов, 8 кандидатов наук, 7 аспирантов и инженерно-технических работников, большую часть которых составляют студенты иркутских вузов (рис. 1).

3. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

Лаборатория тектонофизики проводит исследования по четырём основным направлениям:

1) исследование полей напряжений и разломноблоковой структуры литосферы в разных масштабах для выявления тектонофизических закономерностей деструкции на различных иерархических уровнях;

2) исследование механизмов деструкции литосферы в разнотипных динамических режимах методами физического и математического моделирования;

3) разработка теоретических моделей деструкции верхней части литосферы на базе тектонофизического анализа геолого-структурных, картографических и экспериментальных материалов;

4) исследование закономерностей проявления сейсмической и эманационной активности, локализации кимберлитов и рудных месторождений, связанных с разломными зонами земной коры.

4. АППАРАТУРНО-ПРИБОРНАЯ БАЗА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория в настоящее время является единственным коллективом в России, проводящим полный комплекс тектонофизических исследований: геологоструктурные работы на базе оригинальной методики спецкартирования разломно-блоковых структур и полей напряжений; геофизические исследования разломных зон верхней коры на основе применения радоновой съемки, электротомографии и георадиолокации; деформометрический и эманационный мониторинг в зонах разломов; физическое моделирование на упругих и упруго-пластичных материалах с использованием полярископа-поляриметра и установки «Разлом»; натурное моделирование режима смещений на разломах с применением различных способов воздействия на породный или ледяной массив (взрывы, домкраты, вибрация и др.) (рис. 2).



Рис. 1. Коллектив лаборатории тектонофизики (декабрь 2013 г.).

Первый ряд (слева направо): к.г.-м.н. А.С. Гладков, к.г.-м.н. О.В. Лунина, д.г.-м.н. С.И. Шерман – основатель лаборатории, д.г.-м.н. К.Ж. Семинский – зав. лабораторией, д.г.-м.н. В.В. Ружич, к.г.-м.н. А.В. Черемных; второй ряд (слева направо): к.г.-м.н. Е.А. Левина, Ю.П. Бурзунова, И.А. Платонова, к.г.-м.н. И.А. Потехина, И.В. Кузьмин; третий ряд (слева направо): Р.М. Зарипов; А.А. Тарасова, Е.В. Серебряков, А.М. Афонькин; четвертый ряд (слева направо): М.Г. Мельников, А.С. Черемных, А.В. Андреев, к.г.-м.н. А.А. Бобров, А.А. Гладков, А.К. Семинский.

Fig. 1. The staff of the Laboratory of Tectonophysics, December 2013 (left to right).

1st row – A.S. Gladkov, O.V. Lunina, S.I. Sherman (Founder of the Laboratory), K.Zh. Seminsky (Head of the Laboratory), V.V. Ruzich, A.V. Cheremnykh; 2nd row – E.A. Levina, Yu.P. Burzunova, I.A. Platonova, I.A. Potekhina, I.V. Kuz'min; 3rd row – R.M. Zaripov, A.A. Tarasova, E.V. Serebryakov, A.M. Afon'kin; 4th row – M.G. Melnikov, A.S. Cheremnykh, A.V. Andreev, A.A. Bobrov, A.A. Gladkov, A.K. Seminsky.

5. НАУЧНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ 1979-2008 ГГ.

Основные научные результаты исследований лаборатории тектонофизики опубликованы в монографических сериях, среди которых наиболее значимыми являются «Геология и сейсмичность зоны БАМ. Неотектоника» (1984), «Разломообразование в литосфере» (Зоны сдвига, 1991; Зоны растяжения, 1992; Зоны сжатия, 1993), «Внутренняя структура континентальных разломных зон» (Тектонофизический аспект, 2003; Прикладной аспект, 2005). В этих и других монографиях на базе полевых и экспериментальных исследований показано, что деструкция литосферы закономерна для всех иерархических уровней организации разломноблоковой структуры, а установленные параметры деструктивных зон и связывающие их нелинейные уравнения могут быть использованы для объяснения и прогноза геолого-геофизических процессов, контролируемых разломной тектоникой. Прикладную направленность имеет целый ряд разработок, представленных монографиями (Региональные шкалы сейсмической интенсивности, 2003; Методы тектонофизики при ре-



Рис. 2. Некоторые виды оборудования, используемого в лаборатории тектонофизики для полевых и экспериментальных исследований процесса разломообразования.

А – многоэлектродная электроразведочная станция методов сопротивлений «Скала-48» для проведения электротомографии; Б – георадар «ОКО-2» для георадиолокационной съемки; В – радиометр РРА-01М-03 для радоновой съемки и эманационного мониторинга; Г–Д – тензометрический датчик (Г) и регистратор «Сдвиг 4ММ» (Д) для мониторинга деформаций; Е–Ж – установка «Разлом» (Е) и полярископ-поляриметр «ПСК-250» (Ж) для физического моделирования.

Fig. 2. Equipment of the Laboratory of Tectonophysics for field and experimental studies of faulting.

A – Skala-48 multielectrode electric survey station (electrical tomography by resistance methods); *B* – OKO-2 georadar (georadiolocation survey); *B* – RRA-01M-03 radiometer (radon survey and emanation monitoring); Γ – tensometric gauge (monitoring of deformation); μ – Sdvig 4MM recorder monitoring of deformation); μ – Razlom installation (physical modeling); μ – PSK-250 polariscope-polarimeter (physical modeling).

шении задач алмазопоисковой геологии, 2008) и патентами (Способ оценки перспективности поисковой площади на обнаружение алмазоносных кимберлитовых тел в пределах алмазоносных районов, 2013; Способ оценки ширины зоны динамического влияния активного разлома земной коры, 2014).

Следует отметить, что тектонофизика, как наука, на первом этапе развития охватывала круг проблем, связанных с механизмами формирования тектонических структур земной коры. Однако к концу XX в. ее статус кардинально изменился в двух ключевых позициях. Во-первых, исследованиями многих российских и зарубежных специалистов было показано подобие в главных закономерностях строения и формирования деформационных структур широкого спектра масштабов. В итоге большинство специалистов считают литосферу иерархической структурированной средой, состоящей из блоков, окруженных подвижными зонами с пониженной (вследствие раздробленности) квазивязкостью субстрата. Во-вторых, объем и характер знаний, накопленных в тектонофизике за более чем полувековой период развития, таковы, что значительная часть из них может быть успешно применена в геологической практике. Следовательно, к настоящему времени рамки тектонофизики существенно расширились, с одной стороны, за счет выхода на решение большой группы прикладных задач, обусловленных спецификой процесса деструкции, а с другой – в связи с необходимостью выявления механизмов формирования деформационных структур литосферного уровня. В следующем, основном, разделе статьи показаны главные научные результаты, полученные в этих областях тектонофизики для Центральной Азии. Этот регион характеризуется высокой активностью современных геодинамических процессов (интенсивное напряженное состояние земной коры, активное разломообразование, сейсмичность, дегазация недр и др.), что способствует выявлению наиболее общих закономерностей деструкции и в то же время выдвигает на первый план решение задач прикладного характера.

6. НАУЧНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ 2009–2013 ГГ.

Вопросам тектонофизики геодинамических процессов в Центральной Азии посвящено множество научных работ, опубликованных специалистами России и других стран. Ниже представлены главные результаты, полученные по рассматриваемой проблеме в течение последних пяти лет сотрудниками лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН. Они изложены в кратком иллюстративном виде. Полное описание полученных результатов вместе с обзором достижений предшественников можно найти в публикациях сотрудников лаборатории, помещенных в заключающем статью списке литературы.

6.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данном разделе статьи представлены наиболее общие закономерности процесса деструкции, которые были установлены в результате изучения физических моделей и природных объектов, относящихся к литосфере Центральной Азии в целом или представляющим ее крупным сегментам на территории юга Восточной Сибири. Полный цикл тектонофизических работ был проведен с укрупнением масштаба исследований и состоял в следующем: интеграции материалов по напряженному состоянию, закономерностям делимости литосферы и сопутствующей сейсмичности в Центральной и Восточной Азии; проведении аналогичных исследований для юга Восточной Сибири с акцентом на изучение зонно-блоковой структуры, напряженного состояния и активного разломообразования в пределах Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) и ее отдельных впадин; физическом моделировании механизма формирования Байкальской рифтовой зоны и ее сегментов.

Закономерности тектонической делимости литосферы Азии были установлены на основе тектонофизического анализа серии схем ее зонно-блоковой структуры [Семинский и др., 2013]. На рис. 3 они представлены для глобального (Центральная и Восточная Азия) и трансрегионального (Прибайкалье и Западное Забайкалье) уровней. Аналогичные построения были проведены в региональном (Центральное Прибайкалье) и локальном (северо-восточная часть Приольхонья в Западном Прибайкалье) масштабах. По результатам количественного анализа системы составленных схем установлены ранги межблоковых подвижных зон, и на основе их сопоставления выделены и статистически охарактеризованы 11 объективно существующих уровней иерархии в зонно-блоковой структуре литосферы Центральной и Восточной Азии. Это позволило установить соответствие делимости литосферы Азии теоретической модели иерархической структурированной среды, состоящей из плит, блоков и ограничивающих их подвижных зон сжатия, сдвига и растяжения. Межблоковые зоны сложной конфигурации отличаются комбинацией режимов деформирования, как это, характерно, например, для Байкальской рифтовой зоны: растяжение – в центре и сдвиги – на юго-западном и северо-восточном флангах. В наиболее общем случае приповерхностную структуру деструктивной (в более крупном масштабе – разломной) зоны образуют протяженные разломы с оперением, совокупные подвижки по которым составляют большую часть смещения по зоне в целом. При меньшей локализованности возрастет роль псевдопластической деформации, осуществляющейся за счет многочисленных подвижек по сравнительно небольшим разрывам. Как следствие, в основу построения схем зонно-блоковой структуры, подобных представленным выше, закладывается выделение деструктивных зон, отличающихся сгущением выраженных в рельефе разломов и эпицентров землетрясений. Объективность этих построений подтвердилась в ходе комплексных исследований Байкальской рифтовой зоны, включающих геолого-структурные методы изучения разрывов и полей напряжений, морфотектонический анализ рельефа (в т.ч. дешифрирование космоснимков), электроразведку методами естественного электрического поля и электропрофилирования, магнитотеллурические зондирования, эманационная съемку, гидрогеологические исследования водопроявлений. Работы проводились совместно со специалистами Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, выполнившими весь объем электроразведочных исследований.

Зонно-блоковая структура Байкальской рифтовой зоны отражается в материалах комплексных геологогеофизических исследований [Семинский, Радзиминович, 2011; Семинский, Тугарина, 2011а, 2011б; Черемных, 2009, 2010а, 2010б; Бурзунова, 2011; Семинский, Черемных, 2011; Семинский и др., 2012, 2013; Seminsky, 2013], представленных на примере трансекта Шер-



Рис. 3. Схемы зонно-блоковой структуры литосферы на глобальном (*A*) и трансрегиональном (*Б*) уровнях иерархии [*Семи*-*нский и др., 2013*].

А – схема для Центральной и Восточной Азии: *1* – межблоковые зоны (а) и блоки (б); *2* – разломы; *3*–*4* – магистральные сместители межблоковых зон II (*3*) и III (*4*) уровней иерархии, совпадающие (а) и не совпадающие (б) с разломами; *5* – индексация межблоковых зон и их сегментов; *6* – магистральные сместители межблоковой зоны I уровня иерархии; *7* – контур рис. 3, *Б*. *Б* – схема для Прибайкалья и Западного Забайкалья: *1* – межблоковые зоны (а) и блоки (б); *2* – разломы, отчетливо выраженные линеаментами рельефа; *3* – границы крупных блоков согласно рис. 3, *А*; *4* – положение геолого-геофизического трансекта Шертой – Красный Чикой; *5* – гидросеть.

Fig. 3. Schemes of the zonal-block structure of the lithosphere at the global (A) and trans-regional (Б) hierarchic levels [*Семинский и др., 2013*].

A – Central and Eastern Asia: 1 – inter-block zones (a) and blocks (6); 2 – faults; 3-4 – major displacement planes of inter-block zones of the 2nd (*3*) and 3rd (*4*) hierarchic levels, which coincide (a) and do not coincide (6) with faults; 5 – indexation of inter-block zones and their segments; 6 – major displacement planes of the inter-block zone of the 1st hierarchic level; 7 – contour of Fig. 3, *B*. *B* – Pribaikalie and Western Transbaikalie: 1 – inter-block zones (a) and blocks (6); 2 – faults that are clearly manifested in lineaments of the topography; 3 – boundaries of large blocks according to Fig. 3, *A*; 4 – geological and geophysical transect from Shertoi to Krasny Chikoi; 5 – hydrographic network.

той – Красный Чикой, который полностью пересек ее центральный сегмент, т.е. собственно Байкальский рифт (рис. 3, 4). В приповерхностной части разреза и до глубины 30 км отчетливо проявлено деление земной коры на относительно слабонарушенные блоки, которые контактируют по широким зонам, отличающимся повышенной дислоцированностью и флюидонасыщенностью. Как следствие, в наиболее общем случае они выделяются по сравнению с пространствами блоков понижениями в рельефе, аномалиями условий водообмена, положительными и сложными по форме газовыми аномалиями, а также низкими значениями удельного электрического сопротивления как вблизи поверхности, так и на глубине. В первом приближении блоки имеют плитообразную форму, занимая субгоризонтальное положение в стабильных регионах юга Восточной Сибири (южная часть Сибирской плиты) и субвертикальное – в областях кайнозойской активизации (Байкальский рифт). При детальном рассмотрении межблоковые структуры обычно расши-



Рис. 4. Проявление иерархии межблоковых зон центральной части БРЗ в глубинном строении земной коры по трансекту Шертой – Красный Чикой [*Семинский и др., 2013*].

А – иерархия межблоковых зон в пределах трех порядков (границы зон, отмеченные вертикальными полосами с разными оттенками серого цвета, определены по результатам комплексного анализа геолого-геофизических данных). *Б* – схематичный геолого-структурный разрез (по А.В. Черемных): *1*–*1*1 разнотипные вещественные комплексы; *12* – крупные и более мелкие разломы; *13* – оси разломных зон, занимающих периферийное положение в трех разломных системах, составляющих внутреннюю структуру Байкальского рифта. *В*–*Г* – геоэлектрические разрезы, построенные по результатам магнитотеллурических зондирований с использованием разных способов представления данных (по Е.В. Поспеевой и В.В. Оленченко). Пунктир – положение на разрезе (рис. *4*, *B*) осей Прихребтовой, Бортовой и Джида-Удинской межблоковых разломных зон.

Fig. 4. Manifestation of the hierarchy of inter-block zones, that are located in the central part of the Baikal rift zone, in the deep structure of the crust along the transect from Shertoi to Krasny Chikoi [*Cemuhckuŭ u дp., 2013*].

A – hierarchy of inter-block zones within three orders (vertical bands coloured in various shades of grey show boundaries of the zones which are determined from results of comprehensive analyses of the available geological and geophysical data). B – the schematic geological structural cross-section, according to data provided by A.V. Cheremnykh. 1-11 – real complexes of various types; 12 – large and small faults; 13 – axes of fault zones located at the periphery of the three fault systems comprising the internal structure of the Baikal rift. $B-\Gamma$ – geoelectric profiles reconstructed from results of magnetotelluric surveys, according to data provided by E.V. Pospeeva and V.V. Olenchenko. Dotted lines show positions of axes of the Prikhrebtovaya, Bortovaya and Dzhida-Udinskaya inter-block fault zones shown in the cross-section (see Fig. 4, *B*).

ряются к поверхности и в тектонически активных зонах 1-го порядка могут превышать поперечные размеры смежных слабонарушенных блоков, соответствующих им по уровню иерархии. Подобная ситуация, характерная для активно развивающегося Байкальского рифта, определяет особенности его строения с позиций представлений о зонно-блоковой делимости литосферы. Так, Байкальская межблоковая зона относится к глобальному уровню иерархии в зонно-блоковой структуре Азии и развивается в режиме растяжения при контактировании Сибирского и Забайкальского блоков литосферы (рис. 4). Вдоль трассы трансекта она имеет ширину примерно 200 км и на трансрегиональном уровне иерархии состоит из Обручевской, Черско-Баргузинской и Джида-Витимской крупнейших разломных зон (систем, согласно зарубежной терминологии). Первые две из них ограничивают с запада и востока опущенный блок Байкальской впадины и, таким образом, составляют главный участок растяжения литосферы. Второй участок представлен Джида-Витимской разломной системой, отделен от первого высокоподнятым Хамар-Дабанским блоком и в геоморфологическом отношении в пределах трансекта выражен Иволгино-Удинской впадиной. Здесь, вследствие локализации деформации в смежном районе Южно-Байкальской впадины, деструктивный процесс проявляется в меньшей степени, хотя сравнительно высокие индикаторы современной активности - сейсмичность, тепловой поток, газовые эманации и др. – отличают Джида-Витимскую зону от территории Забайкальского блока. Каждая из трех трансрегиональных разломных систем имеет ширину примерно 50 км и состоит из региональных межблоковых зон, интенсивно развивающихся в пределах байкальского участка растяжения земной коры. По типу внутреннего строения они представляют зоны крупных разломов: Прихребтового, Приморского и Морского – в Обручевской системе, а также Бортового и Дельтового – в Черско-Баргузинской системе. Прихребтовая и Бортовая разломные зоны, занимая в системах периферийное положение, выполаживаются в направлении оси рифта с глубин примерно 20 км, что придает характерный «чашеобразный» профиль участку наиболее интенсивных деформаций в Прибайкалье (пунктиры на рис. 4). Высокая степень деструкции на фоне общего растяжения коры приводит к насыщению этого участ-

K.Zh. Seminsky: Faulting of the lithosphere in the Central Asia and accompanying processes...



Рис. 5. Поле напряжений земной коры северо-восточного фланга БРЗ по геолого-структурным данным [Лунина и др., 2009].

А – карта разломной тектоники. *Б* – схема ориентировок осей главных нормальных напряжений растяжения и сжатия. *В* – круговая диаграмма, показывающая процентные вклады разных типов напряженного состояния в разрывную структуру района исследований.

Fig. 5. The field of crustal stresses of the north-eastern flank of the Baikal rift zone, according to geological and structural data published in [*Lunina et al.*, 2009].

A – the fault tectonic map. E – the scheme showing orientations of main normal stress axes of extension and compression. B – the circle diagram showing contributions (%) of the state of stresses of various types into the fault pattern of the area under study.

ка флюидами за счет проникновения метеорных вод и глубинных растворов в региональные разломные зоны и, частично, в смежные блоки, которые также принадлежат к внутренней структуре Обручевской и Черско-Баргузинской разломных систем. Находящийся между ними блок Байкальской впадины в этом отношении не является исключением, так как нарушен в центре зоной регионального уровня, где вследствие локализации растяжения процесс флюидизации проявлен наиболее интенсивно. Эта зона аномально низких сопротивлений имеет ширину ≈ 7–10 км и не обнаруживает тенденции к резкому сужению в низах коры, что позволяет считать ее главным каналом для миграции глубинных флюидов к поверхности.

<u>Разломное строение и поля напряжений суходольных впадин рифтовой зоны</u>, являющихся главными элементами структуры крупных разломных зон, исследовались на базе применения геолого-структурных и геоэлектрических методов [Гладков, Лунина, 2010а; Лунина, Гладков, 2009, 2011; Бержинская и др., 2009; Лунина и др., 2009а, 2009б, 2010а, 2010в, 2011а, 2012а; Lunina et al., 2012]. Для депрессий северо-восточного фланга БРЗ (рис. 5), а также Тункинской, Баргузинской, Гусиноозерской, Селенгинской и других впадин охарактеризованы разломно-блоковая структура, глубинное строение, напряженное состояние и сейсмическая активность. Особый акцент был сделан на всестороннем исследовании деформационных структур в заполняющих депрессии кайнозойских осадках. Разработана их классификация на основе специфики происхождения под действием импульсных или криповых тектонических процессов. Доказана эффективность картирования разломных зон геолого-структурными методами для площадей, перекрытых рыхлыми и слабосцементированными отложениями. Дизъюнктивы, выявляемые на поверхности во внутренних частях впадин, согласно материалам электромагнитных зондирований, на глубине отражаются в виде зон низкого

удельного электрического сопротивления, с которыми ассоциируются изгибы границ осадочных слоев и поверхности кристаллического фундамента. Установлено, что с позднего плиоцена развитие разрывных систем в регионе происходило в условиях превалирующего СЗ-ЮВ растяжения при значительной роли сдвиговых полей напряжений, которые распространены не только на флангах Байкальской рифтовой зоны, но и в других районах Прибайкалья.

Механизм формирования Байкальской рифтовой зоны, не противоречащий представлениям о зонноблоковой структуре литосферы, должен исходить из первичности относительных перемещений Сибирского и Забайкальского блоков литосферы. В основу физического эксперимента были положены известные представления С.И. Шермана, К.Г. Леви и их последователей о Байкальском рифте как структуре присдвигового растяжения. В связи с этим модель из упруго-пластичного материала (влажная глина) располагалась на плоских жестких штампах, один из которых смещался в горизонтальном направлении и на контакте со вторым штампом имел изгиб, имитирующий в первом приближении прибайкальский сегмент краевого шва Сибирской платформы [Семинский, 2009; Семинский, Когут, 2009]. В серии из 30 экспериментов, один из которых демонстрируется в прикрепленном к статье видеофайле, воссоздавались стабильные условия деформирования, их параметры после пересчета через масштабные коэффициенты в критериях подобия соответствовали природному объекту. Воспроизведенный посредством физического моделирования механизм рифтогенеза позволил объяснить главные пространственно-временные закономерности формирования Байкальской рифтовой зоны: последовательность и двухстадийность эволюционного развития, наличие раздвигового (центральная часть) и сдвиговых (северовосточный и юго-западный фланги) сегментов межплитной границы, морфологию наиболее крупных впадин. В отличие от результатов экспериментальных работ предшественников впервые была достигнута высокая степень подобия в эволюции и взаимном расположении главных межгорных депрессий БРЗ. Следовательно, упруго-пластическая реакция субстрата (1) при реализации левосдвиговых перемещений (2) в области влияния изогнутой в плане инициирующей структурной неоднородности (3) отражает совокупность из трех главных факторов развития природного объекта, реальное сочетание которых может быть достигнуто в сравнительно простом по организации физическом эксперименте. Среди дополнительных факторов на развитие рифтовой зоны безусловное влияние оказывают структурно-вещественные неоднородности литосферы, а также аномальная мантия, активное воздействие которой в период локализации деформации формирует Саяно-Байкальский свод, усиливая вклад обстановки растяжения в развитие современной структуры БРЗ. Выбор главного из обсуждающихся в литературе энергетических источников возникновения блоковых перемещений — тема будущих исследований, поскольку Индо-Евразийская коллизия вследствие относительной молодости не могла выступать в этом качестве, хотя и способствует прогрессирующей деформации в современную эпоху.

Развитие экспериментальных исследований процесса разломообразования на данном этапе исследований связано с применением законов неравновесной термодинамики, мезомеханики, фрактальной геометрии и теории информации к интерпретации результатов физического моделирования подвижных зон, природными аналогами которых в Монголо-Сибирском регионе являются, например, сдвиговые сегменты БРЗ. Они представляют зоны активных разломов, относящихся к категории открытых систем [Борняков, 2010б; Гуо и др., 2011; Борняков, Семенова, 2011]. Энергия тектонических напряжений, накапливающаяся и перераспределяющаяся в этих зонах под действием различных энергетических источников, расходуется главным образом на медленные криповые и дискретно проявляющиеся быстрые сейсмические диссипативные процессы. Результаты физического моделирования формирования структуры зоны крупного разлома отразили пространственно-временные взаимоотношения разнотипных диссипативных процессов, а также позволили оценить контролирующие их факторы. Установлено, что криповый и сейсмический диссипативные процессы имеют в структурной эволюции разломной зоны конкретную пространственно-временную привязку и действуют в противофазе. В большинстве случаев при максимальной реализации одного из процессов другой характеризуется минимальным проявлением, причем эти моменты совпадают со структурными перестройками – временными границами стадий, этапов или других более мелких эволюционных периодов. Частота повторяемости последних зависит от масштабного уровня деформационного процесса и определяет периодичность активизации криповой и сейсмической диссипации. Полученные закономерности, как и другие результаты представленных исследований, использованы для решения серии прикладных задач, часть из которых представлена в следующем разделе статьи.

6.2. Прикладные аспекты тектонофизических исследований

Главным объектом тектонофизических исследований, востребованных практикой, являются разломы земной коры. Рассматриваемый в структурной геологии как дизъюнктивная граница и/или контролирующая структура, в тектонофизике разлом трактуется как объемное тело, внутреннюю структуру которого, кроме зоны тектонитов магистрального сместителя, составляют все генетически связанные с его формированием пластические и разрывные деформации. Вследствие этого объект может являться сейсмической,



В. Графики временных трендов сейсмических событий (на примрере юго-западного сегмента БСЗ), позволяющие осуществить среднесрочный прогноз локализации землетрясений с К≥12 (М≥4.4): 1 - западное и восточное окончания сегмента; 2 – сильнейшие события с К≥15 (М≥5.9); 3-5 – землетрясения с классами (магнитудами): 3 – ≥14 (М≥5.6), 4 – 13 (М=5), 5 – 12 (М=4.4); 6 – линия регрессии, описывающая пространственно-временные последовательности локализации землетрясений вдоль сегмента; 7 – границы доверительного интервала (90%).

Рис. 6. Тектонофизическая модель внутриплитной сейсмической зоны (на примере Байкальской рифтовой зоны) [Шерман, 2013].

Fig. 6. The tectonophysical model of an intraplate seismic zone (as exemplified by the Baikal rift zone) [Шерман, 2013].

металлогенической, водоносной или геопатогенной зоной, изучение которых и составляет область всегда актуальных прикладных исследований.

Обобщение результатов предыдущих тектонофизических исследований позволило выделить серию главных закономерностей разломообразования в литосфере. Это, прежде всего, наличие трех стадий в развитии разлома (ранняя, поздняя и полного разрушения), упорядоченная неравномерность нарушенности субстрата и распределения перемещений в зоне его динамического влияния, единый в механическом отношении парагенезис разрывов 2-го порядка, статистические взаимосвязи между ключевыми параметрами разломной зоны. Данные закономерности – основа выявления особенностей разломообразования в регионах с разными режимами развития, а также установления характера протекания в разломных зонах сопутствующих деструкции процессов – сейсмической, эманационной и криповой активности. Такой тектонофизический подход к решению важных в практическом отношении проблем разломообразования с акцентом на анализе сопутствующих опасных процессов являлся

главной особенностью исследований, представленных далее.

Сейсмическая активность межблоковых деструктивных и разломных зон является предметом многолетних исследований сотрудников лаборатории тектонофизики, которые проводятся в двух основных направлениях: 1) выявление наиболее общих закономерностей взаимосвязи разломообразования и сейсмической активности в Центральной Азии на базе тектонофизического подхода к анализу сейсмологических данных и 2) экспериментальные исследования на породном массиве и ледяном покрове оз. Байкал процесса предразрушения с выходом на его предвестники и разработку способов управления режимом подвижек на активных разломах.

В рамках первого направления на примере Байкальской рифтовой зоны впервые разработана обобщенная тектонофизическая модель сейсмических зон, развивающихся во внутриконтинентальных условиях Центральной Азии [Леви и др., 2009; Шерман, 2009а, 20096, 2009в, 2009г, 2013; Шерман, Семинский, 2010; Шерман, Злогодухова, 2011; Шерман, Горбунова, 2011; Шерман и др., 2011, 2012; Горбунова, Шерман, 2012; Ребецкий и др., 2012; Ма Jin et al., 2012; Мельников, 2013]. В реальном времени (месяцы, годы, десятилетия) она может рассматриваться как отдельная, сложно построенная в структурном отношении область литосферы (рис. 6, А, Б). В плане это межблоковая линейно вытянутая зона современной деструкции литосферы (концентратор наиболее сильных землетрясений), представленная густой сетью разноранговых разломов, многие из которых один или несколько раз селективно вовлекались в кратковременный процесс активизации. В вертикальном разрезе сейсмическая зона характеризуется древовидной структурой, ствол и ветви которой представлены разрывами, контролирующими сейсмические события при активизации. Короткопериодная в реальном времени активизация разрывов и пространственно-временные проявления очагов землетрясений в зонах их влияния возбуждаются деформационными волнами, которые в качестве триггера нарушают метастабильное состояние разломноблоковой среды, находящейся под постоянным воздействием регионального поля напряжений. Тектонофизическая модель сейсмической зоны статистически обоснована фактическим материалом, позволившим оценить скорости и периоды деформационных волн, вызывающих активизацию ее различных сегментов и отдельных разломов (рис. 6, *B*), что, в свою очередь, может служить основанием для определения мест и времени ожидаемых в ближайшее время сейсмических событий. В этих исследованиях хорошо сочетаются теоретические разработки с практическим выходом на вероятностный среднесрочный прогноз землетрясений.

Исследования в рамках второго научного направления были связаны с совершенствованием физических основ среднесрочного и долгосрочного прогноза землетрясений в пределах Байкальской рифтовой зоны и смежных территорий [Ружич, 2009; Ружич и др., 2009а, 2009б; Востриков и др., 2009; Имаев и др., 2009; Шилько и др., 2009; Psakhie et al., 2009, 2010; Борняков, 2010; Борняков, Встовский, 2010; Псахье и др., 2010; Рассказов и др., 2010; Radziminovich et al., 2010; Vstovsky, Bornyakov, 2010; Добрецов и др., 2011; Черных и др., 2011; Деструкция..., 2012; Астафуров и *др.*, 2013; Chernykh et al., 2013]. Они проводились при сотрудничестве с региональными органами МЧС, куда ежеквартально отправлялись оперативные сводки об изменениях сейсмической обстановки в регионе. Опыт этих работ показал, что недостатки среднесрочного прогноза в нашей стране и за рубежом обусловлены дефицитом данных, прежде всего, о процессах подготовки очагов землетрясений в глубинных сегментах зон разломов. Для продвижения в совершенствовании среднесрочного прогноза нужны дополнительные геолого-геофизические и детальные сейсмологические исследования с применением новых видов аппаратуры, что требует существенных капиталовложений.



Рис. 7. Проведение испытаний в штольне «Талая», расположенной в зоне Главного Саянского разлома, для изучения последствий отклика залеченной трещины в породном массиве на воздействия домкратом, вибрациями и ударами (материалы В.В. Ружича).

На врезке показан вид сейсмической записи одного из инициированных импульсов при мгновенном сбросе давления в домкрате.

Fig. 7. Tests in the Talaya mine gallery located in the Main Sayan fault zone. A cured fracture in the natural massif was subject to impacts of a hoisting jack, vibrations and shocks, and its responses were studied (the information is provided by V.V. Ruzhich).

The insert shows a seismic record of an initiated impulse in case of instantaneous pressure drop when the jack was used.

Кроме того, среднесрочный прогноз всегда будет только вероятностным, и он не спасает от ущерба при сильных землетрясениях. Развивающийся в лаборатории новый подход к решению проблем обеспечения сейсмобезопасности связан с разработкой способов управления деформациями в зонах разломов на стадии подготовки очагов землетрясений с применением механических воздействий посредством взрывов, ударов копром, мощных домкратов, закачек водных растворов и вибровоздействий (рис. 7). Кроме того, в течение многих лет осуществлялись инструментальные наблюдения за ходом динамических явлений в ледовом покрове оз. Байкал, разрушение которого протекает по ряду признаков подобно сейсмотектоническому процессу в земной коре.

В качестве главного вывода, полученного на основе интерпретации собранных данных, установлено, что, применяя различные режимы комплексных техногенных воздействий на сегменты разломов в пределах высоконапряженных породных массивов, можно инициировать динамические явления или предупредить их возникновение за счет перераспределения волновой энергии в тепловую, при регулируемом изменении



Рис. 8. Типы аномалий радона (I–IV), формирующихся над разломами, которые отличаются по структуре (сосредоточенные или рассредоточенные) и/или наличию заполнителя (незалеченные или залеченные) [*Radon..., 2012*].

Fig. 8. Types of radon anomalies (I–IV) that form above faults. Such anomalies differ in structure (they may be concentrated or non-concentrated) and / or presence of infilling material (cured or non-cured [*Radon..., 2012*].

скорости скольжения крыльев разломов. В практическом плане разработка технологии в рамках реализации данного подхода может уже в ближайшие годы способствовать снижению риска опасных динамических явлений в районах расположения уязвимых промышленных сооружений, а также при проходке подземных горных выработок на больших глубинах – 1–4 км. При дальнейшем совершенствовании способов безопасной разгрузки очагов горных ударов открываются перспективы разработки аналогичных подходов по отношению к готовящимся коровым землетрясениям. Разработка этих технологий намного сложнее, но она становится все более реальной.

Эманационная активность разломных зон изучалась в ходе многолетних исследований на юге Восточной Сибири и в Монголии [*Семинский*, *Бобров*, 2009а, 2009б; *Семинский и др.*, 2012a; Radon..., 2012; Seminsky, Demberel, 2013]. Интерпретация полученных данных с позиций выявленных ранее закономерностей разломообразования позволила установить, что интенсивность выхода радона через разломные зоны земной коры характеризуется периодической изменчивостью во времени и резко неравномерным распределением в пространстве. Форма и размер аномалии почвенного радона зависят от специфики внутреннего строения и геодинамической активности разломной зоны. Определяющее влияние этих факторов осложняется наличием в разрезе тонкодисперсных продуктов эрозионных процессов и выветривания, препятствующих выходу газа в атмосферу. По форме поперечного профиля выделено четыре типа приразломных аномалий радона (I–IV), отражающих структурные ситуации, которые образуются при различных сочетаниях двух признаков (рис. 8): разновидность разлома (сосредоточенный – на ранней стадии или рассредоточенный – на поздних стадиях развития) и наличие (или отсутствие) в зоне его влияния тонкодисперсного заполнителя. Поперечные размеры эманационной аномалии несколько превышают ширину разломной зоны, включающую все разрывы, связанные с формированием главного сместителя, который в большинстве случаев из-за низкой проницаемости тектонитов маркируется минимумом концентрации почвенного радона. Контрастность эманационных аномалий, которая оценивалась при помощи относительного показателя $K_O = Q_{max}$ / Q_{min} (где Q_{max} – максимальное значение параметра Q, а Q_{min} – минимальное значение параметра Q в породах за границей зоны разлома), тяготеет у выборки из десятков изученных дизъюнктивов к определенным уровням данного параметра. Это позволило выделить

пять групп разломных зон: с низкой ($K_Q \le 2$), средней ($2 < K_Q \le 3$), повышенной ($3 < K_Q \le 5$), высокой ($5 < K_Q \le 10$) и сверхвысокой ($K_Q > 10$) радоновой активностью. Зоны влияния разломов двух последних групп представляют опасность в плане строительства и эксплуатации зданий, в которых длительное время находятся или живут люди. Установленные закономерности являются основой для создания в будущем новой технологии оценки радоноопасности территорий, в которой, кроме наличия радиоактивных пород, значимым фактором является существование в земной коре зон активных разломов.

Проблема контроля разломными зонами алмазоносных кимберлитов на Сибирской платформе имеет двойное значение для практики. Во-первых, это выделение перспективных площадей для поисков новых трубок и, во-вторых, прогноз наиболее нарушенных участков горных выработок (карьеров и шахт) с целью обеспечения безопасности горно-эксплуатационных работ на разрабатываемых месторождениях алмаза [Гладков и др., 2010б; Константинов, Гладков, 2009]. Работы в рамках данной проблемы охватили полный цикл тектонофизических исследований, в результате которого были в первую очередь выявлены главные закономерности строения разрывных сетей в различных структурных этажах Сибирской платформы как единой длительно развивающейся тектонической единицы. Тектонофизическими методами установлена взаимосвязь периодов формирования кимберлитовых тел с этапами становления и активизации разрывной структуры платформенного чехла. Впервые показано, что определяющую роль в структурном контроле кимберлитового магматизма на Сибирской платформе играют разломные зоны ортогональной сети, активизировавшиеся в режиме знакопеременных движений на разных этапах ее развития в палеозое и мезозое. Положение отдельных кимберлитовых полей в пределах субширотных и субмеридиональных разломных зон контролируется системами разрывов 2-го и более высоких порядков, которые заметно отличаются по строению и согласуются с типами полей напряжений, действовавшими в различные эпохи внедрения кимберлитов. Отдельные магматические трубки, как правило, приурочены к структурам растяжения, возникающим на разных этапах тектогенеза в результате взаимодействия субширотных и/или субмеридиональных нарушений на участках окончаний или в узлах пересечений (рис. 9). Установленные закономерности представляют основу выделения на Сибирской платформе новых перспективных площадей, тогда как схемы разломов, составленные для эксплуатируемых месторождений алмаза, являются базовым материалом для разработки безопасной тактики горнорудного производства.

<u>Активные разломы земной коры</u> являются объектом исследований, представляющим особую значимость для практики в связи с нуждами строительства зданий

и сооружений, прогнозом сильных землетрясений, а также опасных инженерно-геологических процессов, интенсивно протекающих в зонах их динамического влияния. Кроме картирования этих структур на местности, особое значение на современном этапе имеет создание геоинформационных систем, включающих базы данных по активным разломам какого-либо региона и программное обеспечение, позволяющее в удобной и доступной форме обрабатывать имеющиеся материалы. Сотрудниками лаборатории тектонофизики [Лунина, 2010; Лунина и др., 2010б, 2011б, 2012б; Андреев, Лунина, 2012; Гладков и др., 2012, 2013] для территории юга Восточной Сибири (50-57° с. ш. и 100–114° в. д.) созданы карта и база данных активных (в неоген-четвертичное время) разломов с сопутствующей информацией об опасных геологических эффектах, сопровождавших умеренные и сильные землетрясения (разрывы, разжижение, воронки-провалы, склоновые движения). База данных позволяет путем электронных запросов классифицировать разломные сегменты по времени последней активизации, кинематике, степени активности и другим характеристикам. Так, на основе созданной базы данных в среде ГИС MapInfo составлена карта активных разломов юга Восточной Сибири, способных генерировать землетрясения с магнитудой 5.5 и выше (рис. 10). Возможность инициирования таких сейсмических событий доказана на основе комплексного тектонофизического анализа связи инструментальных и исторических землетрясений с разломами, палеосейсмогеологических признаков активности и представлений о принадлежности дизъюнктива к зоне возникновения очагов землетрясений, выделенных предшественниками. На карте сейсмоактивные структуры разделены по возрасту последней активизации. Анализ базы данных показал, что главными источниками землетрясений с M>5.5 на юге Восточной Сибири являются северо-восточные сбросы и субширотные разрывы с левосторонней компонентой горизонтального смещения. Это согласуется с приуроченностью к тем же направлениям разрывов тектонических деформаций в рыхлых и слабосцементированных осадках плиоцен-четвертичного возраста и свидетельствует о их бо́льшей активности по сравнению с дизъюнктивами других ориентировок. Карта, представленная на рис. 10, а также другие результаты использования созданной базы данных являются основой решения многих прикладных задач, связанных с прогнозированием опасных природных процессов, сопутствующих деструкции земной коры.

7. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ЛАБОРАТОРИИ

Исследования процесса деструкции литосферы Центральной Азии на разных уровнях иерархии, про-

K.Zh. Seminsky: Faulting of the lithosphere in the Central Asia and accompanying processes...





Рис. 9. Структурная модель формирования кимберлитового тела трубки «Нюрбинская» (вверху – фото карьера в 2008 г.) в узле взаимодействия Широтного и Диагонального разломов на первом (*A*) и втором (*Б*) этапах проявления знакопеременных сдвиговых движений [*Гладков и др., 2010б*].

А – первый этап. Темно-зеленым цветом показана серия структур типа пулл-апарт, возникающих в результате раскрытия разрывов Диагонального разлома на участке взаимодействия с разрывами Широтного разлома. Оконтуренное точками светло-зеленое поле отвечает предполагаемой форме трубки в конце первого этапа. Б – второй этап. Оконтуренное точками светло-зеленое поле отражает конечную форму трубки, деформированной в результате левосдвиговых смещений по разрывам Диагонального разлома. Темно-зеленым цветом показана структура пулл-апарт, с которой может быть связано внедрение последних фаз кимберлитового расплава. Большими стрелками обозначено направление действия сил сжатия (красные) и растяжения (синие). Сплошные линии соответствуют разрывным нарушениям в зонах и узле Широтного и Диагонального разломов. Черные стрелки показывают направления сдвиговых смещений на обоих этапах деформирования.

Fig. 9. The structural model of formation of the kimberlitic body of the Nyurbinskaya pipe (top – a photo of the quarry in 2008) at the junction of the Lateral and Diagonal faults at Stage 1 (A) and Stage 2 (B) when alternating-sign shear movements were manifested [*Gladkov et al.*, 2010b].

A – Stage 1. Series of pull-apart structure are shown in dark green; such structures results from opening of fractures that comprise the Diagonal fault at the junction with fractures comprising the Lateral fault. The assumed shape of the pipe at the end of Stage 1 is shown as a light green field contoured by dots. B – Stage 2. The light green field contoured by dots shows the final shape of the pipe after it was deformed by left-lateral displacement along the fractures comprising the Diagonal fault. The pull-apart structure is shown in dark green; intrusions of the late phases of kimberlitic melt may be associated with the given structure. Big red arrows show directions of compression; big blue arrows show directions of shear displacements at both stages of deformation.



Рис. 10. Карта активных разломов юга Восточной Сибири, способных генерировать землетрясения с магнитудой 5.5 и выше [*Лунина и др., 20126*].

Fig. 10. The map of active faults of the southern regions of East Siberia. Such faults can generate earthquakes of M \geq 5.5 and stronger seismic events [*Lunina et al.*, 2012b].

веденные сотрудниками лаборатории тектонофизики в 2009–2013 гг., позволили получить результаты, имеющие теоретическое и практическое значение. Установлены главные закономерности разломного строения, напряженного состояния, современной активности (сейсмической и радоновой) и механизма формирования Байкальского рифта – главной активной межблоковой зоны на юге Восточной Сибири. Разработана тектонофизическая модель Байкальской сейсмической зоны. Установлены количественные характеристики и специфика внутреннего строения радоновой аномалии, обусловленной формированием Байкальского рифта. Проведена систематизация геолого-геофизической информации, и создана база данных по активным разломам, композитным и индивидуальным сейсмогенным источникам, а также косейсмическим эффектам в Байкальской рифтовой зоне и смежных регионах.

Комплексный анализ этих результатов показал, что реальная картина тектонической делимости в Центральной Азии соответствует тектонофизическим представлениям о зонно-блоковой структуре литосферы. Ее конкретные формы и иерархия отчетливо выделяются при анализе дистанционных данных и материалов полевых геолого-геофизических съемок. В приповерхностной части и до глубин в первые десятки километров проявлено деление земной коры на относительно слабонарушенные блоки, которые контактируют по широким зонам, отличающимся повышенной дислоцированностью и флюидонасыщенностью. Динамика разломообразования в этих зонах обусловливает пространственно-временные проявления сейсмической и радоновой активности. Как следствие, в основе моделей сейсмичности и других важных в практическом отношении сопутствующих деструкции явлений должны лежать структурные особенности земной коры, а также закономерности их изменений в масштабах реального времени. Экспериментальные данные, позволяющие прогнозировать динамику разломообразования, свидетельствуют, что этот процесс сложен вследствие селективной активизации разрывов в межблоковых зонах литосферы. В то же время полученные результаты, в т.ч. и данные экспериментов по управлению режимом смещений в разломных фрагментах, позволяют рассчитывать на выявление устойчивых закономерностей в дальнейшем.

Вследствие изложенного выше научные перспективы коллектива сотрудников лаборатории тектонофизики связаны с разработкой комплексных моделей межблоковых зон, в основе которых лежат особенности разломного строения, а содержательную часть составляют обусловленные ими закономерности сейсмической, эманационной и флюидной активности. Такие модели служат современным теоретическим обеспечением создания разнотипных прикладных технологий, направленных на оценку радоноопасности территорий, прогноз сейсмической активности и опасных инженерно-геологических процессов и явлений.

Успех в развитии намеченного научного направления зависит от полноты информации о деструкции литосферы и сопутствующих процессах, протекающих в различных геодинамических обстановках. Большое значение в сборе такой информации, кроме анализа литературных данных, имеют рабочие контакты со специалистами из России и других стран. В связи с этим сотрудники лаборатории тектонофизики принимали участие в международных геологических конгрессах, ряде совещаний по рифтовым зонам Земли, геодинамике и деструкции литосферы. В 2009 г. к.г.м.н. О.В. Лунина стала Лауреатом национальной премии Л'ОРЕАЛЬ – ЮНЕСКО для молодых российских женщин-ученых.

Лаборатория тектонофизики известна как организатор всероссийских научных совещаний с международным участием: «Разломообразование в литосфере: тектонофизический анализ» (1991 г.), «Напряженное состояние, деформации и сейсмичность литосферы» (2003 г.), «Разломообразование и сейсмичность литосферы: тектонофизические концепции и следствия» (2009 г.), а также IX Международной школы-семинара «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород» (2013 г.). В 2014 г. планируется провести очередное совещание по теме «Разломообразование и сопутствующие процессы в литосфере: тектонофизический анализ», посвященное 35-летию лаборатории тектонофизики и 65-летию Института земной коры СО РАН.

Автор выражает благодарность всем научным сотрудникам лаборатории тектонофизики за материалы, предоставленные для подготовки статьи.

8. ЛИТЕРАТУРА ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЙ (2009-2013 ГГ.)

8.1. Монографии

- Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия / В.Н. Опарин, А.А. Козырев, В.И. Панин, ... В.В. Ружич и др. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 632 с.
- Лунина О.В., Гладков А.С., Неведрова Н.Н. Рифтовые впадины Прибайкалья: тектоническое строение и история развития. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009а. 316 с.
- *Radon: Properties, applications and health hazards /* Eds.: Z. Li and C. Feng. Chapter 1. Seminsky K.Zh., Bobrov A.A. Spatial and temporal variations of soil-radon activity in fault zones of the Pribaikalie (East Siberia, Russia). New York: Nova Sci. Publ. Inc., 2012. P. 1–36.

8.2. СТАТЬИ В ЗАРУБЕЖНЫХ РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ ЖУРНАЛАХ

- Lunina O.V., Nevedrova N.N., Gladkov A.S. Tectonic and geoelectric structure of rift basins in the Baikal region // Comptes rendus geosciences. 2012. V. 344. P. 149–158.
- *Ma Jin, Sherman S.I., Guo Yanshuang.* Identification of meta-instable stress state based on experimental study of evolution of the temperature field during stick-slip instability on 5° bending fault // *Science China. Earth Sciences.* 2012. V. 55. № 6. P. 869–881.
- Psakhie S.G., Dobretsov N.L., Shilko E.V., Astafurov S.V., Dimaki A.V., Ruzhich V.V. Model study of the formation of deformation-induced structures of subduction type in block-structured media. Ice cover of Lake Baikal as a model medium // *Tectonophysics*. 2009. V. 465. P. 204–211.
- Psakhie S.G., Shilko E.V., Astafurov S.V., Dimaki A.V., Ruzhich V.V. Model study of influence of internal stresses on deformation and seismic processes in convergent plate boundary zones by the example of Lake Baikal ice cover // *Geophysical journal*. 2010. V. 32. № 4. P. 134–136.
- Seminsky K.Zh., Demberel S. The first estimations of soil-radon activity near faults in Central Mongolia // Radiation measurements. 2013. V. 49. P. 19–34.
- *Vstovsky G.V., Bornyakov S.A.* First experiences of seismodeformation monitoring of Baikal rift zone (by the example of South-Baikal earthquake of August 27, 2008) // *Natural Hazards and Earth System Sciences.* 2010. V. 10. P. 667–672.

8.3. Статьи в российских рецензируемых журналах

Андреев А.В., Лунина О.В. Параметры землетрясений и пространственное распределение косейсмических эффектов

на юге Сибири и в Монголии // Вопросы инженерной сейсмологии. 2012. Т. 39. № 2. С. 25–62.

- Астафуров С.В., Гранин Н.Г., Димаки А.В., Псахье С.Г., Ружич В.В., Шилько Е.В. Изучение взаимосвязи деформационной и сейсмической активности в блочных ледовых массивах. Возможности прогноза «ледовых ударов». Модельные исследования на ледовом покрове озера Байкал // Вестник НГУ. Серия: Математика, механика, информатика. 2013. Т. 13. Вып. 3. С. 3–10.
- Бержинский Ю.А., Ордынская А.П., Гладков А.С., Лунина О.В., Бержинская Л.П., Радзиминович Н.А., Радзиминович Я.Б., Имаев В.С., Чипизубов А.В., Смекалин О.П. Опыт применения шкалы ESI-2007 для оценки интенсивности Култукского землетрясения 27.08.2008 г. (Южный Байкал) // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36. № 3. С. 5–26.
- *Борняков С.А.* Деформационные предвестники Усть-Баргузинского землетрясения 20 мая 2008 г. // Доклады АН. 2010а. Т. 431. № 3. С. 400–402.
- Борняков С.А. Экспериментальное исследование закономерностей сейсмической активизации разломов в деструктивных зонах литосферы // Физическая мезомеханика. 2010б. Т. 13. № 4. С. 103–108.
- Борняков С.А., Встовский Г.В. Первый опыт сейсмодеформационного мониторинга Байкальской рифтовой зоны (на примере Южно-Байкальского землетрясения 27 августа 2008 г.) // Доклады АН. 2010. Т. 431. № 4. С. 537–541.
- Борняков С.А., Семенова Н.В. Диссипативные процессы в зонах разломов (по результатам физического моделирования) // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 6. С. 862–870.
- Бурзунова Ю.П. Углы между сопряженными системами приразломных трещин в идеализированных и природных парагенезисах, формирующихся в различных динамических обстановках // Литосфера. 2011. № 2. С. 94–110.
- Востриков В.И., Ружич В.В., Федеряев О.В. Система мониторинга обвалоопасных участков бортов глубоких карьеров // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2009. № 6. С. 118–127.
- Гладков А.С., Лунина О.В. Сейсмиты юга Восточной Сибири: проблемы и перспективы изучения // Геодинамика и тектонофизика. 2010а. Т. 1. № 3. С. 249–272.
- Гладков А.А., Лунина О.В., Андреев А.В. Некоторые аспекты разработки информационной системы для интегрирования данных по активной тектонике // Геоинформатика. 2013. № 4. С. 6–14.
- Гладков А.С., Маковчук И.В., Лунина О.В., Борняков С.А., Потехина И.А. Трехмерная модель разломно-блоковой структуры участка локализации кимберлитовой трубки Юбилейная (Россия) // Геология рудных месторождений. 2010б. Т. 52. № 3. С. 260–279.
- Гладков А.С., Радзиминович Я.Б., Лунина О.В. О связи между очагом исторического землетрясения 25 мая 1887 г. и разломом по долине р. Биликтуйка (юг Сибирской платформы) // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 12. С. 1735–1743.
- Горбунова Е.А., Шерман С.И. Медленные деформационные волны в литосфере: фиксирование, параметры, геодинамический анализ (Центральная Азия) // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 1. С.18–25.
- Гуо Ю.С.Х., Ма Джин, Юн Л., Борняков С.А. Экспериментальное изучение процесса прерывистого скольжения по разломам с изгибом // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2. № 1. С. 35–44.
- Добрецов Н.Л., Ружич В.В., Псахье С.Г., Черных Е.Н., Шилько Е.В., Левина Е.А., Пономарева Е.И. О совершенствовании способов прогноза землетрясений средствами физического моделирования в ледовом покрове Байкала // Физическая мезомеханика. 2011. Т. 14. № 4. С. 69–79.
- Имаев В.С., Чипизубов А.В., Ружич В.В., Смекалин О.П., Семенов Р.М., Имаева Л.П., Ордынская А.П. Тектоническая природа Култукского землетрясения (на юге оз. Байкал) // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2009. № 2. С. 35–39.
- Константинов К.М., Гладков А.С. Петромагнитные неоднородности зон обжига пермотриасовых траппов месторождения трубки Комсомольская (Якутская алмазоносная провинция) // Доклады АН. 2009. Т. 427. № 2. С. 245–252.
- Коняев П.А., Боровик А.В. Изучение астроклимата Байкальской астрофизической обсерватории оптическими методами // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 12. С. 1–5.
- Леви К.Г., Шерман С.И., Саньков В.А. Современная геодинамика Азии: карта, принципы составления, геодинамический анализ // Геотектоника. 2009. № 2. С. 78–93.
- Лунина О.В. Формализованная оценка степени активности разломов в плиоцен-четвертичное время (на примере Байкальской рифтовой зоны) // Геология и геофизика. 2010. № 4. С. 525–539.
- *Лунина О.В., Андреев А.В., Гладков А.С.* Локализация эпицентра землетрясения доинструментального периода на основе количественного анализа косейсмических деформаций в рыхлых отложениях // Доклады АН. 2011а. Т. 438. № 4. С. 543–549.
- Лунина О.В., Андреев А.В., Гладков А.С. По следам Цаганского землетрясения 1862 г. на Байкале: результаты исследования вторичных косейсмических деформаций в рыхлых осадках // Геология и геофизика. 2012а. Т. 53. № 6. С. 775–796.
- Лунина О.В. Гладков А.С. Разломно-блоковое строение и напряженное состояние земной коры Гусиноозерской впадины и прилегающей территории (Западное Забайкалье) // Геотектоника. 2009. № 1. С. 78–96.
- Лунина О.В., Гладков А.С. Фрактальный анализ пространственно-временных изменений эпицентрального поля землетрясений в разных районах Байкальской рифтовой зоны // Вулканология и сейсмология. 2011. № 5. С. 60–75.
- Лунина О.В., Гладков А.С., Гладков А.А. Систематизация активных разломов для оценки сейсмической опасности // Тихоокеанская геология. 2012б. Т. 31. № 1. С. 49–60.
- Лунина О.В., Гладков А.А., Капуто Р., Гладков А.С. Разработка реляционной базы данных для сейсмотектонического

K.Zh. Seminsky: Faulting of the lithosphere in the Central Asia and accompanying processes...

анализа и оценки сейсмической опасности юга Восточной Сибири // Геоинформатика. 2011б. № 2. С. 26–35.

- Лунина О.В., Гладков А.С., Неведрова Н.Н. Тектоническое строение, напряженное состояние и геодинамика рифтовых впадин Прибайкалья // Геотектоника. 2010а. № 3. С. 525–539.
- Лунина О.В., Гладков А.С., Орлова О.А. Свидетельства палеосейсмических событий в рифтовых впадинах Прибайкалья и их возрастные привязки // Доклады АН. 2009б. Т. 427. № 1. С. 79–83.
- Лунина О.В., Гладков А.С., Шерстянкин П.П. Новая электронная карта активных разломов юга Восточной Сибири // Доклады АН. 2010. Т. 433. № 5. С. 662–667.
- Лунина О.В., Неведрова Н.Н., Гладков А.С. Тектонофизические и геоэлектрические исследования рифтовых впадин Прибайкалья // Геофизические исследования. 2010в. Т. 11. № 1. С. 5–14.
- *Мельников М.Г.* О волновом механизме активизации разломов в сейсмических зонах литосферы Монголии // *Геодинамика и тектонофизика.* 2013. Т. 4. № 1. С. 69–81.
- Псахье С.Г., Шилько Е.В., Астафуров С.В., Димаки А.В., Гранин Н.Г., Ружич В.В., Гнатовский Р.Ю. Роль внутренних напряжений в плитных средах как фактора, определяющего деформационную активность на границах раздела. Оценка величины избыточных «тектонических» напряжений // Физическая мезомеханика. 2010. Т. 13. № 3. С. 98–103.
- Рассказов С.В., Шерман С.И., Леви К.Г., Ружич В.В., Кожевников В.М., Саньков В.А. Академик Н.А. Логачев и его научная школа: вклад в изучение кайнозойского континентального рифтогенеза // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1. № 3. Р. 209–224.
- Ребецкий Ю.Л., Гончаров М.А., Кузьмин Ю.О., Семинский К.Ж., Шерман С.И. Тектонофизические совещания в СССР и России: информация накануне третьей тектонофизической конференции в ИФЗ РАН: «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле» (Москва, 8–12 октября 2012 г.) // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т. 3. № 3. С. 309–314.
- Ружич В.В. Очаг землетрясения как объект геологического изучения // Физика Земли. 2009. № 11. С. 1–9.
- Ружич В.В., Левина Е.А., Востриков В.И. К проблеме прогноза горных ударов в подземных выработках, пройденных на месторождениях полезных ископаемых // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2009а. Вып. 35. № 2.
- Ружич В.В., Псахье С.Г., Черных Е.Н., Борняков С.А., Гранин Н.Г. Деформации и сейсмические явления в ледяном покрове оз. Байкал // Геология и геофизика. 2009б. № 3. С. 289–299.
- Семинский К.Ж. Главные факторы развития впадин и разломов Байкальской рифтовой зоны: тектонофизический анализ // Геотектоника. 2009. № 6. С. 1–17.
- Семинский К.Ж., Бобров А.А. Радоновая активность разломов (на примере Западного Прибайкалья и Южного Приангарья) // Геология и геофизика. 2009а. Т. 50. № 8. С. 881–896.
- Семинский К.Ж., Бобров А.А. Сравнительная оценка радоновой активности разнотипных и разноранговых разломов Байкальского рифта и юга сибирской платформы // Доклады АН. 2009б. Т. 427. № 4. С. 521–525.
- Семинский К.Ж., Дэмбэрэл С., Тугарина М.А., Ганзориг Д., Борняков С.А. Первые оценки объемной активности почвенного радона в разломных зонах Центральной Монголии // Доклады АН. 2012а. Т. 447. № 2. С. 199–203.
- Семинский К.Ж., Когут Е.И. Определяющие факторы развития впадин и разломов Байкальской рифтовой зоны: результаты физического эксперимента // Доклады АН. 2009. Т. 424. № 1. С. 76–79.
- Семинский К.Ж., Кожевников Н.О., Черемных А.В., Поспеева Е.В., Бобров А.А., Оленченко В.В., Тугарина М.А., Потапов В.В., Бурзунова Ю.П. Межблоковые зоны северо-западного плеча Байкальского рифта: результаты комплексных геолого-геофизических исследований по профилю п. Баяндай – м. Крестовский // Геология и геофизика. 2012б. Т. 53. № 2. С. 250–269.
- Семинский К.Ж., Кожевников Н.О., Черемных А.В., Поспеева Е.В., Бобров А.А., Оленченко В.В., Тугарина М.А., Потапов В.В., Зарипов Р.М., Черемных А.С. Межблоковые зоны в земной коре юга Восточной Сибири: тектонофизическая интерпретация геолого-геофизических данных // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4. № 3. С. 203–278.
- Семинский К.Ж., Радзиминович Я.Б. Поперечные размеры и латеральная зональность Байкальского сейсмического пояса // Доклады АН. 2011. Т. 438. № 1. С. 114–117.
- Семинский К.Ж., Тугарина М.А. Особенности подземной гидросферы западного плеча Байкальского рифта: результаты гидрогеологических исследований вдоль профиля п. Баяндай – м. Крестовский // Доклады АН. 2011а. Т. 439. № 6. С. 775–779.
- Семинский К.Ж., Тугарина М.А. Результаты комплексных исследований подземной гидросферы западного плеча Байкальского рифта (на примере участка п. Баяндай – м. Крестовский) // Геодинамика и тектонофизика. 20116. Т. 2. № 2. С. 126–144.
- Семинский К.Ж., Черемных А.В. Трещинные сети и поля напряжений в кайнозойских осадках Байкальского рифта: новые возможности структурно-парагенетического анализа // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 3. С. 450–469.
- Черемных А.В. Внутренняя структура разломных зон Приольхонья и эволюция напряженного состояния верхней коры Байкальского рифта // Геодинамика и тектонофизика. 2010а. Т. 1. № 3. С. 273–284.
- Черемных А.В. Разломно-блоковая структура и напряженное состояние верхней коры восточного побережья озера Байкал (натурные наблюдения и моделирование) // Физика Земли. 2010б. № 5. С. 41–48.
- Черемных А.В. Поля напряжений в зоне Приморского сброса (Байкальский рифт) // Литосфера. 2011. № 1. С. 135– 142.
- Черных Е.Н., Ключевский А.В., Ружич В.В. Сравнительное исследование записей катастрофического восточнояпонского землетрясения на скальном грунте и ледовом покрове озера Байкал // Вопросы инженерной сейсмоло-

гии. 2011. Т. 38. № 4. С. 29–38.

Шерман С.И. А.В. Пейве – основоположник учения о глубинных разломах // Геотектоника. 2009а. № 2. С. 20–36.

- Шерман С.И. Естественные триггерные механизмы нарушения метастабильного состояния разломно-блоковой среды литосферы в реальном времени // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2009б. № 5. С. 33–48.
- Шерман С.И. Естественные триггерные механизмы нарушения метастабильного состояния разломно-блоковой среды литосферы в реальном времени // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2009в. № 5. С. 33–38.
- Шерман С.И. Тектонофизическая модель сейсмической зоны: опыт разработки на примере Байкальской рифтовой системы // Физика Земли. 2009г. № 11. С. 8–21.
- Шерман С.И. Деформационные волны как триггерный механизм сейсмической активности в сейсмических зонах континентальной литосферы // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4. № 2. С. 83–117.
- Шерман С.И., Горбунова Е.А. Вариации и генезис сейсмической активности разломов Центральной Азии в реальном времени // Вулканология и сейсмология. 2011. № 1. С. 63–76.
- Шерман С.И., Злогодухова О.Г. Сейсмические пояса и зоны Земли: формализация понятий, положение в литосфере и структурный контроль // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2. № 1. С. 1–34.
- Шерман С.И., Лысак С.В., Горбунова Е.А. Тектонофизическая модель Байкальской сейсмической зоны, ее тестирование и возможности среднесрочного прогноза землетрясений // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 4. С. 508– 526.
- Шерман С.И., Семинский К.Ж. Тектонофизические исследования в Институте земной коры СО РАН: принципиальные достижения и актуальные задачи // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1. № 1. С. 4–23.
- Шерман С.И., Сорокин А.П., Сорокина А.Т., Горбунова Е.А., Бормотов В.А. Новые данные об активных разломах и зонах современной деструкции литосферы Приамурья // Доклады АН. 2011. Т. 439. № 5. С. 685–691.
- Шилько Е.В., Астафуров С.В., Ружич В.В., Псахье С.Г. О возможности оценки уровня сдвиговых напряжений на границах раздела в блочных средах // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. № 3. С. 15–22.
- *Chernykh E.N., Klyuchevskii A.V., Ruzhich V.V.* Comparison of nearby earthquake rrecords made on hard rock ground and on ice cover of Lake Baikal // *Seismic Instruments.* 2013. V. 49. № 3. P. 265–274.
- Radziminovich Ya.B., Imaev V.S., Radziminovich N.A., Ruzhich V.V., Smekalin O.P., Chipizubov A.V. The August 27, 2008, M_W = 6.3, Kultuk Earthquake effects in the nearepicenter zone: Macroseismic Survey Results // Seismic Instruments. 2010. V. 46. №. 2. P. 107–120.
- Seminsky K.Zh. Internal structure of fault zones: spatial and temporal evolution studies on clay models // Geodynamics & Tectonophysics. 2012. V. 3. № 3. P. 183–194.



Семинский Константин Жанович, докт. геол.-мин. наук, зав. лабораторией тектонофизики Институт земной коры СО РАН 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия Тел.: 8(3952)423027; ⊠ e-mail: seminsky@crust.irk.ru

Seminsky, Konstantin Zh., Doctor of Geology and Mineralogy, Head of Laboratory of Tectonophysics Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS 128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia Tel.: 8(3952)423027; ⊠ e-mail: seminsky@crust.irk.ru PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2014 VOLUME 5 ISSUE 1 PAGES 135-157

http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0121



ISSN 2078-502X

SEISMOGEOLOGICAL, SEISMOLOGICAL AND ENGINEERING SEISMOLOGICAL STUDIES OF THE LABORATORY OF ENGINEERING SEISMOLOGY AND SEISMOGEOLOGY OF IEC RAS

V. I. Dzhurik

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: The article presents recent results of seismogeological, seismological and engineering seismological studies conducted by the Laboratory. Specific features of seismicity in regions of Russia are reviewed. Space-and-time and energy patterns of seismicity and the state of stresses of the lithosphere are analysed. It is forecasted how foundations of buildings and structures located in the Baikal rift zone may be affected by potential strong earthquakes.

Key words: seismology, seismic zoning, Baikal rift zone, prediction of seismic impact, seismogeodynamics, seismotectonics, structures acting as attractors, rifting, reliability.

Citation: *Dzhurik V.I.* 2014. Seismogeological, seismological and engineering seismological studies of the Laboratory of Engineering Seismology and Seismogeology of IEC RAS. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (1), 135–157. doi:10.5800/GT-2014-5-1-0121.

СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ, СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ И ИНЖЕНЕРНО-СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАБОРАТОРИИ ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОЛОГИИ И СЕЙСМОГЕОЛОГИИ ИЗК СО РАН

В. И. Джурик

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация: Представляются в обобщенном виде результаты исследований, полученные за последние годы сотрудниками лаборатории по вопросам сейсмологии, сейсмогеологии и инженерной сейсмологии. Рассмотрены особенности проявления сейсмичности в различных регионах России, проведен анализ пространственно-временной и энергетической структуры сейсмичности и напряженно-деформированного состояния литосферы. Дается прогноз сейсмических воздействий сильных землетрясений на основания сооружений в различных районах БРЗ.

Ключевые слова: сейсмология, сейсмогеология, сейсмическое районирование, Байкальская рифтовая зона, прогноз сейсмических воздействий, сейсмогеодинамика, сейсмотектоника, структуры-аттракторы, рифтогенез, добротность.

1. Введение

Исследования лаборатории инженерной сейсмологии и сейсмогеологии направлены на решение фундаментальной проблемы общей тектоники, геодинамики и сейсмической опасности – выявление закономерностей процессов сейсмотектонической деструкции земной коры и динамики сейсмогенерирующих структур зон коллизионного взаимодействия литосферных плит.

Для создания региональных сейсмогеодинамических моделей в лаборатории применяются новые геоинформационные системы управления базой данных сейсмотектонических параметров. Региональные модели будут использованы при уточнении исходного сейсмического балла существующих нормативных карт общего и детального сейсмического районирования.

Не менее важной задачей является определение основных закономерностей пространственно-энергетической структуры и эволюции напряженно-деформированного состояния литосферы и сейсмичности под воздействием процессов самоорганизации Байкальской рифтовой системы (БРС) с целью разработки научных основ прогноза сильных землетрясений и параметров их воздействий. Исследование активной нелинейной геофизической среды проводится впервые в мировой практике с целью развития и уточнения геодинамической модели неоднородного и неустойчивого напряженно-деформированного состояния литосферы, адекватно описывающей региональную, локальную и группирующуюся сейсмичность в условиях самоорганизации БРС.

Поставленные задачи решаются в процессе изучения исходной информации, накопленной за последние годы в Байкало-Монгольском регионе с использованием данных анализа сейсмотектонических особенностей территории и имеющихся сведений по слабым и силь-



Рис. 1. Лаборатория инженерной сейсмологии и сейсмогеологии.

Слева на право: 1-й ряд – В.Е. Максименко, д.г.-м.н. В.И Джурик – заведующий лабораторией, Л.Г. Соснина, Г.Н. Масленникова, д.г.-м.н А.В. Ключевский; 2-й ряд – к.г.-м.н. А.Ю. Ескин, Н.Н. Дреннова, В.С. Баскаков, к.г.-м.н. Л.П. Имаева, А.Н. Шагун, к.г.-м.н. С.П. Серебренников; 3-й ряд – д.г.-м.н. А.В. Чипизубов, к.ф.-м.н. А.А. Добрынина, к.г.-м.н. О.П. Смекалин, В.М. Демьянович, д.г.-м.н В.С. Имаев, Е.В. Брыжак

Fig. 1. The Laboratory staff.

1st row – V.E. Maximenko, V.I. Dzurik (Head of the Laboratory), L.G. Sosnina, G.N. Maslennikova, A.V. Klyuchevsky; 2nd row – A.Yu. Eskin, N.N. Drennova, V.S. Baskakov, L.P. Imaeva, A.N. Shagoon, S.P. Serebrennikov; 3rd row – A.V. Chipizubov, A.A. Dobrynina, O.P. Smekalin, V.M. Dem'yanovich, V.S. Imaev, E.V. Bryzhak

ным землетрясениям, получения в натурных условиях новых данных по комплексу методов геологии и геофизики.

Исследования проводятся в рамках общей тематики проекта НИР «Сейсмотектонические процессы и прогноз сейсмических воздействий сильных землетрясений Байкало-Монгольского региона». В общероссийском плане они отвечают приоритетному направлению развития фундаментальной науки в РФ № VIII.78 «Катастрофические эндогенные и экзогенные процессы, включая экстремальные изменения космической погоды: проблема прогноза и снижения уровня негативных последствий».

Основная цель проводимых исследований – использование полученных данных при планировании строительства в сейсмоактивных районах БРЗ, что будет способствовать снижению риска последствий от сейсмических катастроф. В статье будут изложены некоторые полученные результаты исследований по отмеченным и другим вопросам, а также перспективы развития лаборатории.

2. ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

История лаборатории начинается в 1963 г., когда профессором д.ф.-м.н. А.А. Тресковым, главой сибирской сейсмологической школы, была организована служба инструментальных сейсмических наблюдений в Байкальской сейсмической зоне и создана лаборатория сейсмологии. После исследований профессором В.П. Солоненко и его группой Гоби-Алтайского землетрясения (1957 г.) было создано сейсмогеологическое подразделение, которое вскоре оформилось в лабораторию инженерной сейсмогеологии. В 1970 году к.г.-м.н. О.В. Павловым, координатором комплексных геолого-геофизических исследований сейсмической опасности трассы БАМ и других промышленных объектов Восточной Сибири и Монголии, была создана лаборатория инженерной сейсмологии. До слияния лабораторий заведующими были к.г.-м.н. В.М. Кочетков (лаборатория сейсмологии), к.ф.-м.н. А.В. Солоненко (лаборатория физики землетрясений), д.г.-м.н. В.А. Потапов (лаборатория общей и инженерной сейсмологии), В.И. Джурик (кабинет сейсмокриолитозоны) и д.г.-м.н. В.С. Имаев (лаборатория сейсмогеологии).

В настоящее время лаборатория инженерной сейсмологии и сейсмогеологии, созданная в 2011 г., насчитывает 23 сотрудника, включая 5 докторов и 8 кандидатов наук. Заведующий лабораторией д.г.-м.н В.И. Джурик (рис. 1).

3. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

Лаборатория проводит исследования по фундаментальным и прикладным разделам сейсмологии, сейсмогеологии и инженерной сейсмологии. Они включают:

 проблемы очаговой сейсмологии, сейсмического режима, напряженно-деформированного состояния литосферы, количественной оценки сейсмичности, сейсмического районирования разной степени детальности, изучение динамики сейсмических волн в структурно-неоднородных средах и прогноз сейсмических воздействий на грунты и сооружения;

– разработку и совершенствование методов количественной оценки сейсмической опасности, совершенствование и дальнейшую разработку методов палеосейсмогеологического анализа, развитие методов долго- и среднесрочного прогноза сильных землетрясений для Прибайкалья и смежных территорий, напряженнодеформированного состояния геологической среды в зонах активных разломов, а также подготовку пакета новых карт потенциальных очагов землетрясений Восточной Сибири.

4. АППАРАТУРНО-ПРИБОРНАЯ БАЗА ЛАБОРАТОРИИ

Аппаратура, используемая в экспедициях, включает в себя: GPS-приемники, материалы лазерного сканирования, лазерные дальномеры и уровнемеры; среднеи малоглубинная геофизическая аппаратура: сейсморазведочная инженерная станция «Лакколит 24-М», низкочастотная электроразведочная аппаратура Электротест-С, электроразведочная аппаратура ЕРА-МАХ (измерения ВЭЗ, ВП и ЕП); сейсмостанции для регистрации землетрясений, взрывов, вибраций, микросейсм: «Байкал-6», «Байкал-7HR», «Байкал-8»; сейсмодатчики (СК-1П, СМ-3КВ, ОСП 2М) и другие вспомогательные приборы и оборудование.

5. НАУЧНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ ПРОШЛОГО

Из научных достижений прошлого можно отметить следующие:

 – карта сейсмического районирования СССР (масштаб 1:5000000), М.: Наука, 1984;

– из 8-томника «Геология и сейсмичность территории БАМ», Новосибирск: Наука, 1985, три тома («Сейсмичность», «Инженерная геология и инженерная сейсмология», «Сейсмогеология и сейсмическое районирование») являются результатом работ в основном сотрудников предшествующих и настоящей лаборатории;

 официально изданные карты общего сейсмического районирования Российской Федерации ОСР-97 (соавторы В.С. Имаев, Л.П. Имаева, В.С. Хромовских);

– карта общего сейсмического районирования Российской Федерации ОСР-2012 (соавторы В.С. Имаев, Л.П. Имаева, О.П. Смекалин, А.В. Чипизубов, Р.М. Семенов);



Рис. 2. Схема сейсмотектоники Яно-Индигирского сегмента сейсмотектонической зоны Черского.

1–3 – разломы: 1 – сдвиги, 2 – надвиги, 3 – сбросы; 4 – механизм очагов сильных землетрясений с указанием их даты и магнитуды, белым цветом обозначены области сжатия; 5 – направление относительного движения плит; 6 – места позднекайнозойских взбросо-сдвиговых деформаций (1 – Верхнеселенняхская, 2 – Инач, 3 – Сисиктех, Никондя, 4 – Кыллах, 5 – Мятись, Элгандя, 6 – Чаркынская, 7 – Ченкеленьинская, 8 – Нижнемомская, 9 – Улахан, 10 – Верхненерская); 7 – местоположение вулкана Балаган-Тас. Буквами обозначены названия главных разломов: А-Т – Адыча-Тарынский, Чр – Чаркынский, Ч – Чемалгинский, Ч(Д) – Чибагалахский (Догдинский), С – Селенняхский; У – Улахан, Д – Дарпир, Ч-Ю – Чай-Юреинский, М – Мятисский, И-Т – Илин-Тасский, Ар-Т – Арга-Тасский. Крапом нанесены эпицентры инструментально зарегистрированных землетрясений.

Fig. 2. The scheme of seismotectonics of the Yano-Indigirka segment of the Chersky seismotectonic zone.

1–3 – faults: 1 – strike-slip, 2 – thrust, 3 – normal; 4 – strong earthquake focal mechanism, dates and magnitudes (compression areas are shown in white); 5 – relative plate movement directions; 6 – sites of the Late Cenozoic overthrust-shear deformation (1 – Verkhnaselennyakhskaya, 2 – In-ach, 3 – Sisiktekh, Nikondya, 4 – Kyllakh, 5 – Myatus, Elgandya, 6 – Charkynskaya, 7 – Chenkelen'inskaya, 8 – Nizhnemomskaya, 9 – Ulakhan, 10 – Verkhnenerskaya); 7 – location of Balagan-Tas volcano. Main fault names: A-T – Adycha-Tarynsky, 4p – Charkynsky, 4 – Chemalginsky, 4(Д) – Chibagalakhsky (Dogdinsky), C – Selennyakhsky; Y – Ulakhan, Д – Darpir, 4-Ю – Chai-Yureinsky, M – Myatissky, И-T – Ilin-Tassky, Ap-T – Arga-Tassky. Speckles show epicentres of instrumentally recorded earthquakes.

– патент на изобретение «Способ краткосрочного прогноза землетрясения»; авторы: Р.М. Семенов, В.С. Имаев, А.Р. Семенов, А.И. Оргильянов, О.П. Смекалин, Н.П. Широкобокова; патентообладатель: государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Иркутский государственный университет путей сообщения.

6. Основные научные достижения

Основные научные достижения представляются кратко за время существования новой лаборатории по

отмеченным выше основным направлениям и согласно планам НИР.

6.1. СЕЙСМОГЕОДИНАМИКА ГОРНО-СКЛАДЧАТОГО ОБРАМЛЕНИЯ Сибирской платформы: Сейсмический процесс, сейсмотектоника и сейсмобезопасность

В рамках работы лаборатории группой сейсмогеологии решены задачи, которые сгруппированы в несколько отдельных направлений, связанных с особенностями установления сейсмогеодинамической обстановки отдельных районов горно-складчатого обрамления Сибирского кратона.

Проанализированы кинематические типы сейсмогенерирующих структур, а также морфотектонические особенности современного рельефа и соответствующие им поля тектонических напряжений Яно-Индигирского сегмента сейсмотектонической зоны Черского с целью создания модели современной геодинамики территории [Имаева, Имаев и др., 2011]. Установлено, что здесь в условиях транспрессии (сжатия со сдвигом) имеет место определенная кинематическая обстановка, обусловленная взаимодействием сопряженных разнонаправленных сдвигов. Подобные условия возможно смоделировать, если представить, что при сближении Северо-Американской и Евразийской литосферных плит роль активного индентора выполняет Колымо-Омолонский блок (супертеррейн), находящийся во фронтальной части Северо-Американской плиты. Установленный кинематический план системы активных разломов подтверждает унаследованность позднекайнозойских деформаций от мезозойской структуры и свидетельствует о том, что сейсмогенерирующие структуры развиваются в кинематической ситуации, определяемой взаимодействием фронтальных зон Евразийской и Северо-Американской литосферных плит, движущихся с разными скоростями [Имаева и др., 2012]. Полученные результаты детальных сейсмотектонических исследований могут являться основой анализа геодинамических режимов, а также сейсмогеодинамических построений для отдельных сегментов сейсмических поясов северо-востока Азии. Выполненная работа знаменует важный теоретический этап в процессе познания природы сейсмотектонической деструкции земной коры, что позволяет провести определение степени сейсмической опасности территорий на новом качественном уровне (рис. 2).

Структурная организация сейсмогенерирующих зон отдельных сегментов сейсмотектонической зоны Черского свидетельствует о режиме транспрессии (сжатия со сдвигом), обусловленной взаимодействием сближающихся с разными скоростями Евразийской и Северо-Американской литосферных плит (рис. 2).

Таким образом, анализ особенностей сейсмотектонического режима, выявление типов сочленений плит и блоков, а также системы активных разрывных структур Индигиро-Колымского сегмента и проявлений сейсмичности на их границах позволяет прогнозировать характер сейсмотектонических процессов, а также их возможное развитие в пространстве [Имаева, Козьмин и др., 2012].

На основе комплекса геолого-структурных, сейсмологических и сейсмотектонических исследований, проведенных в зоне взаимодействия северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны и Олекмо-Становой сейсмической зоны, выявлена общая геодинамическая позиция и определены закономерности формирования активных разломов области перехода рифтовых структур растяжения к структурам сжатия (рис. 3). Установлено, что закономерности в проявлении сейсмичности, характере полей тектонических напряжений и развитии определенных парагенезисов разломов, возникших в переходной зоне, определяют мозаику развивающихся разломно-блоковых структур (РБС), которые образовались при взаимодействии (транспрессии – сжатии со скольжением) Байкало-Витимского (Забайкальского) и Западно-Станового блоков морфоструктурных элементов современного рельефа и в ориентации нодальных плоскостей фокальных механизмов землетрясений [Имаева, Мельникова и др., 2012].

На основе новых обобщенных геолого-структурных, сейсмологических, сейсмотектонических, наземных геодезических и GPS-данных изучены общая геодинамическая позиция Алдано-Станового блока, его современный структурно-тектонический план и закономерности структурообразования активных разломов в разнородном поле тектонических напряжений, обусловленных взаимодействием Евроазиатской и Амурской литосферных плит на юге Восточной Сибири (Забайкалье), в Южной Якутии и Приамурье [Смекалин и *др., 2010; Имаева, Имаев и др., 2012*].

За время выполнения работ были проведены сейсмотектонические исследования по установлению закономерностей в эволюции сейсмического процесса и развитии системы активных разломов в пределах Монголо-Азиатского орогенного пояса. В настоящее время территория характеризуется высокой тектонической активностью. Большинство сейсмоактивных зон в прошлом веке были отмечены землетрясениями с M>7.0. Однако остаются еще и такие, сейсмичность которых за период инструментальных наблюдений не превышала фоновых значений, а сейсмический потенциал определяется наличием палеосейсмогенных дислокаций. Одна из таких зон установлена в окрестностях г. Улан-Батора и прослеживается в северо-восточном простирании через Керуленскую впадину в направлении Забайкалья, в район Урулюнгуйской впадины [Имаев, Смекалин и др., 2012].

Впервые выраженные в рельефе предположительно активные разломы на территории Южного Забайкалья и Северной Монголии были установлены в конце 50-х годов прошлого века после катастрофического Гоби-Алтайского землетрясения. Однако многие из выделенных тогда линеаментов до недавнего времени не были обследованы сейсмогеологическим методом. Возможно, это связано с тем, что ядро этого мегасвода располагается с восточной стороны от условной меридиональной (103° в.д.) границы, делящей территорию Монголии на западную, высокосейсмичную, и восточную, практически асейсмичную, части.

Сотрудниками сейсмогеологического отряда ИЗК СО РАН совместно с геофизиками Северо-Восточного федерального университета, в сотрудничестве с монгольскими и западноевропейскими коллегами были детально изучены и откартированы сейсмогенерирующие Хустайский, Эмелтский, Гунжинский и Верх-



Рис. 3. Сейсмотектоническая схема северо-восточного фланга БРЗ и сопряженной системы сейсмогенерирующих структур Западно-Станового блока.

Крупные глубинные региональные разломы, активизированные в кайнозое: 1 – сбросы; 2 – взбросы, надвиги, 3 – сдвиги (Хн-К – Хани-Кудулинский, Тнг – Тунгурчинский, Ч-Т – Чаро-Темулякитский, О-Н – Олёкмо-Нюкженский, Им – Имангрский); 4 – диаграммы фокальных механизмов землетрясений с *M*=4.7–7.0 в проекции нижней полусферы (темными и светлыми точками обозначены выходы осей сжатия и растяжения); 5 – впадины: а – кайнозойские: Ч – Чарская, Т – Токкинская; б – мезозойская: Чул – Чульманская; 6 – границы зон взаимодействия структур; 7 – горизонтальная проекция главных осей сейсмотектонических деформаций (красные расходящиеся стрелки – удлинение, светлые – укорочения): I – режим растяжения, II, III – переход от сдвига к растяжению; IV – переход от сдвига к сжатию. Эпицентральные поля: А – Чарское, Б – Олдонгсинское (Чаруодинское), В – Олекминское, Г – Южно-Якутское.

Fig. 3. The seismotectonic scheme of the north-eastern flank of the Baikal rift zone and the conjugated system of structures in the West Stanovoy block, which generate seismicity.

Large deep regional faults reactivated in the Cenozoic: I - normal; 2 - overthrust, thrust; 3 - strike-slip (XH-K - Khani-Kudulinsky, THF - Tungurchinsky, 4-T - Charo-Temulyakitsky, O-H - Olyokmo-Nukzhensky, IM - Imangrsky); 4 - diagram of earthquake focal mechanisms, <math>M=4.7-7.0 in the lower hemisphere projection (dark and light dots show solutions of compression and extension axes); 5 - basins: a - Cenozoic: 4 - Chara, T - Tokka; 6 - Mesozoic: 4yn - Chul'man; 6 - boundaries of interaction zones between structures; 7 - horizontal projection of major axes of seismotectonic deformation (red divergent arrows show elongation; light arrows show shortening): I - extension regime, II, III - transition from shear to extension, IV - transition from shear to compression. Epicentral fields: A - Charskoe, B - Oldongsinskoe (Charuodinskoe), B - Olyok-minskoe, Γ - Yuzhno-Yakutskoe.

некеруленский разломы, представляющие реальную угрозу для столицы Монголии и аймачного центра – г. Баганнур [Дэмбэрэл и др., 2010].

Комплексный анализ материалов дистанционных методов (космических снимков, объемных моделей рельефа поверхности), сейсмогеологические исследования (геоморфологические наблюдения, тренчинг, геофизические малоглубинные исследования) позволили получить информацию о характере строения этих сейсмогенных разломов, фиксируемых деформациях в разрезах толщ вблизи выхода плоскости смещения на поверхность, определить генетический тип и кинематику самих разломов.

В результате проведенных работ впервые палеосейсмическими исследованиями подтвержден высокий сейсмический потенциал сейсмогенерирующих разломов монгольской части Хэнтэй-Даурского мегасвода, расположенных в непосредственной близости от столицы Монголии. Нами установлен сам факт наличия эпицентральных зон палеоземлетрясений и определены их качественные и количественные характеристики (кинематика, амплитуда смещения, абсолютный возраст). На новом фактическом материале оценено значение М_{max}=7.0–7.4 для Хустайского и Гунжинского сейсмогенерирующих разломов (Тольская зона ВОЗ). При этом мы считаем обоснованной оценку возможной интенсивности сотрясений 8.0–8.5 балла по шкале MSK-64 для города Улан-Батора, обозначенную ранее на Карте сейсмического районирования Восточной Сибири и Монголии (карта сейсмического районирования Монголии).

В рамках актуализации действующей нормативной карты общего сейсмического районирования ОСР-97 и создания новой сейсмотектонической основы карты



Рис. 4. Карта сейсмотектоники или ЛДФ-модель для карты ОСР-2012.

Fig. 4. The map of seismotectonics or LDF-model for OSR 2012 Map.

сейсмического районирования следующего поколения – OCP-2012 – нами пересмотрены полученные ранее сейсмотектонические данные на территорию всей Восточной Сибири (Алтай-Саяно-Байкальский, Верхоянский и Приамуро-Приморский сейсморегионы). В основу сейсмотектонических исследований положена концепция о структурно-динамическом единстве геофизической среды и закономерно развивающихся в ней сейсмогеодинамических процессах, методические основы которой разработаны в Институте физики Земли РАН, а в дальнейшем дополнены и регионально адаптированы сотрудниками лаборатории сейсмогеологии ИЗК СО РАН [*Mackey и др., 2010; Fujita и др., 2009*]

В основу актуализации карт ОСР-97 и создания их усовершенствованной версии ОСР-97* положена методология вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО), использованная и при создании комплекта карт ОСР в 1991–1997 гг. Существенным прогрессом за прошедшее с тех пор время явилось широкое привлечение компьютерного моделирования, геологических информационных систем (ГИС), формирование электронных баз данных и совершенствование программно-математического обеспечения для выполнения всех необходимых расчетов и построений. Сохранились принципы линеаментно-доменно-фокальной модели (ЛДФ-модель) зон возникновения очагов землетрясений (зоны ВОЗ).

В связи с тем, что к задачам сейсмотектонических и сейсмогеодинамических исследований относятся выявление и сейсмологическая параметризация сейсмогенерирующих структур (СГС) для создания корректных моделей зон ВОЗ на территории России и в сопредельных регионах, их первоначальное выделение и параметризация происходят путем комплексного анализа и выделения геодинамически активных неотектонических зон (ГАНЗ), которые могут генерировать сильные землетрясения. ГАНЗ, с позиции системного анализа, рассматривается как пространственно локализованный целостный объект с многофакторным взаимодействием его основных компонентов в разрезе земной коры и верхней мантии (литосфере) – коровомантийный вариант, в разрезе литосферы и нижней мантии – суперглобальный вариант.

Составлены схемы сейсмотектоники или линеаментно-доменно-фокальной модели территории Российской Федерации (электронная база данных в формате ArcView GIS) для актуализации действующей нормативной карты общего сейсмического районирования ОСР-97 и построения новой карты общего сейсмического районирования ОСР-2012, на которую в качестве нового элемента сейсмогенерирующих структур (доменов) вынесены отдельные классы ГАНЗ (рис. 4).



Рис. 5. Прогноз изменений сейсмичности по изменению различных процессов.

1 – ход сейсмичности по инструментальным данным; 2 – реконструированный ход сейсмичности; 3–6 – прогноз изменений сейсмичности по солнечной деятельности с различной инерционностью при условии сопоставимости наблюденных и реконструированных W: 3 – ход сейсмичности и его прогнозная часть (коричневая заливка) при наиболее реальной инерционности 662 г., 4 – инерционность 506 лет, 5 – инерционность 298 лет, 6 – инерционность 787 лет; 7 – прогноз при условии противофазного хода наблюденных и реконструированных W. На врезке линиями различного цвета отражен прогноз изменений сейсмичности (E₅) по изменению различных процессов: красный – по V₁₁; синий – по t₅; зеленый – по v₅.

Fig. 5. Forecasting of changes in seismicity from changes of various processes.

1 – seismicity according to instrumental data; 2 – reconstructed seismicity; 3-6 – changes in seismicity as forecasted from data on solar activity with variable inertia on the condition of comparability of the observed and reconstructed W: 3 – seismicity and its forecasted part (brown) at the most realistic inertia of 662 years, 4 – inertia of 506 years, 5 – inertia of 298 years, 6 – inertia of 787 years; 7 – forecast on the condition of antiphase observed and reconstructed W. In the inserts, lines of different colours show forecasted changes in seismicity (E₅) from changes of various processes: red – according to W₁₁; blue – according to t_5 ; green – according to v_5 .

На рис. 4 приведены границы сейсмогеодинамических регионов территории РФ, полученные на основе регионализации объектов с выделением ГАНЗ.

Подготовка и реализация очагов землетрясений оказывают влияние на изменение химического и газового состава подземных вод [Семенов, Имаев и др., 2010]. При этом их предсейсмические вариации часто являются предвестниками времени возникновения землетрясений. Так, в Южном Прибайкалье на основании изучения вариаций концентраций растворенного гелия в глубинной воде Байкала были выявлены краткосрочные предвестники сильного Култукского землетрясений 2008 г. [Семенов, Смекалин, 2011]. Возникновение этих вариаций, на наш взгляд, объясняется моделью подготовки и реализацией очага землетрясения. Из многих существующих в настоящее время моделей для Южного Прибайкалья, характеризующегося развитием рифтогенного процесса, наиболее подходящей является дилатантно-диффузная (ДД) модель.

27 августа 2008 г. в 10 час. 35 мин. местного времени (в 01 час. 35 мин. по Гринвичу) на юге Байкала произошло сильное землетрясение. Магнитуда землетрясения составляла 6.2 (К=15.2), глубина очага 16 км, интенсивность сейсмических сотрясений в эпицентре достигала 8 баллов.

Нами с целью возможного выявления краткосрочных предвестников землетрясений проводится мониторинг содержания гелия в глубинной воде оз. Байкал в связи с изменением сейсмического режима. Работ подобного плана в открытых глубоководных водоемах, расположенных в сейсмически активных районах, таких как Байкал, пока не проводилось.

Перед Култукским землетрясением 27.08.2008 г. в содержаниях гелия отмечалось следующее. Сначала его количество увеличилось до 6.83 10⁻⁵ мл/л, затем уменьшилось до 5.61, далее снова возросло до 6.02, а с 20.08 до 24.08 оставалось в пределах фона. Но ни разу содержание гелия не опускалось ниже фоновых значений. За два дня до землетрясения (25.08.2008 г.) содержание гелия уменьшилось ниже фона до 4.79, что соответствовало среднеквадратичному отклонению величины 2σ, и оставалось на этом уровне в течение 26.08.2008 г., а утром 27.08.2008 г. за два часа до землетрясения повысилось до 5.61. Сразу же после основного толчка и спустя час после землетрясения – повысилось до $6.02 \cdot 10^{-5}$ мл/л. После этого начался его спад, и 28.08.2008 г. содержания гелия снова установились на уровне фоновых значений [Семенов и др., 2010].

Подобные вариации концентраций гелия отмечались и перед некоторыми другими землетрясениями меньшего энергетического класса.

6.2. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОГНОЗА ИЗМЕНЕНИЙ СЕЙСМИЧНОСТИ

Сейсмичность – один из наиболее опасных природных процессов – является следствием тектонических движений, активность которых характеризуется значительными разнопорядковыми квазипериодическими изменениями. Это указывает на важность и необходимость исследований, направленных на прогноз изменений сейсмичности, что необходимо для оптимальной оценки сейсмической опасности [*Чипизубов*, 2008].

В целях надежного прогноза изменений сейсмичности Земли рассматривалась связь между развитием таких параметров геономических процессов, как скорость вращения Земли (отклонения v за 1800–2000 гг., сейсмичность (энергия **E**) землетрясений за 1896–2010 гг.) и изменчивость климата (отклонения глобальной температуры (t) за последние 160 лет), и солнечной деятельностью (**W**) за 1090–2009 гг.

Взаимокорреляционный анализ сглаженных (11летние скользящие средние) временных рядов показал, что очень тесная связь наблюдается при запаздывании: v на 367 лет (R=-0.89, n=141); E на 298 (R=0.86, n=104), 506 лет (R=0.94, n=104) и 662 года (R=0.86, n=104); t на 212 лет (R=0.91, n=151) относительно солнечной деятельности. На основе полученных регрессионных соотношений предлагаются варианты прогноза изменений сейсмичности по динамике других процессов. На рис. 5 приведены эти варианты прогноза изменений сейсмичности Земли.

Проведенный анализ временных рядов рассматриваемых процессов позволяет сделать ряд выводов. 1. Ярко проявляющаяся 11-летняя цикличность в активности Солнца не находит адекватного отражения ни в одном из других рассматриваемых процессов, тогда как более продолжительные квазициклические гармоники проявляются во всех земных процессах.

2. Наиболее тесная (R≥0.86) связь геономических явлений с солнечной деятельностью наблюдается со значительной (сотни лет) инерционностью из-за различной скорости их протекания. Если в газообразной или даже, возможно, плазменной среде звездного объекта это практически мгновение, то в жидкой, пластичной и твердой среде сфер планеты процессы будут происходить с прогрессирующим замедлением.

3. Из предыдущих выводов следует, что солнечную деятельность можно рассматривать только в качестве индикатора изменчивости земных процессов, а не их источника.

4. Общая причина изменчивости процессов на Солнце, кроме собственной 11-летней цикличности, и на Земле связана с изменчивостью какого-то физического поля Вселенной.

5. Разновременность проявления изменчивости различных процессов будет основополагающим фактором при прогнозе изменений сейсмичности и других процессов. При этом величина запаздывания изменчивости одного явления по сравнению с другим напрямую связана с заблаговременностью прогноза.

6. Через 20–30 лет приемлемый прогноз изменений сейсмичности на сотни–тысячу лет по деятельности Солнца – «путеводной звезды» – будет реальностью.

6.3. СТРУКТУРЫ-АТТРАКТОРЫ РИФТОГЕНЕЗА В ЛИТОСФЕРЕ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ И ИХ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ СОВРЕМЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ МОНГОЛО-БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА

Установлено, что временные аттракторы напряжений в литосфере БРС соответствуют структуре «сборки» в рамках сценария эволюции с бифуркацией трехкратного равновесия [*Klyuchevskii, 2010*]. Эта бифуркация состоит в слиянии трех состояний равновесия: узлов Q_1 , Q_2 и седла Q_0 между ними и образовании устойчивого узла в точке Q_0 . Модельной системой для данной бифуркации служит уравнение изменений напряжений *S* в виде:

$$\frac{d}{dt}S = \alpha_1 + \alpha_2 S + S^3.$$
⁽¹⁾

Анализ состояний равновесия (аттракторов) показывает, что при $\alpha_2 > 0$ и любом α_1 система имеет единственное асимптотически устойчивое состояние равновесия Q_0 . При $\alpha_2 < 0$ существует область значений α_1 , где система имеет три состояния равновесия. В фазопараметрическом пространстве системы формируется структура, называемая сборкой. На основании этих соотношений предполагается, что коэффициенты в уравнении (1) имеют вид:

$$\alpha_1 = \frac{S_h - S_V}{S_{\text{max}}}, \ \alpha_2 = \frac{S_H - S_V}{S_{\text{max}}},$$
(2)

где S_{\max} – максимальная из трех компонент напряжений. Тогда при $\alpha_2 > 0$ и любом α_1 система имеет единственное асимптотически устойчивое состояние равновесия, характеризующее режим тектоники лито-сферных плит. При $\alpha_2 < 0$ существует область значений α_1 , в которой система может иметь три неустойчивых состояния равновесия, характеризующие современный режим рифтинга в БРС с неоднородным и нестационарным распределением напряжений.

Методы теории катастроф использованы для интерпретации топологии процесса разрушения горных пород при землетрясении. Поскольку многообразие катастрофы омбилики соответствует дискриминантному конусу, формируемому первыми вступлениями продольных *P*-волн при разрушении горных пород при землетрясении, высказана гипотеза, что очаг землетрясения отражает свойства универсальной катастрофы омбилики [*Klyuchevskii*, 2010]. В рамках этой гипотезы находит логическое объяснение катастрофический характер землетрясений, знакопеременность импульсов на сейсмограммах и самоподобие амплитудных спектров землетрясений.

Оценки и сопоставление энергии сейсмотектонических деформаций литосферы Байкальской рифтовой системы, определенной по данным о сильных землетрясениях с магнитудой М≥6.0 за период инструментальных наблюдений (1950–2002 гг.), исторический период продолжительностью 210 лет (1740-1949 гг.) и по палеосейсмогеологическим материалам за последние две тысячи лет, указывают на адекватность гипотезы стационарного сейсмического процесса [Ключевский, Демьянович, 2009; Ключевский и др., 2013]. Оценена мощность сейсмотектонических процессов, отражающих сброс эндогенной энергии посредством землетрясений. Полученные результаты характеризуют энергию и мощность сейсмотектонических деформаций литосферы БРЗ в абсолютных единицах, что удобно для проектирования и строительства. Выделение участков дефицита энергии сейсмотектонических деформаций литосферы («сейсмических брешей») является важным практическим результатом работы в рамках решения проблем обеспечения сейсмической безопасности в Байкальском регионе (рис. 6).

Исследование и обобщение данных параметров сейсмических источников позволили выделить в литосфере Байкальского региона три пространственные структуры-аттракторы рифтогенеза в районе Южно-Байкальской, Хубсугульской и Муйской впадин [Ключевский, Демьянович, Джурик, 2009; Ключевский, 2011]. По данным о радиусах дислокаций здесь установлены области максимальной деформационно-прочностной анизотропии среды [Ключевский, 2009], а анализ сейсмических моментов землетрясений показал, что в этих областях литосферы происходят преимущественно толчки-сбросы разных энергетических классов [Ключевский, Демьянович и др., 2009; Ключевский, 2010], т.е. доминируют процессы рифтогенеза. В рамках теории нелинейных диссипативных динамических систем эти области классифицируются как пространственные структуры-аттракторы рифтогенеза (САР). САР расположены в центральной части и на флангах БРС (рис. 7): они формируют нелинейность и неустойчивость современных геодинамических и тектонофизических процессов в литосфере, которые проявляются в сейсмичности.

В соответствии с принципом актуализма полученные результаты исследования САР применены для развития и расширения представлений о кайнозойском этапе эволюции литосферы региона [Ключевский, 2011]. Выделение трех САР позволяет развить теорию современной геодинамики и тектонофизики БРС, включить в нее региональные энергетические источники геодинамических и сейсмических преобразований и описать в первом приближении их природу и эффекты. В рамках теории самоорганизации диссипативных динамических систем и нелинейных сред САР рассмотрены как атрибут кайнозойской геодинамики литосферы БРС: они формировали нелинейность и неустойчивость геодинамических и тектонофизических процессов в этот период времени. Три этапа вулканической активизации литосферы БРС объясняются последовательным зарождением и развитием трех САР: сначала в Южно-Байкальской впадине (поздний мел палеоцен), затем в Хубсугульской впадине (эоценолигоцен) и, наконец, в Муйской впадине (послеолигоцен). Начало кайнозойского рифтового этапа Байкальской впадины около 70 млн л. назад объясняется возникновением САР в Южно-Байкальской впадине. Две стадии «рифтинга», нарастание скорости рифтовых процессов в БРС и распространение рифтогенеза на юго-запад и северо-восток от Южно-Байкальской впадины, связываются с возникновением и последовательным двухсторонним развитием САР в Хубсугульской (юго-западный фланг) и Муйской (северо-восточный фланг) впадинах.

Разработаны тектонофизические основы генерации сильных землетрясений Байкальского региона. Показано, что механизм генерации сильных землетрясений Байкальского региона может быть связан с бифуркациями при гистерезисе нелинейного резонанса системы из трех осцилляторов – структур-аттракторов рифтогенеза в литосфере Байкальской рифтовой системы *[Klyuchevskii, Khlebopros, 2013]*. Данное исследование внутриконтинентальной рифтовой системы в рамках модели нелинейного осциллятора с диссипацией



Рис. 6. Карта изолиний логарифма плотности мощности сейсмотектонических процессов со сбросом эндогенной энергии посредством землетрясений. На вставке дано 3D-представление поверхности логарифма плотности мощности сейсмотектонических процессов в инструментально-исторический (*A*) и инструментальный (*Б*) периоды.

1 – озера; 2 – впадины; 3 – разломы; 4 – шкала изолинии логарифма плотности мощности.

Fig. 6. The map showing isolines of the logarithm of the density of magnitudes of seismotectonic processes associated with release of endogenous energy by earthquakes. The insert shows 3D surface of the logarithm of the density of magnitudes of seismotectonic processes in periods of historical instrumental (*A*) and instrumental (*B*) measurements.

1 – lakes; 2 – basins; 3 – faults; 4 – scale of the intensity density logarithm isoline.



Рис. 7. Карта эпицентров и плотности эпицентров сильных землетрясений Байкальского региона с магнитудой *M*_{*LH*}≥5.5, произошедших с 1950 г.

1 – эпицентры пары сильных землетрясений; 2 – основные разломы; 3 – год; номер (первое (I) или второе (II) событие) и магнитуда толчка пары; 4 – эпицентры землетрясений с магнитудой *M*_{LH}≥5.5, 5 – структуры-аттракторы рифтогенеза (САР).

Fig. 7. The map of the Baikal region showing epicentres and density of strong earthquakes ($M_{LH} \ge 5.5$) that took place from 1950.

1 – epicentres of the couple of strong earthquakes; 2 – main faults; 3 – year and number (1st (I) or 2nd (II) event) and magnitude of the shock of the couple of earthquakes; 4 – epicentres of strong earthquakes ($M_{LH} \ge 5.5$); 5 – structures acting as attractors of rifting (CAP).

следует рассматривать как гипотезу, направленную на понимание тектонофизики литосферных процессов и описание региональной геодинамики и сейсмичности. Модель верифицируется в пространственно-временном и магнитудном распределении пар сильных землетрясений региона (рис. 7): все произошедшие за период инструментальных наблюдений пары пространственно разнесенных, но близких во времени сильных землетрясений с магнитудой M_{LH} >5.5 удовлетворяют основным выводам.

Современные знания о сейсмическом процессе и сильных землетрясениях позволяют считать, что они являются свойством одной из разновидностей широкого класса нелинейных диссипативных систем, имеющих противоположные тенденции стремления к порядку и к хаосу. В таких системах переходы от состояния равновесия к неустойчивому равновесию и локальной динамической неустойчивости, порождающие сильное землетрясение, возникают при условии притока энергии, а обратные переходы – при условии диссипации энергии. Одним из признаков состояния неустойчивого равновесия выступает явление генерации согласованных колебаний внутри системы или их проявление вследствие фазовой синхронизации с колебаниями во внешних системах. Такие признаки обнаружены при анализе стрессовых состояний [Ключевский, Ключевская, 2010] и исследовании эпизодов синхронизации толчков в Байкальском регионе и Монголии [Ключевский, Ключевская, 2009; Ключевский, 2010, 2011; Ключевский, Баяр, Бум-очир, 2010], а также при выделении парных сильных землетрясений.

На основе общефизической природы формирования цунами показано, что оно является атрибутом сейсмоопасных областей и регионов, граничащих с большими водоемами. Рассмотрены основные предпосылки и возможности явления цунами на оз. Байкал: информация о землетрясениях Байкальской впадины за инструментально-исторический период (1724–2011 гг.) обобщена в карте эпицентров толчков с магнитудой М≥5 и гистограммах распределения чисел толчков по магнитуде [Ключевский и др., 2012]. Показано, что формирование волн цунами на Байкале начинается при землетрясениях с магнитудой *М*≈5, но из-за отсутствия системы мониторинга цунами на Байкале может наблюдаться только при сильнейших землетрясениях с *М*>7. В качестве примера приведено катастрофическое Цаганское землетрясение (1861 г., *М*≈7.5), произошедшее у восточного побережья оз. Байкал и вызвавшее цунами с человеческими жертвами.

Исследование сейсмотектонических смещений в литосфере БРС, выполненное по данным о динамических параметрах очагов землетрясений с энергетическим классом $K_P \ge 7$ за 1968—1994 гг., позволило установить основные закономерности объемного течения горных пород в регионе [*Ключевский*, *Демьянович*, 2010]. Основной вклад в суммарные смещения вносят многочисленные слабые землетрясения, а максималь-

ные перемещения геологического материала происходят в зонах продолжительных афтершоковых и роевых серий толчков. Полученные *3D* образы объемного сейсмотектонического течения в литосфере БРС указывают на хорошее соответствие отрицательных вертикальных перемещений горных пород рифтовым впадинам, а положительные движения совпадают с межвпадинными горными перемычками.

Напряженно-деформированное состояние литосферы БРС за 1968-1994 гг. исследовано по данным о динамических параметрах очагов более 80 тысяч землетрясений с энергетическим классом 6≤К_Р≤15. За этот небольшой по геологическим масштабам интервал времени в литосфере БРЗ установлены три геодинамических эпизода перестройки напряжений. Природа перестроек связана с явлением инверсии осей главных напряжений, которое формируется процессами рифтогенеза и находит отражение в статистике сейсмических моментов толчков различных классов. Напряженно-деформированное состояние литосферы БРЗ обсуждается в рамках аналогий с установленными в физической мезомеханике закономерностями деформирования структурно-неоднородных сред [Ключевский, 2012].

6.4. ПРОГНОЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗОНАХ БАЙКАЛО-МОНГОЛЬСКОГО РЕГИОНА, РАЙОНИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ И ОЦЕНКА РЕАКЦИИ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ

Прогноз параметров сейсмических волн сильных землетрясений Монголо-Байкальского региона, с учетом пространственно-временной изменчивости реологических свойств приповерхностного слоя земной коры, реализуется путем построения набора моделей, проведения теоретических расчетов, изучения в первом приближении динамики сейсмической опасности территорий, расположенных в зонах сплошной и островной мерзлоты (рис. 8). При изучении использовались макросейсмические сведения по сильным землетрясениям, данные комплекса инструментальных измерений и теоретические расчеты с использованием исходного сигнала, соответствующего местным сильным землетрясениям [Дреннов, Джурик и др., 2009].

В результате получен набор параметров, характеризующих изменение сейсмического риска при одинаковых сейсмических воздействиях, для относительно северных и южных районов Восточной Сибири и Южной Якутии (или для различных их климатических зон) (рис. 8). Показано, что переход к южным районам или деградация мерзлоты малой мощности приводит к усилению влияния приповерхностных неоднородностей, которые становятся значительными (сравнимыми с глубинными) на частотах сейсмических колебаний больше 3 Гц [Дреннов и др., 2013].



Рис. 8. Вероятные расчетные сейсмические характеристики при одинаковых сейсмических воздействиях на основания грунтовых моделей в переходных климатических зонах от мерзлого состояния грунтов к талым (*A*) и относительные частотные характеристики верхних пачек слоев земной коры (*Б*).

Fig. 8. Estimated potential seismic characteristics under similar seismic effects on soil models for climate zones with transition from frozen soil to thawing soil (*A*) and relative frequency characteristics of top layers of the crust (*B*).

При достаточном статистическом наборе регистрируемых инструментальными методами сейсмического микрорайонирования характеристик, обоснованном формировании исходного сигнала, с учетом основных параметров зон ВОЗ, отвечающих исходной сейсмичности территории строительства, и данных записей местных землетрясений, на уровне требований нормативных документов обеспечивается получение необходимого набора параметров сейсмических воздействий, учитывающих деградацию мерзлоты для проектирования сейсмостойких линейных сооружений (рис. 9) [Джурик и др., 2012].

Проведенные исследования направлены на обеспечение сейсмической безопасности при проектировании комплекса протяженных линейных сооружений в районах Сибири и охватывающих переходные зоны от сплошной мерзлоты к талым грунтам [Джурик, Серебренников, Дреннов и др., 2009; Джурик, Серебренников и др., 2011].

Предложена методика районирования сейсмической опасности исследуемых территорий по сейсмогрунтовым моделям [Джурик и др., 2009]. Методика реализована на примере г. Эрдэнэт, Монголия (рис. 10). В итоге методически обосновано решение ряда задач проблемных этапов работ для исследуемых территорий, которые включают изучение основных закономерностей сейсмического режима и современного уровня исходной сейсмичности территории, выявление сейсмоактивных районов и оценку их вероятного сейсмического потенциала, построение сейсмических моделей для типовых грунтовых условий и проведение для них теоретических расчетов основных параметров сейсмических воздействий. Конечным результатом исследований осваиваемых территорий является их районирование по основным параметрам сейсмических воздействий, необходимым для проектирования сейсмостойких сооружений. Это, прежде всего, сейсмическая опасность в баллах, максимальные ускорения (для горизонтальной и вертикальной компонент), преобладающие периоды колебаний при сильном землетрясении и резонансные частоты рыхлой толщи. Такой подход нами реализован на


Рис. 9. Инженерно-сейсмогеологические условия строительства железной дороги в пределах расположения планируемой станции Икабьекан (Южная Якутия).

В квадратах представлены скорости сейсмических волн: сверху Vp, снизу Vs; треугольниками указаны пункты регистрации микросейсм и измерений скоростей сейсмических волн. 1 – граница мерзлоты – естественное состояние грунтов; 2 – граница мерзлоты – прогнозируемое состояние грунтов; 3 – температура мерзлых грунтов для их прогнозируемого состояния; 4 – УГВ – в прогнозируемом состоянии.

Fig. 9. Engineering seismogeological conditions of construction of the rail road in the area of Ikabjekan Station (in design), Southern Yakutia, Russia.

Seismic wave velocities are shown in boxes (top – Vp; bottom – Vs); triangles show microseism survey stations and seismic wave velocity measurement sites. 1 - permafrost boundary in case of the natural state of soils; 2 - permafrost boundary in case of the predicted state of soils; 3 - temperature of frosted soils for their predicted state; <math>4 - groundwater table in the predicted state.

примере сейсмического микрорайонирования территории г. Эрдэнэт в масштабе 1: 25 000 (рис. 10) [Джурик, Батсайхан и др., 2009].

Основная направленность этих исследований заключалась в дальнейшем развитии методов и приемов прогноза сейсмических воздействий и разработке рекомендаций по проведению сейсмического микрорайонирования применительно к грунтовым условиям Монголо-Сибирского региона [Джурик, Серебренников, Рященко и др., 2011].

При использовании записей акселерограмм землетрясений, зарегистрированных в течение последних 10 лет сетью сейсмических станций Байкальского филиала ГС СО РАН, рассмотрены динамические параметры сейсмических сигналов и установлены диапазоны их изменений для относительно сильных землетрясений БРЗ. Получены эмпирические связи между основными динамическими характеристиками ускорений грунта от магнитуды и расстояния. Реализован пример прогноза записей акселерограмм для различных эпицентральных расстояний и магнитуд, направленный на возможность их использования при формировании исходных сейсмических сигналов, с учетом наиболее опасных зон ВОЗ, на примере г. Иркутска (рис. 11) [Джурик и др., 2011].

В методическом плане представленные результаты указанных этапов исследований (рис. 10 и 11) могут служить основой районирования сейсмического риска перспективных для освоения территорий Монголии и Сибири [Джурик и др., 2012].

По записям поперечных кода-волн региональных землетрясений получены значения сейсмической добротности (Qc), частотного параметра (n) и коэффициента затухания (δ) сейсмических волн в литосфере юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы. Наблюдается сильная зависимость добротности от частоты и длины окна: Qc меняется от 47±51 до 1036±190 для центральных частот 0.3 и 12.0 Гц при



Рис. 10. Карта сейсмического микрорайонирования территории г. Эрдэнэт.

1–3 – зоны интенсивности сотрясений на средних грунтах в баллах (MSK-64); 4 – параметры сейсмических воздействий: верхнее значение – максимальные ускорения (см/с²) для горизонтальной компоненты (EW); среднее значение – максимальные ускорения (см/с²) для вертикальной компоненты (Z); нижнее значение – резонансные частоты рыхлого слоя (Гц).

Fig. 10. The seismic micro-zonation map of the city of Erdenet, Mongolia.

1-3 – zones of intensive shocks at medium soils as per MSK-64 intensity rates; 4 – parameters of seismic impacts: top value – maximum acceleration (cm/sec²) for horizontal component (EW); middle value – maximum acceleration (cm/sec²) for vertical component (Z); bottom value – resonance frequencies of the loose layer (Hz).

длине окна обработки коды W = 20 с и от 83 ± 46 до 1596 ± 573 на тех же частотах при W = 60 с. Значения добротности и коэффициента затухания рассчитаны для всей территории юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы и для отдельных тектонических блоков: стабильной Сибирской платформы, горных поднятий Хамар-Дабана и Восточного Саяна, Южно-Байкальской и Тункинской впадин. Сопоставление результатов определений Qc с данными о возрасте, тектонике и уровне сейсмической активности рассматриваемых структур показало, что добротность зависит от современной тектонической активности структур и в меньшей степени от возраста коры [Добрынина, 2009, 2011; Dobrynina, 2011].

По результатам мониторинга сейсмических событий, ведущегося с 1997 г., инженерно-сейсмометрическими станциями (ИСС) на критически важных объектах (КВО) Прибайкалья получены новые данные о их реакции на сейсмические события: землетрясения, взрывы, микросейсмы, вибрации. По данным инженерно-сейсмометрических станций о работе системы «грунт-сооружение» усовершенствована методика инженерно-технического обследования зданий с использованием инструментальных методов. Проведение такого обследования позволило выявить ряд строений, которые внушают опасения, и принять обоснованные технические решения по восстановлению некоторых объектов, пострадавших от землетрясения.

Ретроспективный анализ данных ИСС подтверждает, что сильные движения, вызывающие явно нелинейное поведение грунтов и элементов конструкций с появлением значительных остаточных деформаций на поверхности земли, связаны с землетрясениями более 7 баллов. Остаточные деформации при 6-балльных сотрясениях не превышают 1–2 мм и могут иметь значение только для особо точных производств. При



Рис. 11. Прогнозные акселерограммы (*A*), соответствующие им амплитудные спектры (*Б*), спектры реакции (*B*) и коэффициенты динамичности для рассматриваемых зон ВОЗ (*Г*).

1 – Восточно-Саянская зона ВОЗ; 2 – Южно-Байкальская зона ВОЗ; 3 – значения коэффициента динамичности (βі) в зависимости от расчетного периода собственных колебаний (Т), для территории г. Иркутска, согласно (СНиП II-7-81*).

Fig. 11. Forecasting accelerograms (*A*), corresponding amplitude ranges (*B*), response spectrums (*B*), and dynamics coefficients for the reviewed zones of potential earthquake sources (PES) (Γ).

 $1 - East Sayan zone of PES; 2 - South Baikal zone of PES; 3 - values of dynamics coefficients (<math>\beta$ i) depending on duration of the period of estimations of intrinsic vibrations (T) for the territory of Irkutsk, according to Construction Standard SPNiP II-7-81^{*}.



Рис. 12. Деформации бетонной плотины Иркутской ГЭС до и после Култукского землетрясения.

Fig. 12. The concrete dam of the Irkutsk Power Station before and after the Kultuk earthquake.



Рис. 13. Зависимость максимальной векторной скорости колебаний грунта от приведенного веса при взрывах 2009–2011 гг.

Fig. 13. Dependence of maximum vector velocities of ground vibrations from adjusted weights in case of explosions from 2009 to 2011.

накоплении таких деформаций от нескольких землетрясений они будут представлять опасность и для обычных сооружений (рис. 12) [Бержинский и др., 2013; Басов, Черных, 2010].

Рассмотрены вопросы определения количественных параметров землетрясений из зон возможных сильных землетрясений (ВОЗ), механизмов и динамических параметров очагов для таких ответственных сооружений Прибайкалья, как Иркутская ГЭС, Ангарский электролизно-химический комбинат (АЭХК), Северомуйский тоннель. Выполнен анализ сейсмичности территорий, прилегающих к выделенным объектам, и сделаны предварительные оценки сейсмической опасности территории расположения объектов, дающие возможность понимания структуры сейсмической опасности, обусловленной пространственно-временной неоднородностью напряженно-деформированного состояния материала литосферы на локальных разломах [*Семенов и др., 2011*].

Выполнен прогноз количественных параметров динамических воздействий из зон ВОЗ и массовых взрывов для КВО. Определены параметры скорости колебаний грунта, и установлена максимальная векторная скорость при проведении массовых взрывов в глубоких карьерах (рис. 13). При экспериментах с небольшими взрывами были получены приближенные оценки остаточных деформаций сдвига в мягких сухих грунтах в условиях естественного залегания на глубине 1–2 м при сильных землетрясениях. Полученные оценки максимальных значений при 9-балльных сотрясениях составили около 10^{-3} , а при 8-балльных – порядка $5 \cdot 10^{-4}$. При этом остаточные деформации меньше упругих, которые и составляют основную часть полных деформаций [*Черных и др., 2012*].

В широком диапазоне периодов исследовались временные вариации амплитудных и спектральных характеристик микросейсмического фона на сейсмостанциях Прибайкалья. Для анализа периодичностей и цикличностей временных вариаций микроколебаний структурно-неоднородной среды привлекались также данные наблюдений временных сейсмостанций, регистрирующих колебания ледяного покрова оз. Байкал (рис. 14).

Предложен способ краткосрочного прогнозирования землетрясений, включающий инструментальный мониторинг в пределах локального участка литосферы сейсмоактивной зоны. В качестве прогнозного параметра используются низкочастотные микросейсмические колебания, проводится его спектрально-временной анализ, и по снижению уровня сигнала в спектральном окне 25-40 Гц определяется приближение сейсмического события и его параметры [Черных и др., 2012].

Разработан способ выделения, обработки и интерпретации сейсмических волн на записях микросейсм, которые принимаются как интерференционно-модулированный сигнал, генерируемый источниками разной природы и прошедший амплитудно-частотные преобразования в результате распространения в сложноорганизованной структурно-неоднородной геологической среде. Он основывается на том, что сигналы, возникающие в естественных условиях, можно считать модулированными колебаниями. В технике связи модулирующие сигналы являются информационными, т.е. содержащими передаваемую информацию, тогда как несущее колебание, частота которого, как правило, много больше ширины спектра информационного сигнала, обеспечивает более эффективную передачу этой информации на расстояние. Обычно под модулированными колебаниями понимаются колебания, параметры которых (амплитуда, фаза, частота, длительность и т. п.) изменяются во времени. Однако это понятие распространяется и на колебания, параметры которых изменяются в пространстве, и тогда говорят о пространственно модулированных колебаниях: в отличие от временных модулированных колебаний они могут быть двух- и трехмерными. В общем случае модулированные колебания отражают пространственновременную модуляцию сигналов, в том числе и микросейсм [Черных, Ключевский, 2011; Черных, Ключевский, 2013].

7. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

Проведен спектральный анализ сильных землетрясений из основных зон ВОЗ для БРЗ по данным инст-



Рис. 14. Вариации уровней микросейсмических колебаний в 2013 г.: *а* – сейсмостанция Листвянка; *б* – периоды выделенных периодичностей в микроколебаниях грунта; *в* – вариации уровня микроколебаний льда; *∂* – периоды периодичностей в микроколебаниях льда, вариации температуры льда, *e* – выделенные периоды в колебаниях температуры.

Fig. 14. Variable micro-seismic vibration levels in 2013: a – Listvyanka seismic station; δ – periods of identified regulations in micro-seismic vibration of soil; e – variable micro-seismic vibration levels of ice; ∂ – periods of identified regulations in micro-seismic vibration of ice, variations of ice temperature; e – identified periods in temperature changes.

рументальных наблюдений с привлечением расчетных методов, определены динамические параметры очагов землетрясений за 1995–2008 гг., составлен каталог динамических параметров очагов землетрясений за 1968– 2008 гг., что позволит изучить напряженно-деформированное состояние среды и динамику происходящих в них процессов.

Разработаны принципы региональной классификации неотектонических структур с обоснованием их дифференциации по классам на основе анализа структурно-тектонических, геолого-геофизических и сейсмологических данных эталонных объектов в наиболее активизированных сегментах главных сейсмогенерирующих зон (Саяно-Байкальский и Верхоянский). Эти сведения вошли как основа в составление комплекта новых карт Общего сейсмического районирования Российской Федерации (ОСР-2012), которые характеризуют шесть уровней сейсмической опасности (А, В, С, D, E, F), предназначенных для применения при проектировании и сейсмостойком строительстве объектов разных типов и уровней ответственности. Основной вклад наших исследований в составление карт связан с представленными материалами по сейсмотектонике и динамике сейсмических процессов территории Алтае-Саяно-Байкальской и Якутской сейсмических зон РФ.

Обобщены результаты инженерно-сейсмологических исследований, выполненных за длительный период на обширных территориях Сибири и Монголии. Основная направленность этих работ заключалась в дальнейшем развитии методов и приемов прогноза сейсмических воздействий сильных землетряений и в разработке рекомендаций по проведению сейсмического микрорайонирования в пределах криолитозоны. Предложена методика изучения инженерно-сейсмологических условий строительства ряда крупных промышленных комплексов, протяженных трасс линейных сооружений и критически важных объектов (см. список литературы лаборатории с 2009 г.).

8. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЛАБОРАТОРИИ

Перспективы развития лаборатории видятся в дальнейшем развитии комплексных геолого-геофизических исследований зон активных сейсмопродуцирующих разломов Восточной Сибири методами сейсмогеологического анализа и малоглубинной геофизики. Перспективным представляется проведение работ в зонах главных сейсмогенерирующих разломов Иркутской области и Прибайкалья методом лазерного сканирования при помощи беспилотных летательных аппаратов и лазерного сканера. Это даст возможность построения карт ДСР и СМР нового поколения.

Необходимо создание и экспериментальное обеспечение инженерно-сейсмологических полигонов по региональному сейсмическому мониторингу динамики параметров сильных сейсмических воздействий и сейсмической активности промышленных районов. В этом отношении важнейшими для Байкальской сейсмической зоны становятся задачи разработки новой методологии проведения средне- и мелкомасштабного сейсмического районирования и прогноза сейсмического воздействия на основе решения динамических задач очаговой и структурной сейсмологии с учетом физической нелинейности сейсмических волн и колебаний сооружений.

9. ЛИТЕРАТУРА ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЙ 2009-2013 ГГ.

9.1. Монографии:

- Джурик В.И., Батсайхан Ц., Серебренников С.П. Улаанбаатар хотын нутаг дэвсгэрийн газар ходлолтийн аюулын судалгаа. Улаанбаатар: MAS, 2009. 136 с.
- Джурик В.И., Ключевский А.В., Серебренников С.П., Демьянович В.М., Батсайхан Ц., Баяраа Г. Сейсмичность и районирование сейсмической опасности территории Монголии. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. 420 с.
- Джурик В.И., Серебренников С.П., Рященко Т.Г., Батсайхан Ц., Дугармаа Т, Улзийбат М., Ескин А.Ю., Усынин Л.А. Районирование сейсмической опасности территории города Эрдэнэта. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2011. 122 с.
- Имаева Л.П., Мельникова В.И., Имаев В.С., Козьмин Б.М., Мельников А.И., Гриб Н.Н. Эволюция сейсмотектонических процессов восточного фланга Байкальской рифтовой зоны. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. 232 с.
- Лапердин В.К., Имаев В.С., Верхозин И.И., Качура Р.А., Имаева Л.П. Опасные геологические процессы на юге Якутии и сопредельных территориях. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2011. 239 с.
- Смекалин О.П., Имаев В.С., Чипизубов А.В. Палеосейсмология Восточной Сибири (некоторый опыт практического применения). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2011. 101 с.
- Трифонов В.Г., Додонов А.Е., Бачманов Д.М., Иванова Т.П., Караханян А.С., Имаев В.С., Никифоров С.П., Кожурин А.И., Аммар О., Рукие М., Аль-Кафри А.-М., Минини Х., Аль-Юсеф Ш., Али О., Гриб Н.Н., Соловьев В.Н., Имаева Л.П., Качаев А.В., Сясько А.А., Гусева Т.В., Али М., Заза Т., Юсеф А. Неотектоника, современная геодинамика и сейсмическая опасность Сирии. М.: Геос, 2012. 216 с.

9.2. СТАТЬИ В ЗАРУБЕЖНЫХ РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ ЖУРНАЛАХ

- *Dobrynina A.A.* Coda-wave attenuation in the Baikal rift system lithosphere // *Physics of the Earth and Planetary Interiors.* 2011. V. 188. P. 121–126. http://dx.doi.org/10.1016/j.pepi.2011.05.008.
- Fujita K., Koz'min B.M., Mackey K.G., Riegel S.A., McLean M.S., Imaev V.S. Seismotectonics of the Chersky Seismic Belt, eastern Sakha Republic (Yakutia) and Magadan District, Russia // Stephan Mueller Spec. Publ. Ser. 2009. № 4. P. 117– 145.
- Klyuchevskii A.V. An umbilic catastrophe as a model of rock failure in earthquakes // National Seismological Review of Russia, 2007–2010. P. 107–114. http://dx.doi.org/10.2205/2011-IUGG-NRR2007-2010.
- *Klyuchevskii A.V.* Nonlinear geodynamics of the Baikal Rift System: an evolution scenario with triple equilibrium bifurcation // Journal of Geodynamics. 2010. V. 49. № 1. P. 19–23. http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2009.08.001.
- *Klyuchevskii A.V., Khlebopros R.G.* Coupled large earthquakes in the Baikal rift system: Response to bifurcations in nonlinear resonance hysteresis // *Geoscience Frontiers*. 2013. V. 6. № 4. P. 709–716. http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2013.01. 008.
- Mackey K.G., Fujita K., Hartse H.E., Stead R.J., Steck L.K., Gunbina L.V., Leyshuk N., Shibaev S.V., Koz'min B.M., Imaev V.S., Gordeev E.I., Chebrov V.N., Masal'ski O.K., Gileva N.A., Bormatov V.A., Voitenok A.A., Levin Y.N., Fokina T.A.

V.I. Dzhurik: Seismogeological, seismological and engineering seismological studies...

Seismicity Map of Eastern Russia, 1960–2010 // Seismological Research Letters. 2010. V. 81. № 5. P. 761–768. http://dx.doi.org/10.1785/gssrl.81.5.761.

- Semenov R.M. Earthquake of 27 August 2008 in the Southern Baikal area its precursors // Geodynamics & Tectonophysics. 2010. V. 1. № 4. P. 441–447. http://dx.doi.org/10.5800/GT-2010-1-4-0028.
- Smekalin O.P., Shchetnikov A.A., White D. Arshan palaeoseismic feature of the Tunka fault (Baikal rift zone, Russia) // Journal of Asian Earth Sciences. 2013. V. 62. P. 317–328. http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.10.011.

9.3. СТАТЬИ В РОССИЙСКИХ РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ ЖУРНАЛАХ

- Басов А.Д., Черных Е.Н. О наблюдении среднесрочного предвестника землетрясения в Иркутске // Физика Земли. 2010. № 1. С. 80–89.
- Басов А.Д., Черных Е.Н., Шагун А.Н., Капралов А.П. Микродеформации на Иркутской ГЭС при землетрясении 27 августа 2008 г. на Южном Байкале // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2009. № 4. С. 52–54.
- Бержинский Ю.А., Бержинская Л.П., Горбач Л.С., Иванькина Л.И., Киселев Д.В., Саландаева О.И., Усатый Р.А., Черных Е.Н., Шагун А.Н. Реализация комплексной методики паспортизации жилищного фонда на примере г. Шелехова в рамках целевой программы по сеймобезопасности Иркутской области // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. № 2. С. 54–61.
- Бержинский Ю.А., Бержинская Л.П., Иванькина Л.И., Ордынская А.П., Саландаева О.И., Чигринская Л.С., Акулова В.В., Черных Е.Н. Оценка сейсмической надежности жилых и общественных зданий при землетрясении 27.08.2008 г. на Южном Байкале // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36. № 1. С. 23–39.
- Бержинский Ю.А., Ордынская А.П., Гладков А.С., Лунина О.В., Бержинская Л.П., Радзиминович Н.А., Радзиминович Я.Б., Имаев В.С., Смекалин О.П., Чипизубов А.В. Опыт применения шкалы ESI2007 для оценки интенсивности Култукского землетрясения 27.08.2008 г., Южный Байкал // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36. № 3. С. 5–26.
- Бернгардт О.И., Добрынина А.А., Жеребцов Г.А., Михалев А.В., Перевалова Н.П., Ратовский К.Г., Рахматулин Р.А., Саньков В.А., Сорокин А.Г. Геофизические явления, сопровождавшие падение Челябинского метеороида // Доклады АН. 2013. Т. 452. № 2. С. 205–207.
- *Бесстрашнов В.М., Имаев В.С., Стром А.Л.* Еще раз о палеосейсмодислокациях в северо-западной части зоны Главного Саянского разлома в свете уроков некоторых катастрофических землетрясений // *Геориск.* 2010. № 4. С. 54–58.
- Демберел С., Батарсурэн Г., Имаев В.С., Стром А.Л., Смекалин О.П., Чипизубов А.В., Гриб Н.Н., Сясько А.А., Качаев А.В. Палеосейсмогенные деформации в окрестностях Улан-Батора по геологическим и геофизическим данным // Вопросы инженерной сейсмологии. 2010. Т. 37. № 3. С. 45–54.
- Джурик В.И., Дреннов А.Ф., Серебренников С.П. Расчет акселерограмм сильных землетрясений для г. Иркутска из различных зон ВОЗ // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2012. № 5. С. 64–69.
- Джурик В.И., Серебренников С.П., Батсайхан Ц., Дреннов А.Ф., Брыжак Е.В., Усынин Л.А., Ескин А.Ю. Методика районирования сейсмической опасности приграничных территорий Монголо-Сибирского региона (на примере района г. Эрдэнэт) // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2012. Т. 5. № 1. С. 118–142.
- Джурик В.И., Серебренников С.П., Брыжак Е.В., Дреннов А.Ф., Ескин А.Ю. Методика формирования исходного сейсмического сигнала с целью районирования сейсмической опасности городских агломераций (на примере г. Иркутска) // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2012. Т. 5. № 2. С. 96–110.
- Джурик В.И., Серебренников С.П., Дреннов А.Ф., Брыжак Е.В., Усынин Л.А., Шагун А.Н., Ескин А.Ю. К районированию сейсмической опасности территории г. Иркутска // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2011. Т. 4. № 2. С. 61–81.
- Джурик В.И., Серебренников С.П., Дреннов А.Ф., Усынин Л.А. Районирование сейсмической опасности протяженных трасс линейных сооружений в Сибирском регионе // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36. № 4. С. 53–59.
- Джурик В.И., Серебренников С.П., Ескин А.Ю., Усынин Л.А., Брыжак Е.В., Шагун А.Н. Инженерно-сейсмологическое обеспечение безопасности строительства линейных сооружений в сейсмоактивных районах Южной Якутии с учетом деградации мерзлоты // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2011. Т. 4. № 1. С. 60–78.
- Джурик В.И., Серебренников С.П., Ключевский А.В., Батсайхан Ц. Комплексная оценка сейсмической опасности участков строительства зданий в г. Улаанбаатаре // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2009. № 5. С. 46–51.
- Джурик В.И., Серебренников С.П., Рященко Т.Г., Ескин А.Ю., Усынин Л.А., Брыжак Е.В., Батсайхан Ц., Дугармаа Т. Районирование сейсмической опасности территории г. Эрдэнэт на основе количественных характеристик колебаний грунтов при сильных землетрясениях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2010. № 2. С. 38–43.

- Джурик В.И., Серебренников С.П., Усынин Л.А., Брыжак Е.В., Ескин А.Ю., Шагун А.Н. Пример комплексной оценки сейсмической опасности участка строительства аэропорта «Горячинск» // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2013. Т. 6. № 1. С. 28–45.
- Джурик В.И., Серебренников С.П., Шагун А.Н., Ескин А.Ю., Усынин Л.А., Брыжак Е.В. Опыт районирования линейных сооружений в пределах криолитозоны по максимальным ускорениям при использовании экспериментальных частотных характеристик // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2012. № 2. С. 59–64.
- Добрецов Н.Л., Ружич В.В., Псахье С.Г., Черных Е.Н., Шилько Е.В., Левина Е.А., Пономарева Е.И. О совершенствовании способов прогноза землетрясений средствами физического моделирования в ледовом покрове Байкала // Физическая мезомеханика. 2011. Т. 14. № 4. С. 69–79.
- Добрынина А.А. Очаговые параметры землетрясений Байкальской рифтовой системы // Физика Земли. 2009. № 12. С. 60–75.
- Добрынина А.А., Саньков В.А. Скорости и направления распространения разрывов в очагах землетрясений Байкальской рифтовой системы // Геофизические исследования. 2010. Т. 11. № 2. С. 52–61.
- Добрынина А.А., Чечельницкий В.В., Саньков В.А. Сейсмическая добротность литосферы юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы // Геология и геофизика. 2011. № 5. С. 712–724.
- Дреннов А.Ф., Джурик В.И., Дреннова Н.И. Оценка сейсмических воздействий Байкальской рифтовой зоны // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36. № 4. С. 42–52.
- Дреннов А.Ф., Джурик В.И., Серебренников С.П., Брыжак Е.В., Дреннова Н.Н. Спектры ускорений колебаний, возбуждаемых землетрясениями юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 2. С. 292–301.
- Дреннов А.Ф., Джурик В.И., Серебренников С.П., Дреннова Н.Н. Влияние верхней зоны разреза на амплитудночастотный состав сейсмического сигнала на примере сейсмических станций Прибайкалья и Забайкалья // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 2. С. 48–58.
- Дэмбэрэл С., Имаев В.С., Рогожин Е.А., Смекалин О.П., Улзийбат М., Чипизубов А.В. К уточнению сейсмической опасности г. Улан-Батор (Монголия) // Вопросы инженерной сейсмологии. 2013. Т. 40. № 1. С. 19–32.
- Имаев В.С., Смекалин О.П., Стром А.Л., Чипизубов А.В., Сясько А.А. Оценка сейсмической опасности г. Улан-Батор (Монгольская Народная Республика) по результатам сейсмогеологических исследований // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 9. С. 1182–1193.
- Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмотектонический анализ Яно-Индигирского сегмента зоны Черского // Физика Земли. 2010. № 12. С. 79–86.
- Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Стром А.Л. Сейсмотектонические деформации центральной части Алданского щита // Отечественная геология. 2010. № 5. С. 84–89.
- Имаев В.С., Стром А.Л., Чипизубов А.В, Смекалин О.П., Имаева Л.П., Лободенко И.Ю. Перспективы использования лазерного сканирования при проведении палеосейсмологических исследований в Сибири // Геотектоника. 2013. № 3. С. 78–86.
- Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М. Сейсмогеодинамика Алдано-Станового блока // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 1. С. 5–18.
- Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М. Сейсмотектонический анализ Яно-Индигирского сегмента зоны Черского // Физика Земли. 2011. № 12. С. 1–14.
- Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Имаев В.С. Активизация сейсмотектонических процессов на западе Олекмо-Становой сейсмической зоны // Отечественная геология. 2013. № 6. С. 37–43.
- Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Имаев В.С. Динамика очаговых зон сильных землетрясений северо-восточного фланга Момо-Селенняхских впадин // Отечественная геология. 2011. № 5. С. 113–119.
- Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Имаев В.С. Динамика сейсмогенных структур Индигиро-Колымского (Охотского) сегмента зоны хр. Черского // Отечественная геология. 2012. № 5. С. 55–61.
- Имаева Л.П., Мельникова В.И., Имаев В.С. Сейсмотектоническая деструкции земной коры северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны // Доклады АН. 2012. Т. 443. № 4. С. 492–494.
- Ключевский А.В. О представлении очага землетрясения элементарной катастрофой "омбилики" // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2009. № 3. С. 43–45.
- Ключевский А.В. Влияние изменений энергетического класса землетрясений Байкальского региона на параметры графика повторяемости // Вулканология и сейсмология. 2010. № 4. С. 58–68.
- Ключевский А.В. Корреляции скорости потока землетрясений Байкальского региона и Монголии: эпизоды синхронизации // Физика Земли. 2010. № 4. С. 35–45.
- Ключевский А.В. Аттракторы рифтогенеза как атрибут кайнозойского этапа эволюции литосферы Байкальской рифтовой системы // Доклады АН. 2011. Т. 440. № 6. С. 811–814.
- Ключевский А.В. Структуры-аттракторы рифтогенеза в литосфере Байкальской рифтовой системы // Доклады АН. 2011. Т. 437. № 2. С. 249–253.

V.I. Dzhurik: Seismogeological, seismological and engineering seismological studies...

- Ключевский А.В. Эпизоды высокой корреляции годовых чисел землетрясений Байкальской рифтовой зоны // Вулканология и сейсмология. 2011. № 1. С. 55–62.
- Ключевский А.В. Напряженно-деформированное состояние литосферы Байкальской рифтовой зоны: некоторые аналогии с установленными в физической мезомеханике закономерностями деформирования структурно-неоднородных сред // Физическая мезомеханика. 2012. Т. 15. № 3. С. 23–34.
- Ключевский А.В. Сейсмоэнергетические бреши в литосфере Байкальского региона // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2013. № 2. С. 29–31.
- Ключевский А.В. Статистика основных параметров очагов сильных землетрясений Байкальского региона // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. № 3. С. 46–50.
- *Ключевский А.В., Баяр Г., Бум-очир С.* Эпизоды синхронизации годовых чисел землетрясений Монголо-Байкальского региона // Доклады АН. 2010. Т. 431. № 1. С. 107–112.
- Ключевский А.В., Демьянович В.М. Байкальская рифтовая зона: область повышенной энергии сейсмотектонических деформаций литосферы // Доклады АН. 2009. Т. 428. № 5. С. 663–666.
- Ключевский А.В., Демьянович В.М. Основные закономерности объемного сейсмотектонического течения горных пород в литосфере Байкальской рифтовой зоны // Доклады АН. 2010. Т. 433. № 1. С. 97–101.
- Ключевский А.В., Демьянович В.М., Демберел С., Лхагвадорж Б. Карта энергии сейсмотектонических деформаций литосферы Монголии // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2011. № 1. С. 47–51.
- Ключевский А.В., Демьянович В.М., Джурик В.И. Иерархия сильных землетрясений Байкальской рифтовой системы // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 3. С. 279–288.
- Ключевский А.В., Демьянович В.М., Джурик В.И. Оценки энергии сейсмотектонических деформаций литосферы Байкальской рифтовой зоны // Вулканология и сейсмология. 2013. № 4. С. 40–56.
- Ключевский А.В., Демьянович В.М., Джурик В.И., Черных Е.Н., Серебренников С.П. Карта энергии сейсмотектонических деформаций литосферы Байкальского региона // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2009. № 4. С. 49–51.
- Ключевский А.В., Демьянович В.М., Дэмбэрэл С., Лхагвадорж Б. Энергия сейсмотектонических деформаций литосферы Монголии // Доклады АН. 2012. Т. 442. № 4. С. 495–499.
- Ключевский А.В., Демьянович В.М., Ключевская А.А. О возможности цунами на озере Байкал // Доклады АН. 2012. Т. 442. № 2. С. 254–258.
- Ключевский А.В., Зуев Ф.Л. Фрактальные оценки сейсмического процесса в литосфере Байкальского региона // Литосфера. 2011. № 1. С. 143–149.
- Ключевский А.В., Ключевская А.А. Сейсмический процесс в литосфере Байкальской рифтовой зоны: эпизоды синхронизации // Доклады АН. 2009. Т. 425. № 2. С. 240–244.
- Ключевский А.В., Ключевская А.А. Эффекты синхронизации и десинхронизации при стрессе в геологической и биологической системах // Геофизические процессы и биосфера. 2009. Т. 8. № 3. С. 26–45.
- Ключевский А.В., Ключевская А.А. Эпизоды синхронизации сейсмического процесса в Байкальском регионе и Монголии // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2010. № 3. С. 65–67.
- Ключевский А.В., Ружич В.В. Сравнительное исследование записей близких землетрясений на скальном грунте и ледовом покрове озера Байкал // Сейсмические приборы. 2012. Т. 48. № 4. С. 39–50.
- Лапердин В.К., Имаев В.С. Геологические опасные процессы в зоне Байкальского рифта и сопредельных территорий // Вопросы инженерной сейсмологии. 2010. Т. 37. № 1. С. 40–55.
- Леви К.Г., Бержинская Л.П., Бержинский Ю.А., Гилева Н.А., Имаев В.С., Лухнев А.В., Масальский О.К., Мельникова В.И., Ордынская А.П., Радзиминович Н.А., Радзиминович Я.Б., Ружич В.В., Саньков В.А., Смекалин О.П., Черных Е.Н., Чечельницкий В.В. Култукское землетрясение // Природа. 2009. № 7. С. 56–63.
- Лопатин М.Н., Семенов Р.М. Подземные воды Южного Прибайкалья источник информации для прогноза землетрясений // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 3 (39). С. 187–193.
- *Мельникова В.И., Гилева Н.А., Имаев В.С., Радзиминович Я.Б., Тубанов Ц.А.* Особенности сейсмических активизаций Среднего Байкала в 2008–2011 годах // Доклады АН. 2013. Т. 453. № 6. С. 1–6.
- Мельникова В.И., Радзиминович Я.Б., Гилева Н.А., Радзиминович Н.А., Папкова А.А. Балейское землетрясение 6 января 2006 г.: отражение современной тектонической активности Восточного Забайкалья // Доклады АН. 2011. Т. 437. № 6. С. 828–832.
- Никитин Р.Я., Васильев А.В., Хон В.И., Черных Е.Н. Сейсмометрические исследования воздействия массовых взрывов в карьере на охраняемые объекты рудника «Интернациональный» // Горный журнал. 2012. № 2. С. 14–16.
- Очковская М.Г., Радзиминович Н.А. Предварительные результаты анализа афтершоковых последовательностей Байкальской рифтовой зоны // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2011. Т. 4. № 1. С.164–172.
- Псахье С.Г., Шилько Е.В., Астафуров С.В., Димаки А.В., Гранин Н.Г., Ружич В.В., Гнатовский Р.Ю. Роль внутренних напряжений в плитных средах как фактора, определяющего деформационную активность на границах разде-

ла. Оценка величины избыточных «тектонических» напряжений // *Физическая мезомеханика*. 2010. Т. 13. № 3. С. 98–103.

- Радзиминович Н.А. Глубины очагов землетрясений Байкальского региона: обзор // Физика Земли. 2010. № 3. С. 37–51.
- Радзиминович Я.Б., Имаев В.С., Радзиминович Н.А., Ружич В.В., Смекалин О.П., Чипизубов А.В. Эффекты Култукского землетрясения 27 августа 2008 года с М_W=6.3 в ближней к эпицентру зоне: результаты макросейсмического обследования // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36. № 1. С. 56–71.
- Радзиминович Я.Б., Мельникова В.И., Середкина А.И., Гилева Н.А., Радзиминович Н.А., Папкова А.А. Землетрясение 6 января 2006 г. (Мw=4.5): редкий случай проявления сейсмической активности в Восточном Забайкалье // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 10. С. 1–20.
- Ружич В.В., Псахье С.Г., Черных Е.Н., Борняков С.А., Гранин Н.Г. Деформации и сейсмические явления в ледяном покрове озера Байкал // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 3. С. 289–299.
- Семенов Р.М., Имаев В.С., Смекалин О.П., Чипизубов А.В., Оргильянов А.И. Гелий в глубинной воде Байкала предвестник землетрясений // Доклады АН. 2010. Т. 432. № 4. С. 533–536.
- Семенов Р.М., Ключевский А.В., Черных Е.Н. Количественная оценка динамических параметров землетрясений для построения геомеханической модели Северомуйского тоннеля // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 2. С. 156–169.
- Семенов Р.М., Лопатин М.Н. Поиск краткосрочных предвестников землетрясений в Южном Прибайкалье // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2013. Т. 6. № 1. С. 183–189.
- Семенов Р.М., Малевич Л.В., Оргильянов А.И., Смекалин О.П. Исследования по поиску краткосрочных предвестников землетрясений в Прибайкалье // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2011. № 4. С. 43–46.
- Семенов Р.М., Смекалин О.П. Сильное землетрясение на Байкале 27 августа 2008 г. и его предвестники // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 4. С. 521–528.
- Смекалин О.П., Имаев В.С., Чипизубов А.В. Палеосейсмологические исследования в зоне Хустайского разлома // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 7. С. 940–951.
- Смекалин О.П., Чипизубов А.В., Имаев В.С. Палеоземлетрясения Прибайкалья: методы и результаты датирования // Геотектоника. 2010. № 2. С. 77–96.
- Черных Е.Н., Басов А.Д., Семенов Р.М. Деформационные процессы на Северомуйском тоннеле // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 2 (34). С. 71–79.
- Черных Е.Н., Ключевский А.В. Выделение в записях микросейсм интерфейсных волн, генерируемых рифтом озера Байкал // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2013. № 5. С. 34–38.
- Черных Е.Н., Ключевский А.В., Ружич В.В. Сравнительное исследование записей катастрофического Восточно-Японского землетрясения на скальном грунте и ледовом покрове озера Байкал // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 38. № 4. С. 29–38.
- Чипизубов А.В., Имаев В.С., Смекалин О.П. О кинематике активного Баргузинского разлома // Вопросы инженерной сейсмологии. 2012. Т. 38. № 4. С. 49–58.
- Шибаев С.В., Петров А.Ф., Козьмин Б.М., Имаева Л.П., Тимиршин К.В. Сейсмический риск на территории г. Якутска // Наука и образование. 2010. № 2. С. 4–10.



Джурик Василий Ионович, докт. геол.-мин. наук, заведующий лабораторией инженерной сейсмологии и сейсмогеологии Институт земной коры СО РАН 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия Тел. (3952)427510; ⊠ e-mail: dzhurik@crust.irk.ru

Dzhurik, Vasiliy I., Doctor of Geology and Mineralogy, Head of Laboratory of Engineering Seismology and Seismogeology Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS 128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia Tel. +7(3952)427510; ⊠ e-mail: dzhurik@crust.irk.ru PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2014 VOLUME 5 ISSUE 1 PAGES 159-182

http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0122



RECENT GEODYNAMICS OF INTRACONTINENTAL AREAS: INSTRUMENTAL AND GEOMORPHOLOGICAL ASSESSMENT OF CRUSTAL MOVEMENTS AND DEFORMATION IN CENTRAL ASIA

V. A. Sankov

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: Studies of recent geodynamics have been conducted by the Institute of the Earth's Crust, SB RAS since 1998. Present-day crustal deformations are monitored at the geodynamic GPS polygon established by the Laboratory of Recent Geodynamics in the Mongol-Baikal region. Original methods and techniques using specialized equipment are applied to research intra-continental tectonic deformation and have already provided original scientific results. Independent data are received concerning the onset and character of processes of neotectonic activation and the state of stresses and deformation of the crust in the southern part of Siberia and in Mongolia. A model of the Late Cenozoic and contemporary geodynamics of the Mongol-Siberian mobile area is proposed. With application of GPS geodesy methods, quantitative parameters of present-day horizontal movements and deformations are determined for Central Asia and a part of the Far East at different scale levels. Present-day velocities of extension of the Baikal rift are estimated, and parameters of rotation of the Amur plate relative to Eurasia are calculated. Data on long-term and contemporary deformation are subject to comparative analyses. The Laboratory develops studies of present-day and historical seismicity in relation to processes of contemporary faulting in active tectonic zones of inter-plate boundaries and diffusive activation of subactive intraplate territories. The first results are obtained in studies of local crustal deformation by methods of satellite radar interferometry and ground polygonometry. Jointly with other institutes of SB RAS, the Laboratory conducts instrumental studies of interaction between the lithosphere and the ionosphere. Looking further ahead, the main scientific fields and prospects of the Laboratory are highlighted.

Key words: recent geodynamics, present-day movements, satellite geodesy, active faults, state of stresses, deformation, seismicity, interaction between the lithosphere and the ionosphere, Central Asia.

Citation: *Sankov V.A.* 2014. Recent geodynamics of intracontinental areas: instrumental and geomorphological assessment of crustal movements and deformation in Central Asia. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (1), 159–182. doi:10.5800/GT-2014-5-1-0122.

Современная геодинамика внутриконтинентальных областей: инструментальные и геолого-геоморфологические оценки движений и деформаций земной коры Центральной Азии

В. А. Саньков

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация: Исследования в области современной геодинамики в ИЗК СО РАН проводит лаборатория с одноименным названием, организованная в 1998 г. Коллективом лаборатории создан обширный Монголо-Байкальский геодинамический GPS-полигон для исследований современных деформаций земной коры, он обладает оригинальным набором методов и подходов, а также оборудования для исследований процессов внутриконтинентальных тектонических деформаций. За последние годы в направлении исследований получен ряд оригинальных научных результатов. Получены независимые данные о начале и характере протекания процессов неотектонической активизации, напряженно-деформированном состоянии земной коры на юге Сибири и в Монголии. Предложена модель позднекайнозойской и современной геодинамики Монголо-Сибирской подвижной области. Методами GPS-геодезии количественно охарактеризованы современные горизонтальные движения и деформации Центральной Азии и части Дальнего Востока на разных масштабных уровнях. Оценены современные скорости раздвижения Байкальского рифта, рассчитаны параметры вращения Амурской плиты относительно Евразии. Выполнен сопоставительный анализ данных долговременных и современных деформаций. В лаборатории проводятся исследования современной и исторической сейсмичности в связи с процессами современного разломобразования в активных тектонических зонах межплитных границ и диффузной активизации слабоактивных внутриплитных территорий. Получены первые результаты исследований локальных деформаций земной поверхности с использованием методов спутниковой радарной интерферометрии и наземной полигонометрии. В кооперации с другими научными подразделениями СО РАН проводятся инструментальные исследования взаимодействий литосферы и ионосферы. В статье охарактеризованы основные направления и перспективы развития исследований лаборатории на ближайшие годы.

Ключевые слова: современная геодинамика, современные движения, спутниковая геодезия, активные разломы, напряженно-деформированное состояние, сейсмичность, литосферно-ионосферные взаимодействия, Центральная Азия.

1. Введение

Современная геодинамика, как научное направление, во всем мире базируется на инструментальных и количественных методах исследований. Она активно ассимилирует данные из смежных отраслей знаний (геология, геофизика, метеорология и др.). Базовыми же для современной геодинамики являются методы исследований движений и деформаций земной коры, среди которых основное место занимают методы спутниковой и наземной геодезии, деформометрии и радарной интерферометрии, которые позволяют исследовать широкий пространственно-временной спектр деформаций. На данных этих методов, вместе с использованием индикаторов долговременных движений, получаемых с использованием геолого-геоморфологических методов исследований, осуществляются вероятностные оценки опасности неблагоприятных природных процессов. В качестве прямых и косвенных показателей динамики деформаций широко используются сейсмичность, геофизические поля, уровень подземных вод, газовые эманации. Наименее изучены современные геодинамические процессы и их влияние на формирование природных опасностей во внутриконтинентальных областях, что объясняется невысокими скоростями тектонических движений по сравнению с областями вблизи границ литосферных плит. Остро стоит вопрос о соотношении долговременной и современной составляющих движений по крупным внутриконтинентальным активным разломам в связи с неравномерностью процесса реализации накопленной упругой энергии и взаимодействием структур.

Лаборатория современной геодинамики ИЗК СО РАН (рис. 1) уже в течение 15 лет проводит исследования по обозначенному кругу вопросов. Ее созданию предшествовала организация в 1992 г. кабинета сейсмогеодинамики под руководством д.г.-м.н. К.Г. Леви, в рамках которого проводилось изучение закономерностей изменений, происходящих в литосфере вследствие развития сейсмического процесса. После реструктуризации института в 1996 г. кабинет сейсмогеодинамики влился в лабораторию сейсмогеологии и сейсмогеодинамики. В связи с аккредитацией Института в 1998 г. и уточнением его основных научных направлений, группа сейсмогеодинамики была преобразована в лабораторию современной геодинамики, которую до 2008 г. возглавлял д.г.-м.н. К.Г. Леви. Основная цель исследований лаборатории – выявление закономерностей современных геодинамических процессов как результата взаимодействия геосфер и проявлений солнечной активности для разработки основ среднесрочного прогноза экстремальных (катастрофических) явлений. За период 1998–2008 гг. коллективом лаборатории при участии В.А. Санькова, А.И. Мирошниченко, А.В. Лухнева, С.В. Ашуркова заложены основы геодезической сети обширного Монголо-Байкальского геодинамического полигона для проведения исследования современных движений и деформаций методом GPS-геодезии, получены новые данные о современных деформациях земной поверхности исследуемой территории. Благодаря усилиям К.Г. Леви и Н.В. Задониной, создана мировая база данных, характеризующая временные вариации опасных природных процессов за 500 прошедших лет. Выполнен статистический анализ временных вариаций проявления сейсмичности, вулканизма и экзогенных гравитационных процессов. Проведены исследования эволюции напряженно-деформированного состояния земной коры Байкальской рифтовой системы (работы А.В. Парфеевец, В.А. Санькова). Для территории Алтае-Саянской горной области, Монголии и Прихубсугулья получены новые данные о кинематике активных разломов (С.Г. Аржанников, А.В. Аржанникова, А.И. Мирошниченко, А.В. Парфеевец, В.А. Саньков), выявлены многочисленные следы палеогидрокатастроф (С.Г. Аржанников, А.В. Аржанникова). Теоретические разработки [Леви и др., 2009; Саньков и др., 2012] позволили определить место современной геодинамики в цик-



Рис. 1. Коллектив лаборатории современной геодинамики.

Первый ряд: к.г.-м.н. С.Г. Аржанников, к.г.-м.н. А.В. Аржанникова, к.г.-м.н. В.А. Саньков – зав. лабораторией, к.г.-м.н. А.И. Мирошниченко, к.г.-м.н. А.В. Лухнев. Второй ряд: Л.Е. Гофман, к.г.-м.н. Я.Б. Радзиминович, к.г.-м.н. О.Ф. Лухнева, к.г.-м.н. А.В. Парфеевец, к.г.-м.н. А.В. Новопашина, Л.М. Бызов, А.В. Саньков. Третий ряд: Е.А. Кузьмина, Т.В. Лешкевич, Ф.Л. Зуев, к.г.-м.н. С.В. Ашурков.

Fig. 1. Staff of Laboratory of Recent Geodynamics.

1st row – S.G. Arzhannikov, A.V. Arzhannikova, V.A. San'kov (Head of the Laboratory), A.I. Miroshnichenko, A.V. Lukhnev. 2nd row – L.E. Gofman, Ya.B. Radziminovich, O.F. Lukhneva, A.V. Parfeevets, A.V. Novopashina, L.M. Byzov, A.V. San'kov. 3rd row – E.A. Kuzmina, T.V. Leshkevich, F.L. Zuev, S.V. Ashurkov.

ле наук о Земле, а также выделить особую отрасль, специализирующуюся на изучении связей природных процессов на Земле с солнечной активностью, – гелиогеодинамику. Успешной работе коллектива способствовали обширные международные связи с учеными из Франции, Бельгии, Германии, Монголии. В исследования активно вовлекалась молодежь, чему способствовало создание совместной кафедры современной геодинамики на базе ИЗК СО РАН и ИрГТУ.

В настоящее время работы лаборатории выполняются в рамках бюджетного проекта «Современная геодинамика внутриконтинентальных областей: инструментальные и геолого-геоморфологические оценки движений и деформаций земной поверхности как основа изучения опасных природных процессов (на примере Центральной Азии)» (научный руководитель к.г.м.н. В.А. Саньков), который является частью программы «Тектонофизика современных геодинамических процессов как основа прогноза природных катастроф во внутриконтинентальных условиях» (координаторы д.г.-м.н. Г.И. Татьков, д.г. м.н. К.Г. Леви) по приоритетному направлению СО РАН «Катастрофические эндогенные и экзогенные процессы, включая экстремальные изменения космической погоды: проблемы прогноза и снижения уровня негативных последствий».

Цели и предполагаемые результаты исследований – выявление закономерностей современных внутриконтинентальных деформаций на разных пространственных и временных масштабных уровнях, взаимосвязей процессов в литосфере и других геосферах для разработки моделей современной геодинамики и основ прогноза опасных геологических процессов. В результате проведения работ в 2009–2013 гг. получены новые знания о развитии позднекайнозойских и современных тектонических процессов, соотношениях между деформациями земной поверхности, сейсмичностью и другими опасными процессами в пределах Центральной Азии, построены кинематические и динамические модели отдельных ее регионов и структур.

2. ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ МЕДЛЕННЫХ И БЫСТРЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В РЕЛЬЕФЕ И ПРОЯВЛЕНИЙ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕРРИТОРИИ МОНГОЛО-СИБИРСКОГО РЕГИОНА

В рамках исследований по этому блоку осуществляется количественная оценка тектонических движений, запечатленных в рельефе, что связано с необходимостью датирования форм рельефа, деформаций в разрезе и коррелятных отложений. Другим способом оценки скоростей вертикальных движений является применение метода трекового датирования по апатиту, который позволяет реконструировать термальную историю апатитсодержащих пород, выведенных на поверхность в результате тектонических и эрозионных процессов. Используются также методы датирования поверхностей по космогенному изотопу ¹⁰Ве. На базе геолого-геоморфологических методов определяются возраст и динамика формирования рельефа различных неотектонических структур Монголо-Сибирского региона, степень унаследованности тектонических движений на современном этапе, скорости движений по активным разломам.

Получение информации о начале процессов неотектонического поднятия территории важно с точки зрения определения последовательности воздействия тектонических сил на литосферу исследуемого региона и их эволюции. Нами в ходе совместных исследований с французскими учеными с применением методов трекового анализа по апатитам получены новые данные о динамике вертикальных движений в центральной части Байкальского рифта [Jolivet et al., 2009] вдоль СЗ-ЮВ профиля от Сибирской платформы до Баргузинского хребта. Наши результаты показывают, что Байкало-Патомское поднятие начало воздыматься в раннем карбоне, а затем активизировалось в средней юре – раннем мелу во время коллизии и орогенного коллапса в Монголо-Охотском поясе. Образцы, собранные на Сибирской платформе, указывают на непрерывную седиментацию вплоть до раннего карбона, после чего происходило их медленное остывание при приближении к земной поверхности, не связанное с более поздними тектоническими эпизодами. Показано, что Баргузинский хребет начал подниматься уже в позднем мелу, что предполагает продолжение деформаций от мелового посторогенного коллапса в южном обрамлении Сибирской платформы к кайнозойскому растяжению в Байкальском рифте (рис. 2, *a*). Таким образом, на инициальной стадии внутриконтинентальные деформации не зависели от процесса Индо-Азиатской коллизии. Усиление скорости поднятия с

0.03 мм/год в олигоцене – миоцене до 0.40–0.45 мм/год в позднем миоцене – раннем плиоцене (рис. 2, б) связывается с возможным воздействием коллизионных процессов.

Датированы этапы формирования рельефа Восточного Саяна, который является ключевым районом для понимания взаимодействия транспрессивных деформаций, обусловленных удаленным воздействием Индо-Азиатской коллизии, с деформациями растяжения, связанными с раскрытием Байкальской рифтовой системы [Аржанникова и др., 2011; Jolivet et al., 2011]. На основе результатов применения термохронологического метода трекового датирования апатитов, метода датирования по космогенному изотопу ¹⁰Ве, тектонического анализа и изучения морфологии неогеновых лавовых потоков сделан вывод о том, что в доолигоценовое время территория Восточного Саяна представляла собой обширную, постоянно обновляющуюся эрозионную поверхность. Термальное моделирование показало, что эта поверхность начала формироваться как минимум в поздней юре – раннем мелу (140–120 млн лет) (рис. 3). Скорость долговременной эксгумации, вычисленная с помощью трекового анализа (17.5 м/млн лет), и скорость, рассчитанная за кратковременный период эрозии с использованием космогенного ¹⁰Ве (12–20 м/млн лет), согласуются между собой, что означает постоянную скорость эрозии начиная с поздней юры [Аржанникова и др., 2011; Jolivet et al., 2011]. Эта постоянная медленная эрозия препятствовала формированию латерит-каолинитовой коры выветривания на поверхности выравнивания. В олигоцен-раннемиоценовое время произошло сводообразное поднятие региона, вызвавшее формирование неглубоких эрозионных долин, впоследствии заполнившихся базальтовыми лавовыми потоками. И, наконец, в плиоцене началась наиболее активная фаза тектонических движений, приведшая к формированию отдельных высокогорных хребтов.

3. Инструментальное изучение движений и деформаций земной коры разных масштабных уровней в стабильных и подвижных областях Центральной Азии

Основными методами инструментальных исследований современных деформаций, используемыми в лаборатории, являются спутниковая геодезия (GPS/ГЛОНАСС технология), радарная (PCA) интерферометрия, наземная геодезия. Современная точность измерений указанными методами позволит исследовать как быстрые (сейсмогенные и экзогенные), так и медленные (тектонические) деформации. Исходя из идеи о том, что позднекайнозойские деформации в Байкальской рифтовой системе связаны с взаимодействием Евразийской и Амурской плит [Шерман, Леви, 1977; Zonenshain, Savostin, 1981], можно полагать, что



а

Рис. 2. Результаты моделирования длины апатитовых треков для образцов по профилям вкрест Баргузинского разлома [Jolivet et al., 2009]: a – профиль вблизи п. Баргузин (южная кулиса Баргузинского разлома); б – профиль в районе долины р. Улзика (центральная кулиса Баргузинского разлома).

140

Alt. – высота, FT – возраст апатитовых треков, MTL – средняя измеренная длина треков. Темно-серым показаны возможные области положения кривой температура–время в интервале ошибки 1σ вдоль осредняющей кривой, светло-серым показано то же, но в интервале 2σ. Гистограммы длины треков показаны для каждого образца. L – длина треков в μm, Fr. (%) – частота встречаемости в %, N – общее число измеренных треков.

Fig. 2. Model lengths of apatite fission tracks for samples taken at profiles across the Barguzin basin [*Jolivet et al.*, 2009]: *a* – profile near Barguzin settlement (southern wing of the Barguzin fault); 6 – profile near the Ulzika river valley (central wing of the Barguzin fault).

Alt. – altitude; FT – age of apatite fission tracks; MTL – average measured length of fission tracks. Inferred areas of location of the temperaturetime curve are shown in dark grey in the error range of 1σ along the averaging curve and in light grey in the error range of 2σ . Histograms of track lengths are shown for each sample. L - fission track length (µm); Fr. (%) - frequency of occurrence (%); N - total number of measured fission tracks.



Рис. 3. Интегральная термальная модель для профиля через хребет Кропоткина (Восточный Саян) по данным трекового анализа апатитов [*Jolivet et al., 2013*].

а – модель, включающая образцы S07-5, S07-7, S07-8 and S07-12. Светло-серое поле соответствует 95%-ному доверительному интервалу для термальной истории верхнего образца (S07-5), а темно-серое поле соответствует 95%-ному доверительному интервалу для термальной истории нижнего образца (S07-12). Верхняя пунктирная линия соответствует средней из всех моделей для верхнего образца. Нижняя пунктирная линия соответствует средней из всех моделей для нижнего образца; б – подобные модели, построенные с исключением образца S07-5.

Fig. 3. An integral thermal model for the profile across the Kropotkin ridge (East Sayan) according to apatite fission track analyses [*Jolivet et al.*, 2013].

a – model including Samples S07-5, S07-7, S07-8 and S07-12. Light grey and dark grey – 95% confidence intervals for the thermal history of Sample S07-5 (top) and Sample S07-12 (bottom), respectively. The upper and lower dotted lines correspond to the models that are in the middle among others for the top and bottom samples, respectively; b – Similar models constructed upon exclusion of Sample S07-5.

получение данных о параметрах относительного вращения этих плит позволит прогнозировать характеристики современных деформаций на их границе. Основой таких расчетов являются измерения с использованием метода GPS-геодезии на обширных пространствах, как на границах, так и во внутренних частях литосферных плит [Быков и др., 2009; Саньков и др., 2009; Лухнев и др., 2010, 2013; Ашурков и др., 2011; и др.]. По результатам GPS-измерений за период 2001–2007 гг. на Амуро-Зейском геодинамическом полигоне, расположенном на территории Амурской области, нами впервые было получено поле скоростей современных горизонтальных движений земной коры для этого района [Ашурков и др., 2011] (рис. 4). На его основе с привлечением дополнительных данных рассчитаны параметры относительного вращения Евразийской (EU) и Амурской (AM) плит. Полюс их относительного вращения имеет координаты 122.285° в.д., 58.950° с.ш. и угловую скорость вращения 0.095 град./млн лет. Полученная кинематическая модель описывает движение Евразийской и Амурской плит как независимых тектонических единиц. Статистический анализ показал, что данная гипотеза верна на 99%-ном доверительном уровне. Расчеты также показали, что восточная граница Амурской плиты проходит по одной из ветвей системы разломов Тан-Лу. Полученная кинематическая модель для Евразийской и Амурской плит находится в хорошем согласии с данными о современном напряженном состоянии и подвижках по сейсмоактивным разломам межплитной границы (рис. 5).



Рис. 4. Скорости современных горизонтальных смещений земной коры относительно Евразии [Ашурков и др., 2011].

В квадратах обозначены GPS-пункты, использованные для определения параметров вращения по модели ITRF2005–EU. Эллипсы обозначают ошибки измерений в 95%-ном доверительном интервале. Черной линией показаны межплитные границы по модели NUVEL-1A.

Fig. 4. Velocities of recent horizontal displacements of the crust relative to Eurasia [Αшурков и др., 2011].

GPS-points used to determine the rotation parameters according to model ITRF2005-EU, are marked in squares. Ellipses indicate the measurement error of 95% confidence interval. Black line shows the interplate boundaries according to model NUVEL-1A.



Рис. 5. Сопоставление векторов подвижек в очагах землетрясений с моделями вращения Амурской плиты относительно Евразийской (по [*Ашурков и др.*, 2011] с дополнениями).

Штриховыми линиями показаны малые круги с центром в рассчитанном полюсе вращения. Черными отрезками показаны векторы подвижек для Байкальской рифтовой системы [*Petit et al., 1996*], белыми указаны векторы подвижек для Олекмо-Становой и Тукурингро-Джагдинской сейсмических зон [*Парфенов и др., 1987*].

Fig. 5. Comparison of displacement vectors in earthquake foci and data from models showing rotation of the Amur plate relative to the Eurasian plate (according to [*Auypkob u ∂p., 2011*], with additional data).

Hatches show small circles with the centre at the calculated pole of rotation. Vectors of displacement are shown by black lines for the Baikal rift system [*Petit et al., 1996*] and white lines for the Olyokma-Stanovoy and Tukuringro-Dzhagdinskaya seismic zones [*Парфенов и др., 1987*].

V.A. Sankov: Recent geodynamics of intracontinental areas...



Рис. 6. Скорости современных горизонтальных движений Монголо-Байкальского региона по данным GPS-измерений 1994–2007 гг. относительно Евразийской плиты в 95%-ном доверительном интервале [Лухнев и др., 2010].

Белые стрелки – осредненные скорости на равномерной сетке 30'×30'.

Fig. 6. Rate of present-day horizontal movements of Mongolia-Baikal region according to GPS-measurement data for the period from 1994 to 2007 (relative to the Eurasian plate, 95% confidence interval) [*Лухнев и др., 2010*].

White arrows show average velocities for the regular grid of 30'×30'.

Позднекайнозойское горообразование и современная тектоническая активность Центральной Азии во многом связаны с процессами коллизии и продолжающейся конвергенции Индостана и Евразии. На основе данных многолетних измерений методом GPSгеодезии сети Монголо-Байкальского геодинамического полигона за 1994-2007 гг. рассчитано поле скоростей горизонтальных смещений, деформаций и вращений земной поверхности в периферийной части зоны коллизионного взаимодействия [Лухнев и др., 2010]. Установлено, что северо-восточное направление движения пунктов полигона, наблюдаемое на большей части исследуемой территории, меняется на широтное в Центральной Монголии и юго-восточное в районах Забайкалья, причем скорость пунктов увеличивается на юго-восток от Байкальского рифта, а их направления сохраняются. Несмотря на отсутствие сейсмологических и геологических данных о наличии границы между Евразийской и Амурской плитами на ее западном участке (территория Монголии), изменение направлений и скоростей GPS-пунктов, наличие совокупности доменов с разнонаправленным вращением подтверждают ее существование. Результаты GPS-измерений позволяют установить перемещение Амурской тектонической плиты в юго-восточном направлении со скоростью порядка 2 мм/год. Частично эти движения отражают дополнительное выжимание Амурской плиты в результате коллизионных процессов между Индостаном и Евразийской плитой (рис. 6).

Анализ относительных деформаций позволяет выделить участки с преимущественным укорочением, удлинением земной поверхности и переходные зоны



Рис. 7. Поле скоростей относительных горизонтальных деформаций Монголо-Байкальского региона по данным GPS-измерений 1994–2007 гг. [Лухнев и др., 2010].

Красные стрелки – оси укорочения; синие стрелки – оси удлинения.

Fig. 7. The field of horizontal deformation velocities according to GPS-measurement data on Mongolia-Baikal region for the period from 1994 to 2007 [*Лухнев и др.*, 2010].

Red arrows show shortening axes; blue arrows show alongation axes.

между ними (рис. 7). Участки преимущественного укорочения СВ простирания выявлены в районах Гобийского и Монгольского Алтая, а также в районе Хамар-Дабанского поднятия. Участки преимущественного удлинения расположены в центральной части Байкальского рифта, в пределах западной части Хангая и южной части Хубсугульского поднятия. Переходные зоны отмечены в центральной части Монголии, между структурами Гобийского Алтая и Хамар-Дабана, где значения укорочения и удлинения приблизительно равны и не имеют выдержанной ориентировки [Лухнев и др., 2010].

Современные тектонические деформации локального уровня исследованы на примере области сочленения Южно-Байкальской, Северо-Байкальской и Баргузинской рифтовых впадин, которая представляет собой сложную структуру с двумя трансферными зонами – Ольхонско-Святоносской и Усть-Баргузинской. Показано, что движение блоков происходит в ЮВ направлении, перпендикулярно структурам трансферных зон и под острым углом по отношению к общему простиранию Байкальского рифта, что отвечает условиям правостороннего сдвиго-раздвига по главной структуре (рис. 8. *a*, *б*) [Лухнев и др., 2013]. Средние значения скоростей увеличиваются от 3.0 мм/год в северной части Южно-Байкальской впадины до 6.5 мм/год – в Баргузинской. Оси удлинения, которое превалирует в пределах района исследований, в среднем имеют СЗ-ЮВ направление. Области повышенных деформаций тяготеют к структурам с высоким уровнем сейсмиче-



Рис. 8. Структура и современные горизонтальные движения центральной части Байкальской рифтовой системы по данным GPS-измерений [*Лухнев и др., 2013*].

а – неотектоническая разломно-блоковая структура центральной части Байкальской рифтовой системы. Цифрами в квадратах обозначены главные разломы: 1 – Обручевский, 2 – Приморский, 3 – Морской (Ольхонский), 4 – Северо-Байкальский, 5 – Баргузинский. Цифрами в кругах обозначены Ольхонско-Святоносская (1) и Усть-Баргузинская (2) трансферные зоны. МВ – Маломорская впадина, ЧВ – Чивыркуйская впадина, У-БВ – Усть-Баргузинская впадина. Серией широких серых полос выделена Ольхонско-Святоносская зона аккомодации. На врезке – положение района исследований. 1 – осадки и вода озер, заполняющие рифтовые впадины; 2 – породы фундамента; 3 – рифтовые разломы: а – главные, б – второстепенные; 4–6 – кинематика разломов: 4 – сбросы, 5 – сдвиги, 6 – разломы с неустановленным типом смещений; *б* – скорости современных горизонтальных движений центральной части Байкальской рифтовой системы по данным измерений методом GPS-геодезии за период с 1994 по 2011 г. Звездочками и треугольниками показаны пункты Байкальского GPS-полигона с аббревиатурами их названий и векторами скоростей (стрелки с эллипсами 95%-ного доверительного интервала). Звездочки – пункты локальной системы отсчета, расположенные в пределах стабильного Сибирского блока.

Fig. 8. The structure and recent horizontal movements of the central part of the Baikal rift system, according to GPS measurement data [Π *ухнев и др., 2013*].

a – neotectonic fault-block structure of the central part of the Baikal rift system. Numbers show main faults: 1 – Obruchevsky, 2 – Primorsky, 3 – Morskoy (Olkhonsky), 4 – Northern Baikalsky, 5 – Barguzin. Numbers in circles show the Olkhon-Svyatoy Nos (1) and Ust Barguzin (2) transfer zones. MB – Malomorskaya basin, 4B – Chivyrkuy basin, Y-BB – Ust Barguzin basin. Wide grey bands show the Olkhon-Svyatoy Nos accommodation zone. The region under study is shown in the insert. 1 – sediments and water of lakes in rift basins; 2 – basement rocks; 3 – rift faults: a – main, 6 – secondary; 4–6 – kinematics of faults: 4 – normal faults, 5 – strike-slip faults faults, 6 – faults which type of displacement is not identified. 6 – rate of present-day horizontal movements in the central part of the Baikal rift system, according to measurements obtained from GPS geodetic surveys in the period from 1994 to 2011. Stars and triangles show monitoring stations in the GPS polygon in the Baikal region; names of the stations are abbreviated; arrows with ellipses show vectors of velocities (95% confidential interval). Stars show local reference sites located within the stable Siberian block.

ской активности в Южно-Байкальской и, отчасти, в Баргузинской впадинах, что подтверждает существование современной зоны деструкции земной коры в Байкальской рифтовой системе [Шерман и др., 2004], которая представляется наиболее вероятным источником сильных землетрясений будущего в этом районе (рис. 9, *a*).

В поле скоростей вращения земной поверхности выделяются две зоны с разнонаправленным вращением (рис. 9, б). Вращение по часовой стрелке характерно для структур ССВ простирания (Маломорская впадина, южная часть Северо-Байкальской впадины, поднятие Баргузинского хребта). Вращение против часовой стрелки получено для структур СВ простирания (северная часть Южно-Байкальской впадины, южная часть Баргузинской впадины). В целом полученные данные показывают сложную картину современных горизонтальных смещений и деформаций в пределах области сочленения рифтовых структур СВ и ССВ простирания, подчеркивая потенциальную возможность реализации в их пределах соответственно левосторонних и правосторонних сдвиговых движений по разломам.

Следует упомянуть о первых результатах применения не получившего пока широкого распространения в России метода исследований площадных деформаций земной поверхности с использованием спутниковых радарных снимков. Нами в зоне сочленения субширотной Тункинской и субмеридиональной Хубсугульской ветвей юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы выявлена область активного деформирования земной поверхности с образованием крупных



Рис. 9. Современные горизонтальные деформации и вращения центральной части Байкальской рифтовой системы по данным GPS-измерений [*Лухнев и др., 2013*].

а – поле скоростей относительных горизонтальных деформаций. Оси деформаций удлинения показаны расходящимися незалитыми стрелками, оси укорочения – залитыми сходящимися стрелками; б – поле скоростей вращений земной поверхности в горизонтальной плоскости.

Fig. 9. Recent horizontal deformation and rotation of the central part of the Baikal rift system, according to GPS-measurement data [Лухнев и др., 2013]

a – field of velocities of relative horizontal deformation. Deformation axes due to extension are shown by divergent white arrows; deformation axes due to compression are shown by covergent dark arrows; δ – field of rotation velocities of the crust in the horizontal plane.

открытых трещин, не сопровождающимся сейсмическими явлениями. Для оценки скорости современных движений в пределах исследуемых структур мы применили метод дифференциальной РСА-интерферометрии [Лебедева и др., 2013] с использованием космических снимков японских спутников ALOS/PALSAR. На интерферограмме, полученной из снимков с разницей пролетов два года (2009.01.16-2007.01.11), выделена линейная зона активных деформаций сантиметрового уровня. Длина структуры СЗ простирания составляет около 4 км. Сдвиг по линии визирования радара (LOS) составляет от 18 до 42 мм, что соответствует вертикальному смещению от 22 до 50 мм либо горизонтальному смещению от 32 до 74 мм. Данные, полученные с помощью метода РСА-интерферометрии, коррелируют с данными наземных геодезических измерений, проведенных в период 2009–2011 гг., которые показывают, что большинство базовых линий полигона испытывает удлинение с максимальными значениями, достигающими 30 мм/год. Активизация разрывных структур происходит в соответствии с современным полем напряжений.

4. ИЗУЧЕНИЕ НАЛОЖЕННОСТИ И УНАСЛЕДОВАННОСТИ ПОЗДНЕКАЙНОЗОЙСКИХ И СОВРЕМЕННЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

Исследования по блоку базируются на представлении о том, что развитие тектонических деформаций в пределах различных регионов внутренней части Евразии на протяжении неотектонического этапа начиналось в разное время [Леви, 1991] и происходило неравномерно. Исследуя основные закономерности современного напряженно-деформированного состояния земной коры Центральной Азии, логично принимать современный этап тектонического развития земной коры за неотъемлемую часть неотектонического этапа активизации. В рамках такого подхода необходимо исследовать общий геодинамический фон, главные долговременные тенденции тектонического развития региона, которые привели к современному состоянию геологической структуры и рельефа исследуемой территории. Наиболее чувствительными к воздействию и изменениям напряженно-деформированного состояния



Рис. 10. Карта позднекайнозойского напряженного состояния Монгольского блока [Parfeevets, Sankov, 2012].

1 — стресс-тензоры режима радиального растяжения; 2 — стресс-тензоры режима растяжения; 3 — стресс-тензоры режима сдвига; 4 — стресс-тензоры режима транспрессии; 5 — стресс-тензоры режима сжатия; 6 — стресс-тензоры режима радиального сжатия. Классификация стресс-тензоров дана в соответствии с [Delvaux et al., 1997].

Puc. 10. The map of the state of stresses of the Mongolian block in the Late Cenozoic [Parfeevets, Sankov, 2012].

Legend of stress tensors: 1 – radial extension, 2 – extension, 3 – shear, 4 – transpression, 5 – compression, 6 – radial compression. The stress tensors are classified according to [*Delvaux et al.*, 1997].

являются зоны активных разломов. На основе геологоструктурных и геоморфологических реконструкций основных этапов эволюции поля тектонических напряжений в зонах разломов будут определены долговременный и современный стили деформирования земной коры, степень их унаследованности или наложенности. Изучение соотношений между современными и неотектоническими движениями и деформациями даст возможность выделить и исследовать области современной перестройки тектонических деформаций как мест высокой концентрации напряжений и возможных катастрофических землетрясений.

В рамках работ, проводимых лабораторией современной геодинамики, обобщены материалы многолетних исследований позднекайнозойского напряженного состояния земной коры и геодинамики Монгольского блока. Построена карта полей палеонапряжений Центральной и Западной Монголии [Парфеевец, Саньков, 2010; Parfeevets, Sankov, 2012] (рис. 10). Особое внимание уделено исследованиям переходных зон между такими крупными орогенами, как Хангай и Гобийский Алтай.

В целом для территории характерно, что максимальные деформации, связанные с коллизионным сжатием генерального уровня СВ направления, концентрируются по периферии Монгольского блока. При этом максимальное сжатие сосредоточено на его западной и южной границе и формирует право- и левосторонние транспрессивные структуры Монгольского и Гобийского Алтая. Деформациям, связанным с



Рис. 11. Эволюция деформационных структур южной части Восточного Саяна [Arzhannikova et al., 2011].

Черные стрелки характеризуют первую тектоническую фазу, начавшуюся в позднем плиоцене, белые – позднечетвертичную фазу. 1 – структуры сжатия; 2 – структуры растяжения; 3 – структуры сдвига.

Fig. 11. Evolution of deformation structures of the southern part of East Sayan [Arzhannikova et al., 2011].

Legend of structures: 1 - compression, 2 - extension, 3 - shear. Black arrows correspond to the first tectonic phase that started in the Late Pliocene; white arrows correspond to the Late Quaternary phase.

сокращением земной коры, подвержены не только горные хребты, обрамляющие блок, но и межгорные депрессии, отделяющие Гобийский и Монгольский Алтай от Хангайского свода, а также южная часть Хангайского поднятия. Разнообразие деформаций центральной части Хангая связано с взаимодействием растяжения, возникающего в результате поддерживающего влияния мантийной аномалии и регионального сжатия СВ направления. Мы предполагаем, что относительная жесткость и слабая деформируемость Хангайского блока способствуют передаче деформаций на его северное ограничение - сейсмически активный Северо-Хангайский сдвиг. В этой широтной зоне также наблюдается увеличение роли сжатия к западу, где она сочленяется с транспрессивными структурами Монгольского Алтая, и увеличение влияния растяжения к востоку, где формируются структуры типа «releasing bends». В этих районах поле современных тектонических напряжений, устанавливаемых с использованием механизмов очагов землетрясений, по своим пространственным характеристикам и типу совпадает с характеристиками реконструированного нами позднекайнозойского напряженного состояния земной коры.

В отличие от Западной Монголии, южное горное обрамление Сибирской платформы представляет собой территорию с более сложной историей деформационного процесса в позднем кайнозое. На основе анализа космических и аэрофотоснимков, трехмерной модели рельефа, данных полевых исследований и опубликованных материалов авторы [Arzhannikova et al., 2011] пришли к выводу, что формирование рельефа южной части Восточного Саяна началось в позднем плиоцене – плейстоцене путем активизации древних геологических структур в условиях сжатия. На начальном этапе структуры формировались в условиях субмеридионального сжатия, а на позднем – северовосточного (рис. 11). В позднем плейстоцене вращение блоков по часовой стрелке способствовало формированию сдвигов и вторичных структур растяжения в условиях генерального поля сжатия. В целом, сдвиговая тектоника определает облик и кинематику структур в юго-западном обрамлении Сибирской платформы на позднекайнозойском этапе, а также палео- и современную сейсмичность [Аржанников, Аржанникова, 2009, 2011; Иванов и др., 2009; Jolivet et al., 2013]. Эти представления подтверждают и уточняют наши выводы, сделанные ранее на основе анализа геологоструктурных данных, реконструкций напряженно-деформированного состояния земной коры, физического моделирования и результатов GPS-измерений, обосновывающих основные этапы эволюции напряженно-деформированного состояния в южном горном обрамле-



Рис. 12. Идеализированная блок-диаграмма, поясняющая взаимоотношения между силами вязкого трения на подошве литосферы под воздействием астеносферного течения, сжатием как результатом конвергенции Индостана и Евразии и крупными неоднородностями литосферы в Монголо-Сибирском регионе [*Саньков и др., 20116*].

Буквами обозначены: V_{аст} – скорость движения астеносферного потока; V_{CE} – скорость движения Северной Евразии; V_{AM} – скорость движения Амурской плиты. Граница Евразийской и Амурской плит показана точечным пунктиром.

Fig. 12. An idealized block diagram providing an explanation of relationships between viscous friction forces at the lithospheric bottom under the impact of asthenospheric flow, compression caused by convergence of the Indian and Eurasian plates, and large discontinuities of the lithosphere in the Mongol-Siberian region [*Cahbkob u ∂p., 20116*].

 V_{acr} – velocity of the asthenospheric flow; V_{CE} – velocity of movements of North Eurasia; V_{AM} – velocity of movements of the Amur plate. The boundary between the Eurasian and Amur plate is shown by the dotted line.

нии Сибирской платформы [*Саньков и др., 2002; Парфеевец, Саньков, 2006а, 2006б*]. В целом эта территория вызывает особый интерес с точки зрения наложенности позднекайнозойских деформаций и формирования аномальных структур, представляющих повышенную опасность, как зона концентрации тектонических напряжений и возможного формирования очагов катастрофических землетрясений.

5. ОТ РЕГИОНАЛЬНЫХ СХЕМ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ К МОДЕЛИ СОВРЕМЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ МОНГОЛО-СИБИРСКОГО РЕГИОНА

На основе комплексного анализа параметров, характеризующих современные и неотектонические деформации земной коры и верхней мантии, предложена модель современной геодинамики Монголо-Сибирского региона, показывающая источники тектонических сил и результаты их воздействия [Саньков и др., 2011а, 20116] (рис. 12). В качестве показателей современных деформаций на уровне земной поверхности приняты направления осей горизонтальных деформаций в геодезической сети по данным GPS-геодезии, а на уровне средней коры – направления принципиальных осей напряжений стресс-тензоров, рассчитанных с использованием механизмов очагов землетрясений. В качестве показателей позднекайнозойских палеодеформаций для верхней части коры приняты направления осей напряжений стресс-тензоров, реконструированных по геолого-структурным данным. Для мантийных глубин показателями деформации служат данные о сейсмической анизотропии верхней мантии, полученные из опубликованных источников по результатам исследований расщепления поперечных волн от удаленных землетрясений. Показано, что направление осей деформаций удлинения (минимального сжатия) по всему комплексу данных совпадает с направлением анизотропии верхней мантии региона, медианное значение которого составляет 310-320°. Сейсмическая анизотропия интерпретируется как упорядоченная ориентировка кристаллов оливина, возникающая при больших деформациях вследствие течения вещества мантии. Наблюдаемая механическая сопряженность коры и верхней мантии Монголо-Сибирской подвижной области показывает участие литосферной мантии в формировании неотектонических структур и позволяет выделить главные процессы, определяющие позднекайнозойский тектогенез на этой территории (рис. 12).

Сделан вывод о том, что одним из главных движущих механизмов неотектонических и современных деформаций Монголо-Сибирского региона является длительно живущий крупномасштабный поток вещества верхней мантии в направлении с СЗ на ЮВ, вызывающий как движение северной части континента в целом, так и дивергенцию Северной Евразии и Амурской плиты с формированием Байкальской рифтовой системы. В западной части региона деформации литосферы связаны со сжатием коллизионного происхождения, а в центральной – с динамическим взаимодействием указанных крупномасштабных тектонических процессов.

6. ИЗУЧЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ И НА ИСТОРИЧЕСКОМ ЭТАПЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ И СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ

Одним из наиболее ярких отражений современной активности литосферы является ее сейсмичность. В тектонически активных областях Центральной Азии сейсмический фон в целом повышен и испытывает колебания во времени в связи с пространственно-временными вариациями процессов современного разломообразования, миграции флюидов, изменениями напряженного состояния под воздействием прохождения деформационных волн разного происхождения.

Для Байкальской рифтовой системы осуществлена компьютерная визуализация распределения сейсмических событий в пространстве и времени за инструментальный период 1964–2002 гг. [*Новопашина и др.*, 2012]. Построение для отдельных сейсмоактивных зон пространственно-временных диаграмм параметра суммарной выделившейся при землетрясениях энергии позволило обнаружить цепочки смещения максимумов сейсмической энергии вдоль осей проецирования и определить скорости этих смещений. На различных участках центральной части Байкальской впадины и северо-восточной части БРС выявлены миграции сейсмической активности со скоростями от первых километров до десятков километров в год. Размеры сейсмоактивных сегментов областей проецирования, на которых зафиксированы миграции, за некоторыми исключениями, не превышают 70 км, что обусловлено параметрами делимости земной коры.

Проведенный для сейсмических структур Байкальской рифтовой системы (рис. 13, а) по временным рядам количества землетрясений взаимокорреляционный анализ с использованием ранговой корреляции (рис. 13, б) позволил установить характерные периоды одновременной активизации этих структур длительностью от двух до восьми лет, выделяющиеся по продолжительности непрерывных последовательностей высоких коэффициентов взаимной корреляции кривых. Временные промежутки между максимумами сейсмической активизации (1965, 1973, 1983, 1990, 1997) составляют 7–11, в среднем 9 лет. Результаты корреляционного анализа дают основание предполагать воздействие на литосферу некоего фактора, влияющего на все сейсмоактивные структуры, реагирующие на это воздействие в течение ограниченного промежутка времени.

Если в тектонически активных областях Центральной Азии сейсмический фон в целом повышен, хотя испытывает колебания во времени в связи с пространственно-временными вариациями процессов современного разломообразования, то в пределах стабильных участков литосферы, где современные деформации не превышают 10⁻⁹ год⁻¹, проявления землетрясений достаточно редки. Спорадически возникающие очаги и кластеры землетрясений в пределах современных тектонических плит (краевая часть Сибирского блока Североевразийской плиты, Амурская плита) позволяют говорить о потенциально высокой сейсмической опасности этих территорий, связанной с проявлениями транзитной сейсмичности и процессами собственной тектонической активизации. В связи с этим проводится поиск новой информации о забытых и ранее неизвестных исторических землетрясениях Восточной Сибири и прилегающих территорий с использованием максимально широкого диапазона исторических источников. Как показали исследования, проведенные Я.Б. Радзиминовичем [Радзиминович, Шетников, 2009, 2010, 2011; Радзиминович, Никонов, 2013; Радзиминович и др., 2012; Radziminovich, Shchetnikov, 2013], необходима детальная ревизия исходных данных и переоценка в ряде случаев параметров уже известных и каталогизированных сейсмических событий. Параметризация многих из них были выполнена на основе ограниченных исходных данных, а также, в некоторых случаях, под влиянием традиционных, стереотипных представлений. Уточнение основных очаговых параметров землетрясений позволит скорректировать существующие представления о сейсмической опасности тех или иных территорий. Так, в результате





Рис. 13. Сейсмические структуры Байкальской рифтовой системы (*a*) и вариации количества корреляционных связей временных рядов числа землетрясений К≥8 для них со значимыми положительными коэффициентами корреляции (*б*) [*Новопашина и др., 2012*].

Fig. 13. Seismic structures of the Baikal rift system (*a*), and variations of the number of correlations between time rows of the number of earthquakes (K \geq 8) at such structures with significant positive correlation coefficients (6) [*Hobonauuha u dp., 2012*].

исследования исторической сейсмичности Восточного Забайкалья показано, что значения магнитуд землетрясений, приуроченных к основным активным структурам территории, могут достигать 5.5–6.0. Отмечено, что с середины 1930-х годов в Восточном Забайкалье наблюдалось сейсмическое затишье, прерванное в 2006 г. землетрясением с М~4.5. Определены основные параметры семи исторических землетрясений, которые могут быть включены в параметрические каталоги (рис. 14).

Другим характерным примером применяемого подхода является исследование, в результате которого были пересмотрены параметры «Великого ВосточноСибирского» землетрясения 1 февраля 1725 г. [*Радзиминович, Никонов, 2013*]. Это землетрясение длительное время считалось не только наиболее ранним из точно датированных исторических сейсмических событий Восточной Сибири, но и наиболее сильным за весь период фиксации сейсмических событий в регионе (*M*=8.2) [*Новый каталог..., 1977*]. Местоположение эпицентра (Становое нагорье) и магнитуда землетрясения оценивались на основе скудных исторических данных, а также с использованием палеосейсмогеологической информации. Параметры землетрясения на протяжении десятилетий служили решающим аргументом при осуществлении работ по оценке сейсмиче-



Рис. 14. Макросейсмические проявления исторических землетрясений Восточного Забайкалья [*Радзиминович*, *Щетников*, 2010].

а – землетрясение 3 мая 1886 г. (цифрами обозначены населенные пункты Нерчинск (1) и Сретенск (2)); *б* – землетрясение 17 декабря 1889 г. (цифрами обозначены населенные пункты Александровский завод (1), Шилкинское (Шилка) (2), Сретенск (3), Нерчинский завод (4), Чита (5)); *в* – землетрясение 29 октября 1892 г. (цифрами обозначены населенные пункты Сретенск (1), Нерчинск (2), Горбица (3), Нерчинский завод (4)); *г* – землетрясение 29 октября 1892 г. (цифрами обозначены населенные пункты Сретенск (1), Нерчинск (2), Горбица (3), Нерчинский завод (4)); *г* – землетрясение 23 февраля 1895 г. (цифрами обозначены населенные пункты Чита (1), Кайдалова (Кайдалово) (2), Укар (Укыр) (3), Подволочное (Подволок) (4), Князе-Урульгинское (Урульга) (5), Агинское (6), Бальзойское (Бальзой) (7)); *д* – землетрясение 28 января 1908 г. (цифрами обозначены населенные пункты Нерчинск (1), Шилка (2), Сретенск (3)); *е* – землетрясение 23 сентября 1927 г. (цифрами обозначены населенные пункты С), Кайдалова (4), Кайдалова (4), 1 – интенсивность сотрясений в баллах по шкале MSK-64; *2* – государственная граница.

Fig. 14. Macroseismic manifestations of historical earthquakes in Eastern Transbaikalie [Радзиминович, Щетников, 2010].

a – May 3, 1886 earthquake (numerals mark the towns of Nerchinsk (1) and Sretensk (2)); δ – December 17, 1889 earthquake (numerals mark the following population centers: (1) Aleksandrovskii Zavod, (2) Shilkinskoe (or Shilka), (3) Sretensk, (4) Nerchinskii Zavod, (5) Chita); e – October 29, 1892 earthquake (numerals mark the following population centers: (1) Sretensk, (2) Nerchinsk, (3) Gorbitsa, (4) Nerchinskii Zavod; e – February 23, 1895 earthquake (numerals mark the following population centers: (1) Chita, (2) Kaidalova (or Kaidalovo), (3) Ukar (or Ukyr), (4) Podvolochnoe (or Podvolok), (5) Knyaze-Urul'ginskoe (or Urul'ga), (6) Aginskoe, (7) Bal'zoiskoe (or Bal'zoi); ∂ – January 28, 1908 earthquake (numerals mark the following population centers: (1) Nerchinsk, (2) Shilka, (3) Sretensk; e – September 23, 1927 earthquake (numerals mark the population centers: (1) Nerchinsk, (2) Shilka, (3) Sretensk; e – September 23, 1927 earthquake (numerals mark the population centers: (1) Olovyannaya, (2) Mogoitui, (3) Verkhnii Chasuchai (or Verkhnii Tsasuchei), (4) Makarovo). 1 – intensity of shaking on the MSK-64 scale; 2 – state border.



Рис. 15. Локализация эпицентра землетрясения 1 февраля 1725 г. по результатам пересмотра исходных исторических данных [*Радзиминович*, *Никонов*, *2013*].

1 – интенсивность сотрясений в баллах по шкале MSK-64; 2 – макросейсмический эпицентр.

Fig. 15. Location of the epicentre of 01 February 1725 earthquake, according to reviewed historical data [*Radziminovich, Nikonov, 2013*].

1 – intensity of shocks as per MSK-64 scale; 2 – macroseismic epicentre.

ской опасности и сейсмическому районированию северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны. Вместе с тем решение очаговых параметров в «Новом каталоге...» [1977] вызывает серьезные сомнения. Предложено новое решение, основанное на повторном, детальном анализе уже известной макросейсмической информации, а также на дополнительных исторических данных, ранее не попадавших в поле зрения сейсмологов. В результате получено иное решение координат эпицентра (51.8° с.ш., 113.0° в.д., Восточное Забайкалье) и существенно меньшее значение магнитуды (*M*=6.0) по сравнению с параметрами, приведенными в «Новом каталоге...» [1977] (рис. 15). Представленное решение заставляет более внимательно отнестись к оценкам сейсмической опасности территории Восточного Забайкалья.

7. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕОСФЕР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ И СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ

В рамках этого направления проводятся исследования литосферно-атмосферных и литосферно-ионосферных взаимодействий на основе данных режимных GPS-наблюдений в тесном взаимодействии и в рамках совместных междисциплинарных проектов с сотрудниками ИСЗФ СО РАН и ИФМ СО РАН [Afraimovich et al., 2010; Сейсмоионосферные и сейсмоэлектромагнитные процессы..., 2012; Perevalova et al., 2014]. Сигналы GPS-спутников содержат информацию о состоянии ионосферы и тропосферы, поэтому существует возможность сопоставления процессов в литосфере и в



Рис. 16. Изменения на базовых линиях ULAZ-IRKT (*a*) и ULAZ-LIST (*б*) после Култукского землетрясения 27 августа 2008 г. Временная серия построена с осреднением 1 час [*Сейсмоионосферные и сейсмоэлектромагнитные процессы..., 2012*].

Fig. 16. Changes in ULAZ-IRKT (*a*) и ULAZ-LIST (б) base lines after the August 27, 2008 Kultuk earthquake. The time series is constructed with averaging to one hour [*Сейсмоионосферные и сейсмоэлектромагнитные процессы*..., 2012].

вышележащих геосферах, особенно при проявлении быстрых процессов, таких, как землетрясения. Так, во время Веньчуаньского землетрясения 12.05.2008 г. (Mw=7.9) сетью постоянных GPS-станций на территории Китая были зарегистрированы эффекты изменения полного электронного содержания в ионосфере, связанные с воздействием ударной акустической волны, возникшей при быстром смещении земной поверхности. В работе [Afraimovich et al., 2010] показано, что Nобразная плоская ударная акустическая волна с полупериодом около 200 с распространялась со скоростью 580 м/с на расстояние около 1000 км от эпицентра. Фронт волны распространялся поперек сейсмогенного разлома, который является надвигом. Предполагается, что указанные особенности волны связаны с геодинамическими условиями возникновения сейсмогенного разрыва и его морфолого-генетическим типом.

Развиваемая в Байкальском регионе сеть GPS-пунктов, функционирующих на постоянной основе, позволяет исследовать эффекты подготовки сильных землетрясений и сигналы, связанные с быстрыми косейсмическими деформациями в литосфере и ионосфере. В результате координированных исследований поведения геодинамических и ионосферных параметров вблизи эпицентра Култукского землетрясения 27.08.2008 г. (Mw=6.3) у южной оконечности оз. Байкал показано, что механизм очага землетрясения полностью соответствует системе напряжений, существовавшей до землетрясения, полученной по данным GPS-геодезии [Сейсмоионосферные и сейсмоэлектромагнитные процессы..., 2012]. Высокоточные GPSизмерения во время землетрясения выявили изменения на базовых линиях Улан-Удэ – Иркутск и Улан-Удэ –

Листвянка. После землетрясения отклонения на базовых линиях достигали 125 и 150 мм, соответственно, и пришли к исходному уровню к середине 28.08.2008 г. (рис. 16). Вместе с тем, исследование с помощью системы GPS реакции ионосферы не выявило заметных изменений в поведении параметра полного электронного содержания, обусловленных главным толчком и афтершоками Култукского землетрясения. Выполненный анализ возможных причин отсутствия ионосферного отклика показал, что наиболее вероятной причиной является относительно малая энергетика Култукского землетрясения [Сейсмоионосферные и сейсмоэлектромагнитные процессы..., 2012]. Последовавшие два сейсмических события на Тувинском нагорье 27.12.2011 г. (Мw=6.7) и 26.02.2012 г. (Мw=6.6) имели довольно ясно выраженный отклик в ионосфере. Анализ мировых данных и результаты наших региональных наблюдений показали, что сейсмические события, для которых наблюдаются ионосферные отклики, имеют нижний предел по магнитуде порядка 6.5 [Perevalova et al., 2014].

Под руководством К.Г. Леви продолжались традиционные для лаборатории работы по пополнению и анализу баз данных об опасных природных процессах, развивающихся в Сибири и в мире с целью выявления их цикличности и взаимосвязей с солнечно-земными взаимодействиями. Их результаты опубликованы в трехтомнике «Радиоуглеродная хронология природных и социальных феноменов Северного полушария» [Леви и др., 2010] (рис. 17). Проанализировано развитие во времени (последние 50 тыс. лет) вулканизма, сейсмичности, почво- и торфообразования, наводнений, природных пожаров, фауны и археологических



Рис. 17. Три тома монографии «Радиоуглеродная хронология природных и социальных феноменов Северного полушария» [*Леви и др., 2010*].

Fig. 17. Photo of the three volumes of "Radiocarbon Chronology of Natural and Social Phenomena in the Northern Hemisphere" [*Леви и др., 2010*].

культурных комплексов. Сделан главный вывод о том, что весь комплекс атмосферно-гидросферных и экзогенных процессов сильно зависит от длиннопериодных вариаций солнечной активности в сочетании с изменением орбитальных параметров Земли (рис. 18) [Задонина, 2009; Леви и др., 2010]. Разработки по взаимосвязям современных геодинамических процессов с изменениями солнечной активности, объединенные понятием «гелиогеодинамика», вошли в изданное учебное пособие для вузов [Задонина, Леви, 2009; Леви и др., 2012].

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие современной геодинамики как науки происходит разнонаправленно. С одной стороны, происходит специализация и углубление исследований, сосредоточенных на современных процессах, с другой – знание закономерностей протекания современных процессов позволяет исследователям получать новую информацию, проникнуть в глубь геологической истории, пользуясь принципом актуализма. Не являются исключением в этом отношении и исследования лаборатории современной геодинамики. Опубликованные в последние годы новые важные научные результаты охватывают широкий спектр геологических процессов и диапазон возрастов. Получены независимые данные о начале и характере протекания процессов неотектонической активизации, напряженно-деформированном

состоянии земной коры на юге Сибири и в Монголии. Предложена модель позднекайнозойской и современной геодинамики Монголо-Сибирской подвижной области. Методами GPS-геодезии количественно охарактеризованы современные горизонтальные движения и деформации Центральной Азии и части Дальнего Востока на разных масштабных уровнях. Получены первые результаты исследований локальных деформаций земной поверхности с использованием методов спутниковой радарной интерферометрии и наземной полигонометрии. Развиваются исследования современной и исторической сейсмичности в связи с процессами современного разломообразования в активных тектонических зонах межплитных границ и диффузной активизации слабоактивных внутриплитных территорий. В кооперации с другими научными подразделениями СО РАН успешно ведутся инструментальные исследования взаимодействий литосферы и ионосферы.

Большой интерес к разработкам лаборатории продемонстрирован на состоявшихся 23–29 сентября 2012 г. Всероссийском совещании с участием приглашенных исследователей из других стран «Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе» и Всероссийской молодежной школе по современной геодинамике. На совещании было сформулировано более строгое понимание современной геодинамики как научного направления, в рамках которого изучаются «процессы, происходящие в твердых оболочках Земли – структурно-вещественные преобра-

SA, CM, относительные единицы



Рис. 18. Модельные кривые вариаций солнечной активности SA и орбитальных параметров Земли CM за 50000 лет [*Леви и др., 2010*].

Fig. 18. Model curves of solar activity (SA) variations and orbital parameters of Earth (CM) for the past 50000 years [*Леви и др.*, *2010*].

зования вещества, короткопериодные движения литосферы и/или ее самой верхней части – земной коры, их результаты, вариации напряженно-деформированного состояния, отраженные в структурных формах, проявившихся в течение первого тысячелетия или нескольких столетий тому назад и происходящие в реальное время, а также процессы, синхронно протекающие и часто генетически связанные с движениями и деформациями верхней части литосферы или земной коры» [Саньков и др., 2012, с. 57]. Современная геодинамика имеет дело с процессами и явлениями, которые можно непосредственно измерить, изучить и пытаться прогнозировать. Этим коротким в геологическом смысле периодом времени и возможностью мониторинга событий и процессов современная геодинамика отличается от палеогеодинамики, в рамках которой геодинамические процессы реконструируются по результатам их воздействия (структурам, вещественным комплексам). Вместе с тем, совершенно очевидно, что современные геодинамические процессы являются неотъемлемой частью текущего геологического этапа развития, поэтому современная геодинамика рассматривает состояние недр, сил и процессов в планете Земля как продолжение позднекайнозойской эволюции.

Исходя из такого понимания современной геодинамики, выстраиваются перспективы развития исследований лаборатории, предполагающие опору на инструментальные методы исследований. Главным трендом современных исследований на геодинамических полигонах, которому стремится следовать коллектив лаборатории, является изучение движений и деформаций на основе использования данных постоянных измерений. Режимные наблюдения с поддержкой длинных временных рядов позволяют исследовать динамику деформаций, характерные черты которой определяются мультимасштабными пространственно-временными процессами деформирования земной коры. Главной практической задачей является организация и поддержка сети пунктов постоянных измерений методом спутниковой геодезии в Байкальской рифтовой системе и на окружающих территориях с возможностью оперативного получения и обработки данных на региональных геодинамических полигонах. Наряду с этим будут развиваться измерения на локальных (характерный размер 10⁶–10⁵ м) и малых (характерный размер 10⁴ м) геодинамических полигонах. Организация малых геодинамических полигонов в зонах активных разломов нацелена на исследования закономерностей процесса накопления упругих напряжений при подготовке землетрясений.

Планируется усилить исследования локальных площадных деформаций земной поверхности экзогенного и эндогенного происхождения с использованием спутниковой радарной интерферометрии и заверкой методами наземной геодезии.

В рамках инструментальных исследований взаимосвязей современных геодинамических процессов с процессами взаимодействия геосфер совместно с ИСЗФ СО РАН будут продолжены работы по поиску ионосферных предвестников сильных землетрясений и исследования закономерностей отклика ионосферы на сейсмические события. Впервые для Сибири инициируются исследования состояния тропосферы с помощью GPS/ГЛОНАСС технологии, поскольку вопрос о взаимодействии тропосферы и литосферы в регионе слабо исследован. Кроме того, планируется установка новых пунктов постоянных GPS-измерений на побережье озера Байкал и в районах искусственных водохранилищ Ангарского каскада ГЭС с целью получения данных отклика земной коры на изменения уровня воды в этих резервуарах и оценки возможности триггерного эффекта этих изменений на сейсмичность.

С применением геолого-геоморфологических методов будет продолжен поиск и датирование следов опасных процессов недавнего, в геологическом смысле, прошлого, таких, как палеоземлетрясения, оползни, проявления вулканизма, палеогидрокатастрофы, для понимания и интерпретации тенденций современного течения подобных процессов. Большое внимание будет уделено поиску и датированию геологических и геоморфологических реперов для оценки скорости движений по активным разломам. Исходя из этих данных, будет проводиться математическое моделирование формирования рельефа в зонах разломов с возможностью выработки прогнозных сценариев его дальнейшего развития. Геолого-структурные исследования с привлечением сейсмологических и геодезических данных будут направлены на изучение районов с аномальными соотношениями позднекайнозойских и современных тектонических деформаций как мест возможной перестройки структурного плана с концентрацией повышенных тектонических напряжений.

Будут продолжены поиски неизвестных и забытых землетрясений исторического прошлого для территории Прибайкалья и Забайкалья. Большое практическое значение для уточнения карт сейсмического районирования территории Сибири будут иметь разработки нового концептуального подхода к созданию каталога исторических землетрясений нового поколения.

Успешное проведение исследований по очерченному кругу направлений будет возможно, в том числе, за счет традиционной для лаборатории современной геодинамики широкой международной, внутрироссийской и внутриинститутской кооперации. Созданная в 2013 г. в Иркутском государственном университете базовая кафедра современной геодинамики даст возможность целенаправленно готовить специалистов для пополнения лаборатории молодыми кадрами.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Afraimovich E.L., Feng D., Kiryushkin V.V., Astafyeva E.I., Jin S.G., Sankov V.A. TEC response to the 2008 Wenchuan earthquake in comparison with other strong earthquakes // International Journal of Remote Sensing. 2010. V. 31. № 13. P. 3601–3613. http://dx.doi.org/10.1080/01431161003727747.
- Arzhannikova A., Arzhannikov S., Jolivet M., Vassallo R., Chauvet A. Pliocene to Quaternary deformation in South East Sayan (Siberia): Initiation of the Tertiary compressive phase in the southern termination of the Baikal Rift System // Journal of Asian Earth Sciences. 2011. V. 40. P. 581–594. http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.10.11.
- Delvaux D., Moyes R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnichenko A., Ruzhich V., San'kov V. Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part 2. Cenozoic rifting // Tectonophysics. 1997. V. 282. P. 1–38. http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00210-2.
- Jolivet M., Arzhannikov S., Arzhannikova A., Chauvet A., Vassallo R., Braucher R. Geomorphic Mesozoic and Cenozoic evolution in the Oka-Jombolok region (East Sayan ranges, Siberia) // Journal of Asian Earth Sciences. 2013. V. 62. P. 117–133. http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.09.017.
- Jolivet M., Arzhannikov S., Chauvet A., Arzhannikova A., Vassallo R., Kulagina N., Akulova V. Accomodating large-scale intracontinental extension and compression in a single stress-field: A key example from the Baikal Rift System // Gond-wana Research. 2013. V. 24. № 3–4. P. 918–935. http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2012.07.017.
- Jolivet M., De Boisgrollier T., Petit C., Fournier M., Sankov V.A., Ringenbach J.-C., Byzov L., Miroshnichenko A.I., Kovalenko S.N., Anisimova S.V. How old is the Baikal Rift Zone? Insight from apatite fission track thermochronology // Tectonics. 2009. V. 28. TC3008. http://dx.doi.org/10.1029/2008TC002404.
- Parfeevets A.V., Sankov V.A. Late Cenozoic tectonic stress fields of the Mongolian microplate // Comptes rendus Geoscience. 2012. V. 344. P. 227–238. http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2011.09.009.
- Perevalova N.P., Sankov V.A., Astafyeva E.I., Zhupityaeva A.S. Threshold magnitude for Ionospheric TEC response to earthquakes // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2014. V. 108. P. 77–90. http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp. 2013.12.014.

- Petit C., Déverchère J., Houdry F., Sankov V.A., Melnikova V.I., Delvaux D. Present-day stress field changes along the Baikal rift and tectonic implications // Tectonics. 1996. V. 15. № 6. P. 1171–1191. http://dx.doi.org/10.1029/96TC00624.
- *Radziminovich Ya.B., Shchetnikov A.A.* Historical earthquakes studies in Eastern Siberia: State-of-the-art and plans for future // *Journal of Asian Earth Sciences.* 2013. V. 62. P. 134–145. http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.09.017.
- Zonenshain L.P., Savostin L.A. Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia // Tectonophysics. 1981. V. 76. № 1–2. P. 1–45. http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(81)90251-1.
- Аржанников С.Г., Аржанникова А.В. Палеосейсмогенная активизация Большеозерского сегмента Эрзино-Агардагского разлома // Вулканология и сейсмология. 2009. № 2. С. 56–66.
- Аржанников С.Г., Аржанникова А.В. Позднечетвертичная геодинамика Хиргиснурской впадины и ее горного обрамления (Западная Монголия) // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 2. С. 276–288.
- Аржанникова А.В., Аржанников С.Г., Жоливе М., Вассалло Р., Шове А. Плиоцен-четвертичные деформации юговосточной части Восточного Саяна // Геотектоника. 2011. № 2. С. 49–65.
- Ашурков С.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Лухнев А.В., Сорокин А.П., Серов М.А., Бызов Л.М. Кинематика Амурской плиты по данным GPS-геодезии // Геология и геофизика. 2011. № 2. С. 299–311.
- Быков В.Г., Бормотов В.А., Коковкин А. А., Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Герасименко М.Д., Шестаков Н.В., Коломиец А.Г., Сорокин А.П., Сорокина А.Т., Серов М.А., Селиверстов Н.И., Магуськин М.А., Левин В.Е., Бахтиаров В.Ф., Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Бызов Л.М., Дучков А.Д., Тимофеев В.Ю., Горнов П.Ю., Ардюков Д.Г. Начало формирования единой сети деформационных наблюдений ДВО РАН // Вестник ДВО РАН. 2009. № 4. С. 83–93.
- Задонина Н.В. Анализ проявления сейсмичности в Монголо-Байкальском регионе за последние 320 лет // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36. № 2. С. 47–56.
- Задонина Н.В., Леви К.Г. Хронология природных и социальных феноменов в истории мировой цивилизации. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2009. 864 с.
- Иванов А.В., Саньков В.А., Смекалин О.П., Чипизубов А.В. Оценка периодов повторяемости сильных землетрясений в зонах Главного Саянского и Тункинского разломов по данным радиоуглеродного датирования и статистического анализа // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36. № 2. С. 70–80.
- Лебедева М.А., Саньков В.А., Захаров А.И., Захарова Л.Н. Активные деформации в зоне влияния разломов Мондинской впадины по данным РСА-интерферометрии // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. 2013. № 5 (51). С. 63–65.
- *Леви К.Г.* Неотектонические движения в сейсмоактивных зонах литосферы (тектонофизический анализ). Новосибирск: Наука, 1991. 168 с.
- Леви К.Г., Задонина Н.В., Язев С.А. Радиоуглеродная хронология природных и социальных феноменов Северного полушария. В 3 т. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2010. Т. I–III.
- Леви К.Г., Задонина Н.В., Язев С.А., Воронин В.И. Современная геодинамика и гелиогеодинамика: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2012. 539 с.
- Леви К.Г., Шерман С.И., Саньков В.А. Современная геодинамика Азии: карта, принципы составления, геодинамический анализ // Геотектоника. 2009. № 2. С. 78–93.
- Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Кале Э. Вращения и деформации земной поверхности в Байкало-Монгольском регионе по данным GPS-измерений // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 7. С. 1006– 1017.
- Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Ашурков С.А., Бызов Л.М., Саньков А.В., Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г., Кале Э. Современные деформации земной коры в области сочленения сегментов рифтов центральной части Байкальской рифтовой системы по данным GPS-геодезии // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 11. С. 1814– 1825.
- Новопашина А.В., Саньков В.А., Буддо В.Ю. Пространственно-временной анализ сейсмических структур Байкальской рифтовой системы // Вулканология и сейсмология. 2012. № 4. С. 55–64.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука, 1977. 535 с.
- Парфеевец А.В., Саньков В.А. Напряженное состояние земной коры и геодинамика юго-западной части Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2006. 151 с.
- Парфеевец А.В., Саньков В.А. Геодинамические условия развития Тункинской ветви Байкальской рифтовой системы // Геотектоника. 2006. № 5. С. 61–84.
- Парфеевец А.В., Саньков В.А. Позднекайнозойские поля тектонических напряжений Западной и Центральной Монголии // Физика Земли. 2010. № 5. С. 3–14.
- Парфенов Л.М., Козьмин Б.М., Имаев В.С., Савостин Л.А. Тектоническая природа Олекмо-Становой сейсмической зоны // Геотектоника. 1987. № 6. С. 94–108.
- Радзиминович Я.Б., Мельникова В.И., Середкина А.И., Гилева Н.А., Радзиминович Н.А., Папкова А.А. Землетрясение 6 января 2006 г. (Мw=4.5): редкий случай проявления сейсмической активности в Восточном Забайкалье // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 10. С. 1430–1444.

- Радзиминович Я.Б., Никонов А.А. «Великое Восточно-Сибирское» землетрясение 01.02.1725 г. (М=8.2): ревизия основных параметров в свете дополнительных данных и современных требований // Вопросы инженерной сейсмологии. 2013. Т. 40. № 4. С. 42–66.
- Радзиминович Я.Б., Щетников А.А. Новые данные о сейсмичности Восточного Забайкалья в историческом прошлом // Доклады АН. 2009. Т. 426. № 6. С. 809–812.
- Радзиминович Я.Б., Щетников А.А. Историческая сейсмичность Восточного Забайкалья // Вулканология и сейсмология. 2010. № 6. С. 65–78.
- Радзиминович Я.Б., Щетников А.А. Каталоги исторических землетрясений Восточной Сибири: необходимость ревизии // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 7. С. 931–939.
- Саньков В.А., Леви К.Г., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Парфеевец А.В., Радзиминович Н.А., Мельникова В.И., Девершер Ж., Кале Э., Пети-Мариани К., Амаржаргал С., Дельво Д. Современная геодинамика Монголо-Сибирского подвижного пояса по данным геолого-структурных и инструментальных исследований // Тектоника и геофизика: Материалы XXXV Тектонического совещания. М.: Геос, 2002. С. 170–174.
- Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Бызов Л.М., Дембелов М.Г., Кале Э., Девершер Ж. Растяжение в Байкальском рифте: современная кинематика пассивного рифтогенеза // Доклады АН. 2009. Т. 424. № 5. С. 664–668.
- Саньков В.А., Лухнев А.В., Парфеевец А.В., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В. Сопряженность деформаций земной коры и верхней мантии Монголо-Сибирской подвижной области // Доклады АН. 2011. Т. 436. № 3. С. 401–406.
- Саньков В.А., Парфеевец А.В., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В. Позднекайнозойская геодинамика и механическая сопряженность деформаций земной коры и верхней мантии Монголо-Сибирской подвижной области // Геотектоника. 2011. Т. 45. № 5. С. 52–70.
- Саньков В.А., Шерман С.И., Леви К.Г. Современная геодинамика: объем понятия, временной охват, концептуальные подходы // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе: Материалы Всероссийского совещания и молодежной школы по современной геодинамике (г. Иркутск, 23–29 сентября 2012 г.). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. Т. 1. С. 56–60.
- Сейсмоионосферные и сейсмоэлектромагнитные процессы в Байкальской рифтовой зоне / Под ред. Г.А. Жеребцова. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 304 с.
- Шерман С.И., Демьянович В.М., Лысак С.В. Сейсмический процесс и современная многоуровенная деструкция литосферы в Байкальской рифтовой зоне // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 12. С. 1460–1472.
- Шерман С.И., Леви К.Г. Трансформные разломы Байкальской рифтовой зоны // Доклады АН СССР. 1977. Т. 233. № 2. С. 454–464.



Саньков Владимир Анатольевич, канд. геол.-мин. наук, зав. лабораторией современной геодинамики Институт земной коры СО РАН 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия Тел. (3952)427903; ⊠ email: sankov@crust.irk.ru

San'kov, Vladimir A., Candidate of Geology and Mineralogy, Head of Laboratory of Recent Geodynamics Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS 128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia Tel. +7(3952)427903; ⊠ email: sankov@crust.irk.ru PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2014 VOLUME 5 ISSUE 1 PAGES 183-199

http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0123

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF REGIONAL SEISMIC SAFETY (BAIKAL REGION)

Yu. A. Berzhinsky

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: The article reviews problems of regional seismic safety and current programs aimed at earthquake proofing of buildings, houses, facilities and life-support systems. It describes the main scientific methodological principles for certification of buildings and facilities located in earthquake-prone regions. With reference to case studies of Angarsk, Shelekhov and Baikalsk and data on Ulaan Baatar (jointly studied with ICAG of the Academy of Sciences of Mongolia), examples of the certification method application in practice are described. Special attention is given to monitoring of the technical status of bearing-wall apartment buildings and houses built in 1960s and 1970s. Cooperation between the Laboratory of Earthquake-Proof Construction and leading scientific research institutes of Russia is reviewed specifically within the framework of the Federal Seismic Safety Program and participation of the Laboratory in development of the national standard titled GOST R Earthquake Intensity Scale.

Key words: regional seismic safety, certification of buildings, seismic risk maps, monitoring of the technical status of buildings, earthquake intensity scale, earthquake proofing of buildings.

Citation: *Berzhinsky Yu.A.* 2014. Experimental and theoretical studies of regional seismic safety (Baikal region). *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (1), 183–199. doi:10.5800/GT-2014-5-1-0123.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ (НА ПРИМЕРЕ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА)

Ю. А. Бержинский

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация: Статья посвящена решению проблем региональной сейсмобезопасности в соответствии с действующими программами повышения устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения. Изложены научно-методические основы паспортизации зданий в сейсмических районах. На примере застройки городов Ангарска, Шелехова и Байкальска, а также г. Улаанбаатара (совместно с ИЦАГ АН Монголии) показано практическое применение методики паспортизации. Значительное внимание уделено мониторингу технического состояния жилых домов первых панельных серий постройки 60–70-х годов прошлого века. Освещен опыт сотрудничества лаборатории сейсмостойкого строительства с ведущими научно-исследовательскими организациями России по выполнению блока НИОКР федеральной целевой программы по сейсмобезопасности, в том числе участие в разработке Проекта Национального стандарта ГОСТ Р «Шкала интенсивности землетрясений».

Ключевые слова: региональная сейсмобезопасность, паспортизация зданий, карты сейсмического риска, мониторинг технического состояния зданий, шкала интенсивности землетрясений, сейсмоусиление зданий.



ISSN 2078-502X

1. Введение

Лаборатория сейсмостойкого строительства (рис. 1) организована в 1990 г. совместным приказом-распоряжением ТСО «Востоксибстрой» бывшего Министерства строительства в восточных районах РСФСР и ИНЦ СО АН СССР № 31/15701-2115.1 от 14.02.1990 г. Бессменным руководителем лаборатории является Ю.А. Бержинский.

За время своего существования лабораторией совместно с другими подразделениями института и рядом научно-исследовательских, проектных и строительных организаций проведены полтора десятка крупномасштабных вибрационных и сейсмовзрывных испытаний региональных типов зданий. Указанные экспериментально-теоретические исследования сейсмостойкости зданий массовой застройки проведены впервые в Восточной Сибири. Для выполнения этих работ было изготовлено уникальное вибрационное оборудование – мощные вибромашины типа В-3 конструкции ЦНИИЭП жилища. В настоящее время ИЗК СО РАН, наряду с ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко (г. Москва) и полигоном под г. Выборгом (г. Санкт-Петербург) бывшего министерства обороны СССР, является одной из трех научно-исследовательских организаций России, которые способны проводить экспериментальные исследования в области сейсмостойкого строительства. По модернизированным на основании натурных испытаний типовым проектам были возведены жилые дома общей площадью 250 тыс. м². Лабораторией разработана региональная шкала сейсмической интенсивности РШСИ-2002 (научный руко-



Рис. 1. Коллектив лаборатории сейсмостойкого строительства.

Слева направо: К.В. Акимова, Л.И. Иванькина, Л.С. Кокорина, к.г.-м.н. А.П. Ордынская, к.т.н. Л.П. Бержинская, к.г.-м.н. Ю.А. Бержинский – зав. лабораторией, О.И. Саландаева.

Fig. 1. The staff of the Laboratory of Earthquake-Proof Construction.

Left to right: K.V. Akimova, L.I. Ivan'kina, L.S. Kokorina, A.P. Ordynskaya, L.P. Berzhinskaya, Yu.A. Berzhinsky (Head of the Laboratory), O.I. Salandaeva.
водитель, д.г.-м.н., проф. С.И. Шерман). По результатам исследований в области нового научного направления была подготовлена и издана монография «Региональные шкалы сейсмической интенсивности» (авторы – С.И. Шерман, Ю.А. Бержинский, В.А. Павленов, Ф.Ф. Аптикаев). Лабораторией проведены обследования последствий реальных сейсмических событий 1995, 1999, 2001 и 2008 г.

Перспективными направлениями в работе лаборатории являются: паспортизация жилищного фонда в сейсмических районах Байкальского региона и оценка сейсмического риска территорий, населения и застройки населенных пунктов. Лаборатория явилась инициатором и ведущим исполнителем трех программ по сейсмобезопасности Иркутской области: 1991, 1995 и 2010 гг. Сотрудники лаборатории приняли участие во Всероссийских конференциях по сейсмостойкому строительству, проводимых в г. Сочи в 1999, 2003, 2007 и 2011 гг. За комплекс работ по экспериментальной оценке сейсмостойкости безригельного каркаса серии 1.120с лаборатория награждена грамотой губернатора Иркутской области.

2. Основные направления исследований

1. Экспериментальные исследования региональных типов зданий при высоком уровне динамической на-грузки.

2. Паспортизация зданий существующей застройки.

3. Сейсмические шкалы.

4. Методы математического моделирования поведения зданий при сейсмических воздействиях.

5. Оценка сейсмического риска.

3. ПАСПОРТИЗАЦИЯ ЖИЛИЩНОГО ФОНДА В СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЙОНАХ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

В ИЗК СО РАН усилиями лаборатории сейсмостойкого строительства и лаборатории инженерной сейсмологии и сейсмогеологии разработана и апробирована комплексная методика паспортизации зданий в сейсмических районах.

Комплексный характер предложенной методики паспортизации реализуется в процессе выполнения следующих этапов:

1 этап. Экспериментальные исследования фактической сейсмостойкости региональных типов зданий и их натурных фрагментов при высоком уровне динамической нагрузки.

2 этап. Создание опорной сети зданий-представителей (эталонных зданий).

З этап. Сплошная паспортизация, результатом которой служат усредненные оценки уязвимости застройки по площадям в масштабе города, жилого района, микрорайона, квартала. На 1-м этапе проводятся натурные испытания (вибрационные, сейсмовзрывные, с помощью знакопеременной статической нагрузки и др.) наиболее распространенных типов жилых и общественных зданий массовой застройки. Решающее условие – обеспечение высокого уровня динамического или статического нагружения, при котором отчетливо проявляется конструктивная и физическая нелинейность системы.

На 2-м этапе создается опорная сеть, которая служит для оценки макросейсмического эффекта землетрясений различной интенсивности, мониторинга изменения параметров технического состояния зданий и уточнения карт сейсмического микрорайонирования путем сопоставления реакции зданий одинаковых типов на различных грунтовых комплексах. База данных зданий опорной сети содержит цифровую и графическую информацию в электронном виде, которая пополняется и обновляется. Указанная информация служит основой для количественных оценок при построении Карт сейсмического риска.

На 3-м этапе выполняются работы по сплошной паспортизации с учетом реальных ограничений по срокам и объемам проводимых работ. В силу этих ограничений «нижняя граница» детальности сплошной паспортизации соответствует не отдельному объекту, а микрорайонному уровню. Результаты первых двух этапов паспортизации проецируются на микрорайонный уровень с усредненной оценкой уязвимости застройки, типовой характер которой способствует подобному обобщению.

Принципиальные отличия комплексной методики паспортизации зданий в сейсмических районах, разработанной ИЗК СО РАН, от существующих методик паспортизации сводятся к двум основным положениям:

1. Оценка фактической сейсмостойкости региональных типов зданий, основанной на результатах экспериментальных исследований опытных объектов при высоком уровне динамического воздействия, соизмеримом по величине с сейсмическими нагрузками реальных землетрясений, а не на экспертных оценках (зачастую субъективных).

2. Создание опорной сети зданий-представителей, служащей логическим каркасом (моделью) жилой застройки населенного пункта (с учетом объектов социально-культурного назначения).

В настоящее время в Иркутской области создана опорная сеть зданий-представителей в количестве 400 объектов в следующих городах:

Иркутск – 600 тыс. жителей, сейсмичность в баллах по карте OCP-97 составляет 8, 9, 9;

Ангарск – 242 тыс. жителей – 8, 8, 9;

Шелехов – 45 тыс. жителей – 8, 9, 10;

Байкальск – 15 тыс. жителей – 9, 9, 10;

Слюдянка (в т.ч. пос. Култук) – 20 тыс. жителей – 9, 9, 10;



Рис. 2. Город Ангарск. Ледовый дворец «Ермак». Инженерно-сейсмометрические исследования металлической мембраны пролетом 90 м.

Fig. 2. Engineering seismometric studies of the steel membrane (90 m long) in Ermak Ice Stadium located in the city of Angarsk, Irkutsk region, Russia.



Рис. 3. Прочностные испытания фрагмента покрытия ЛД «Ермак» в лаборатории ИрГТУ (Д.В. Киселев).

Fig. 3. Structural integrity test of the beam structure of Ermak Ice Stadium in the laboratory of the Irkutsk State Technical University (D.V. Kiselev).



Рис. 4. Школа в микрорайоне № 7, г. Ангарск.

Fig. 4. A school building in District 7, Angarsk.



Рис. 5. Экспериментальные формы колебаний дисков перекрытий 4-этажного учебного корпуса школы в г. Ангарске при микродинамических воздействиях.

Fig. 5. Experimental osscilations of discs of the beam structure of the 4-storeyed school building in Angarsk which was subject to miscrodynamics tests.

Иркутский, Ангарский, Усольский и Слюдянский АМО – 60 тыс. жителей.

Общее количество жителей в перечисленных населенных пунктах и районах достигает 1 млн человек.

Методы технической диагностики широко применялись при обследовании ответственных гражданских объектов. К их числу относятся: ледовый дворец «Ермак» с покрытием в виде металлической мембраны с пролетом 90 м в г. Ангарске (рис. 2, 3); экспериментальная школа в 7-м м-не с общей площадью 20 тыс. м² (рис. 4, 5); опытная 9-этажная блок-секция в каркасе серии 1.120с в г. Иркутске. В таблице 1 представлена структура методов технической диагностики, применяемых при паспортизации зданий (рис. 6).

Таблица 1. Структура методов технической диагностики

T a b l e 1. Engineering diagnostic methods

Уровень динамического (знакопеременного статического) воз- действия	Вид испытаний
Высокий уровень динамического (знакопеременного статиче- ского) воздействия	Вибрационные испытания Сейсмовзрывные испытания Знакопеременные статические испытания
Микродинамический уровень воздействия	Запись микросейсм Метод стоячих волн Воздействия импульсного типа
Прочностные испытания	С отбором образцов из деловых конструкций и лабораторными ис- пытаниями Неразрушающие методы контроля прочности Учет физического износа конструкций и материалов



Рис. 6. Отбор образцов-кернов для прочностных испытаний бетона наружной стены.

Fig. 6. Core sampling for structural integrity tests of the concrete materials of the outside wall.

4. ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СОВРЕМЕННОЙ ЗАСТРОЙКИ Г. УЛААНБААТАРА

В рамках Договора о научно-техническом сотрудничестве между ИЗК СО РАН и Исследовательским центром астрономии и геофизики АН Монголии коллективом специалистов ИЗК СО РАН (г. Иркутск) и Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ) проведено обследование современной жилой застройки г. Улаанбаатара. Исследования включали в себя: обследование и оценку состояния несущих и ограждающих конструкций зданий-представителей жилой застройки; инструментальные измерения их динамических характеристик; сбор данных о структуре жилищного фонда, необходимых для моделирования сейсмической реакции жилых домов при сильных землетрясениях.

Структура застройки Улаанбаатара отличается значительным разнообразием. Наряду с интенсивным строительством современных зданий высотой 12–16 этажей и более (рис. 7), в городе сохранился значительный панельный фонд 5- и 9- этажных жилых домов постройки 70–90-х годов (рис. 8), а также 2-3этажный жилищный фонд, состоящий из зданий с кирпичными несущими стенами и деревянными перекрытиями постройки 50-60-х годов прошлого века. Значительная доля городского населения Улаанбаатара проживает в юртах – национальном типе жилища, конструкция которого отработана веками и отличается исключительной рациональностью (рис. 9).

Население г. Улаанбаатара (по данным 2010 г.) составляло 1.2 млн человек, из них 440 тыс. человек проживали в благоустроенном жилищном фонде. Общая площадь жилищного фонда города на 2010 г. составляет 9.5 млн м². Распределение числа жителей по жилым районам представлено на рис. 10.

Цель инженерно-технического и инструментального обследования заключалась в оценке сейсмической



- Рис. 7. Современная застройка г. Улаанбаатара.
- **Fig. 7.** Building recently constructed in Ulaan Baatar, Mongolia.



Рис. 8. Надстройка панельного жилого здания, возведенного при содействии бывшего СССР, г. Улаанбаатар.

Fig. 8. The upper storey constructed on top of the panel-type house built with support of the USSR in the Soviet time. The house is located in Ulaan Baatar.



Рис. 9. Юрточный поселок, г. Улаанбаатар.

Fig. 9. Gers in Ulaan Baatar.



Рис. 10. График распределения числа жителей по районам города.

Fig. 10. The population/city district curve.

надежности и долговечности жилых домов (согласно нормам сейсмостойкого строительства РФ), возведенных в различное время на территории города.

5. Создание карт сейсмического риска для населенных пунктов Иркутской области – Ангарска, Шелехова и Байкальска

Сейсмический риск является заключительным звеном методической цепочки: сейсмическая опасность – паспортизация – сейсмическая уязвимость – сейсмический риск. Для оценки сейсмического риска и построения карт сейсмической уязвимости застройки территории необходимо располагать следующими исходными данными:

- уточненными показателями сейсмической опасности региона, включая карты сейсмического микрорайонирования основных населенных пунктов;

- уточненной структурой застройки селитебных территорий;

- результатами паспортизации жилищного фонда городов и населенных пунктов.

Комплект карт сейсмического риска для Ангарска, Шелехова и Байкальска включает в себя:

- карты уязвимости застройки (средневзвешенной степени повреждений);

 карты относительного экономического ущерба городов;

- карты уровня индивидуального сейсмического риска для населения и территории городов.

На рисунках 11–16 представлены карты сейсмического риска территории г. Байкальска при 7, 8 и 9 баллах. При составлении карт СМР использовались результаты исследований, накопленные институтом за полвека. Так, для г. Шелехова и Байкальска составители карт сейсмического риска в основном опирались на работы известных ученых – чл.-корр. АН СССР В.П. Солоненко и д.ф.-м.н. С.И. Голенецкого, автора уникального Каталога землетрясений по Восточной Сибири (рис. 17, 18).

В Сибирском федеральном округе девять областей из двенадцати расположены в сейсмической зоне. Среди них Иркутская область заметно выделяется обширностью и достоверностью базы данных по проблемам сейсмобезопасности. Чтобы построить достоверные карты сейсмического риска для других городов, нужно еще многое сделать. Например, Иркутск имеет устаревшую карту СМР, которую утвердил Госстрой РСФСР в 1988 г. С тех пор гидрогеологическая обстановка в городе заметно изменилась, что естественно отразилось на сейсмичности территории города.

6. Экспериментальные исследования

Лабораторией сейсмостойкого строительства с участием ИрГТУ, АГТА (г. Ангарск) и ряда других организаций проведены натурные испытания ряда опытных объектов.

1. Инженерно-сейсмометрические исследования динамических характеристик 4-этажного учебного блока общеобразовательной школы в м-не 7 г. Ангарска (совместно с лабораторией инженерной сейсмологии и сейсмогеологии). Прочностные испытания конструктивной ячейки перекрытия безригельного каркаса системы КУБ-1.

2. Оценка надежности крупнопанельных жилых домов первой панельной серии 1-335с, постройки 60-х годов прошлого столетия, которые обладают рядом конструктивных особенностей, неблагоприятных с точки зрения долговечности и сейсмостойкости. В течение 40-50 лет эксплуатации дома первой панельной серии подверглись значительному физическому износу. Наиболее острая ситуация сложилась в г. Ангарске. В городе находятся в эксплуатации 500 домов серии 1-335с, что составляет половину всех домов этой серии в Иркутской области. Первый дом построен в 1959 г. (рис 19, 20). Дефицит сейсмостойкости жилищного фонда серии 1-335с оценивается в 1.5-2.0 балла. В силу этих причин г. Ангарск был выбран в качестве полигона для количественной оценки предпочтительности различных вариантов решения этой проблемы.

Для решения проблемы жилищного фонда серии 1-335с были предложены три альтернативы (варианта):

Альтернатива 1: Снос 500 домов серии 1-335с. Строительство нового жилья взамен демонтированных домов для расселения жителей. Утилизация строительных отходов.

Альтернатива 2: Сохранение жилищного фонда серии 1-335с без усиления. Косметический ремонт наружных стен из газозолобетона. Восстановление жилых домов после землетрясения 8 баллов. Компенсационные выплаты за погибших и раненых согласно Федеральному закону ФЗ-225.

Альтернатива 3: Косметический ремонт наружных стен из газозолобетона. Усиление домов минимум до 7 баллов. Работы по энергосбережению (устройство вентилируемых навесных фасадов). Восстановление домов после землетрясения 8 баллов. Компенсационные выплаты за погибших и раненых.

Для оценки альтернатив использован метод анализа иерархий (табл. 2), разработанный американским математиком Т.Л. Саати. К настоящему времени метод получил широкое распространение в самых различных областях и имеет солидное математическое обоснование. Сущность метода МАИ заключается в проведении интуитивно-логического анализа проблемы с количественной или качественной оценкой суждений и формальной обработкой результатов.

Наилучшую стратегию с предпочтительностью в 50 % показала альтернатива 1. Однако ее реализация связана со значительными финансовыми затратами. Если результаты расчета для 500 жилых домов экстраполировать на весь объем жилищного фонда серии





Рис. 11. Карта сейсмического риска г. Байкальска. Уязвимость застройки города при землетрясении интенсивностью 7 баллов.

Fig. 11. Seismic risk map of the town of Baikalsk, Irkutsk region, Russia with reference to a potential earthquake intensity 7. Susceptibility of the town buildings to seismic effects.



Рис. 12. Карта сейсмического риска г. Байкальска. Относительный экономический ущерб застройки при землетрясении интенсивностью 7 баллов. **Fig. 12.** Seismic risk map of Baikalsk with reference to a potential earthquake intensity 7. Estimated economic damage of the town buildings.



Рис. 13. Карта сейсмического риска г. Байкальска. Уязвимость застройки города при землетрясении интенсивностью 8 баллов.

Fig. 13. Seismic risk map of the town of Baikalsk, Irkutsk region, Russia with reference to a potential earthquake intensity 8. Susceptibility of the town buildings to seismic effects.



Рис. 14. Карта сейсмического риска г. Байкальска. Относительный экономический ущерб застройки при землетрясении интенсивностью 8 баллов. **Fig. 14.** Seismic risk map of Baikalsk with reference to a potential earthquake intensity 8. Estimated economic damage of the town buildings.



Рис. 15. Карта сейсмического риска г. Байкальска. Уязвимость застройки города при землетрясении интенсивностью 9 баллов.

Fig. 15. Seismic risk map of the town of Baikalsk, Irkutsk region, Russia with reference to a potential earthquake intensity 9. Susceptibility of the town buildings to seismic effects.



Рис. 16. Карта сейсмического риска г. Байкальска. Относительный экономический ущерб застройки при землетрясении интенсивностью 9 баллов. **Fig. 16.** Seismic risk map of Baikalsk with reference to a potential earthquake intensity 9. Estimated economic damage of the town buildings.



Рис. 17. Карта сейсмического микрорайонирования СМР г. Байкальска (по данным В.П. Солоненко).

Fig. 17. The seismic micro-zonation map of the construction area in the town of Baikalsk, Irkutsk region, Russia (according to data published by V.P. Solonenko).



Рис. 18. Карта сейсмического микрорайонирования СМР г. Шелехова (по данным С.И. Голенецкого).

Fig. 18. The seismic micro-zonation map of the construction area in Baikalsk (according to data published by S.I. Golenetsky).



- Рис. 19. Первый 3-этажный жилой дом серии 1-335с постройки 1959 г., г. Ангарск.
- **Fig. 19.** The first house of Series 1-335c built in Angarsk in 1959.



- Рис. 20. Опытное сейсмоусиление серии 1-335с., г. Ангарск.
- **Fig. 20.** A seismic reinforcement structure of the house of Series 1-335c in Angarsk.

Таблица 2. Результаты оценки альтернатив методом МАИ

Количество критериев	Альтернативы		
	X1 – снос 1-335с; новое строительство С/стойкость 8 баллов Долговечность 100 лет S-риск 1×10 ⁻⁵	X2 – косметический ремонт наружных стен С/стойкость 6 баллов Долговечность 20 лет S-риск 20×10 ⁻⁵	X3 – сейсмоусиление серии 1-335с С/стойкость 7 баллов Долговечность 50 лет S-риск 2×10 ⁻⁵
5 3 Результат	0.491 0.495 50 %	0.152 0.140 15 %	0.357 0.365 35 %

T a b l e 2. Alternatives assessment results by MAI method

1-335с в Прибайкалье (1000 объектов), то стоимость реконструкции панельной застройки составит около 90 млрд руб. Это сумма равняется годовому бюджету Иркутской области.

Наихудшую же стратегию – игнорирование превентивных мероприятий – предлагает альтернатива 2 с уровнем предпочтительности 15 %, которая не гарантирует жителям обеспечение сейсмобезопасности в случае стихийного бедствия. К сожалению, эта наихудшая стратегия фактически реализуется в сейсмических районах Иркутской области на протяжении последних двадцати лет.

Применение метода МАИ позволило впервые получить количественные оценки *предпочтительности* вариантов (альтернатив) решения проблемы застройки первых панельных серий в сейсмическом районе: 50 %–15 %–35 % для принятых альтернатив.

3. Натурные испытания системы сейсмоизоляции в виде кинематических фундаментов типа КФ под 9этажный жилой дом серии 97с в г. Усолье-Сибирском. Техническое решение усиления конструкций заключалось в устройстве металлических связей-подкосов с упруго-фрикционными соединениями с несущими конструкциями нулевого цикла жилого дома. В результате натурных испытаний впервые была получена экспериментальная оценка порога срабатывания системы сейсмоизоляции в виде кинематических фундаментов типа КФ (рис. 21).

7. УЧАСТИЕ ЛАБОРАТОРИИ СЕЙСМОСТОЙКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА В ФЕДЕРАЛЬНЫХ И РЕГИОНАЛЬНЫХ ПРОГРАММАХ ПО СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ

1. Лаборатория сейсмостойкого строительства приняла участие в выполнении блока НИОКР федеральной целевой программы «Повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в сейсмических районах Российской Федерации на 2009–2018 гг.» (утверждена Постановлением Правительства РФ № 365-пп от 23 апреля 2009 г.).

Лаборатория выступила соисполнителем ПНИИИС

по следующим темам НИОКР:

- разработка Проекта национального стандарта Российской Федерации ГОСТ Р «Шкала интенсивности землетрясений» (главный редактор д.ф.-м.н., проф. Ф.Ф. Аптикаев, ИФЗ РАН). Проект шкалы одобрен Протоколом № 2/2013 расширенного заседания Научного совета РАН по проблемам сейсмологии от 28 ноября 2013 г.;

 разработка территориальных схем оценки уровня риска и сейсмостойкости зданий и сооружений;

- мониторинг сейсмического риска на критически важных объектах (КВО);

- развитие экспериментальной базы моделирования сценарных условий воздействия сейсмических проявлений на элементы конструкций зданий и сооружений.

2. Долговременная целевая программа «Повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в сейсмических районах Иркутской области на 2011–2018 гг.» (утверждена Постановлением Правительства Иркутской области № 293-пп от 19 ноября 2010 г.).

Лаборатория выступила ведущим исполнителем по следующим темам НИОКР:

- разработка унифицированных методов и конструктивных решений сейсмоусиления зданий и сооружений; паспортизация застройки сейсмически активных урбанизированных территорий (госконтракт № 517-000-00/11);

- составление карт сейсмического риска городов Ангарска, Шелехова и Байкальска (госконтракт 61-41-19/2013);

- разработка методических рекомендаций по проведению обследования и паспортизации зданий типовой застройки с целью определения их сейсмостойкости и целесообразности сейсмоусиления (госконтракт 61-41-16/2013).

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За время своей более чем 20-летней работы лаборатория сейсмостойкого строительства совместно с друYu.A. Berzhinsky: Experimental and theoretical studies of regional seismic safety...



Рис. 21. Схема натурных испытаний системы сейсмоизоляции в виде кинематических фундаментов типа КФ: <u></u>– основание; <u></u>– фундамент КФ; <u></u>– рама.

Fig. 21. The scheme of field tests of the seismic protection system represented by kinematic foundations (type KF): \triangle – base; \triangle – foundation KF; \triangle – grid.

гими лабораториями ИЗК СО РАН и рядом научноисследовательских организаций сумела создать базу данных по региональной сейсмобезопасности. Проведены крупномасштабные экспериментальные исследования сейсмостойкости региональных типов зданий. Разработана и внедрена методика паспортизации зданий в сейсмических районах Байкальского региона. Лаборатория приняла активное участие в выполнении блока НИОКР федеральной целевой программы по сейсмобезопасности России, в том числе в разработке Проекта Национального стандарта РФ ГОСТ Р «Шкала интенсивности землетрясений». Заключительным этапом этих работ явилось создание карт сейсмического риска территории, населения и застройки населенных пунктов региона.

9. ЛИТЕРАТУРА ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЙ 2009-2013 ГГ.

- Бержинская Л.П., Бержинский Ю.А. Методы паспортизации зданий в сейсмических районах // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36. № 2. С. 57–69.
- Бержинская Л.П., Бержинский Ю.А. Уязвимость школьного фонда г. Ангарска в рамках региональной программы по сейсмобезопасности Иркутской области // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. № 4. С. 32–35.
- Бержинский Ю.А., Бержинская Л.П. Резервы живучести безригельного каркаса при запроектных воздействиях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. № 3. С. 31–35.
- Бержинский Ю.А., Бержинская Л.П., Иванькина Л.И., Ордынская А.П., Саландаева О.И., Чигринская Л.С., Акулова В.В., Черных Е.Н. Оценка сейсмической надежности жилых и общественных зданий при землетрясении 27.08.2008 на Южном Байкале // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36. № 1. С. 23–39.
- Бержинский Ю.А., Бержинская Л.П., Иванькина Л.И., Саландаева О.И., Черных Е.Н., Шагун А.Н., Усатый Р.А., Горбач П.С., Киселев Д.В. Реализация комплексной методики паспортизации жилищного фонда на примере г. Шелехова в рамках целевой программы по сейсмобезопасности Иркутской области // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. № 2. С. 15–21.
- Бержинский Ю.А., Ордынская А.П., Гладков А.С., Лунина О.В., Бержинская Л.П., Радзиминович Н.А., Радзиминович Я.Б., Имаев В.С., Смекалин О.П., Чипизубов А.В. Опыт применения шкалы ESI 2007 для оценки интенсивности Култукского землетрясения 27.08.2008 г., Южный Байкал // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36. № 3. С. 5–26.
- Леви К.Г., Бержинский Ю.А. Экспериментальные исследования сейсмостойкости зданий и сооружений в Прибайкалье // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2009. № 1. С. 13–16.
- Леви К.Г., Бержинский Ю.А. Развитие экспериментальной базы моделирования сейсмических воздействий на элементы зданий и сооружений // Проектирование и строительство в Сибири. 2011. № 2. С. 29–33.
- Ордынская А.П. Интегральная оценка интенсивности проявлений землетрясений в природной среде и техносфере // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2010. № 5. С. 45–53.

Татьков Г.И., Базаров А.Д., Бержинская Л.П., Демберел С. Сейсмическая надежность жилой застройки г. Улаанбаатара // Вестник ВСГУТУ. 2012. № 1 (36). С. 223–228.



Бержинский Юрий Анатольевич, канд. геол.-мин. наук, зав. лабораторией сейсмостойкого строительства Институт земной коры СО РАН 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия ⊠ e-mail: berj@crust.irk.ru

Berzhinsky, Yuri A., Candidate of Geology and Mineralogy, Head of the Laboratory of Earthquake-Proof Construction Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS 128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia ⊠ e-mail: berj@crust.irk.ru PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2014 VOLUME 5 ISSUE 1 PAGES 201-221

http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0124



ISSN 2078-502X

GEOLOGICAL MEDIUM AND UNDERGROUND HYDROSPHERE

S. V. Alekseev, E. A. Kozyreva

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: The article informs about the history, the staff, researches and scientific activities of the Laboratory of Hydrogeology and the Laboratory of Engineering Geology and Geoecology of the Institute of the Earth's Crust, SB RAS. It reviews the major results of scientific research projects implemented from 2009 to 2013, which provided for determination of characteristics of the geological medium and hydrosphere of East Siberia and Mongolia in natural and technogenic conditions and modeling of the evolution of natural, natural-technogenic hydrogeological and engineering geological systems in regions with contrasting climate conditions and specific geological settings.

Key words: underground hydrosphere, mineral, thermal, industrial underground water, hydrogeological systems, stable isotopes, geological medium, natural-technogenic systems, exogenic geological processes, East Siberia, Mongolia.

Citation: Alekseev S.V., Kozyreva E.A. 2014. Geological medium and underground hydrosphere. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (1), 201–221. doi:10.5800/GT-2014-5-1-0124.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СРЕДА И ПОДЗЕМНАЯ ГИДРОСФЕРА

С. В. Алексеев, Е. А. Козырева

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация: В настоящей статье представлены материалы по истории, кадровому составу, научной и научно-организационной деятельности лаборатории гидрогеологии и лаборатории инженерной геологии и геоэкологии Института земной коры СО РАН. Основная часть статьи посвящена результатам научно-исследовательских работ 2009– 2013 гг., позволившим охарактеризовать состояние геологической среды и подземной гидросферы Восточной Сибири и Монголии в природных и техногенных условиях, а также создать модели эволюции природных, природно-техногенных гидрогеологических и инженерно-геологических систем в регионах с контрастными климатическими условиями и геолого-структурной обстановкой.

Ключевые слова: подземная гидросфера, минеральные, термальные, промышленные подземные воды, гидрогеологические системы, стабильные изотопы, геологическая среда, природно-технические системы, экзогенные геологические процессы, Восточная Сибирь, Монголия.

1. Введение

Геологическая среда – открытая иерархически устроенная термодинамическая система. Являясь важнейшим элементом литосферы, она определяет жизнедеятельность человека и биосферы в целом.

Состояние геологической среды — важнейший параметр, интегрирующий результаты воздействия различных природных и техногенных факторов. Эволюционируя, оно стремится к равновесию с изменяющейся во времени внешней средой. При этом происходит цепь взаимосвязанных процессов трансформации компонентов геологической среды — горных пород, подземных вод, природных газов, биоты, физических полей и т.д. Расширение и углубление знаний об особенностях эволюции геологической среды дает определенный ключ к пониманию важнейших функций литосферы — ресурсной, геодинамической, геохимической. Энергетика системы вода-порода-газ-живое вещество



Рис. 1. Д. г.-м. н., профессор В.Г. Ткачук.

Fig. 1. Prof. Tkachuk V.G., Doctor of Geology and Mineralogy.

и массообмен в ее границах – сущность направления мировых исследований XXI в.

Отдел гидрогеологии и инженерной геологии под руководством д.г.-м.н. С.В. Алексеева многие годы выполняет научно-исследовательские работы по одному из основных направлений деятельности Института земной коры СО РАН – «Ресурсы, динамика подземных вод и геоэкология». Отдел включает лабораторию гидрогеологии (зав. лаб. д.г.-м.н. С.В. Алексеев) и лабораторию инженерной геологии и геоэкологии (зав. лаб. к.г.-м.н. Е.А. Козырева).

2. ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОДЗЕМНОЙ ГИДРОСФЕРЕ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

2.1. КРАТКАЯ ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Лаборатория гидрогеологии основана в 1953 г. доктором геолого-минералогических наук, профессором Валентиной Георгиевной Ткачук (рис. 1). Создание лаборатории явилось началом систематических исследований подземной гидросферы Восточной Сибири.

На первом этапе (1953–1960 гг.) осуществлялись региональные исследования, гидрогеологическое картирование и изучение минеральных вод. С 1961 по 1979 г. (заведующий Е.В. Пиннекер) решались проблемы генезиса и формирования различных геохимических типов подземных вод, в т.ч. концентрированных рассолов, развивалось учение о подземном стоке, проводились научно-прикладные исследования гидрогеологических условий зоны БАМ. Из других направлений следует выделить гидрогеологию месторождений полезных и скопаемых, поиски месторождений минеральных и пресных подземных вод и изотопную гидрогеологию.

С 1979 по 1995 г. действовали две лаборатории гидрогеологического профиля по руководством чл.корр. РАН, проф. Е.В. Пиннекера и д.г.-м.н., проф. Б.И. Писарского (рис. 2). В 1995 г. они объединены в одну структурную единицу. Главным направлением исследований этих лет стало выявление роли воды в геологических процессах и изучение закономерностей формирования подземных вод.

Важнейшим достижением Е.В. Пиннекера и его коллег стала шеститомная монография «Основы гидрогеологии», не имеющая аналогов в России и за рубежом. Два тома этого уникального труда были переизданы в Англии и Германии. Е.В. Пиннекер, Б.И. Писарский и И.С. Ломоносов были удостоены Государственной премии СССР в области науки и техники. Полученные важнейшие научные результаты позволили гидрогеологам института прочно закрепиться на мировом уровне.

В 2001 г. лабораторию возглавил ученик и последователь Е.В. Пиннекера С.В. Алексеев. В настоящее время в штате структурной единицы института 18



Рис. 2. Чл.-корр. РАН, профессор Е.В. Пиннекер и д.-г.-м.н., профессор Б.И. Писарский.



сотрудников, из них 2 доктора и 6 кандидатов наук (рис. 3).

Под руководством д.г.-м.н.С.В. Алексеева коллектив лаборатории участвовал в реализации научных проектов «Массо- и энергообмен в подземной гидросфере Восточной Сибири и Монголии», «Модели эволюции природных, природно-техногенных гидрогеологических и инженерно-геологических систем в ре-



Рис. 3. Коллектив лаборатории гидрогеологии (2014 г.). В первом ряду, слева направо: к.г.-м.н. Ю.И. Кустов, В.А. Плешевенкова, А.Г. Томилова, Л.А. Дурбан, Л.А. Черных, И.Г. Крюкова. Во втором ряду, слева направо: П.С. Бадминов, А.И. Оргильянов, к.г.-м.н. Л.П. Алексеева, к.г.-м.н. А.М. Кононов, д.г.-м.н. С.В. Алексеев – зав. лабораторией, к.г.-м.н. М.А. Данилова, к.г.-м.н. С.Х. Павлов, П.А. Шолохов.

Fig. 3. The staff of the Laboratory of Hydrogeology in 2014 (left to right): 1st row – Yu.I. Kustov, V.A. Pleshevenkova, A.G. Tomilova, L.A. Durban, L.A. Chernykh, I.G. Kryukova; 2nd row – P.S. Badminov, A.I. Orgilianov, L.P. Alekseeva, A.M. Kononov, S.V. Alekseev (Head of the Laboratory), M.A. Danilova, S.Kh. Pavlov, P.A. Sholokhov.



Рис. 4. Строение криолитозоны криогидрогеологических систем Якутской алмазоносной провинции (*A* – Оленек-Мархинской, *Б* – Вилюй-Ботуобинской).

1—4 — породы: 1 — мерзлые, 2 — морозные, 3 — охлажденные, 4 — с положительной температурой; 5—9 подземные воды: 5 — пресные в твердой фазе, 6 — солоноватые в твердой фазе, 7 — соленые внутри- и межмерзлотные, 8 — соленые, слабые и крепкие рассолы, 9 — крепкие и весьма крепкие рассолы.

Fig. 4. Cryolitic zones of cryohydrogeological systems of the Yakutian diamond-bearing province, the Republic of Yakutia (Sakha), Russia (*A* – Olenek-Markha; *B* – Vilyui-Botuoba).

1-4 – rocks: 1 – permafrost, 2 – frosted, 3 – with negative temperatures, 4 – with positive temperatures; 5-9 – underground waters: 5 – fresh in solid phase, 6 – salted water in solid phase, 7 – intra- and inter-permafrost salted water, 8 – salted water, weak and strong brine, 9 – strong and very strong brine.

гионах с контрастными климатическими условиями и геолого-структурной обстановкой», «Состояние геологической среды и подземной гидросферы Восточной Сибири в природных и техногенных условиях», «Природно-техногенные процессы в геологической среде и подземной гидросфере нефтегазоносных районов Восточной Сибири и сопредельных территорий».

В настоящее время усилия исследователей направлены на количественную оценку природных и техногенных процессов, происходящих в подземной гидросфере осадочных бассейнов Сибирской платформы и Байкальской рифтовой зоны в рамках Программы СО РАН VIII.73.3. «Эволюция гидрогеологических систем осадочных бассейнов Сибири» на 2013–2016 гг.

2.2. Важнейшие научные результаты исследований лаборатории гидрогеологии в 2009–2013 гг.

2.2.1. Пресные подземные воды

Получены новые данные о гидрогеологических условиях надтрапповой части осадочного чехла на Верхнечонском нефтегазоконденсатном месторождении (рис. 4). В пределах верхней 500-метровой толщи выделены четыре основных водоносных комплекса отложений юры, среднего-верхнего и нижнего кембрия. Установлено, что основные ресурсы пресных подземных вод приурочены к карбонатно-терригенным породам верхоленской свиты среднего-верхнего кембрия. В



Рис. 5. Изменение основных гидрогеохимических характеристик азота и метана в зависимости от степени взаимодействия воды с алевролитом при T=45 °C и P=80 бар.

1 - pH; 2 - Eh; 3 - минерализация (мг/кг H₂O); содержание компонентов в воде (мг/кг H₂O): $4 - CH_4$, $5 - N_2$; твердая фаза (весовые %): 6 - гиббсит, 7 - рутил, 8 - каолинит, 9 - магнетит, 10 - пирит, 11 - клинохлор, 12 - аннит, 13 - кварц, 14 - сфен, 15 - мусковит, 16 - анкерит, 17 - анальцим.

Fig. 5. Changes of main hydrochemical characteristics of nitrogen and methane depending on interaction between water and aleurolite at T=45 °C and P=80 bar.

1 - pH; 2 - Eh; 3 - salinity (mg/kg of H₂O); contents of components in water (mg/kg of H₂O): $4 - CH_4$, $5 - N_2$; solid phase (weight %): 6 - gibbs-ite, 7 - rutile, 8 - kaolinite, 9 - magnetite, 10 - pyrite, 11 - clinochlore, 12 - annite, 13 - quartz, 14 - sphen, 15 - muscovite, 16 - ankerite, 17 - analcime.

границах горного отвода на участке локализации стока сосредоточены ресурсы, равные 0.43 м³/с, что составляет примерно 80 % всего подземного стока лицензионного отвода. Все участки локализации при модуле 0.2 л/с·км² продуцируют не более 0.2 м³/с. С увеличением объема нефтедобычи и водоотбора для поддержания пластового давления при общей потребности, оцениваемой в 540 л/с, выявленные ресурсы окажутся достаточными только в годы высокой водности, которые фиксируются 2–4 раза в 10–12 лет. Таким образом, с наступлением маловодного периода неизбежно произойдет сработка ресурсов, возобновление которых будет возможно только в последующие годы большой водности.

По хлор-индикатору, эмиссия которого происходит из разнообразных поверхностных и подземных источников загрязнения, оценена уязвимость подземных вод. Хлор в количествах, превышающих в сотни раз фоновый уровень, установлен во всех типах водопунктов: поверхностных водах, родниках, скважинах. Разработаны два сценария изменения гидрогеодинамической обстановки: депрессивный (добыча подземных вод для поддержания пластового давления) и репрессивный (закачка подогретых вод в продуктивный пласт). По обоим сценариям происходят неблагоприятные изменения гидрогеохимической обстановки [Шенькман, 2013а, 20136].

2.2.2. Минеральные и термальные подземные воды

Составлена карта минеральных лечебных вод Тункинской группы впадин Байкальской рифтовой зоны, частично охватывающая территорию гидроминеральных областей: Восточно-Саянской – углекислых холодных и термальных вод и Байкальской – азотных, углекислых и метановых термальных вод (рис. 5). На карте отображено распространение кристаллических пород горно-складчатого обрамления и межвпадинных



Рис. 6. Распространение водоносных комплексов на Верхнечонском нефтегазоконденсатном месторождении.

1–3 – водоносные комплексы отложений: 1 – терригенных юрских, 2 – терригенных верхоленской свиты среднего-верхнего кембрия, 3 – карбонатных литвинцевской свиты нижнего-среднего кембрия; 4–6 – скважины, вскрывшие воды: 4 – верхоленской свиты, 5 – литвинцевской свиты, 6 – ангарской свиты нижнего-среднего кембрия: а – в надтрапповом, б – в подтрапповом слоях; 7 – фонтанирующие скважины; 8–10 – уровенные поверхности водоносных комплексов: 8 – гидроизогипсы верхоленского; пьезоизогипсы: 9 – литвинцевского, 10 – ангарского: а – надтраппового, б – подтраппового; 11 – граница участка, где пьезоповерхность литвинцевского комплекса находится выше земной поверхности; 12 – разлом: а – водовыводящий; 6 – водопроводящий; 13 – граница лицензионного отвода; 14 – основной участок нефтедобычи; 15 – предполагаемый подземный водораздел верхоленского водоносного комплекса.

Fig. 6. Water-bearing complexes in the Verkhnechonskoe oil and gas field.

1-3 – water-bearing complexes of sediments: 1 – terrigenous of the Jurassic, 2 – terrigenous of the Upper Lena suite of the Upper-Middle Cambrian, 3 – carbonate of the Litvintsevskaya suite of the Upper-Middle Cambrian; 4-6 – wells with water in: 4 – the Upper Lena suite, 5 – the Litvintsevskaya suite, 6 – the Angarskaya suite the Lower Cambrian: a – in the layer above trappes, 6 – in the layer below trappes; 7 – wells with natural flow; 8-10 – levels of water complexes: 8 – the Upper Lena water table contour; piezometric contours: 9 – Litvintsevsky, 10 – Angarsky: a – above trappe, 6 – below trappe; 11 – boundary of the site where the piezometric contour of the Litvintsevsky complex is above the ground surface; 12 – fault: a – water extraction, 6 – water transfer; 13 – boundary of the license area; 14 – main oil production site; 15 – assumed underground watershed of the Upper Lena water-bearing complex.

перемычек, вулканогенных и терригенных пород осадочного чехла впадин; показаны проявления и месторождения минеральных вод: азотные, метановые, углекислые; радоновые, сероводородные, железистые; холодные, термальные; состав минеральных вод, состав растворенных газов по преобладающему компоненту, бальнеотерапевтически активный компонент и температура воды [*Кустов, 2009*].

В результате моделирования физико-химических

процессов в системе «вода – алюмосиликатные осадочные породы» впервые прослежен механизм образования углеводородных и азотных газов в формирующихся гидрокарбонатных натриевых термальных водах, в реальных условиях распространенных в осадочной толще Тункинской впадины Байкальской рифтовой зоны (рис. 6).

Установлено, что образование азота и метана может происходить не только в результате биохимических,



Рис. 7. Геоэлектрический разрез и схема продольного сопротивления горных пород усольской свиты нижнего кембрия юго-восточного крыла Жигаловского вала Сибирской платформы.

Fig. 7. The geoelectrical profile and the longitudinal resistance scheme of rocks in the Usolskaya suite of the Lower Cambrian in the south-eastern segment of the Zhigalovsky embankment of the Siberian platform.

термических и термокаталитических превращений органического вещества. Эти газы также образуются в породах, содержащих органическое вещество в процессе его гидролитического диспропорционирования. Соотношение между азотом и метаном в растворе зависит от формы углерода, содержащегося в осадочных образованиях, а устойчивый рост их содержания – от степени взаимодействия воды с породой. На основе полученных данных и результатов полевых гидрогеохимических исследований сформулирован принципиальный вывод о существовании в Тункинской впадине современной водонапорной системы с элизионным типом водообмена и седиментационном генезисе метановых термальных подземных вод, а не их инфильтрогенной или ювенильной природе [Павлов, Чудненко, 2011].

В системе «вода – гранит» определена стадийность аутигенного минералообразования, его роль в формировании кислотно-щелочного равновесия, окислительно-восстановительного потенциала, минерализации и состава растворов. Доказано, что в результате гидролитического воздействия воды на гранит, содержащий в своем составе летучие в кларковых концентрациях, могут сформироваться растворы, в которых анионы содержатся в количестве, фиксируемом в азотных термах, но при более высокой, редко встречающейся величине минерализации [Павлов, Чудненко, 2013а, 2013б].

2.2.3. Промышленные подземные воды

Созданы гидрогеологические и геолого-геофизические модели залегания глубоких поликомпонентных промышленных рассолов в разрезе осадочного чехла юга Сибирской платформы. Методом глубинной электроразведки (ЗСБ) по геоэлектрическим свойствам горных пород выявлены зоны низких (25-100 Ом м) значений сопротивления, протягивающиеся с югозапада на северо-восток вдоль Жигаловского вала. На этой основе установлены закономерности локализации в плане и в разрезе рассолоносных зон, приуроченных к аномально проницаемым коллекторам в межсолевых карбонатных горизонтах галогенно-карбонатной гидрогеологической формации нижнего кембрия (рис. 7). В ходе бурения нефтеразведочной скважины на юговосточном крыле Жигаловского вала в интервале глубин 2040-2240 м вскрыты весьма крепкие хлоридные кальциевые рассолы с минерализацией 458 г/л и дебитом на изливе 3000 м³/сут. Метод ЗСБ может успешно использоваться в комплексе геологоразведочных работ на стадии общих и детальных поисков глубокозалегающих металлоносных промышленных рассолов [Рябцев и др., 2013].

Получены новые данные о распространении и геохимических особенностях литиеносных подземных вод Иркутской области и Западной Якутии, выполнено таксономическое расчленение гидрогеологического



Рис. 8. Значения δ³⁷Cl в соленых водах и рассолах осадочных бассейнов Сибирской, Северо-Американской и Южно-Американской платформ, а также Канадского и Фенноскандинавского кристаллических щитов.

Fig. 8. Values of δ^{37} Cl in salted waters and brines of sedimentary basins located at the Siberian, North American and South American platforms and the Canadian and Fennoscandian crystalline shields.

разреза Сибирской платформы, и выделены перспективные рассолоносные зоны. Рассолы Сибирской платформы по концентрации лития сопоставимы с месторождениями (рапа озер) Цайдамской котловины Китая (Ситай и Дунтай) и Силвер Пик в США. Использование комплексной инновационной схемы переработки гидроминерального сырья Сибирской платформы позволит обеспечить производство соединений лития с низкой себестоимостью и вывести из стагнации литиевую отрасль России [Алексеев и др., 2012а, 20126].

2.2.4. Стабильные изотопы в подземных водах

Выявлено распределение стабильного изотопа δ³⁷Cl в соленых водах и рассолах осадочных бассейнов Сибирской, Северо-Американской и Южно-Американской платформ, а также Канадского и Фенноскандинавского кристаллических щитов. Установлено, что для весьма крепких хлоридных кальциевых рассолов подсолевых и межсолевых водоносных комплексов осадочных бассейнов характерны наиболее низкие значения δ^{37} Cl (-1.2...+0.4 ‰), отражающие процессы испарительного концентрирования на ранних стадиях формирования маточной рапы (рис. 8). Хлоридные натриевые рассолы выщелачивания надсолевых водоносных комплексов в осадочных бассейнах, как правило, занимают промежуточное положение и в целом характеризуются небольшим диапазоном значений δ^{37} Cl (-0.3...+0.5 ‰). Особую группу образуют подземные воды с широким диапазоном значений δ^{37} Cl и

выраженным смещением в положительную сторону. К ним относятся седиментогенные хлоридные рассолы терригенно-карбонатных толщ (δ^{37} Cl –0.3...+1.4 ‰), в формировании которых важную роль сыграли процессы диффузии и ионной фильтрации, а также рассолы кристаллических щитов (δ^{37} Cl –0.78...+1.52 ‰) с более выраженным влиянием процессов взаимодействия в системе «вода – порода».

2.2.5. Эволюция криогидрогеологических систем

Определены основные этапы позднекайнозойской эволюции криогидрогеологических систем Якутской алмазоносной провинции в связи с динамикой климата, оледенениями и дегляциацией, регрессиями и трансгрессиями моря, изменением свойств горных пород и подземной гидросферы. Получены новые данные, и уточнены геокриологический (тепловое состояние горных пород, мощность, строение криолитозоны) и гидрогеологический (основные водоносные комплексы, гидрогеохимическая зональность, геохимические типы подземных вод) разрезы систем, разработана региональная схема криогенного метаморфизма подземных вод, выявлены ведущие факторы формирования их химического состава в зонах активного и затрудненного водообмена, выделен преобладающий тип техногенеза в ходе разработки месторождений алмазов (рис. 9). Созданные теоретические модели эволюции криогидрогеологических систем явились качественно новым звеном в теории развития мерзлых толщ и подземной гидросферы в четвертичном периоде [Алексеев, 2009].

2.2.6. Геологическая среда

На примере Шишкинской писаницы – особого объекта древнего наскального искусства Северной Азии, изученного с позиций геологического строения и закономерностей формирования склонов, впервые разработаны подходы к комплексному изучению археологических памятников и принципы информационного обеспечения их подготовки к музеефикации. Показана значимость геолого-геоморфологических особенностей массива скальных пород для обоснования относительного возраста плоскостей наскальной живописи [*Мельникова и др., 2011*].

Проекты лаборатории по планам НИР входят в число приоритетных направлений фундаментальных, ориентированных фундаментальных и прикладных исследований СО РАН, поддержаны грантами РФФИ, проводятся в рамках междисциплинарных интеграционных проектов и обеспечены хоздоговорами.

Научно-организационная деятельность лаборатории связана с работой Комиссии по изучению подземных вод Сибири и Дальнего Востока СО АН СССР (1959– 1991 гг.), секции Сибири и Дальнего Востока Научного совета РАН по геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, проведением многочисленных региональных и всероссийских совещаний.

Сотрудники лаборатории работают в кооперации с лабораториями институтов СО РАН и вузами Иркутска, Красноярска, Новосибирска, Томска, Тюмени, Улан-Удэ, Читы, Якутска, тесно сотрудничают с учеными Германии, Канады, Китая, Монголии, США, Франции. Многие годы проводится подготовка специалистов высшей квалификации – кандидатов и докторов наук. Успешно работает совет по защитам докторских диссертаций по специальностям 25.00.07 – гидрогеология и 25.00.08 – инженерная геология, грунтоведение и мерзлотоведение.

Перспективы дальнейшего развития лаборатории определяются наличием сложившейся и успешно развивающейся гидрогеологической школы, основателем которой является выдающийся исследователь подземной гидросферы Е.В. Пиннекер.

3. Экзогеодинамика юга Восточной Сибири и Монголии

3.1. КРАТКАЯ ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Лаборатория инженерной геологии и геоэкологии. Направление инженерной геологии, идейным организатором которого являлся М.М. Одинцов, развивается в институте с 1949 г. У истоков инженерно-геологических исследований в Восточной Сибири стояли Г.Б. Пальшин (лаборатория динамики склонов), Е.К. Гречищев, В.И. Астраханцев (лаборатория геодинамики водохранилищ), Ф.Н. Лещиков (лаборатория мерзлотоведения и грунтоведения). Долгие годы руководителем инженерно-геологического сектора (с 1968 по 2004 г. заведующий лаборатории) был Ю.Б. Тржцинский, который и возглавил в 1995 г. при объединении лабораторий единую лабораторию инженерной геологии и геоэкологии (рис. 10). В период 2004-2005 гг. заведующим лаборатории был Г.И. Овчинников.

За прошедший исторический период были получены значимые научные результаты, оказавшие существенное влияние на социально-экономическое развитие Сибирского региона. Вышли в свет специализированные инженерно-геологические карты, выполнены научно-теоретические разработки по планированию и прогнозу положения береговой зоны водохранилищ Ангарского каскада ГЭС, выявлены региональные особенности развития основных экзогенных процессов Восточной Сибири, положено начало изучению лессовых грунтов региона. Результаты исследований обобщены в серии монографий: «Инженерная геология Прибайкалья», 1963, «Геология и сейсмичность зоны БАМ», 1985, «Братское водохранилище», 1963, и др.

Установлены основные закономерности формирования и распространения сезонно- и многолетнемерз-



Рис. 9. Карта минеральных лечебных вод Тункинской группы впадин зоны Байкальского рифта.

Fig. 9. The mineral water map of the Tunka group of valleys of the Baikal rift.

S.V. Alekseev, E.A. Kozyreva: Geological medium and underground hydrosphere

210



- Рис. 10. Д.г.-м.н. Ю.Б. Тржцинский.
- **Fig. 10.** Trzhtsinsky Yu.B., Doctor of Geology and Mineralogy.

лых пород юга Восточной Сибири, предложены принципы инженерно-геологического районирования, изучены микроструктуры глинистых и лессовых грунтов, исследованы их тиксотропно-реологические свойства. Выполнено теоретическое обобщение инженерно-геологических обстановок зон влияния Ангаро-Енисейского каскада ГЭС. Опубликованы монографии: «Проблемы охраны геологической среды (на примере Восточной Сибири)», 1993, «Изменение геологической среды в зонах влияния Ангаро-Енисейских водохранилищ», 1999, «Грунты юга Восточной Сибири и Монголии», 1998, «Современная экзогеодинамика юга Сибирского региона», 2006, «Экзогенные процессы в геологической среде. Оценка природных опасностей», 2008.

С 2006 г. лабораторию инженерной геологии и геоэкологии возглавляет Е.А. Козырева. В настоящее время в лаборатории трудятся: 1 доктор и 6 кандидатов наук, 1 н.с. без степени, 1 аспирант и 8 сотрудников инженерного состава (рис. 11). Научно-исследовательские работы проводились в рамках проектов: «Состояние геологической среды и подземной гидросферы Восточной Сибири в природных и техногенных условиях»; «Природно-техногенные процессы в геологической среде и подземной гидросфере нефтегазоносных районов Восточной Сибири и сопредельных территорий». В настоящее время реализуется научный проект «Экзогенные геологические процессы Монголо-Сибирского региона: факторы развития, современная динамика и степень опасности». Выполняются работы международного сотрудничества с Монголией, Польшей, Италией, Великобританией, США.

Научно-организационная деятельность лаборатории связана с участием в работах экспертных комиссий по вопросам геоэкологической безопасности, сотрудничеству с Министерством природных ресурсов Иркутской области. В 2013 г. по заказу Федерального агентства водных ресурсов проведена III Международная конференция «Создание и использование искусственных земельных участков на берегах и акватории водоемов». Исследовательские работы осуществляются в кооперации с коллегами из Тихоокеанского института географии ДВО РАН, Института географии РАН, Института водных и экологических проблем СО РАН, Национального исследовательского ИрГТУ, ИГУ. Современная инновационная направленность научных исследований обеспечена преемственностью в развитии знаний инженерно-геологического направления и научным потенциалом кадрового состава подразделения.



Рис. 11. Коллектив лаборатории инженерной геологии и геоэкологии.

Первый ряд: к.г.-м.н. А.А. Рыбченко, Ю.С. Тарасова, Л.Д. Баскакова, Т.В. Буддо, к.г.-м.н. А.В. Кадетова, В.А. Пеллинен, к.г.-м.н. Е.А. Козырева – зав. лабораторией. Второй ряд: М.В. Данилова, к.г.-м.н. О.А. Мазаева, к.г.-м.н. В.В. Акулова, В.В. Бехтерева, д.г.-м.н. Т.Г. Рященко, Г.И. Кустова, Е.В. Мартынюк, А.А. Светлаков.

Fig. 11. The staff of the Laboratory of Engineering Geology and Geoecology.

1st row – A.A. Rybchenko, Yu.S. Tarasova, L.D. Baskakova, T.V. Buddo, A.V. Kadetova, V.A. Pellinen, E.A. Kozyreva (Head of the Laboratory); 2nd row – M.V. Danilova, O.A. Mazaeva, V.V. Akulova, V.V. Bekhtereva, T.G. Ryashchenko, G.I. Kustova, E.V. Martynyuk, A.A. Svetlakov

3.2. Важнейшие научные результаты исследований лаборатории инженерной геологии и геоэкологии в 2009–2013 гг.

3.2.1. Состояние геологической среды в условиях техногенеза

Впервые для города Иркутска выполнен анализ механизмов развития экзогенных процессов, определена группа ведущих процессов, влияющих на формирование современного состояния геологической среды города. Не выявлено отличий в механизмах развития природных и природно-техногенных процессов, они схожи и определяются комплексом природных и техногенных факторов, что позволило определить техногенез как ведущий процессообразующий фактор на современном этапе эволюционного развития геологической среды города. Построенные электронные инженерно-геодинамические карты гравитационных,

эрозионных, абразионных, суффозионно-просадочных процессов отражают вероятностно-площадное распространение процессов на территории города Иркутска и демонстрируют наиболее опасные участки с высоким риском деформаций зданий и сооружений (рис. 12). Установлено, что глубина трансформации геологической среды определяется природными особенностями вмещающих горных пород (морфология поверхности), свойствами геологической среды (структура и свойства отложений), а также степенью эволюции компонентов геологической основы и сочетанием различных техногенных факторов, проявляющихся как последовательно, так и одновременно. Использование инженерно-геологических карт с оценкой степени опасности экзогенных процессов для территории города способствует повышению геоэкологической безопасности при планировании городского пространства [Рыбченко и др., 2012; Козырева и др., 2012].



Рис. 12. Инженерно-геодинамические карты: *а* – суффозионно-просадочного процесса; *б* – подтопления; *в* – эрозионного процесса; *г* – гравитационного процесса.

Вероятность развития процесса: 1 – высокая; 2 – средняя; 3 – низкая; 4 – техногенное подтопление.

Fig.12. Engineering geodynamics maps: a – subsoil erosion and sinking; 6 – water flooding; e – erosion; z – gravity process. Process development potential: 1 – high; 2 – medium; 3 – low; 4 – technogenic flooding.





Fig. 13. 3D model of the local bank geosystem, 2010. Location: the southern part of the Bratsk water reservoir.



Рис. 14. Годовой цикл осадков и периоды активизации экзогенных процессов.

1 – суточное количество осадков; 2 – характеристика талого стока по запасам воды в снегах; 3 – период активизации экзогенных процессов; 4 – температура воздуха.

Fig. 14. The annual precipitation cycle and periods of activation of exogenous processes.

1 – daily precipitation; 2 – characteristics of snowmelt runoff by water and snow reserves; 3 – periods of activation of exogenous processes; 4 – air temperature.

3.2.2. Природно-технические геосистемы – водохранилища

Мониторинг развития экзогенных геологических процессов на ключевых участках юга Восточной Сибири позволил получить новые представления о развитии геологической среды в условиях техногенеза. На основе построения и сопоставления разновременных геодинамических моделей локальных береговых геосистем получена принципиальная модель трансформации береговых склонов вследствие влияния внешних факторов: природных (климатические) и техногенных (колебание уровня воды в водохранилище) (рис. 13).

Установлена последовательная смена механизма трансформации локальной геосистемы через синергетические эффекты (деформации) от совместного развития береговых процессов:

 взаимодействие процессов происходит постоянно, ведущий процесс изменяется во времени и контролируется воздействием внешнего фактора: природного или техногенного;

 оползневые и эрозионные процессы в пределах локальной геосистемы являются антагонистами, а их совместное развитие усиливает трансформацию берегового склона во времени;

 – оползневая активность снижается в период низкого положения уровня воды, однако при повышении уровня устойчивость склона переходит в неустойчивое состояние вследствие абразии;

– активизация глубинной эрозии при понижении уровня воды в водохранилище, абразионный размыв берегового склона вызывают нарушение продольного профиля равновесия эрозионных форм, что способствует сохранению высокой динамики эрозионного процесса [*Мазаева и др., 2011, 2014*].

Полученная модель трансформации геосистемы позволяет в зависимости от заданного параметра внешнего фактора прогнозировать состояние берегового склона в схожих литолого-геоморфологических условиях побережья регулируемого водоема. На основе детального анализа характера распределения и количества атмосферных осадков как фактора образования оврагов и снижения устойчивости склона выявлены благоприятные временные периоды для развития деформаций: периоды талого (март – апрель) и ливневого (июль – сентябрь) стока (рис. 14). Впервые определены временные периоды активизации береговых процессов неволнового характера для водохранилищ Восточной Сибири [*Mazaeva et al., 2013*].

3.2.3. Лессовый литогенез и техногенные литосистемы

На основе принципов регионального грунтоведения предложена комплексная методическая схема лабораторных исследований грунтов, которая включает раз-



Рис. 15. Заброшенные дачные участки в районе терриконов Черемховского угольного месторождения в связи с высоким загрязнением почвы серой (*a*).

На фрагментах отражены фумарольные зоны «дымящегося» террикона (б) с друзами (в) и почковидными (г) образованиями серы.

Fig. 15. Gardening land lots in the vicinity of gob piles of the Cheremkhovo coal deposit field, which are abandoned because the soil is highly contaminated with sulfur (*a*).

Inserts show fumarole zones of the 'smoldering' gob pile (6) with sulfur druses (6) and nodules (2).

работанные методы «Микроструктура» и программный комплекс «Decompose» [*Рященко*, 2010]. На основе выявленных закономерностей формирования региональных проблемных грунтов (лессовых, глинистых и песчаных), которые обладают набором противоречивых свойств, предложен метод расчета интегрального индекса устойчивости территориальной системы «грунтовые толщи – природно-техногенные геологические процессы» к геодинамическим воздействиям [*Рященко*, 2013]. При изучении лессового литогенеза на территории юга Восточной Сибири установлена ведущая роль криогенного фактора на фоне интенсивной карбонатизации осадков, влияние геологического субстрата (характер распространения различных



Рис. 16. А – распределение спелеотем U-Th возраста ($\pm 2\sigma$) во времени и пространстве (n – общее количество датировок для каждой пещеры, в том числе за пределами U-Th диапазона). Серые вертикальные полосы показывают периоды роста спелеотем в Охотничьей и Ботовской пещерах. В – δ 18О в бентосных фораминиферах океана с номерами MIS (морские изотопные стадии). С – концентрация биогенного кремнезема в донных отложениях озера Байкал (%). D – сравнение температуры поверхности Тихого океана (SST – sea surface temperature) по соотношению Mg/Ca с доиндустриальной температурой позднего голоцена (SST показана красной пунктирной линией). Е и F – содержание CH₄ и CO₂ в записи кернов с Антарктической станции Восток (EPICA). G – летняя инсоляция при 55 ° N.

Fig. 16. A – distribution of speleothems of U-Th age $(\pm 2\sigma)$ in time and space $(n - total number of datings for each cave, including those outside the U-Th range). Grey vertical bands show periods when speleothems grew in the Okhotnichiya and Botovskaya caves. B – <math>\delta$ 18O in benthic foraminifers of the ocean with MIS numbers. C – concentration of biogenic silicon oxide in bottom sediments of Lake Baikal (%). D – comparison between the sea surface temperature (SST) of the Pacific ocean against Mg/Ca and the pre-industrial temperature of the Late Holocene (SST is shown by the red dotted line). E, F – contents of CH₄ and CO₂ in core samples from the Vostok station in Antarctica (EPICA). G – summer insulation at 55°N.



Рис. 17. Образец сталактита из Ботовской пещеры, анализируемый различными методами.

Fig. 17. A stalactite sample from the Botovskaya cave which is studied by various methods.

геологических формаций) и возможность развития этих процессов в голоцене, включая исторический период [*Рященко и др., 2011, 2012*].

По результатам изучения техногенных литосистем городских территорий юга Восточной Сибири получен фактический материал о техногенно-переотложенных юрских угленосных отложениях. Изученные терриконы и отвалы Иркутского угольного бассейна (рис. 15), свидетельствуют о широком спектре техногенного воздействия на окружающую среду и формировании отложений особого состава и состояния [Akulov et al., 2010; Jolivet et al., 2013].

3.2.4. Эволюция природных систем Сибири и Монголии

Выполнены датировки периодов роста спелеотем из пещер, расположенных по трансекту с юга на север

Монголо-Сибирского региона. Методом U-Th датирования определены периоды роста спелеотем, соответствующие термохронам за последние 500 тыс. лет. Установлено, что для южной части Монголо-Сибирского региона отмечается частое чередование термохронов и криохронов, что отражено в структуре спелеотем пещер южной зоны, тогда как в северной зоне спелеотем моложе 400 тыс. лет не обнаружено, что свидетельствует о наличии единого длительного периода криохрона [Pacton et al., 2013]. Датированные периоды роста соответствуют основным палеоклиматическим обстановкам, установленным по другим источникам; в том числе по морским изотопным стадиям (MIS 1–11), по палеоклиматическим данным из донных отложений оз. Байкал. Сопоставление данных позволяет судить о достоверной связи между изменениями глобальной температуры, климата и особенностями существования многолетней мерзлоты (рис. 16). Сравнение данных с PWP SST (Sea Surface Temperatures of the Pacific Warm Pool) и прогнозные построения показали, что повышение глобальной температуры на 0.5–1.0 °С по сравнению с доиндустриальным периодом позднего голоцена приведет к деградации областей прерывистой мерзлоты в Сибири и трансформации влажностных условий в южных районах (территория Монголии), а потепление на ~1.5 °С до уровня MIS-11 приведет к существенной деградации мерзлоты на север до 60° с.ш. и создаст более влажные условия в пустыне Гоби [Vaks, 2011, 2013].

3.2.5. Генезис карстовых форм

На основе многостороннего анализа сибирских сталактитов, включая микроскопию высокого разрешения, геохимию изотопов, лабораторные опыты по микробиологически вызванному выпадению в осадок минералов, установлено, что поверхность соприкосновения между слоями роста в сталактите несет биогенный изотопный след. Вместе с морфологическими данными это свидетельствует о том, что кальцитовые кристаллы образованы микроорганизмами (рис. 17). Уранториевое датирование показало плейстоценовый возраст образцов сталактита. Таким образом, выявлено биотическое и абиотическое происхождение кристаллов сталактита [Гутарева и др., 2009; Базарова, 2011].

4. ЛИТЕРАТУРА ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Монографии

- Алексеев С.В. Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Академическое изд-во «ГЕО», 2009. 320 с.
- Джурик В.И., Серебренников С.П., Рященко Т.Г. и др. Районирование сейсмической опасности территории города Эрдэнэта. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2011. 122 с.
- Лапердин В.К., Качура Р.А. Геодинамика опасных процессов в зонах природно-техногенных комплексов Восточной Сибири. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2010. 312 с.

S.V. Alekseev, E.A. Kozyreva: Geological medium and underground hydrosphere

- Лапердин В.К., Имаев В.С., Верхозин И.И., Качура Р.А., Имаева Л.П. Опасные геологические процессы на юге Якутии и сопредельных территориях. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2011. 240 с.
- Мельникова Л.В., Николаев В.С., Демьянович Н.И. Шишкинская писаница. Т. 1. История и методика изучения, проблемы музеефикации, описание петроглифов. Иркутск: ООО «Репроцентр А1», 2011. 426 с.
- Рященко Т.Г. Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2010. 287 с.
- Szczypek T., Kozyriewa E.A., Rybczenko A.A., Chak W.A., Mazajewa O.A., Wika S. Wyspa Olchon na Bajkale. WNoZ UŚ, ISZ SO RAN, Sosnowiec-Irkuck, 2011. 54 p.
- Szczypek T., Wika S., Snytko W.A., Chak W.A., Kozyriewa E.A. Obszary piaszczyste na Olchonie (Bajkał), WNoZ UŚ, ISZ SO RAN, Sosnowiec–Irkuck, 2012. 69 p.

4.2. СТАТЪИ В ЗАРУБЕЖНЫХ ЖУРНАЛАХ

- Akulov N.I., Akulova V.V., Khudonogova E.V. Pyrogenic metamorphism of the carbonaceous rocks in the south of the Siberian platform // Coal Combustion Research. 2010. P. 219–234.
- Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Kononov A.M. Cryopegs of the Yakutian diamond-bearing province (RUSSIA) // Groundwater Quality Sustainability (IAH Selected Papers). 2012. P. 101–107.
- Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Kononov A.M., Shmarov G.P. New Opportunities to Effective Tailing Storage Operation (JSC "ALROSA", Russia) // Procedia Earth and Planetary Science. 2013. V. 7. P. 10–13. http://dx.doi.org/10.1016/j.proeps. 2013.03.021.
- Badminov P.S., Ganchimeg D., Pisarsky B.I., Oyuntsetseg D., Orgilyanov A.I., Kryukova I.G., Zundui-Osor Ch. Special features of the forming of thermal waters of the eastern part of the Khangay neotectonic uplift // Вестник АН Монголии. 2009. Т. 4. С. 64–70.
- Chabaux F., Granet M., Larquer Ph., Riotte J., Skliarov Eu., Skliarova O., Alexeieva L., Risacher F. Geochemical and isotopic (Sr, U) variations of lake waters in the Ol'khon Region, Siberia, Russia: Origin and paleoenvironmental implications // Comptes Rendus Geoscience. 2011. V. 343. № 7. P. 462–470. http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2011.07.004.
- Jolivet M., Arzhannikov S., Chauvet A., Arzhannikova A., Vassallo R., Kulagina N., Akulova V. Accomodating large-scale intracontinental extension and compression in a single stress-field: A key example from the Baikal Rift System // Gond-wana Research. 2013. V. 24. № 3–4. P. 918–935. http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2012.07.017.
- Kaczmarek Halina, Mazaeva Oksana A., Kozyreva Elena A., Khak Viktoria A. Stacjonarne badania procesów egzogenicznych w strefie brzegowej Zbiornika Brackiego (południe Syberii Wschodniej) // Landform Analysis. 2012. V. 19. P. 110–120.
- *Khak V.A., Kozyreva E.A.* Changes of geological environment under the influence of anthropogenesis (by the example of south of East Siberia, Russia) // *Zeitschrift für Geomorphologie*. 2012. V. 56. № 2. P. 183–199. http://dx.doi.org/10.1127/0372-8854/2011/0064.
- Levi K.G., Kozyreva E.A., Zadonina N.V., Chechelnitsky V.V., Gilyova N.A. Problems of induced seismicity and engineering geological protection of reservoirs of the Baikal-Angara cascade // Geodynamics & Tectonophysics. 2013. V. 4. № 1. P. 13–36. http://dx.doi.org/10.5800/GT-2013-4-1-0089.
- Pacton M., Breitenbach S.F.M., Lechleitner F.A., Vaks A., Rollion-Bard C., Gutareva O.S., Osintcev A.V., Vasconcelos C. The role of microorganisms in the formation of a stalactite in Botovskaya Cave, Siberia – paleoenvironmental implications // Biogeosciences. 2013. V. 10. P. 6115–6130. http://dx.doi.org/10.5194/bg-10-6115-2013.
- Rahmonov O., Rzetala M., Rahmonov M., Kozyreva E., Jagus A., Rzetala M. The formation of soil chemistry and the development of fertility islands under plant canopies in sandy areas // Research Journal of Chemistry and Environment. 2011. V. 15. № 2. P. 823–829.
- Vaks A., Gutareva O., Breitenbach S., Avirmed E., Kononov A., Osinzev A., Henderson G. Speleothem record of permafrost in Siberia and aridity in Mongolia during the Last 450 kyr. // Mineralogical Magazine: Goldschmidt Conference. 2011. 2057.
- Vaks A., Gutareva O.S., Breitenbach S.F.M., Avirmed E., Mason A.J., Thomas A.L., Osinzev A.V., Kononov A.M., Henderson G.M. Speleothems Reveal 500,000-Year History of Siberian Permafrost // Science. 2013. V. 340. № 6129. P. 183–186. http://dx.doi.org/10.1126/science.1228729.

4.3. СТАТЬИ В ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЖУРНАЛАХ

- Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Вахромеев А.Г., Владимиров А.Г., Волкова Н.И. Литиевые подземные воды Иркутской области и Западной Якутии // Химия в интересах устойчивого развития. 2012а. № 1. С. 27–33.
- Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Вахромеев А.Г., Шмаров Г.П. Литиеносные подземные воды Иркутской области и Западной Якутии // Горный журнал. 20126. № 2. С. 8–13.
- Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Кононов А.М. Новые данные об изотопном составе (¹⁸О и ²Н) подземных вод кимберлитовых полей (Западная Якутия) // Геология, поиски и разведка рудных месторождений. Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. 2013. № 2(43). С. 93–99.
- Алексеев С.В., Кононов А.М., Алексеева Л.П., Шмаров Г.П. Перспективы эффективной эксплуатации бессточных хвостохранилищ Удачнинского ГОКа АК «АЛРОСА» // Горный журнал. 2009. № 6. С. 53–56.

- Аржанников С.Г., Алексеев С.В., Глызин А.В., Кулагина Н.В., Игнатова Н.В., Орлова Л.А. Динамика развития природной среды в конце плейстоцена и голоцене западной части Тоджинской впадины (Восточная Тува) // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 2. С. 206–221.
- Бадминов П.С., Ганчимэг Д., Оргильянов А.И., Крюкова И.Г., Оюунцэцэг Д. Оценка глубинных температур термальных источников Хангая и Восточного Саяна с помощью гидрохимических геотермометров // Вестник БГУ. Химия, физика. 2011. Вып. 3. С. 90–94.
- Бадминов П.С., Иванов А.В., Писарский Б.И., Оргильянов А.И. Окинская гидротермальная система (Восточный Саян) // Вулканология и сейсмология. 2013. № 4. С. 27–39.
- Базарова Е.П., Гутарева О.С., Кононов А.М., Ущаповская З.Ф., Нартова Н.В., Осинцев А.В. Минералы пещеры Охотничья (Байкальский регион, Иркутская область) // Спелеология и карстология. 2011. № 7. С. 5–14.
- Базарова Е.П., Гутарева О.С., Кононов А.М., Ущаповская З.Ф., Нартова Н.В., Осинцев А.В. Минералы пещеры Охотничья (Байкальский регион, Иркутская область) // Спелеология и карстология. 2011. № 7. С. 5–14.
- Бержинский Ю.А., Бержинская Л.П., Иванькина Л.И., Ордынская А.П., Саландаева О.И., Чигринская Л.С., Акулова В.В., Черных Е.Н. Оценка сейсмической надежности жилых и общественных зданий при землетрясении 27.08.2008 на Южном Байкале // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36. № 1. С. 23–39.
- Верхозина В.А., Верхозина Е.В., Писарский Б.И. Геоэкологическая оценка влияния антропогенного фактора на экосистемы рифтовых озер мира (на примере Байкала и Ньясы) // Проблемы региональной экологии. 2010. № 2. С. 9– 13.
- Гутарева О.С., Козырева Е.А., Тржцинский Ю.Б. Карст в природных и техногенно изменённых условиях на юге Восточной Сибири // География и природные ресурсы. 2009. № 1. С. 96–103.
- Демьянович Н.И. Особенности формирования склонов, врезанных в отложения верхне-среднекембрийской терригенной красноцветной формации // Геоморфология. 2010. № 3. С. 32–40.
- Демьянович Н.И. Оползни как один из факторов природного и техногенного риска на территории города Иркутска // Геоэкология. 2011. № 4. С. 354–361.
- Джурик В.И., Серебренников С.П., Рященко Т.Г., Ескин А.Ю., Усынин Л.А., Брыжак Е.В., Батсайхан Ц., Дугармаа Т. Районирование сейсмической опасности г. Эрдэнэт на основе количественных характеристик колебаний грунтов при сильных землетрясениях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2010. № 2. С. 38–43.
- Кадетова А.В., Козырева Е.А. Потенциальные природные опасности при проектировании и эксплуатации подвесной канатной дороги на горнолыжном курорте «Гора Соболиная», Южное Прибайкалье // География и природные ресурсы. 2013. № 1. С. 50–55.
- Качура Р.А., Куклин А.С, Лапердин В.К., Тимофеев Н.В. Прогнозная оценка геологических опасностей и экологических рисков на Дулисминском месторождении углеводородов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2009. № 7. С. 29–34.
- Качура Р.А., Куклин А.С., Лапердин В.К., Тимофеев Н.В. Селеопасность Южного Прибайкалья (на примере руч. Сухого) // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2009. Т. 2. № 1. С. 86–104.
- Качура Р.А., Куклин А.С., Лапердин В.К., Тимофеев Н.В. Геологические опасности в зоне освоения побережья озера Байкал на участке порт Байкал–пос. Култук // Вестник ИрГТУ, Науки о Земле. 2010. № 3 (43). С. 22–29.
- Козырева Е.А., Рыбченко А.А., Мазаева О.А, Хак В.А., Кадетова А.В. Опасные инженерно-геологические процессы зоны влияния байкало-ангарской гидротехнической системы // ГеоРиск. 2012. № 3. С. 46–55.
- Козырева Е.А., Рыбченко А.А., Тарасова Ю.С., Жентала М., Ягус А. Трансформации береговых зон водохранилищ в ходе эксплуатационного периода (Южное Приангарье, Верхнесилезский регион) // Вестник ИрГТУ. 2012. № 3 (62). С. 42–50.
- Козырева Е.А., Рыбченко А.А., Щипек Т., Пеллинен В.А. Солифлюкционные оползни побережья острова Ольхон // Вестник ИрГТУ. 2011. № 4. С. 41–49.
- Кустов Ю.И. Подземные минеральные воды в Тункинском регионе юго-западного фланга Байкальского рифта // Отечественная геология. 2009. № 2. С. 53–60.
- Лапердин В.К., Имаев В.С. Геологические опасные процессы в зоне Байкальского рифта и сопредельных территорий // Вопросы инженерной сейсмологии. 2010. Т. 37. № 1. С. 40–55.
- Лапердин В.К., Качура Р.А. Криогенные опасности в зонах природно-технических комплексов на юге Восточной Сибири // Криосфера Земли. 2009. т. XIII. № 2. С. 27–43.
- Лапердин В.К., Качура Р.А. Анализ возникновения природно-техногенных рисков и геоэкологической нестабильности по трассам нефтегазопроводов на юге Якутии // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2012. № 9. С. 17–24.
- Лапердин В.К., Качура Р.А. Природная нестабильность и геоэкологический риск по трассе продуктопровода (район г. Благовещенска) // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2013. № 8. С. 18–22.
- Лапердин В.К., Кустов Ю.И., Качура Р.А. Факторы природной нестабильности и техногенных рисков на территории курорта Аршан (бассейн р. Кынгарги, Республика Бурятия) // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2010. № 4. С. 37–45.
- Лапердин В.К., Юшкин В.И., Качура Р.А. Геоэкологические опасности от криогенных деформаций на объектах автозаправочных станций на юге Восточной Сибири // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2012. № 6. С. 32–37.

- *Мазаева О.А., Хак В.А., Козырева Е.А.* Оценка основных процессообразующих факторов развития экзогенных гелогических процессов в локальных продно-технических геосистемах (на примере участка Быково, Брасткое водохранилище) // *Вестник ИрГТУ*. 2011. № 2. С. 41–47.
- Мазаева О.А, Хак В.А., Козырева Е.А. Эрозионно-оползневой тип взаимодействия в локальных береговых геосистемах (на примере Братского водохранилища) // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Наук о Земле». 2012. Т. 5. № 1. С. 205–223.
- *Мазаева О.А., Хак В.А., Козырева Е.А.* Мониторинг локальных береговых геосистем Братского водохранилища // *Геоморфология.* 2014. № 1. С. 75–80.
- Оргильянов А.И., Крюкова И.Г., Бадминов П.С. Новые данные о минеральных источниках Хэнтэй-Даурского неотектонического поднятия // Вестник кафедры географии Восточно-Сибирской государственной академии образования. 2011. № 2(3). С. 36–43.
- Оргильянов А.И., Малков Е.Э., Писарский Б.И., Бадминов П.С., Ганчимэг Д. Минеральные воды трансграничной (проектируемой?) особо охраняемой природной территории «Истоки Амура» // География и природные ресурсы. 2011. № 2. С. 46–61.
- Павлов С.Х., Оргильянов А.И., Бадминов П.С., Крюкова И.Г. Фильтрационные утечки из золошлакоотвала и их взаимодействие с геологической средой // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2013. Т. 6. № 2. С. 1–10.
- Павлов С.Х., Чудненко К.В. Происхождение и процессы формирования метановых вод Тункинской впадины // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2011. № 2 (39). С. 1–7.
- Павлов С.Х., Чудненко К.В. Физико-химические аспекты формирования азотных терм в системе «вода гранит» // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2011. Т. 2. № 2. С. 1–15.
- Павлов С.Х., Чудненко К.В. Исследование происхождения метановых и азотных термальных вод методом компьютерного моделирования // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2013. Т. 6. № 1. С. 133–146.
- Павлов С.Х., Чудненко К.В. Физико-химические взаимодействия в системе «вода–порода» в условиях формирования азотных терм // Известия Сибирского Отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2013а. № 1(42). С. 82–95.
- Павлов С.Х., Чудненко К.В. Формирование азотных терм: моделирование физико-химических взаимодействий в системе «вода-гранит» // Геохимия. 2013б. № 12. С. 1090–1104.
- Павлов С.Х., Чудненко К.В., Тржцинский Ю.Б. Формирование оползневых процессов в карбонатных и сульфатнокарбонатных породах: физико-химические аспекты, гидрогеологические и структурные особенности // Геоэкология. 2009. № 5. С. 1–11.
- Пеллинен В.А. Принципы создания классификаций оползней: краткий обзор // Вестник ИрГТУ. 2012. № 8. С. 52–55.
- Рыбченко А.А., Кадетова А.В., Козырева Е.А. Результаты использования трехмерных моделей при мониторинге абразионного участка «Солнечный» (Иркутское водохранилище) // Вестник ИрГТУ. 2012. № 4 (63). С. 61–67.
- Рябцев А.Д., Коцупало Н.П., Вахромеев А.Г., Комин М.Ф. Поликомпонентные литиеносные рассолы Сибирской платформы сырье многоцелевого назначения // Рациональное освоение недр. 2013. № 1. С. 40–47.
- Рященко Т.Г. Типизация геологической среды при сейсмическом микрорайонировании территории г. Эрдэнэта (Монголия) // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 2010. № 5. С. 71–78.
- Рященко Т.Г., Акулова В.В., Ербаева М.А. Формирование лессовидных отложений Забайкалья (на примере ключевых участков) // География и природные ресурсы. 2012. № 4. С. 117–125.
- Рященко Т.Г. Микроструктура и свойства дисперсных грунтов (опыт применения кластерного анализа) // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 2013. № 3. С. 39–45.
- Рященко Т.Г. Сценарий формирования циклично построенных грунтовых толщ (оригинальный комбинированный метод) // Вестник ИрГТУ. 2013. № 7 (78). С. 50–57.
- Рященко Т.Г., Вашестюк Ю.В. Сравнительный анализ параметров микроструктуры глинистых и лессовых грунтов (программа «Стандартная статистика») // Вестник ИрГТУ. 2011. № 9. С. 64–72.
- Рященко Т.Г., Вашестюк Ю.В. Сравнительная характеристика микроструктуры и глинистых минералов полигенетических лессовидных отложений и эоловых лессов // Вестник ИрГТУ. 2012. № 6. С. 43–48.
- Рященко Т.Г., Ухова Н.Н., Слагода Е.А. Изучение проблемных геолого-литологических разрезов глинистых отложений с применением грунтоведческих критериев // Отечественная геология. 2009. № 4. С. 61–67.
- *Рященко Т.Г., Ухова Н.Н., Штельмах С.И.* Геохимические критерии инженерно-геологической оценки дисперсных грунтов юга Восточной Сибири (методические аспекты) // *Вестник ИрГТУ*. 2011. № 2. С. 58–61.
- Рященко Т.Г., Ухова Н.Н., Штельмах С.И. Сравнительный анализ геохимических особенностей лессовых пород юга Восточной Сибири и Беларуси // Отечественная геология. 2011. № 2. С. 82–86.
- Рященко Т.Г., Ухова Н.Н., Штельмах С.И., Белянина Н.И., Белянин П.С. Гипотезы формирования бурых суглинков Приморья: ретроспектива и новый взгляд (Дальний Восток России) // Тихоокеанская геология. 2011. Т. 30. № 3. С. 80–92.
- Рященко Т.Г., Ухова Н.Н., Щетников А.А., Рыжов Ю.В. Глинистые минералы дисперсных грунтов Монголо-Сибирского региона (методы и прогнозы) // Отечественная геология. 2012. № 6. С. 56–65.

- Рященко Т.Г., Чернышова Ю.В. Методы изучения микроструктуры дисперсных грунтов // Вестник ИрГТУ. 2009. № 1. С. 34–38.
- *Рященко Т.Г., Чернышова Ю.В.* Микроструктура и физико-химические свойства глинистых грунтов (опыт применения кластерного анализа) // *Вестник ИрГТУ*. 2010. № 4. С. 41–44.
- Семенов Р.М., Имаев В.С., Смекалин О.П., Чипизубов А.В., Оргильянов А.И. Гелий в глубинной воде Байкала предвестник землетрясений // Доклады АН. 2010. Т. 432. № 4. С. 533–536.
- Семенов Р.М., Малевич Л.В., Оргильянов А.И., Смекалин О.П. Исследования по поиску краткосрочных предвестников землетрясений в Прибайкалье // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2011. № 4. С. 43–46.
- Скляров Е.В., Склярова О.А., Меньшагин Ю.В., Данилова М.А. Минерализованные озера Забайкалья и Северо-Восточной Монголии: особенности распространения и рудогенерирующий потенциал // География и природные ресурсы. 2011. № 4. С. 29–39.
- Склярова О.А., Скляров Е.В., Меньшагин Ю.В., Данилова М.А. Динамика формирования и рудогенерирующий потенциал минерализованных озер Забайкалья и Северо-Восточной Монголии // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. № 1. С. 35–41.
- Тимофеева С.С., Чемерис Н.В., Шенькман Б.М. Современное состояние поверхностных, подземных и сточных вод в зоне воздействия шламонакопителей Байкальского целлюлозно-бумажного комбината // Современные наукоемкие технологии. 2008. № 5. С. 213–219.
- Шенькман Б.М. Ресурсы подземных вод Верхнечонского нефтегазоконденсатного месторождения // География и природные ресурсы. 2013а. № 3. С. 77–84.
- Шенькман Б.М. Химия подземных вод Верхнечонского нефтегазоконденсатного месторождения (ВЧНГКМ) // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2013б. Т. б. № 1. С. 206–222.
- Шенькман Б.М., Шолохов П.А., Шенькман И.Б. Железо и марганец в пресных подземных водах Иркутска // Вестник ИрГТУ. 2011. № 8. С. 76–83.
- Шенькман Б.М., Шолохов П.А., Шенькман И.Б. Подтопление Иркутска грунтовыми водами // География и природные ресурсы. 2011. № 2. С. 54–61.
- Шишелова Т.И., Самусева М.Н., Шенькман Б.М. Использование ЗШО в качестве сорбента для очистки сточных вод // Современные наукоемкие технологии. 2008. № 5. С. 220–222.



Алексеев Сергей Владимирович, докт. геол.-мин. наук, зав. лабораторией гидрогеологии Институт земной коры СО РАН 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия ⊠ e-mail: salex@crust.irk.ru

Alekseev, Sergei V., Doctor of Geology and Mineralogy, Head of Laboratory of Hydrogeology Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS 128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia ⊠ e-mail: salex@crust.irk.ru



Козырева Елена Александровна, канд. геол.-мин. наук, зав. лабораторией инженерной геологии и геоэкологии Институт земной коры СО РАН 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия Тел.: (3952)425899; e-mail: kozireva@crust.irk.ru

Kozyreva, Elena A., Candidate of Geology and Mineralogy, Head of the Laboratory of Engineering Geology and Geoecology Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS 128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia Tel.: (3952)425899; e-mail: kozireva@crust.irk.ru
PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2014 VOLUME 5 ISSUE 1 PAGES 223-229

http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0125



ISSN 2078-502X

THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST MUSEUM TODAY

L. A. Ivanova

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: In the past five years, the Institute of the Earth's Crust Museum has considerably increased its exhibition space and the collection of objects. The Museum documents the history of the Institute since 1949. Its three rooms contain original artefacts, books and reports by prominent scientists and a rich variety of rocks collected by IEC staff, including a collection of new minerals discovered by IEC researchers and approved by the Commission for New Minerals Nomenclature and Classification (CNMNC) of the International Mineralogical Association. Displayed are a unique collection of kimberlites from Yakutia which was given to the Museum by D.I. Savrasov, a founder of the Kimberlites Museum in the city of Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), a collection of hydrogenous minerals from many countries of the world which was given to the Museum by Dr. B.I. Pisarsky, a set of minerals collected by Dr. Yu.V. Komarov who founded the Museum and given to the Museum by his widow L.V. Komarova, and other sets of minerals. A special exhibition is devoted to the 100th Anniversary of Prof. M.M. Odintsov, Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences, who was a prominent Russian geologist, worked in Siberia and headed the IEC from 1954 to 1976. To commemorate the 90th Anniversary of the Museum founder Dr. Yu.V. Komarov, the first museum room was renovated and now includes an exhibition devoted to researches of Dr. Yu.V. Komarov. A new display is a collection of minerals from Bulgaria. The Museum is regularly visited by high school and post graduate students to whom the museum objects and collections of minerals serve as useful physical materials in studies of geology and mineralogy, and in such cases the Institute of the Earth's Crust Museum operates as an educational outreach.

Key words: the Institute of the Earth's Crust Museum, collection, display, exhibition.

Citation: *Ivanova L.A.* 2014. The Institute of the Earth's Crust Museum Today. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (1), 223–229. doi:10.5800/GT-2014-5-1-0125.

Музей Института земной коры сегодня

Л. А. Иванова

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация: Музей Института земной коры за последнее пятилетие значительно расширил свои демонстрационные площади и обновил экспозиции. Основное направление – институт из прошлого (1949 г.) – в будущее... В трех выставочных залах экспонируются материалы, посвященные выдающимся ученым, внесшим огромный вклад в развитие сибирской науки, а также коллекции горных пород и минералов, собранные сотрудниками института. Представлены результаты научных исследований отдельных лабораторий. Демонстрируется коллекция новых минералов, открытых сотрудниками института и утвержденных Международной комиссией по новым минералам. Экспонируются: уникальная коллекция кимберлитов Якутии, подаренная музею Д.И. Саврасовым – основателем музея кимберлитов в г. Мирном; коллекция гидрогенных минералов различных регионов мира, переданная в дар музею д.г.-м.н. Б.И. Писарским; домашняя коллекция минералов, собранная основателем музея института д.г.-м.н. Но.В. Комаровым, переданная в дар музею его вдовой, и ряд других коллекций. К 100-летию со дня рождения открыта экспозиция, посвященная жизни и деятельности выдающегося сибирского геолога, директора ИЗК с 1954 г. по 1976 г.,

чл.-корр. АН СССР, профессора М.М. Одинцова. К 90-летию со дня рождения основателя музея Ю.В. Комарова обновлен первый выставочный зал и открыта экспозиция, посвященная его жизни и деятельности. Открыта новая выставка «Минералы Болгарии». Все музейные коллекции служат наглядным материалом при проведении лекционных и практических занятий со студентами и аспирантами.

Ключевые слова: Музей Института земной коры, экспозиция, коллекция, выставка.

1. Введение

Решение о создании Геологического музея и фондов в Институте геологии ВСФ АН СССР, который в 1962 г. был переименован в Институт земной коры СО АН СССР, было принято в 1953 г. на заседании Президиума АН СССР при утверждении структуры института. Однако из-за отсутствия помещений ни музей, ни фонды созданы не были. Лишь в 1995 г. музей получил первое помещение, в котором по инициативе и при непосредственном участии д.г.-м.н. профессора Ю.В. Комарова Геологический музей был размещен. Уже в 1998 г., когда в музейном зале начались систематические занятия со студентами Иркутского государственного технического университета, выставочная коллекция насчитывала более 800 образцов минералов, руд, горных пород, подаренных музею сотрудниками института. Экспозиция музея представляла собой небольшие тематические коллекции: щелочные комплексы Восточной Сибири, сибирские кимберлиты, цветные поделочные камни, породы и руды Слюдянского горно-рудного узла, базит-ультрабазитовые комплексы, а также минералы рудных месторождений Восточной Сибири и Монголии. На стендах было выставлено почти 700 значков, посвященных различным геологическим мероприятиям или событиям, а также Байкалу и Иркутску; экспонирована небольшая коллекция почтовых марок по геологической тематике; создан богатый фонд изданных карт геологического профиля, составленных сотрудниками института. На стенах музея выставлялись картины и другие экспонаты, подаренные ИЗК в связи с различными юбилеями.

2. Дань памяти великим ученым

16 октября 2009 г. к 60-летию Института земной коры был открыт новый музейный зал. В нем разместились фрагменты мемориальных кабинетов чл.-корр. АН СССР М.М. Одинцова (директор института в 1954–1976 гг.) и академика АН СССР Н.А. Логачева (директор института в 1976–1998 гг.); витрины и стенды, посвященные выдающимся ученым, много лет проработавшим в ИЗК и внесшим весомый вклад в развитие сибирской науки: директору-организатору

ИЗК (1949–1953 гг.), чл.-к. АН СССР, основателю сибирской школы неотектоники и геоморфологии Н.А. Флоренсову; заместителю директора института (1963– 1967 гг.), профессору, д.ф.-м.н., основателю иркутской сейсмологической школы и организатору сети сейсмостанций Восточной Сибири А.А. Трескову; заместителю директора института (1967–1972 гг.), чл.-корр. АН СССР, основателю и руководителю сейсмологической научной школы В.П. Солоненко; заместителю директора института (1972–1995 гг.), чл-корр. РАН, главе сибирской школы гидрогеологов Е.В. Пиннекеру; информационные стенды каждой лаборатории, отражающие историю создания, основные направления научной деятельности и достижения данного коллектива сотрудников.

3. Музей и основные научные направления Института земной коры

Экспозиция музея дала возможность получить полное представление об основных научных направлениях Института земной коры — комплексного научноисследовательского учреждения с оригинальным научным профилем, ознакомиться со структурой, лабораториями и уникальными результатами деятельности одного из научных учреждений страны в области геологии, геофизики, гидрогеологии и инженерной геологии.

Научная деятельность коллектива института по всем разрабатываемым проблемам достаточно плодотворна. Получены интересные, зачастую уникальные результаты, часть которых, несомненно являясь наследием института, экспонируется в музее.

С открытием нового музейного зала значительно расширилась тематика экспозиции. Геологический музей был переименован в Музей Института земной коры (рис. 1). Если основная цель деятельности Геологического музея заключалась в создании наглядной коллекции, то перед музеем института встал вопрос о сохранении историко-естественно-научного наследия будущему, потомкам и открытии этого наследия настоящему и современникам. Основное направление музейной экспозиции – Институт из прошлого (1949 г.) – в будущее...



Рис. 1. Основной музейный зал сегодня.

Fig. 1. The main museum room.

4. Институт из прошлого (1949 г.) – в будущее...

В залах музея выставлены обновленные коллекции горных пород и минералов, собранные сотрудниками института. Среди них породы Мурунского, Тажеранского и других щелочных массивов, основные и ультраосновные породы и руды, золотоносные руды с видимым самородным золотом разных типов, черносланцевые золотоносные месторождения Сибири, Средней Азии, Монголии. Экспонируются образцы вольфрамитовых месторождений Забайкалья и Монголии, оловоносные руды касситерит-кварцевого типа с турмалином и пиритом Центрального Забайкалья и Дальнего Востока, молибденовые руды Бурятии и Читинской области. Значительно расширена экспозиция пород и руд Слюдянского горно-рудного узла, издавна служащего научным полигоном для петрологов, минералогов и геохимиков. Представлены коллекции ювелирных и поделочных камней Восточной Сибири и Монголии. Среди них разноокрашенные нефриты, лазуриты, чароиты, агаты и халцедоны. Оформлены витрины, в которых экспонируется коллекция минеральных вод Прибайкалья, исследованных в Институте земной коры. Представлены минеральные лечебностоловые и природные столовые бутилированные воды. Среди них пользующиеся популярностью «Иркутская», «Ангарская», «Братская», «Мальтинская», «Байкальская» и многие другие. Демонстрируются результаты инженерно-геологических исследований плотины Иркутской ГЭС после 50 лет эксплуатации. Выставлены образцы макротериофауны Южного Прибайкалья (поздний кайнозой), представляющие фрагменты костей мамонта, шерстистого носорога, бизона; ископаемой флоры каменноугольного и юрского периодов, представленные отложениями Якутской алмазоносной провинции (Северо-Восточный Тунгусский бассейн) и Иркутского угольного бассейна. Оформлена витрина представительной палеоген-неогеновой малакофауны Танхойской свиты Тункинской впадины Южного Прибайкалья.

Гордостью музейной экспозиции является выставка новых минералов, открытых А.А. Коневым, Л.З. Резницким, Е.В. Скляровым, З.Ф. Ущаповской, А.А. Кашаевым и другими сотрудниками института, утвержденных Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации минералов Международной минералогической ассоциации (КНМНМ ММА). Экспонируются дипломы, каменный материал, фотографии, структуры 25 новых минеральных видов. Во многих случаях открытие новых минералов сопровождалось открытием новых минеральных серий – изоморфных рядов или твердых растворов, ранее не известных в природе и не синтезировавшихся. Часть новых минералов принадлежит к породообразующим или петрологически важным группам – пироксенам (наталиит), слюдам (хромфиллит), шпинелям (магнезиокулсонит), турмалинам (ванадиодравит, окси-хром-дравит). Нередко новые минералы отличаются необычными особенностями состава и структуры. Так, экспонирующиеся в музее сульфошпинели изоморфной серии калининит – флоренсовит – купрокалининит, открытые Л.З. Резницким, Е.В. Скляровым и З.Ф. Ущаповской с коллегами, относятся к довольно редкому классу минералов – сульфидов со структурой обычных кислородных шпинелей, в которых вместо кислорода сера. Соединения хрома с серой в природе очень редки. Слюдянские минералы – первые находки хромовых сульфошпинелей в земных породах. Сульфошпинели десятки лет исследуются физикой и химией твердых тел, технологам они интересны важным сочетанием оптических, магнитных и диэлектрических свойств. Флоренсовит – пока единственный в минералогии пример изоморфизма хрома и сурьмы. Через несколько лет после открытия флоренсовит был синтезирован и оказался новым перспективным соединением как полупроводник.

Открытие Л.3. Резницким с соавторами ряда хромванадиевых турмалинов, последний из которых – хромо-алюмино-повондраит утвержден КНМНМ ММА в октябре 2013 г., привело к пересмотру общей классификации турмалинов и появлению группы окситурмалинов.

В названиях новых минеральных видов отражены имена видных исследователей Прибайкалья и Восточной Сибири. Так, наталиит назван в честь Наталии Васильевны Фроловой – выдающегося исследователя докембрия; калининит – в память о замечательном минералоге профессоре Павле Васильевиче Калинине, внесшем неоценимый вклад в изучение минералогии Южного Прибайкалья. В честь виднейших российских ученых-геологов, с именами которых связано становление академической науки в Восточной Сибири, -Николая Александровича Флоренсова, Михаила Михайловича Одинцова, Льва Владимировича Таусона, Евгения Владимировича Павловского – получили свое название минералы флоренсовит, одинцовит, таусонит и павловскиит. По названию Института земной коры получил свое имя новый карбонат – земкорит, обнаруженный в кимберлите восточного тела трубки Удачная и изученный К.Н. Егоровым с коллегами. Отражается в названиях новых минералов и география Прибайкалья: ольхонскит (остров Ольхон), олекминскит (река Олекма), тажеранит (Тажеранская степь), бираит (река Бирая), а также составы минеральных видов (батисивит — название дано по катионам, входящим в идеальную формулу (Ва, Ti, Si, V); хлормагалюминит; оксиванит — по компонентам идеальной формулы.

Выставка новых минералов в последнее время пополнилась за счет подобных исследований и открытий сотрудников Института геохимии СО РАН. Дипломы и образцы восьми новых минеральных видов переданы в дар музею А.Н. Сапожниковым, В.Е. Загорским, Н.В. Владыкиным с соавторами.

Подчеркивая тесную связь фундаментальных исследований и основанных на них прикладных разработок, в музее экспонируются результаты деятельности лабораторий в этом направлении. Среди таких разработок открытие И.В. Беловым и Н.Я. Волянюком в Западном Забайкалье месторождения вулканических стекол и туфов, пригодных для получения строительного материала – вспученного перлита. Производство бетона из перлита было принято Иркутским совнархозом для внедрения в народное хозяйство. За открытие месторождения и разработку возможностей использования вулканических стекол в качестве сырья для получения вспученного перлита И.В. Белову в 1960 г. присуждена малая золотая медаль ВДНХ. В 80-х годах ХХ в. на территориях Иркутской и Читинской областей Ю.В. Комаровым, А.В. Белоголовкиным, Э.Н. Копыловым открыты месторождения кремугитового сырья. Это был новый для Восточной Сибири строительный материал, применяемый как пористый заполнитель легких бетонов, получаемый по сухому способу из углеродсодержащих кремнисто-гидрослюдистых алевролитов и сланцев.

Уникальная экспозиция посвящена разнообразной продукции из безжелезистых волластонит-диопсидовых руд Слюдянского района Южного Прибайкалья. В экспозиции представлены волластонитовые и диопсидовые руды, а также авторское свидетельство на изобретение «Способ поиска волластонитовых горных пород», полученное В.Н. Вишняковым – первооткрывателем месторождения волластонита – в соавторстве с Е.И. Воробьевым, В.М. Новиковым, Л.З. Резницким, Е.П. Васильевым и А.Ф. Щербаковым. Диопсид и диопсидовые горные породы являются принципиально новым в мировой практике видом минерального сырья. Приоритет в изучении природного диопсида как полезного ископаемого принадлежит нашей стране. В технологическом плане диопсид имеет ряд несомненных достоинств, к которым относятся очень высокие диэлектрические характеристики при относительно невысокой температуре плавления, небольшие значения коэффициента термического расширения при высоких физико-механических свойствах, отсутствие полиморфных модификаций (стабильность в изделиях), химическая стойкость, широкая изоморфная емкость и др., чем определяется повышенный интерес к диопсидовым материалам. Экспонируются образцы керамических диэлектриков, тонкой и строительной керамики, образцы керамических пигментов на диопсидовой основе, керамические глазури, стекла, ситаллы, каменное литье, диопсидсодержащие материалы на основе вяжущих веществ.

Несомненным украшением экспозиции разноокрашенных нефритов Восточной Сибири является разработка В.Я. Медведева и Л.А. Ивановой «Способ обработки природных камней и изделий из них», предназначенная для улучшения декоративно-художественных качеств камнесамоцветного сырья, по своей окраске и механическим свойствам не отвечающих предъявляемым требованиям. Среди нефритов это табачные, зеленовато-табачные, буроватые, желтоватые нефриты, получившие подобные оттенки благодаря вторичным процессам, широко проявленным по краевым частям жил, вблизи трещин, а также на участках нефритоносных зон, подверженных катаклазу. Процесс облагораживания основан на изотермической выдержке образцов и изделий в восстановительной атмосфере при общем давлении 50-100 МПа и температуре 400-500 °С. Способ позволяет за счет изменения вариантов количественного сочетания двух- и трехвалентного железа и других хромофоров получать ювелирные нефриты необходимых тонов нужной окраски и улучшать их механические свойства.

Не все результаты научных исследований могут быть представлены в виде коллекций. Достижения в области геотектоники, геофизики, сейсмологии, сейсмостойкого строительства, инженерной геологии, мерзлотоведения и ряда других разрабатываемых направлений представлены в музее в виде демонстрационных стендов, патентов, авторских свидетельств на изобретения.

Особенностью музейного собрания является мемориальность некоторых коллекций, связанных с именами выдающихся ученых, посвятивших свою жизнь исследованию минеральных богатств нашей страны. Среди них коллекции по щелочным массивам Прибайкалья и других регионов, составленные д.г.-м.н. А.А. Коневым – петрографом и минералогом, специализировавшимся в области щелочного магматизма Прибайкалья; коллекция гидрогенных минералов различных регионов мира, переданная в дар д.г.-м.н. Б.И. Писарским – специалистом в области региональной гидрогеологии и ресурсов подземных вод; уникальная коллекция кимберлитов Якутии, подаренная музею Д.И. Саврасовым – основателем единственного в мире Музея кимберлитов в п. Мирный.

Очень дорога музею памятная домашняя коллекция минералов, собранная его основателем д.г.-м.н. Ю.В. Комаровым – специалистом в области магматической геологии и металлогении, переданная в дар музею вдовой Юрия Васильевича – Любовью Всеволодовной. Коллекция представлена 75 экспонатами, среди которых прекрасная друза аметиста, кристаллы горного хрусталя, дымчатого кварца, мориона, аквамарина; агаты, халцедоны, сапфирины, сердолики, самородная сера, пейзажная яшма и яшмоиды; полированные образцы лазурита, офиокальцита и другие породы и минералы. Большой интерес вызывают каменные картины – работы Юрия Васильевича, выполненные им на мраморных пластинах разными минералами. Среди них «Байкальский полевой цветок», «Стрекоза», «Обезьянки», «Кораблик». Коллекция дополнена сувенирами и образцами, подаренными Юрию Васильевичу к памятным дням и юбилеям. Открытие выставки этой коллекции было приурочено ко Дню геолога в 2010 г.

В ноябре 2011 г. в рамках Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Михаила Михайловича Одинцова – директора ИЗК с 1954 по 1976 г., член-корреспондента Академии наук СССР профессора, выдающегося сибирского геолога, одного из первооткрывателей сибирских алмазов – открыта экспозиция, посвященная его жизни и деятельности [Ivanova, 2011]. М.М. Одинцовым выделены территории Якутии, перспективные на обнаружение источников алмазов. Намечены перспективы алмазоносности юга Сибирской платформы и Присаянья. Экспозиция разворачивается на фоне коллекции кимберлитов Якутии и других регионов мира [Ivanova et al., 2013]. Демонстрируется макет кимберлитовой трубки Мир, открытой в июне 1955 г. – первого разрабатываемого месторождения алмазов в нашей стране.

Благодаря поддержке администрации института и программе «Поддержка музеев СО РАН», в музее за последнее пятилетие отремонтированы выставочные залы, закуплены витрины и оборудование, обновляются и создаются новые экспозиции. Музей Института земной коры в настоящее время значительно обновил свои демонстрационные площади.

В январе 2014 г. к 90-летию со дня рождения основателя музея д.г.-м.н. профессора, заслуженного деятеля науки Республики Бурятия Юрия Васильевича Комарова в капитально отремонтированном первом музейном зале открыта экспозиция, посвященная его жизни и деятельности (рис. 2). Оформлен фрагмент кабинета, где экспонируются рабочее место Юрия Васильевича в музее, его библиотека, созданные им картины из каменной крошки. На стене – портрет Юрия Васильевича, подаренный музею Любовь Всеволодовной Комаровой. Демонстрируются фотографии, полевые дневники и отчеты, экземпляры кандидатской и докторской диссертаций, монографии. Демонстрируется коллекция рабочих образцов Юрия Васильевича, положившая начало музейным экспозициям. Среди этих образцов золотоносные, оловоносные, вольфрамовые и молибденовые руды Забайкалья, Дальнего Востока, Монголии, железные руды Бурятии и Украины.

К юбилею Ю.В. Комарова приурочено открытие выставки – «Минералы Болгарии», где демонстриру-



Рис. 2. Общий вид экспозиции, посвященной основателю музея – Ю.В. Комарову.

Fig. 2. The exhibition devoted to the Museum founder Dr. Yu.V. Komarov.

ются новые поступления — собранные сотрудниками образцы руд крупнейшего золоторудного месторождения Европы Челопеч, золоторудного месторождения Чала, железорудного месторождения Крумово, цеолитовая минерализация различных пород.

Все музейные коллекции служат наглядным материалом при проведении лекционных и практических занятий со студентами Иркутского государственного университета (ИГУ) и Иркутского государственного технического университета (ИрГТУ). Использование музея как аудитории для занятий значительно усиливает восприятие слушателями излагаемого материала, так как многие экспонируемые образцы принимают непосредственное участие в лекционном процессе. Благодаря расширенным и обновленным коллекциям появилась возможность наглядной демонстрации образцов в процессе чтения курса лекций «Природа окраски минералов» студентам кафедры геммологии Института недропользования ИрГТУ. Экспозиция результатов обработки природных камней и изделий из них способом, разработанным сотрудниками лаборатории петрологии, геохимии и рудогенеза, демонстрирует возможности облагораживания некондиционного поделочного сырья на примере улучшения декоративно-художественных свойств нефрита и служит наглядным пособием в процессе проведения занятий курса лекций «Методы облагораживания ювелирных камней». Экспонируются исходные и облагороженные пластинки, кольца, браслеты, двухцветные образцы, гемма из Улан-Ходинского нефрита.

Студенты биолого-почвенного факультета ИГУ в курсе лекций «Основы палеоботаники» используют рабочие коллекции ископаемой флоры каменноугольного и юрского периодов.

Аспиранты Института земной коры с первого года обучения в курсе обязательных лекций ведущих научных сотрудников института получают возможность на примере экспозиций более детально ознакомиться с представляемыми научными направлениями. Пройдя по музейным залам, вникнув в историю развития существующих в институте в настоящее время профильных геологических отделов, осознав, что музей – это не только история, но и наша память, будущие сотрудники более ответственно ощущают себя в научном сообществе института. Именно от них зависит сохранение преемственности, которая позволит вовлечь уже имеющиеся музейные коллекции и отдельные музейные образцы в новые экспозиции, так как одной из главных функций музея института является не только сохранение, но и дальнейшее пополнение коллекций, и формирование новых.

Музеем ведется популяризация геологических знаний среди населения и, прежде всего, среди школьников и студентов. Знакомство с музейными экспозициями позволяет получить представление о комплексных исследованиях сотрудников института в области геологии, геофизики, гидрогеологии и инженерной геологии; осознать важность и необходимость этих исследований для развития и процветания нашего края.

Сотрудники музея благодарны всем, кто оказывает неоценимую помощь в решении возникающих проблем.

5. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Ivanova L.A., 2011. Mikhail M. Odintsov's exhibition in the museum of the Institute of the Earth's Crust. *Geodynamics & Tectonophysics* 2 (4), 430–437. http://dx.doi.org/10.5800/GT-2011-2-4-0055.

Ivanova L.A., Koshkarev D.A., Levi T.M., 2013. Mikhail M. Odintsov and diamond theme in the museum exposition of the Institute of the Earth's crust. Vestnik Irkutskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii 57 (1), 163–169 (in Russian) [Иванова Л.А., Кошкарев Д.А., Леви Т.М. Михаил Михайлович Одинцов и алмазная тематика в экспозиции музея Института земной коры // Вестник ИрГСХА. 2013. Вып. 57. Ч. 1. С. 163–169].



Иванова Лариса Александровна, канд. геол.-мин. наук., с.н.с., научный руководитель Музея ИЗК СО РАН Институт земной коры СО РАН 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия ⊠ e-mail: liva@crust.irk.ru

Ivanova Larisa A., Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher Scientific Supervisor of the Museum of the Institute of the Earth's Crust Institute of the Earth's Crust SB RAS 128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia ⊠ e-mail: liva@crust.irk.ru PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2014 VOLUME 5 ISSUE 1 PAGES 231-256

http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0126



THE PALEOPROTEROZOIC IMANDRA-VARZUGA RIFTING STRUCTURE (KOLA PENINSULA): INTRUSIVE MAGMATISM AND MINERAGENY

V. V. Chashchin, F. P. Mitrofanov

Geological Institute KSC RAS, Apatity, Russia

Abstract: The article provides data on the structure of the Paleoproterozoic intercontinental Imandra-Varzuga rifting structure (IVS) and compositions of intrusive formations typical of the early stage of the IVS development and associated mineral resources. IVS is located in the central part of the Kola region. Its length is about 350 km, and its width varies from 10 km at the flanks to 50 km in the central part. IVS contains an association of the sedimentary-volcanic, intrusive and dyke complexes. It is a part of a large igneous Paleoproterozoic province of the Fennoscandian Shield spreading for a huge area (about 1 million km²), which probably reflects the settings of the head part of the mantle plume. Two age groups of layered intrusions were associated with the initial stage of the IVS development. The layered intrusions of the Fedorovo-Pansky and Monchegorsk complexes (about 2.50 Ga) are confined to the northern flank and the western closure of IVS, while intrusions of the Imandra complex (about 2.45 Ga) are located at the southern flank of IVS. Intrusions of older complexes are composed of rock series from dunite to gabbro and anorthosites (Monchegorsk complex) and from orthopyroxenite to gabbro and anorthosites (Fedorovo-Pansky complex). Some intrusions of this complexes reveal features of multiphase ones. The younger Imandra complex intrusions (about 2.45 Ga) are stratified from orthopyroxenite to ferrogabbro. Their important feature is comagmatical connection with volcanites. All the intrusive complexes have the boninite-like mantle origin enriched by lithophyle components. Rocks of these two complexes with different age have specific geochemical characteristics. In the rocks of the Monchegorsk and Fedorovo-Pansky complexes, the accumulation of REE clearly depends on the basicity of the rocks, the spectrum of REE is non-fractionated and 'flat', and the Eu positive anomaly is slightly manifested. In the rocks of the Imandra complex, the level of REE accumulation is relatively higher. The spectrum of REE here differs with more fractionated LREE with a 'flat' distribution of HREE and distinct Eu anomalies. Rocks of all the intrusive complexes are characterized mostly by negative $\varepsilon_{Nd}(T)$ values, and ε_{Nd} values are distributed more heterogeneously in the rocks of the Monchegorsk complex than in the rocks of the Fedorovo-Pansky complex. Deposits and occurrences of Cr, complex PGE-Cu-Ni and lowsulfide Pt-Pd ores of the world class are spatially related and genetically associated with the IVS intrusive complexes. The Sopcheozero deposit (Monchepluton of the Monchegorsk complex) and Bolshaya Varaka deposit (the same-name intrusion of the Imandra complex) represent a layered Cr mineralization. Complex PGE-Cu-Ni deposits are confined to Monchepluton. They occur in vein ores of the Nittis-Kumuzhya-Travyanaya massifs (which have been worked out) and Sopcha, vein PGE-Cu, injecting Ni ores mostly and bottom deposits of the Nittis-Kumuzhya-Travyanaya massifs, as well as in the Nyud 'critical' horizon. In the past 10–15 years, low-sulphide Pt-Pd ores were discovered as new for the Kola region. Two main types of such ores have been distinguished: (1) stratiform (rift) ores being consistent with the massifs' layering, and (2) basal ores located within lower marginal zones. Deposits of Kievey (West-Pansky massif of the Fedorovo-Pansky complex), horizon 330 of the Sopcha and Vurechuayvench (Monchepluton of the Monchegorsk complex) belong to the first type; the second type is represented by the Fedorovotundrovskoe (Fedorovo-Pansky complex), South Sopcha and Loypishnyun (Monchetundrovsky massif of Monchegorsk complex) deposits.

Key words: Imandra-Varzuga rifting structure, mantle plume, layered intrusions, minerageny, low-sulfide Pt-Pd mineralization.

Recommended by E.V. Sklyarov

Citation: *Chashchin V.V., Mitrofanov F.P.* 2014. The Paleoproterozoic Imandra-Varzuga rifting structure (Kola Peninsula): intrusive magmatism and minerageny. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (1), 231–256. doi:10.5800/GT-2014-5-1-0126.

ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКАЯ ИМАНДРА-ВАРЗУГСКАЯ РИФТОГЕННАЯ СТРУКТУРА (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ): ИНТРУЗИВНЫЙ МАГМАТИЗМ И МИНЕРАГЕНИЯ

В. В. Чащин, Ф. П. Митрофанов

Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия

Аннотация: В статье приведены данные о строении палеопротерозойской внутриконтинентальной Имандра-Варзугской рифтогенной структуры (ИВС), составе интрузивных образований ее раннего этапа развития и связанных с ними полезных ископаемых. ИВС расположена в центральной части Кольского региона, имеет протяженность около 350 км и ширину от 10 км на флангах до 50 км в центральной части и включает ассоциацию осадочно-вулканогенных, интрузивных и дайковых комплексов. Она входит в состав обширной изверженной палеопротерозойской провинции Фенноскандинавского щита, которая охватывает огромный площадной ареал развития (около 1 млн км²), отражающий, по-видимому, параметры головной части мантийного плюма. С начальным этапом развития ИВС связано формирование двух возрастных групп расслоенных интрузий. К северному борту и западному замыканию структуры приурочены расслоенные интрузии Федорово-Панского и Мончегорского комплексов с возрастом около 2.50 млрд лет, а к южному борту структуры – интрузии Имандровского комплекса с возрастом около 2.45 млрд лет. Интрузии более древних комплексов образованы рядом пород от дунитов до габбро и анортозитов (Мончегорский комплекс) и от ортопироксенитов до габбро и анортозитов (Федорово-Панский комплекс). При этом в некоторых интрузиях этих комплексов установлены признаки их многофазности. Интрузии более молодого Имандровского комплекса с возрастом около 2.45 млрд лет расслоены от ортопироксенитов до феррогаббро. Важной их особенностью является комагматическая связь с вулканитами. Все интрузивные комплексы образованы из бонинитоподобного мантийного источника, обогащенного литофильными компонентами. Для пород этих двух разновозрастных комплексов характерны свои отличительные геохимические особенности. В породах Мончегорского и Федорово-Панского комплексов наблюдается отчетливая зависимость накопления редкоземельных элементов (РЗЭ) от основности пород, нефракционированный «плоский» характер спектра РЗЭ и незначительно проявленные положительные Eu аномалии. В породах Имандровского комплекса уровень накопления РЗЭ сравнительно более высокий. Спектр РЗЭ в них отличается более фракционированным характером легких редкоземельных элементов (РЗЭ) при «плоском» распределении тяжелых редкоземельных элементов (РЗЭ) и отчетливо выраженными Ец аномалиями. Породы всех интрузивных комплексов характеризуются преимущественно отрицательными значениями параметра $\epsilon_{Nd}(T)$, при этом в породах Мончегорского комплекса распределение значений є_{№1} более гетерогенное, чем в породах Федорово-Панского комплекса. С интрузивными комплексами ИВС пространственно и генетически связаны месторождения и проявления Cr, комплексных платинометально (ЭПГ)-Cu-Ni и малосульфидных Pt-Pd руд мирового уровня. Стратиформное хромовое оруденение представлено Сопчеозерским месторождением (Мончеплутон Мончегорского комплекса) и месторождением Большая Варака (одноименная интрузия Имандровского комплекса). Комплексные ЭПГ-Cu-Ni месторождения – приурочены к Мончегорскому плутону. Они присутствуют в жильных рудах массивов Ниттис-Кумужья-Травяная (отработаны) и Сопчи, жильных ЭПГ – Сu, инъекционных существенно Ni рудах и донной залежи массива Ниттис-Кумужья-Травяная, а также в «критическом» горизонте Нюда. Малосульфидные Pt-Pd руды были выявлены в течение последних 10-15 лет и являются новыми для Кольского региона. Они делятся на два основных типа: стратиформные (рифовые), гармоничные с расслоенностью массивов, и базальные, локализованные в пределах нижних краевых зон. К первому типу относятся месторождения Киевей (Западно-Панский массив Федорово-Панского комплекса), 330-го горизонта Сопчи и Вурэчуайвенч (Мончеплутон Мончегорского комплекса), ко второму – Федоровотундровское (Федорово-Панский комплекс), Южносопчинское и Лойпишнюн (Мончетундровский массив Мончегорского комплекса).

Ключевые слова: Имандра-Варзугская рифтогенная структура, мантийный плюм, расслоенные интрузии, минерагения, малосульфидное Pt-Pd оруденение.

1. Введение

В пределах Фенноскандинавского щита, на территории Кольского полуострова, Карелии и Финляндии, широким развитием пользуются внутриконтинентальные палеопротерозойские рифтогенные структуры, объединяемые в обширную изверженную провинцию. В качестве наиболее вероятного механизма их формирования большинством исследователей рассматривается плюм-тектоническая модель [Puchtel et al., 1997; Mitrofanov, Bayanova, 1999; Sharkov et al., 2000; Mitrofanov et al., 2013], адекватно объясняющая образование огромной Восточно-Скандинавской магматической провинции за счет поднятия перегретого нижнемантийного материала. При этом сходные магматические процессы проявляются с позднего архея до середины раннего протерозоя, что выражается в пространственной сопряженности неоархейских зеленокаменных поясов и палеопротерозойских рифтогенных структур региона [Sharkov et al., 2000].



Рис. 1. Схема расположения Имандра-Варзугской структуры.

1 – палеозойские плутоны нефелиновых щелочных сиенитов и фоидолитов: Хибинский (Х), Ловозерский (Л); 2 – гранулитовые пояса: Лапландский (Л), Кандалакшско-Колвицкий (КК); 3 – палеопротерозойские рифтогенные структуры: Печенгская (П), Имандра-Варзугская (ИВ) и Куолаярвинская (К); 4 – расслоенные базит-ультрабазитовые интрузии с возрастом около 2.45–2.52 млрд лет: г. Генеральская (1), Солозеро (2), Улитаозерская (3), Мончетундровская (4), Мончеплутон (5), Имандровский комплекс (6), Федорова тундра (7), Панские тундры (8), Песочная (9); 5 – неоархейская Кейвская структура с щелочными гранитами в ее обрамлении; 6 – неоархейские зеленокаменные пояса: Колмозеро-Воронинский (КВ), Терско-Аллареченский (ТА); 7 – архейские метаморфические и ультраметаморфические образования; 8 – разрывные нарушения.

Fig. 1. The scheme showing the location of the Imandra-Varzuga rifting structure.

1 – Paleozoic plutons of nepheline alkaline syenites and foidolites: Khibiny (X), Lovozero (Π); 2 – granulitic belts: Lapland (Π), Kandalaksha-Kolvitsa (KK); 3 – Paleoproterozoic riftogenic structures: Pechenga (Π), Imandra-Varzuga (ИB), Kuolayarvi (K); 4 – layered mafic-ultramafic intrusions (about 2.45–2.52 Ga): Mt. Generalskaya (1), Solozero (2), Ulitaozero (3), Monchetundra (4), Monchepluton (5), Imandra complex (6), Fedorova tundra (7), Pana tundras (8), Pesochnaya (9); 5 – Neoarchean Keyvu structure framed by alkaline granites; 6 – Neoarchean greenstone belts: Kolmozero-Voronya (KB), Tersko-Allarechka (TA); 7 – Archean metamorphic and ultrametamorphic formations; 8 – faults.

Для обширной изверженной провинции Фенноскандинавского щита характерен огромный площадной ареал развития (около 1 млн км²), который включает тесную пространственную ассоциацию протяженных вулканических и интрузивных поясов, а также дайковых роев и отражает, по-видимому, параметры головной части мантийного плюма [*Mitrofanov et al.*, 2013].

Имандра-Варзугская структура (ИВС) является одной из типовых и крупнейших структур провинции и частью некогда единого Печенгско-Варзугского пояса, включающего ИВС и Печенгскую структуру (рис. 1). Е.Е. Милановский был одним из первых, кто отметил близость Печенгской и Имандра-Варзугской структур (палеоавлакогенов) к современным эпиплатформенным рифтам щелевого типа, отличающимся наличием внутренней складчатости, обусловленной сменой начального режима растяжения на последующее сжатие [*Milanovsky*, 1976, 1983].

ИВС расположена в центральной части Кольского региона, ориентирована в субширотном-северо-западном направлении при протяженности около 350 км и ширине от 10 км на флангах до 50 км в центральной части (рис. 1). Она включает ассоциацию осадочновулканогенных, интрузивных и дайковых комплексов. С севера-северо-востока ИВС контактирует с породами архейского Кольского блока, а также позднеархейскими щелочными гранитами обрамления Кейвской структуры, а с юга-юго-запада граничит с вулканитами позднеархейского Терско-Аллареченского зеленокаменного пояса, имея с ним тесную пространственную сопряженность (рис. 1).

ИВС обладает наиболее полным разрезом слагающих ее осадочно-вулканогенных пород, который начинается с сумия и в этом отношении не имеет аналогов в регионе. Весь объем осадочно-вулканогенных образований ИВС делится на десять циклических пар в ранге свит, которые объединены в три серии: стрельнинскую (сумий), варзугскую (сариолий и ятулий) и томингскую (людиковий и калевий). Таким образом, осадочно-вулканогенные образования ИВС характеризуют временной интервал проявления геологических процессов от 2550 до 1880 млн лет, т.е. на протяжении почти 700 млн лет.

В основании свит залегают осадочные породы, а в верхах – вулканогенные. Осадочные образования представлены метаморфизованными граувакками, аркозами, кварцитами, доломитами, углеродистыми сланцами, иногда с конгломератами в основании [Gorbunov, 1982]. Суммарная мощность осадочных образований достигает 4 км. Вулканиты представлены широким спектром пород от низкотитанических пикритов и базальтов до андезитов, дацитов и риолитов с преобладанием базальтов. Они связаны с развитием в стрельнинское время трещинных щитовых вулканов, которые сменялись центральными на конечных стадиях циклов. Высокая интенсивность извержений в раннем палеопротерозое постепенно уменьшалась к его позднему этапу. Суммарная мощность вулканитов составляет около 11 км [Gorbunov, 1982].

Интерес, который продиктован к ИВС, обусловлен тем, что с ней пространственно и генетически связано подавляющее большинство расслоенных интрузий Кольского региона, несущих важные в промышленном отношении стратегические месторождения Cr, ЭПГ-Cu-Ni и Pt-Pd руд. Данная статья посвящена характеристике интрузивного магматизма ИВС и ассоциирующей с ним минерагении.

2. Интрузивный магматизм ИВС

С начальным этапом развития ИВС связано формирование двух возрастных групп расслоенных интрузий. К северному борту и западному замыканию структуры приурочены расслоенные интрузии Мончегорского и Федорово-Панского комплексов с началом формирования около 2.5 млрд лет, а к южному борту структуры – интрузии Имандровского комплекса с возрастом около 2.45 млрд лет (рис. 2).

В состав Мончегорского комплекса входят: собственно Мончегорский плутон, Мончетундровская интрузия и Островской массив (рис. 2). *Мончеплутон* площадью около 55 км² на современном эрозионном срезе имеет дугообразную форму и состоит из двух ветвей (камер): северо-западной, представленной массивами Ниттис-Кумужья-Травяная (НКТ), и субширотной, сложенной массивами Сопча-Нюд-Поаз (рис. 3). Они имеют мульдообразную форму с пологим падением первичной расслоенности и трахитоидности под углами 10–25° к центру мульд и более крутым падением контактов (до 45°). По данным бурения установлено, что плутон полого погружается на юго-запад и на юго-восток.

Мончегорский плутон сложен дунитами, гарцбургитами, ортопироксенитами, норитами и габбро-норитами, образующими единый сингенетический ряд пород [Kozlov, 1973]. Он отчетливо дифференцирован в вертикальном и горизонтальном направлениях, что в общем виде выражается в понижении основности пород снизу вверх и с запада на восток. Разрезы массивов НКТ и Сопча сложены (снизу вверх): кварцсодержащими норитами и габбро-норитами придонной зоны мощностью 10-100 м, гарцбургитами (100-200 м), чередованием гарцбургитов и ортопироксенитов (250-400 м), ортопироксенитами (300-700 м). Общая мощность массива НКТ увеличивается с севера на юг от 200-300 до 800-1000 м, мощность пород массива Сопча составляет 1100-1600 м и является максимальной для Мончеплутона [Mitrofanov, Smol'kin, 2004a]. В восточной части плутона, в районе массивов Нюд-Поаз, при общей мощности разреза около 800 м придонная часть сложена кварцсодержащими норитами и габброноритами мощностью до 50 м, выше по разрезу развиты меланократовые нориты, которые в верхней части сменяются на мезо- и лейкократовые нориты и габбронориты (Поаз). В средней части разреза массива Нюд залегает «критический» горизонт, сложенный незакономерным чередованием мезо- и меланократовых норитов, плагиоортопироксенитов, габбро-норитов, гарцбургитов, микрогаббро и микрогаббро-норитов, а также интенсивно ороговикованных высокоглиноземистых сланцев кровли. В юго-восточной части плутона, вблизи его контакта с вулканитами ИВС, развиты метаморфизованные габбро-нориты и плагиоклазиты массива Вурэчуайвенч, степень изменения которых возрастает по направлению к вулканитам.

Возраст некоторых пород массива, определенный U-Pb методом по циркону и бадделеиту, укладывается в диапазон от 2508 до 2493 млн лет (табл. 1). Сходство возрастных характеристик пород, в т.ч. из платиноносных рифов, по-видимому, подтверждает вывод [Kozlov, 1973] о том, что все породы массива формировались в ходе единой внутрикамерной дифференциации расплава.

Мончетундровский массив имеет форму сильно



Рис. 2. Схема геологического строения западного замыкания Имандра-Варзугской рифтогенной структуры.

1 – палеозойский Хибинский плутон щелочных нефелиновых сиенитов и фоидолитов; 2–8 – палеопротерозойские интрузивные и вулканогенно-осадочные образования: 2 – массив щелочных сиенитов Соустова с возрастом 1860±8 млн лет [*Arzamastsev et al.*, 2001], 3 – массив габбро-норитов Нярк-Тундры; 4 – субщелочные анатектит-граниты и кварцевые диориты, 5 – расслоенные мафитовые интрузии Имандровского комплекса: Прихибинский (1), Мончеполуострова (2), г. Сеяваренч (3), г. Девичья (4), г. Ягельная (5), Оспе-Лувтуайвенч (6), Экостровский (7), Умбареченский (8), Большая Варака (9), 6 – Имандра-Варзугская рифтогенная структура, 7 – массив анортозитов, лейкогаббро, лейкогаббро-норитов и лейконоритов Чуна Тундры, 8 – Мончегорский комплекс расслоенных интрузий: Мончеплутон (1), Мончетундровский массив (2), Островской массив (3); 9 – неоархейский Терско-Аллареченский зеленокаменный пояс; 10 – архейские метаморфические и ультраметаморфические образования Кольского блока (К) и Беломорского подвижного пояса (Б); 11 – месторождения (а), проявления и рудные горизонты (б) хромовых руд, проявления и рудные горизонты ванадийсодержащих ильменит-титаномагнетитовых руд (в); 12 – геологические границы; 13 – разрывные нарушения: главные (а), второстепенные (б).

Fig. 2. The scheme showing the geological structure of the western closure of the Imandra-Varzuga rifting structure.

1 – Paleozoic Khibiny pluton of alkaline nepheline syenites and foidolites; 2-8 – Paleoproterozoic intrusive and volcano-sedimentary formations: 2 – Soustov alkaline syenite massif (1860±8 Ma) [*Arzamastsev et al., 2001*], 3 – Nyark Tundra gabbro-norite massif, 4 – subalkaline anatectitegranites and quartz diorites, 5 – layered mafic intrusions of Imandra complex: Prikhibinsky (1), Monchepoluostrov (2), Mt. Seyavarench (3), Mt. Devichya (4), Mt. Yagelnaya (5), Ospe-Luvtuayvench (6), Ekostrovskiy (7), Umbarechenskiy (8), Bolshaya Varaka (9), 6 – Imandra-Varzuga rifting structure, 7 – anorthosites, leucogabbro, leucogabbro-norites and leuconorites of the Chuna Tundra massif, 8 – Monchegorsk complex of layered intrusions: Monchepluton (1), Monchetundra massif (2), Ostrovskoy massif (3); 9 – Neoarchean Tersko-Allarechka greenstone belt; 10 – Archean metamorphic and ultrametamorphic formations of Kola block (K) and Belomorian mobile belt (Б); 11 – deposits (a), manifestations and ore horizons (6) of chromic ores, manifestations and ore horizons of vanadium-bearing ilmenite-titanomagnetitic ores (B); 12 – geological boundary; 13 – main (a) and secondary (6) faults.



Рис. З. Схема размещения месторождений и проявлений в пределах Мончеплутона и его обрамления.

1 – Имандра-Варзугская рифтогенная структура; 2 – Мончетундровский массив: верхняя зона – метагаббро, метагаббро-нориты и анортозиты средне-крупнозернистые (а), нижняя зона – нориты и ортопироксениты мелко-среднезернистые (б); 3 – кварцевое метагаббро массива 10-й аномалии; 4 – нориты лейко-мезократовые массива Морошковое озеро; 5 – габбро-нориты массива Кириха; 6 – Мончеплутон: метагаббро-нориты (а) и плагиоклазиты (б) предгорий Вурэчуайвенч, сульфидные жилы (в), пласт 330-го горизонта (г), «критический горизонт» (д), Дунитовый блок (е), ортопироксениты (ж), переслаивание ортопироксенитов и гарцбургитов (з), гарцбургиты (и), нориты (к), габбро-нориты (л); 7 – горизонты сульфидной платинометальной минерализации; 8 – архейские метаморфические и ультраметаморфические образования Кольского блока; 9–11 – месторождения (а) и проявления (б): 9 – хромовых руд, 10 – платино-медноникелевых руд, 11 – малосульфидных платинометальных руд; 12 – геологические границы: достоверные (а), предполагаемые (б), фациальные (в); 13 – разрывные нарушения.

Fig. 3. The scheme showing locations of deposits and manifestations within Monchepluton and its framing.

1 – Imandra-Varzuga rifting structure; 2 – Monchetundra massif: upper zone – medium- and coarse-grained metagabbro, metagabbro-norites (a), lower zone – fine- and medium-grained norites and orthopyroxenites (6); 3 – quartz metagabbro of Anomaly 10 massif; 4 – leuco-mesocratic norites of Lake Moroshkovoe massif; 5 – gabbro-norites of Kiriha massif; 6 – Monchepluton: metagabbro-norites (a) and plagioclasites (6) of Vurechuayvench foothills, sulfide veins (B), bed of Horizon 330 (r), 'critical horizon' (д), Dunitic block (e), orthopyroxenites (∞), interbedding orthopyroxenites and harzburgites (3), harzburgites (ν), norites (κ), gabbro-norites (a) and manifestations (6): 9 – chromic ores, 10 – PGE-Cu-Ni ores, 11 – low-sulfide PGE ores; 12 – proved (a), inferred (6) and facial (B) geological boundaries; 13 – faults.

Таблица 1. U-Pb возраст пород Мончегорского плутона

Массивы	Породы	Возраст, млн лет	Минералы	Источник
HKT	кварцевый норит	2507±9	Zr	[Mitrofanov, Smol'kin, 2004b]
Нюд	габбро-пегматит	2504.4±1.5	Zr	[Amelin et al., 1995]
	габбро-пегматит	2500±5	Zr, bad	[Mitrofanov, Smol'kin, 2004b]
	норит	2493±7	Zr	[Balashov et al., 1993]
Вурэчуайвенч	метаплагиоклазит	2508±7	Zr	[Pripachkin et al, 2012]
	метагаббро-норит	2504±8	Zr	
	метагаббро-норит	2497±21	Zr, bad	[Mitrofanov, Smol'kin, 2004b]

T a b l e 1. U-Pb age of Monchepluton rocks

вытянутого овала и протяженность около 30 км при ширине 2-6 км (см. рис. 2). В поперечном разрезе массив имеет форму мульды с падением трахитоидности и первичной полосчатости к ее центру. Вертикальная мощность сохранившейся части массива по данным глубокого структурного бурения составляет около 2 км, а его кровля и верхняя часть эродированы. С Мончегорским плутоном массив имеет тектонический контакт, в пределах которого контактируемые породы обеих интрузий разбиты на ряд узких линейных блоков, разделенных бластомилонитами. По данным глубокого структурного бурения Мончетундровский массив состоит из двух зон: нижней - норит-ортопироксенитовой с прослоями и линзами метадунитов и гарцбургитов и верхней – лейкогаббро-норитовой и габбро-анортозитовой [Mitrofanov, Smol'kin, 2004a]. Возраст среднезернистых мезократовых габбро-норитов средней части Мончетундровского массива находится в интервале 2501–2505 млн лет [Mitrofanov, Smol'kin, 2004b; Bayanova, 2004]. Для крупнозернистых лейкогаббро и лейкогаббро-норитов из верхней части массива определен возраст в 2476-2453 млн лет [Mitrofanov et al., 1993; Nerovich et al., 2009; Bayanova et al., 2010], что может свидетельствовать о фазных соотношениях между этими породами или о длительности формирования массива.

Островской массив имеет в плане неправильноокруглую форму размером 3.5×(3–4) км (см. рис. 2) и воронкообразную в разрезе. В его разрезе выделяются три зоны (сверху вниз): габбро-норитов (250 м), чередования вебстеритов и лерцолитов (130 м) и оливинитов с редкими прослоями лерцолитов и вебстеритов (свыше 600 м) [*Mitrofanov*, *Smol'kin*, 2004*a*].

Федорово-Панский комплекс имеет протяженность около 90 км при мощности до 4 км. Тектоническими нарушениями комплекс разбит на четыре блока, рассматриваемых в качестве самостоятельных массивов: Федорова тундра, Ластъяврский, Западно-Панский и Восточно-Панский [Schissel et al., 2002] (рис. 4). Согласно последним данным, каждый из этих массивов представлял собой самостоятельную магматическую камеру со своей историей формирования и различными механизмами их внутрикамерной дифференциации

[Korchagin, Mitrofanov, 2008].

Массив Федорова тундра имеет линзовидную форму в плане размером 15×5 км и сложен в основании такситовыми габбро-норитами, выше которых залегает зона плагиоортопироксенитов и норитов мощностью до 200 м, затем габбро-норитов и норитов мощностью 200–800 м, и завершает разрез зона габбро мощностью более 1000 м (рис. 4).

Ластъяврский массив имеет линзовидную форму размером 5.0×1.8 км, ориентированную в северо-западном направлении. Разрез массива представлен такситовыми габбро-норитами мощностью 50 м в основании, выше залегают нориты и плагиоортопироксениты краевой зоны мощностью 150–200 м и габбро-нориты верхней зоны мощностью до 1 км.

Западно-Панский массив имеет пластообразную форму протяженностью около 30 км и отделен от Ластъяврского массива мощной зоной Цагинского разлома. Он сложен главным образом габбро-норитами, среди которых выделяются два расслоенных горизонта. В его разрезе выделяются (снизу вверх): метагабброиды краевой зоны мощностью 70 м, нориты мощностью 50 м и габбро-нориты мощностью 2500 м. Нижний расслоенный горизонт залегает в 600–800 м от подошвы массива, образован тонким чередованием контрастных по составу пород (норитов, пироксенитов, пятнистых габбро и анортозитов). Верхний расслоенный горизонт представляет собой чередование разнозернистых габбро-норитов, норитов и анортозитов.

Восточно-Панский массив располагается к юговостоку от Западно-Панского, его протяженность составляет около 20 км, неполная видимая мощность массива достигает 4.5 км (рис. 4). От Западно-Панского массива он отличается характером расслоенности, резким преобладанием габбро в верхних частях разреза. В разрезе Восточно-Панского массива выделены три зоны. В основании массива залегает нижняя краевая зона мощностью около 100 м, представленная мелкозернистыми габбро-норитами. Выше залегает габбро-норитовая зона мощностью до 1.5 км, сложенная равномернозернистыми, такситовыми и пойкилитовыми габбро-норитами. Завершает разрез массива



Рис. 4. Схема геологического строения Федорово-Панского комплекса, по [Korchagin, Mitrofanov, 2008] с авторскими добавлениями.

1 – дайки метагаббро-долеритов; 2 – Имандра-Варзугская рифтогенная структура; 3–8 – Федорово-Панский комплекс расслоенных интрузий: 3 – тонкорасслоенные горизонты, 4 – оливиновые горизонты, 5 – габбро, 6 – габбро-нориты, 7 – нориты и плагиоортопироксениты, 8 – такситовые габбро-нориты краевой зоны; 9 – позднеархейские щелочные граниты; 10 – архейские метаморфические и ультраметаморфические образования Кольского блока; 11 – горизонты сульфидной и платинометальной минерализации; 12 – месторождения (а) (1 – Федоровотундровское, 2 – Киевей, 3 – Восточное Чуарвы) и проявления (б) ЭПГ; 13 – геологические границы: достоверные (а), фациальные (б); 14 – разрывные нарушения: главные (а), второстепенные (б).

Fig. 4. The scheme showing the geological structure of the Fedorovo-Pana complex according to data from [*Korchagin*, *Mitrofanov*, 2008] and the author's data.

1 – metagabbro-dolerite dykes; 2 – Imandra-Varzuga rifting structure; 3-8 – Fedorovo-Pana complex of layered intrusions: 3 – laminated horizons, 4 – olivine horizons, 5 – gabbro, 6 – gabbro-norites, 7 – norites, 8 – taxitic gabbro-norites of the marginal zone; 9 – Late Archean alkaline granites; 10 – Archean metamorphic and ultrametamorphic formations of Kola block; 11 – horizons of sulfide and PGE mineralization; 12 – PGE deposits (a) (1 – Fedorovotundrovskoe, 2 – Kievey, 3 – East Chuarvi) and manifestations (6); 13 – proved (a) and facial (6) geological boundaries; 14 – main (a) and secondary (6) faults.

габбровая зона мощностью до 3 км, представленная крупнозернистым и пегматоидным габбро с прослоями лейкократовых, оливиновых и магнетитовых разновидностей (рис. 4).

По многочисленным изотопно-возрастным определениям U-Pb и Sm-Nd методами [Amelin et al., 1995; Bayanova, 2004; Nitkina, 2006; Serov, 2008; Groshev et al., 2009] временной интервал формирования пород и руд Федорово-Панского комплекса был очень длительным, в диапазоне 2526–2447 млн лет. При этом развитие Федоровотундровской рудной системы (расслоенной базитовой серии пород и рудоформирующей дополнительной магматической габбро-норитовой фазы) происходило в два этапа (2510±10 и 2485±9 млн лет), а малосульфидные платинометальные рифы Западно-Панского массива обязаны своим появлением более поздним процессам жильного анортозитообразования (~2470 и ~2450 млн лет) в массе более ранних (2495±5 млн лет) грубо расслоенных габбро-норитов.

Имандровский комплекс объединяет несколько от-

дельных интрузий (см. рис. 2), которые, как предполагается, являются фрагментами первоначально единой крупной интрузии, названной Имандровским лополитом [Dokuchaeva et al., 1980, 1982].

Одним из типовых массивов комплекса является Умбареченский, который имеет пластовую форму протяженностью 50 км и мощностью от 0.5 до 2 км. Он имеет моноклинальное залегание с падением на север и северо-восток под углами от 40–50 до 70°. На основании бурения поисковых скважин в разрезе Умбареченского массива выделяются четыре зоны [*Chashchin et al., 2008*]:

- нижняя зона (мощность 30–40 м) амфиболизированных пироксенитов и меланократовых норитов с горизонтами хромититов мощностью 0.2–2.0 м;

- главная зона (мощность 500–550 м) габбро-норитов, различающихся по текстурно-структурным особенностям;

- переходная зона (мощность 250–300 м) чередующихся мезо-лейкократовых габбро и габбро-норитов с

Таблица2. U-Pb возраст пород из массивов Имандровского комплекса

Массивы	Породы	Возраст, млн лет	Минералы	Источник
Прихибинский	гранофир	2442.2±1.7	Bad	[Amelin et al., 1995]
	гранофир	2434±15	Zr, bad	[Bayanova, 2004]
	плагиоклазит	2437±11	Bad	[Galimzyanova et al., 1998]
Большая Варака	габбро-норит	2446±39	Zr, bad	[Bayanova, 2004]
	габбро-пегматит	2440±4	Zr	
	монцодиорит	2398±21	Zr	
	оливиновый габбро-норит	2395±5	Zr, bad	
Умбареченский	норит	2441.0±1.6	Zr	[Amelin et al., 1995]
	норит	2437±7	Zr, bad	[Bayanova, 2004]

горизонтом плагиоклазитов мощностью 15 м в кровле;

- верхняя зона (мощность 100—150 м) кварцсодержащих лейко-мезократовых метаморфизованных феррогаббро с горизонтами титаномагнетитовых руд мощностью до 20 м, прослоями ферродиоритов и кварцевых ферродиоритов в кровле.

Время формирования различных интрузий Имандровского комплекса укладывается преимущественно в интервал 2446–2437 млн лет. Для пегматоидных габбро-норитов и дайки монцодиоритов, секущих габбронориты массива Большая Варака, установлен более молодой возраст (2395 и 2398 млн лет, соответственно), что дает основание для отнесения этих пород к поздней фазе данного комплекса (табл. 2).

Зачастую в кровле некоторых интрузий комплекса на их контакте с кислыми вулканитами сейдореченской свиты наблюдаются гранофировые породы гранитного состава (см. рис. 3). Это мелко-среднезернистые породы, состоящие из кварца (20–30 %), плагиоклаза (55–75 %), микроклина (до 20 %), биотита (лепидомелан, 3–10 %) и мусковита (до 5 %). В качестве второстепенных минералов присутствуют эпидот и карбонат, в акцессорных количествах встречаются титанит, апатит и рудный минерал. Структура пород гранофировая с участками гипидиоморфнозернистой и бластогранитной.

Возраст гранофиров, определенный U-Pb методом по циркону и бадделеиту, находится в пределах 2442– 2434 млн лет (табл. 2). Приуроченность гранофиров к верхней зоне габброидов Имандровского комплекса, зависимость их состава от состава вмещающих пород позволяют рассматривать их возникновение в результате частичного подплавления вышележащих пород сейдореченской свиты при внедрении интрузий габброидов. Близость возраста формирования и состава вулканитов сейдореченской свиты и пород Имандровского комплекса послужила аргументом для объединения их в единую сумийскую вулканоплутоническую ассоциацию [*Chashchin et al., 2008*]. В нижней части разреза некоторых интрузий комплекса присутствуют месторождения и проявления хромовых руд, связанные с маломощными горизонтами хромитового оруденения, а в верхней – ванадий-титановые проявления, приуроченные к горизонтам ильменит-титаномагнетитового оруденения (см. рис. 2).

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЗЭ В ПОРОДАХ РАССЛОЕННЫХ ИНТРУЗИЙ

Для распределения РЗЭ в различных породах Мончегорского плутона характерно закономерное возрастание их содержаний по мере снижения основности пород. В перидотитах и пироксенитах НКТ и Сопчи оно в 1-5 раз выше хондрита. Исключение составляют перидотиты 330-го горизонта Сопчи, отличающиеся наиболее низкими содержаниями РЗЭ – 0.2–1.0 относительно хондрита. В основных породах Нюда и Вурэчуайвенча обогащенность РЗЭ в 6-20 раз больше хондрита (рис. 5, А). Для всех пород Мончеплутона характерно слабое фракционирование легких РЗЭ и отсутствие фракцирования тяжелых РЗЭ. При этом особенностью перидотитов и пироксенитов Мончеплутона является отсутствие положительных аномалий Еи (исключение составляет одна проба из перидотита Дунитового блока), тогда как основные породы Нюда и Вурэчуайвенча выделяются положительными Еu аномалиями: слабыми в норитах, повышенными в габбро-норитах и плагиоклазитах (рис. 5, А), что связано с наличием в их составе кумулусного плагиоклаза.

Примечательным является существенное сходство спектра распределения РЗЭ в породах краевой и расслоенной серий массива Федорова тундра с габброидами Мончеплутона (рис. 5, *A*), что свидетельствует об их генетическом единстве.

Породы Имандровского комплекса характеризуются умеренным обогащением легкими РЗЭ, в 10–40 раз превышающим хондритовый уровень, и относительно ровным, «плоским» спектром распределения тяжелых РЗЭ с характерной положительной Еu аномалией, обусловленной кумулусным фракционированием плагиоклаза (рис. 5, *Б*). Сходный с интрузивными породами



Рис. 5. Распределение хондрит-нормализованных содержаний РЗЭ в породах Мончегорского плутона, по [*Krivolutskaya et al., 2010; Mitrofanov, Smol'kin, 2004a*], массива Федорова тундра, по [*Groshev, 2010*] (*A*), Имандровского комплекса, по [*Mitrofanov, Smol'kin, 2004a*], вулканитах сейдореченской свиты ИВС, по [*Mints et al., 1996*] и гранофировых гранитах, по [*Bayanova et al., 1993*] (*Б*).

Fig. 5. Distribution of chondrite-normalized REE contents in Monchepluton rocks according to [*Krivolutskaya et al., 2010; Mitro-fanov, Smol'kin, 2004a*], Fedorova Tundra massif according to [*Groshev, 2010*] (*A*), Imandra complex according to [*Mitrofanov, Smol'kin, 2004a*], volcanites of Seidorechka suites according to [*Mints et al., 1996*], and granophyres granites according to [*Ba-yanova et al., 1993*] (*F*).

Имандровского комплекса уровень фракционирования РЗЭ имеют метабазальты и метаандезибазальты сейдореченской свиты ИВС, отличаясь от них наличием отрицательной Eu аномалии. Распределение РЗЭ в метариодацитах сейдореченской свиты характеризуется еще большей степенью фракционирования с обогащением легкими РЗЭ, в 200 раз превышающим хондритовый уровень, с аналогичной отрицательной Еu аномалией. Таким образом, спектры РЗЭ в вулканитах сейдореченской свиты располагаются субпараллельно друг другу с последовательным увеличением концентраций РЗЭ по мере снижения основности пород (рис. 5, Б). При этом наличие отрицательной Еи аномалии в вулканитах обусловлено, вероятно, частичным накоплением плагиоклаза в остаточном магматическом источнике. Обращает на себя внимание практически одинаковый характер распределения РЗЭ в метариодацитах и гранофирах (рис. 5, *Б*), что является веским аргументом в пользу представления об образовании последних за счет подплавления кислых вулканитов. Сходный характер распределения РЗЭ в породах Имандровского комплекса и вулканитах сейдореченской свиты может свидетельствовать об образовании их из одного магматического источника и является дополнительным аргументом в пользу объединения их в единую вулканоплутоническую ассоциацию.

4. Sm-Nd изотопные данные

На диаграмме ε_{Nd} -время (рис. 6) магматические породы ИВС можно разделить на две группы. К первой относятся расслоенные интрузии и вулканиты раннего этапа ее развития. Они характеризуются в основном отрицательными значениями $\epsilon_{\rm Nd}$, расположенными существенно ниже уровня деплетированной мантии (рис. 6). В частности, в интрузивных породах Мончеплутона определены преимущественно отрицательные, но в отдельных случаях и положительные значения величины є_{Nd}. В частности, положительные значения установлены для ортопироксенитов г. Сопча (+1.18) и оливиновых ортопироксенитов г. Кумужья (+0.29), для остальных пород установлены отрицательные значения ϵ_{Nd} , варьирующиеся в широком диапазоне – (–0.17 \div -2.64) [Mitrofanov, Smol'kin, 2004b]. Для массива предгорий Вурэчуайвенч получены весьма низкие значения ε_{Nd} = -2.98 [Mitrofanov, Smol'kin, 2004b], что может свидетельствовать о большей степени контаминации его родоначального расплава породами кровли магматической камеры. Наиболее низкие значения є_{Nd} установлены для пород «критического» горизонта Нюда: меланоноритов (-2.75) и плагиогарцбургитов (-6.06) [Mitrofanov, Smol'kin, 2004b], что показывает существенную роль контаминации коровым материалом расплава, исходного для пород «критического» горизонта. В породах Мончетундровского массива значения величины

 $\varepsilon_{\rm Nd}$ также характеризуются значительным разбросом (рис. 6). Так, в меланократовых норитах нижней зоны массива величина $\varepsilon_{\rm Nd}$ составляет –1.58 [*Mitrofanov*, *Smol'kin*, 2004b], а в породах верхней зоны она изменяется от +2.03 до –3.41 [*Mitrofanov*, *Smol'kin*, 2004b; *Nerovich et al.*, 2009].

Для пород Западно-Панского массива Федорово-Панского комплекса значения ϵ_{Nd} варьируются от -0.20 в норитах краевой зоны до -2.41 в габбро-норитах его верхней зоны (рис. 6) [Serov, 2008]. В целом, все расслоенные интрузии ИВС характеризуются в основном отрицательными значениями величины $\varepsilon_{\rm Nd}$, что свидетельствует о близких типах их обогащенных мантийных источников. Подобные характеристики определены и для всех палеопротерозойских интрузий Фенноскандинавского щита, что отчетливо видно на примере расслоенных интрузий Карелии и Финляндии (рис. 6) и свидетельствует об их образовании из обогащенного литофильными компонентами мантийного резервуара. Некоторые различия величин ε_{Nd} в породах палеопротерозойских расслоенных интрузий, в том числе появление среди них редких плюсовых значений, возможно, связаны с суммарным эффектом нескольких процессов, в том числе многократным пульсационным поступлением в магматическую камеру нескольких порций магматических расплавов, изотопный состав которых менялся со временем, контаминацией расплавами вмещающих коровых пород во время продвижения магм вверх или после заполнения ими промежуточных камер.

Вторая группа представлена ферропикритами и комагматичными им габбро-верлитовыми интрузиями Печенгской структуры с возрастом 1990±40 и 1982±8 млн лет, соответственно [*Smol'kin*, 1992; *Smol'kin*, *Bayanova*, 1999], для которых характерны положительные значения ε_{Nd} , расположенные несколько ниже уровня деплетированной мантии (рис. 6). Таким образом, величина ε_{Nd} в мантийных источниках пород Печенгской и Имандра-Варзугской структур изменялась от ε_{Nd} <0 в сумии (2.5–2.4 млрд лет) до ε_{Nd} >0 в людиковии (2.1–1.9 млрд лет). Это свидетельствует о смене мантийного источника в процессе эволюции рифтогенеза с обогащенного (бонинитоподобного) на деплетированный (пикритовый).

5. Минерагения

Основу минерагении ИВС составляют месторождения и проявления Сг, комплексных ЭПГ-Си-Ni и малосульфидных Pt-Pd руд, пространственно и генетически связанные с Мончегорским, Федорово-Панским и Имандровским комплексами. Большинство комплексных ЭПГ-Си-Ni месторождений приурочены к Мончеплутону и известны с конца 30-х годов прошлого века. В то же время за последние 15–20 лет были выявлены новые для региона месторождения хромовых и мало-



Рис. 6. Диаграмма ε_{Nd} -время для палеопротерозойских расслоенных интрузий Фенноскандинавского щита.

1 – ферропикриты (а) и Пильгуярвинская габбро-верлитовая интрузия (б) Печенгской структуры [Hanski et al., 1990]; 2 – Мончегорский плутон [Mitrofanov, Smol'kin, 2004b]; 3 – Мончегундровский массив [Mitrofanov, Smol'kin, 2004b; Nerovich et al., 2009]; 4 – Федорово-Панский комплекс [Balashov et al., 1993; Serov, 2008]; 5 – Имандровский комплекс [Balashov et al., 1993]; 6 – расслоенные интрузии Карелии и Финляндии [Amelin, Semenov, 1996; Berkovskii et al., 2000; Huhma et al., 1990]; 7 – кислые метавулканиты сейдореченской свиты ИВС [Chashchin et al., 2008]; 8 – вулканиты позднеархейских зеленокаменных поясов Кольского полуострова и Карелии [Vrevsky et al., 2003; Puchtel et al., 1999; Svetov, Huhma, 1999]; 9 – тренд эволюции величины ε_{Nd} в мантийных резервуарах. CHUR – однородный хондритовый резервуар, МОRB – базальты срединно-океанических хребтов по модели [Smith, Ludden, 1989], AR – область эволюции архейской коры по [Patchett, Bridgwater, 1984].

Fig. 6. The ε_{Nd} -time diagram for the Paleoproterozoic layered intrusions of the Fennoscandian shield.

1 – ferropicrites (a) and Pilguyarvi gabbro-wehrlite intrusion (6) of the Pechenga structure [*Hanski et al.*, 1990]; 2 – Monchepluton [*Mitrofanov*, *Smol'kin*, 2004b]; 3 – Monchetundra massif [*Mitrofanov*, *Smol'kin*, 2004b; *Nerovich et al.*, 2009]; 4 – Fedorovo-Pansky complex [*Balashov et al.*, 1993; *Serov*, 2008]; 5 – Imandra complex [*Balashov et al.*, 1993]; 6 – layered intrusions of Karelia and Finland [*Amelin*, *Semenov*, 1996; *Berkovskii et al.*, 2000; *Huhma et al.*, 1990]; 7 – acid metavolcanites of IVS Seydorechka suite [*Chashchin et al.*, 2008]; 8 – volcanites of Late Archaean greenstone belts of the Kola peninsula and Karelia [*Vrevsky et al.*, 2003; *Puchtel et al.*, 1999]; Svetov, *Huhma*, 1999]; 9 – evolution trend of magnitude ε_{Nd} in mantle reservoirs. CHUR – homogeneous chondritic reservoirs, MORB – basalts of mid-oceanic ridges according to the model by [*Smith*, *Ludden*, 1989], AR – Archaean crust evolution area according to [*Patchett*, *Bridqwater*, 1984].

сульфидных платинометальных руд, имеющие важное промышленное значение.

5.1. Стратиформные хромовые руды

Они представлены месторождениями Сопчеозерским и Большая Варака. Сопчеозерское хромовое месторождение было открыто в конце 90-х годов прошлого века. Оно расположено в юго-западной части Мончегорского плутона (см. рис. 3) и приурочено к пластообразному телу дунитов, расположенному на сочленении северо-западной (Ниттис-Кумужья-Травяная) и субширотной (Сопча-Нюд-Поаз) ветвей плутона. Дунитовый блок имеет сложную конфигурацию в плане и размеры около 1500×3000 м, его вертикальная мощность варьируется от 100 до 700 м с погружением на юго-восток. Подстилающими породами блока являются ортопироксениты мощностью 400-600 м с прослоями гарцбургитов, сходные с породами массива Ниттис-Кумужья-Травяная [Mitrofanov, Smol'kin, 2004а]. Блок разбит серией разрывных нарушений преимущественно северо-западного простирания с амплитудой смещения от нескольких до первых сотен метров. Вблизи зон разломов породы блока частично серпентинизированы, хлоритизированы, реже оталькованы. Для Дунитового блока установлена четко выраженная латеральная зональность, связанная с увеличением содержания интеркумулусных минералов - плагиоклаза и пироксена в дунитах и постепенным переходом их в плагиоклаз-пироксеновые дуниты и далее в плагиогарцбургиты от центральной его части к северозападному и юго-восточному флангам (рис. 7). Югозападная часть блока сечется многочисленными дайковыми телами габброидов, сходными с соответствующими породами Мончетундровского массива без признаков зон закалки, а также дайками метадолеритов (рис. 7). Дайки разбивают рудное тело на отдельные блоки со смещением и разубоживают руду.

Хромитовая залежь приурочена к дунитам и представлена одним пологопадающим пластом длиной по прослеженной части 1.2 км и шириной от 80 до 225 м. На северо-западном фланге головная часть рудной залежи длиной 190 м выходит на поверхность под морену (рис. 7). К юго-западу залежь постепенно погружается на глубину около 300 м, где расщепляется и постепенно выклинивается. Вертикальная мощность пласта в его головной части составляет 3–10 м. С глубиной мощность его постепенно увеличивается, достигая максимальной величины 40 м, средняя мощность составляет 14.7 м [*Chashchin et al.*, 1999].

Рудная залежь состоит из трех типов руд: богатых, рядовых и бедных. Богатые хромовые руды густовкрапленного и сплошного сложения содержат >60 об. % хромита, или >30 мас. % Сг₂О₃. Для них характерна полосчатая текстура, часто наблюдается пятнистая и массивная. Рядовые хромовые руды редко- и средневкрапленного сложения содержат 30–60 об. % хромита, или 15–30 мас. % Cr_2O_3 . Бедные вкрапленные хромовые руды содержат >10 об. % хромита, или >5 мас. % Cr_2O_3 . Богатые руды расположены в центральной части рудной залежи, рядовые руды обрамляют богатые, бедные руды расположены в висячем и лежачем боку. Зачастую среди богатых руд присутствуют дуниты с убогой или редковкрапленной хромитовой минерализацией. По простиранию каких-либо определенных закономерностей в расположении богатых руд не наблюдается. Богатые руды составляют 28 % от общего количества руды.

В среднем минеральный состав руд состоит из оливина (40 %), хромита (50 %), ортопироксена (6 %), серпентина (3 %), хлорита, талька, актинолита и плагиоклаза (1%). Главным рудообразующим минералом является хромит. Породообразующие минералы представлены оливином, ортопироксеном и плагиоклазом, вторичные - серпентином, хлоритом, тальком и актинолитом. По содержанию Cr₂O₃ богатые руды без обогащения соответствуют литейным сортам, а рядовые руды требуют обогащения, как для повышения концентрации Cr₂O₃, так и для снижения содержания SiO₂. Разведанные балансовые запасы хромовой руды промышленных категорий составляют 9.5 млн т со средним содержанием $Cr_2O_3 - 24$ мас. %. По запасам хромовых руд Сопчеозерское месторождение находится на 2 месте в России, уступая только Аганозерскому месторождению Бураковского массива в Карелии.

Месторождение Большая Варака открыто в середине 90-х годов прошлого века и приурочено к одноименному расслоенному массиву основных пород Имандровского комплекса (см. рис. 2). Массив имеет неправильно-овальную форму в плане размером 5.0×(0.9–2.2) км, мульдообразную асимметричную – в поперечном сечении и корытообразную с двумя мульдообразными прогибами – в продольном, с глубиной залегания подошвы от 270 до 490 м. В разрезе массива выделяется три зоны. Нижняя зона, мощностью от первых десятков метров в северном крыле до 300 м в южном, сложена интенсивно амфиболизированными габбро-норитами и плагиопироксенитами и занимает около 40 % массива. Средняя зона образована переслаиванием плагиопироксенитов, габбро-норитов и, реже, норитов мощностью от 8 до 150 м. Верхняя зона сложена монотонными габбро-норитами мощностью до 250 м [Chashchin, 1999]. Месторождение приурочено к нижней зоне массива, в разрезе которой выявлено пять горизонтов хромовых руд мощностью от 1 до 12 м, два нижних из них являются промышленными. Все хромитовые горизонты залегают согласно с вмещающими породами и характеризуются пологими (5–15°) углами падения на юг в северном крыле и более крутым (30-40°) падением на север в южном крыле массива. Нижележащий промышленный хромитовый горизонт имеет среднюю мощность 0.86 м, максимальная мощность 11.8 м установлена в раздуве длиной 120 м. Вышележащий хромитовый горизонт представляет собой



Рис. 7. Схема геологического строения Сопчеозерского хромитового месторождения и разрез по линии I-I.

1 – четвертичные отложения; 2 – дайки метадолеритов; 3 – Мончетундровский массив: габбро, габбро-нориты средне-крупнозернистые, частью амфиболизированные (а), меланонориты и плагиоортопироксениты (б); 4 – Мончегорский плутон: ортопироксениты, плагиоортопироксениты массива НКТ (а), дуниты (б), гарцбургиты (в) и хромовая руда (г) Дунитового блока; 5 – геологические границы: достоверные (а), фациальные (б); 6 – разрывные нарушения; 7 – буровые скважины (только на разрезе).

Fig. 7. The scheme showing the geological structure of the Lake Sopcha chromite deposit and the cross-section along line I-I.

1 – Quaternary sediments; 2 – metadolerite dykes; 3 – Monchetundra massif, including medium- and coarse-grained gabbro, gabbronorites, partly amphibolized (a), melanonorites and plagioorthopyroxenites (6); 4 – Monchepluton, including orthopyroxenites, plagioorthopyroxenites of NKT massif (a), dunites (6), harzburgites (B) and chromic ore (r) of Dunitic block; 5 – proved (a) and facial (6) geological boundaries; 6 – faults; 7 – boreholes (only at cross-section).

две линзы размером 1.8×1.0 и 3.0×0.8 км с промышленно значимой мощностью (0.5 м), выдержанной в пределах всего горизонта. Содержание хромита в руде варьируется от 30 до 90 %, кроме того, присутствует плагиоклаз (10–25 %), амфибол актинолит-тремолитового ряда (5–45 %), хлорит (5–25 %), иногда встречаются реликты пироксена. Текстура руд вкрапленная, массивная, реже – полосчатая [*Chashchin, 1999*]. По технологическим свойствам хромовые руды пригодны для получения высококачественных огнеупоров. На месторождении подсчитаны запасы хромовых руд – 7.4 млн т при среднем содержании Cr₂O₃25 мас. %.

5.2. Комплексные ЭПГ-Сu-Ni руды

Они присутствуют в следующих месторождениях и проявлениях Мончегорского плутона: эпигенетических жильных рудах НКТ и Сопчи, жильных платинометально-медных и инъекционных существенно никелевых рудах НКТ, а также сингенетических вкрапленных рудах «критического» горизонта Нюда и донной залежи НКТ. С эпигенетическими жильными рудами НКТ были связаны основные промышленные запасы ЭПГ-Си-Ni руд. Жильное поле эпигенетических руд НКТ в вертикальном разрезе слагает три рудоносных горизонта, образующих единую систему рудных тел. Оно приурочено к системе прототектонических нарушений, ограниченной осевой зоной массива НКТ и прослеженной на глубину от поверхности до подошвы массива. Верхний горизонт представлен ЭПГ-Сu-Ni рудами, средний – ЭПГ-Си, а нижний – инъекционными рудами существенно никелевого состава (рис. 8).

Жильное поле ЭПГ-Си-Ni руд было открыто в 30-х годах прошлого века, в течение 40 лет служило основной рудной базой комбината «Североникель» и в середине 70-х было отработано. На поверхности оно имеет протяженность 3800 м и ширину 200-400 м, глубина залегания жил 200-400 м. В пределах жильного поля известно 57 промышленных жил мощностью от 5 до 30-60 см, в раздувах до 2.0-2.5 м, север-северовосточного простирания (0-20°). Протяженность жил по простиранию варьируется от 100 до 1700 м, по падению они прослежены на 60-400 м (рис. 8). Сульфидные жилы приурочены к зоне приблизительно параллельных трещин, вытянутых вдоль длинной оси массива над центральной частью его мульдообразного дна. Падение рудовмещающих трещин крутое (85-90°), направление падения большинства трещин – к центру рудного поля. Эта единая система тектонических трещин контролирует не только размещение жильного поля ЭПГ-Си-Ni руд, но и более глубинных ЭПГ-Си и существенно Ni иньекционных руд. Средние содержания полезных компонентов в рудах составляют: Pt – 6.73 г/т, Pd – 1.42 г/т, Au – 0.21 г/т, Ni – 4.94 мас. %, Си – 3.05 мас. %.

ЭПГ-Си руды массива НКТ слагают его средний рудоносный горизонт, который расположен на 200-

250 м ниже верхнего жильного поля (рис. 8). Существенно халькопиритовые жилы установлены в северной и южной частях рудного поля. Вертикальная мощность зоны жильного халькопиритового оруденения не превышает 150-200 м. От ЭПГ-Си-Ni жильной зоны оно отделена слоем пустой породы мощностью 150-200 м. Жилы локализуются в плагиоклазовых гарцбургитах, пространственно тяготея к телам габбро-пегматитов. Установлена сложная форма и изменчивые параметры рудных тел при субмеридиональном простирании и крутом падении. Мощности рудных жил колеблются от 0.11 до 6.42 м, составляя в среднем 1.6 м. По простиранию отдельные жилы прослежены на 300-450 м, по падению – на 130 м. Для этих руд установлены высокие содержания ЭПГ и наличие минералов платиновой группы, представленных сперрилитом, брэггитом, палладистой платиной, мончеитом, котульскитом, теллуридами, теллуро-висмутидами платины и палладия. Средние содержания полезных компонентов в рудах составляют: Pt – 4.00 г/т, Pd – 23.00 г/т, Au – 1.56 г/т, Ni – 0.45 мас. %, Cu – 6.53 мас. %. В последнее время к этому типу руд проявляется повышенный интерес в связи с высокими содержаниями в руде платиноидов.

Существенно Ni инъекционные руды массива НКТ образуют нижний рудоносный горизонт, который развит ниже ЭПГ-Си жильных руд (рис. 8). Для этого типа оруденения характерна сложная морфология рудных тел в виде жил, прожилков, гнезд и зонок брекчирования, залегающих в норитах и кварцевых диоритах приподошвенной части массива, иногда в подстилающих его биотитовых гнейсах. Они группируются в тела протяженностью до 1800 м, шириной до 22 м и наиболее изучены в северной части рудного поля. В пределах рудных тел оруденение распределено крайне неравномерно, поэтому, несмотря на наличие богатых руд с содержанием никеля до 8 мас. %, руды данного интереса.

5.3. МАЛОСУЛЬФИДНЫЕ ПЛАТИНО-ПАЛЛАДИЕВЫЕ (Pt-Pd) МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Такие крупные месторождения мирового уровня были выявлены в течение последних 10–15 лет, являются новыми для Кольского региона и делятся на два основных типа: стратиформные («рифовые»), гармоничные с расслоенностью массивов, и «базальные», локализованные в пределах краевых частей интрузий [*Mitrofanov, 2005*]. К первому типу относятся месторождения Киевей, 330-го горизонта Сопчи и Вурэчуайвенч, ко второму – Федоровотундровское, Южная Сопча и Лойпишнюн.

Месторождение Киевей приурочено к Западно-Панскому массиву Федорово-Панского комплекса и включает в себя часть Северного рифа протяженностью 6 км от участка Марьйок до участка Восточный



Рис. 8. Схема геологического строения массива НКТ и разрез по линии I-I.

1 – дайки метадолеритов; 2 – Мончетундровский массив: метагаббро, метагаббро-нориты, нориты и ортопироксениты; 3 – массив Кириха: габбро-нориты; 4 – массив НКТ: сульфидные жилы (а), сульфидно-магнетитовые жилы (б), Дунитовый блок и Сопчеозерское месторождение хромитов (в), ортопироксениты (г), переслаивание ортопироксенитов и гарцбургитов (д), гарцбургиты (е), кварцсодержащие нориты и габбро-нориты придонной зоны и связанная с ними сульфидная минерализация (ж); 5 – Кольский метаморфический комплекс: плагиогнейсы биотитовые и амфибол-биотитовые, амфиболиты; 6 – геологические границы: достоверные (а), предполагаемые (б), фациальные (в); 7 – разрывные нарушения.

Fig. 8. The scheme showing the geological structure of NKT massif and the cross-section along line I-I.

1 – metadolerite dykes; 2 – Monchetundra massif, including metagabbro, metagabbro-norites, norites and orthopyroxenites; 3 – Kiriha massif, including gabbro-norites; 4 – NKT massif, including sulfide veins (a), sulfide-magnetite veins (б), Dunitic block and the Lake Sopcha chromic deposit (B), orthopyroxenites (Γ), interbedding orthopyroxenites and harzburgites (д), harzburgites (e), quartz-bearing norites and gabbro-norites of benthic zone and sulfide mineralization (π); 5 – Kola metamorphic complex, icnluding plagiogneisses biotite and amphibole-biotite, amphibolites; 6 –proved (a), inferred (G) and facial (B) geological boundaries; 7 – faults.



Рис. 9. Схема геологического строения и разрез месторождения Киевей [Korchagin, Mitrofanov, 2008].

1 – четвертичные отложения; 2 – дайки метадолеритов и метагаббро-долеритов; 3 – габбро пятнистые лейкократовые и анортозиты; 4 – магнетитовые габбро; 5 – габбро-нориты мезократовые с прослоями пойкилитовых; 6 – переслаивание мезо- и лейкократовых габбро с габбро-норитами; 7 – пироксениты и меланократовые нориты неравномерно-зернистые; 8 – габбро мезо- и лейкократовые среднезернистые; 9 – метагаббро-нориты мелкозернистые; 10 – нориты меланократовые и ортопироксениты мелкозернистые краевой зоны; 11 – милонитизированные и рассланцованные метагабброиды зоны эндоконтакта; 12 – щелочные граниты; 13 – горизонты малосульфидного платинометального оруденения; 14 – геологические границы: достоверные (а), фациальные (б); 15 – разрывные нарушения; 16 – буровые скважины (только на разрезе).

Fig. 9. The scheme showing the geological structure of the Kievey deposit and its cross-section [Korchagin, Mitrofanov, 2008].

1 -Quaternary sediments; 2 -metadolerite and metagabbro-dolerite dykes; 3 -mottled leucogabbro and anorthosites; 4 -magnetite gabbro; 5 -mesocratic gabbro-norites with poikilitic interbeds; 6 -interbedding of meso- and leucocratic gabbro with gabbro-norites; 7 -irregularly-grained pyroxenites and melanocratic norites; 8 -medium-grained meso-and leucocratic gabbro; 9 -fine-grained metagabbro-norites; 10 -melanocratic norites and fine-grained ortopyroxenites of the marginal zone; 11 -mylonitic and schistose metagabbroids of the endocontact zone; 12 -alkaline granites; 13 -horizons of low-sulfide PGE mineralization; 14 -proved (a) and facial (6) geological boundaries; 15 -faults; 16 -boreholes (only at cross- section).

Киевей (рис. 9). Главная геологическая структура месторождения – Нижний расслоенный горизонт (НРГ), представляет собой пластообразное тело мощностью около 50 м, сложенное разнообразными по составу породами. НРГ расположен между двумя мощными, слабодифференцированными толщами габбро-норитов: мелкозернистыми метагаббро-норитами на севере и среднезернистыми мезократовыми габбро-норитами на юге (рис. 9). В подошве НРГ часто залегают выдержанные (протяженностью до 1.5 км) пластообразные тела и линзы мелкозернистых плагиопироксенитов и меланократовых норитов мощностью от нескольких десятков сантиметров до первых метров. Этот подошвенный горизонт является маркирующим, ниже его сульфидная минерализация отсутствует [Groshev, 2010].

Внутреннее строение НРГ циклическое (ритмичное) и заключается в чередовании подобных друг другу, повторяющихся частей вертикального разреза. Большинство циклов в подошве содержат слой кумулятивного плагиопироксенита или норита. Лейкократовые анортозитовые породы слагают верхние части циклов. Мощность циклов составляет в среднем 10–15 м. Количество циклов в НРГ варьируется от одного до пяти. Чаще всего надежно выделяются два или три цикла. Сульфидное платинометальное оруденение (Северный платиноносный риф) приурочено ко второму и третьему циклам магматической стратификации НРГ.

Северный риф представляет собой сульфидоносную зону шириной 5–15 м, залегающую согласно с расслоенностью пород НРГ, выдержанную по простиранию и падению. Мощность собственно сульфидных горизонтов варьируется от первых десятков сантиметров до 5– 6 м. Эмпирически установлено, что чем больше мощность НРГ, количество и суммарная мощность слоев меланократовых кумулатов, тем больше мощность рудных тел и содержание в них сульфидов и элементов платиновой группы.

На месторождении выделяются две рудных залежи. Наиболее выдержана нижняя залежь, которая протягивается через весь участок месторождения и локализуется во втором цикле НРГ. В западной части месторождения она приурочена к пироксенитовому слою в основании цикла, а в восточной части – к участкам переслаивания норитов, габбро-норитов, лейкогаббро в средней части второго цикла. Маломощное, невыдержанное верхнее рудное тело выявлено в центральной части месторождения, залегает в третьем цикле на границе зоны тонкого переслаивания норитов и габброноритов с вышезалегающим слоем лейкогаббро.

Форма рудных тел пластообразная и линзовиднопластообразная. Залегая в целом согласно с расслоенностью пород НРГ, рудные тела приурочены к прослоям, наиболее обогащенным сульфидами Ni и Cu. В рудах месторождения установлено более 40 минералов ЭПГ и золота, среди которых преобладают висмутотеллуриды (мончеит, котульскит, меренскиит) и сульфиды (брэггит, высоцкит), в подчиненном количестве присутствуют арсениды и теллуриды ЭПГ, а также сплавы Au [*Gabov*, 2009].

Общее содержание сульфидов в руде среднего качества около 1 мас. %. Среднее содержание Ni по нижнему рудному телу – 0.13 мас. %, Cu – 0.15 мас. %, по верхнему – 0.08 и 0.06 мас. %, соответственно. Руды существенно палладиевые: среднее отношение Pd/Pt=6.7. Содержания Pt+Pd+Au по сечениям нижнего рудного тела варьируются от 0.80 до 18 г/т. При этом повышенные значения характерны для центральной части месторождения, более низкие – для флангов. Такие же тенденции проявлены и в распределении каждого из благородных металлов в отдельности.

Месторождение 330-го горизонта Сопчи имеет форму пластообразного тела, залегающего среди ортопироксенитов (см. рис. 3) в виде пологой мульды размером 2700×1200 м. Мощность горизонта от 1.2 до 14.8 м. Его полный разрез представлен (снизу вверх): базальной зоной бронзититов с участками оливиновых бронзититов, дунитами, полосчатыми гарцбургитами, иногда с участками бронзититов и бронзититами с крупными линзами пегматоидных разновидностей. Для горизонта характерна тонкая ритмичная расслоенность, обусловленная чередованием обогащенных и относительно обедненных оливином пород. Мощность слоев колеблется от 2-3 до 5-6 см, реже 10-12 см, границы между слоями резкие. Сульфидная минерализация в количественном выражении до 3-5 % представлена пирротином, пентландитом и халькопиритом в бронзититах, пентландитом, халькопиритом и миллеритом в дунитах и гарцбургитах. Особенностью минерального состава оруденения 330-го пласта является ассоциация сульфидов с оксидными минералами магнетитом и хромитом. ЭПГ присутствуют как в виде собственных минеральных фаз, так и в форме изоморфных примесей в сульфидах. Среди собственных минеральных фаз установлены меренскиит и два интерметаллических соединения: (Pd, Pb) и (Pd, Rh, Cu). Минерализация ЭПГ развита по всему разрезу горизонта с тенденцией к увеличению концентраций ЭПГ по направлению к его кровле. При этом наибольшие содержания платиноидов обнаружены в пегматоидных бронзититах и плагиобронзититах. Средние содержания полезных компонентов в руде составляют: Pt+Pd -1.17 г/т, при Pd/Pt=4, Ni+Cu – 0.7 мас. %.

Месторождение Вурэчуайвенч приурочено к одноименному массиву, расположенному к юго-востоку от массивов Нюд-Поаз (см. рис. 3), который наращивает их разрез, тем самым представляя собой самую верхнюю часть общего разреза Мончегорского плутона. Разрез массива Вурэчуайвенч представлен следующими разновидностями (снизу вверх): придонными габбро-норитами мощностью 5-10 м, монотонными меланократовыми и мезократовыми норитами (400-650 м) и мезократовыми метагаббро-норитами (300 м) (рис. 10). В верхней части разреза среди мезократовых метагаббро-норитов выделяется полосчатая зона мощностью 200-250 м, представленная переслаиванием мезо-лейкократовых массивных и такситовых метагаббро-норитов с прослоями метаплагиоклазитов рудного тела. Наиболее детально платинометальное Pt-Pd opyденение изучено в юго-западной части массива, где оно локализовано в пределах рудного горизонта (рифа), приуроченного к метаплагиоклазитам полосчатой зоны (рис. 10). Здесь рудный горизонт имеет протяженность около 2 км. В пределах его отдельные рудные тела пластообразной и линзовидной формы имеют пологое падение под углами от 2-5° до 10-15° на юговосток согласно с расслоенностью вмещающих пород. Средняя мощность рудных тел колеблется от 3 до 5 м в зависимости от принятого бортового содержания [Ivanchenko et al., 2008; Grokhovskaya et al., 2000].

Сульфидная минерализация в пределах рудных тел развита неравномерно: от единичных гнездовых скоплений размером 1–2 мм с содержанием сульфидов около 1 % до гнездовой вкрапленности размером 1–5 мм в количественном выражении 2–3 % и гнездовошлировых скоплений сульфидов в количественном выражении 5–10 %. Сульфиды представлены в основном халькопиритом (40–90 %), миллеритом (до 50 %), с подчиненным количеством ковеллина, халькозина,



Рис. 10. Схема геологического строения месторождения Вурэчуайвенч и разрез по линии I-I [Ivanchenko et al., 2008].

1 – четвертичные отложения; 2 – дайка метадолеритов; 3 – Имандра-Варзугская рифтогенная структура; 4 – нориты лейко-мезократовые массива Морошковое озеро; 5–6 – массив Вурэчуайвенч: 5 – метагаббро-нориты лейко-мезократовые с прослоями меланократовых и такситовых, 6 – плагиоклазиты средне-мелкозернистые; 7 – нориты меланократовые и лейко-мезократовые; 8 – рудные тела малосульфидного платинометального оруденения; 9 – геологические границы: достоверные (а), предполагаемые (б), фациальные (в); 10 – разрывные нарушения; 11 – буровые скважины (только на разрезе).

Fig. 10. The scheme showing the geological structure of the Vurechuayvench deposit and its cross-section along line I-I [*Ivanchenko et al., 2008*].

1 – Quaternary sediments; 2 – metadolerite dykes; 3 – Imandra-Varzuga rifting structure; 4 – leuco-mesocratic norites of the massif of Lake Moroshkovoe; 5-6 – Vurechuayvench massif: 5 – leuco-mesocratic metagabbro-norites with melanocratic and taxitic interbeds, 6 – medium-to-fine-grained plagioclasites; 7 – melanocratic and leuco-mesocratic norites; 8 – ore bodies of low-sulfide PGE mineralization; 9 – proved (a), inferred (6) and facial (B) geological boundaries; 10 – faults; 11 – boreholes (only at cross-section).

пентландита и пирротина; присутствуют также арсениды никеля и кобальта – кобальтин и герсдорфит. Собственные минералы ЭПГ представлены висмутотеллуридами, арсенидами, реже сульфидами и сульфоарсенидами палладия и платины, при значительном преобладании минералов палладия [*Grokhovskaya et al., 2000*]. Средние содержания полезных компонентов в руде составляют: Pt+Pd – 3.0 г/т, при Pd/Pt=7.7, Ni+Cu – 0.43 мас. %.

Федоровотундровское месторождение приурочено к нижней краевой зоне одноименного массива Федорово-Панского комплекса. Основной тип оруденения месторождении представлен малосульфидным вкрапленным типом в такситовых габбро-норитах и других породах краевой зоны массива. Рудная зона прослежена на двух сопряженных, разделенных зоной тектонического нарушения, участках: Федорова тундра и Пахкварака, имеет протяженность около 3 км, при средней мощности до 60 м [Schissel et al., 2002; Korchagin, Mitrofanov, 2008]. Она состоит из серии рудных тел линзовидно-пластообразной формы сложного строения, которые залегают субсогласно простиранию пород массива и повторяют форму его нижнего контакта. Границы рудных тел определяются опробованием и, в целом, совпадают с границами развития сульфидов, которые располагаются отдельными струями, линзами, столбами различной мощности, протяженности, ориентировки, что является результатом общего брекчиевидного строения рудной зоны. Распределение компонентов в рудных телах неравномерное обогащенные сульфидами Си и Ni участки такситовых габбро-норитов разделены пустыми пироксенитами и габбро-норитами.

Вкрапленное оруденение представлено бедной минерализацией пентландит-пирротин-халькопиритового состава с общим содержанием сульфидов около 1 об. % в руде среднего качества. Наиболее типичными являются неравномерная, интерстициальная сульфидная и сульфидно-оксидная вкрапленность и минерализация вкрапленно-гнездового типа с фрагментами прожилково-вкрапленных макро- и микротекстур. Локально, в интервалах до нескольких десятков сантиметров, распространены густовкрапленные руды. Во всех типах оруденелых пород агрегаты и индивиды рудных минералов имеют сложную форму, подчиненную интерстициям первичных магматических и вторичных силикатов. Практически всегда наблюдаются реакционные взаимоотношения сульфидов с первичными магматическими силикатами: вкрапленники обычно окружены реакционными каймами вторичных минералов (амфиболы, хлорит, клиноцоизит, кварц и др.).

Главными в составе малосульфидных руд месторождения являются три минерала – халькопирит, пирротин и пентландит. Их соотношение в среднем по руде в пересчете на 100-процентный сульфид – 41, 35 и 24 об. %, соответственно. Доля этих минералов в общей сульфидной массе составляет обычно 95–100 %. В качестве вторичных и акцессорных минералов в переменных количествах присутствуют пирит, троилит, ильменит, магнетит, макинавит, марказит, кубанит, миллерит, борнит, сфалерит, виоларит. В составе платинометального оруденения установлено 29 минералов платиновой группы и золота, а также четыре фазы, не имеющие пока статуса самостоятельных минеральных видов. Среди них наибольшим развитием пользуются сульфиды, арсениды и висмуто-теллуриды, с подчиненным количеством сульфоарсенидов, станнидов и самородных элементов. Содержания полезных компонентов составляют: Pt+Pd – 1–10 г/т, при Pd/Pt= =4.3, Cu+Ni – 0.2–0.5 мас. %.

Южносопчинское месторождение приурочено к юго-восточному флангу Мончетундровского интрузива (см. рис. 3). В его внутреннем строении выделяются две зоны: нижняя норит-ортопироксенитовая и верхняя габбровая (рис. 11). Платинометальное оруденение приурочено к нижней зоне, содержащей мелкую сульфидную вкрапленность, реже гнезда пирротин-халькопиритового состава в количестве 1-3 об. %. В северозападном блоке рудная зона включает около 20 рудных тел линзовидно-пластовой формы мощностью от 1 до 20 м, развитых по всему разрезу нижней зоны, при этом суммарная мощность рудных тел достигает 50-60 м. В юго-восточном блоке рудные тела приурочены к верхним и средним частям нижней зоны, их количество сокращается до 10, а суммарная мощность увеличивается до 55-85 м, при этом мощность отдельных рудных тел варьируется от 1 до 65 м в раздувах. Таким образом, мощность рудных тел заметно увеличивается в юго-восточном направлении.

В составе платинометального оруденения выявлено более 20 минералов ЭПГ, представленных главным образом арсенидами, висмуто-теллуридами и сульфидами [*Grokhovskaya et al.*, *2012*]. Средние содержания полезных компонентов в руде составляют: Pt+Pd – 1.44 г/т, при Pt/Pd=4.4, Ni+Cu – 0.20 мас. %.

Месторождение Лойпишнюн расположено в северо-восточной части Мончетундровского массива (см. рис. 3) и приурочено исключительно к нижней норитортопироксенитовой зоне, тяготея к ее висячему боку вблизи контакта с верхней зоной. Рудная зона прослежена бурением на протяжении около 1 км в северозападном направлении при мощности 100–200 м. В ее пределах выделяется около десяти отдельных рудных тел линзовидно-пластовой формы мощностью от 0.3 до 42.0 м.

Платинометальное оруденение связано с сульфидной минерализацией, представленной преимущественно редкой, иногда густой вкрапленностью (1–5 об. %), реже прожилково-гнездовыми агрегатами пирротина, пентландита и халькопирита. При изучении состава платинометальной минерализации выявлено 48 минеральных фаз, среди которых наиболее распространенными являются теллуриды и висмуто-теллуриды, в меньшей степени распространены сульфиды. Средние



Рис. 11. Схема геологического строения Южносопчинского месторождения и разрез по линии І-І.

1 – четвертичные образования; 2 – Имандра-Варзугская рифтогенная структура; 3–5 – Южносопчинский массив: 3 – верхняя зона, метагаббро и метагаббро-нориты средне-крупнозернистые, лейко-мезократовые, 4–5 – нижняя зона: 4 – метанориты мелко-среднезернистые мезо-меланократовые, 5 – метаплагиопироксениты; 6 – кварцевые метагаббро массива 10-й аномалии; 7 – нориты лейко-мезократовые массива Морошковое озеро; 8 –9 – Мончегорский плутон: 8 – массив Сопча: ортопироксениты (а), пласт 330 (б), 9 – массив Нюд, нориты лейко-мезократовые с прослоями меланократовых и оливиновых; 10 – кварцевые гнейсо-диориты; 11 – рудные горизонты малосульфидного платинометального оруденения; 12 – геологические границы: достоверные (а), фациальные (б); 13 – разрывные нарушения; 14 – буровые скважины (только на разрезе).

Fig. 11. The scheme showing the geological structure of the South Sopcha deposit and its cross-section along line I-I.

1 – Quaternary sediments; 2 – Imandra-Varzuga rifting structure; 3-5 – South Sopcha massif: 3 – upper zone, medium-to-coarse leuco-mesocratic metagabbro and metagabbro-norites, 4-5 – lower zone: 4 – fine-to-medium-grained meso-melanocratic metanorites, 5 – metaplagiopyroxenites; 6 – quartz metagabbro of Anomaly 10 massif; 7 – leuco-mesocratic norites of the massif of Lake Moroshkovoe; 8-9 – Monchepluton: 8 – Sopcha massif, including orthopyroxenites (a) and Horizon 330 (6), 9 – Nyud massif, leuco-mesocratic norites with melanocratic and olivine interbeds; 10 – quarth gneiss-diorites; 11 – ore horizons of low-sulfide PGE mineralization; 12 – proved (a) and facial (6) geological boundaries; 13 – faults; 14 – boreholes (only at cross-section).

содержания полезных компонентов в руде составляют: Pt+Pd – 1.36 г/т, при Pd/Pt=1.8, Ni+Cu – 0.18 мас. %.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье представлены результаты обобщения большого объема информации по интрузивному магматизму ИВС и связанному с ним оруденению. ИВС входит в состав обширной изверженной Восточно-Скандинавской провинции [Mitrofanov et al., 2013], является ее типичным представителем и в то же время одной из наиболее крупных и полно проявленных внутриконтинентальных рифтогенных структур Фенноскандинавского щита. Она выполнена сложнопостроенным комплексом осадочно-вулканогенных пород мощностью около 15 км, который развивался на протяжении почти 700 млн лет. В совокупности, триада магматических составляющих ИВС – вулканиты, интрузивные расслоенные комплексы и дайковые пояса – является производной длительно живущего палеопротерозойского мантийного суперплюма площадью около 1 млн км².

Среди интрузивного магматизма ИВС наиболее широко развиты расслоенные интрузии. Они включают две возрастные группы комплексов, тяготеющих к бортам ИВС. Интрузии более древних комплексов (Мончегорский и Федорово-Панский) с возрастом около 2.50 млрд лет образованы рядом пород, от дунитов до габбро и анортозитов (Мончегорский) и от ортопироксенитов до габбро и анортозитов (Федорово-Панский). При этом в отдельных массивах (Федоровотундровский и Мончетундровский) установлены признаки многофазности [Bayanova, 2004; Groshev et al., 2009; Grohovskaya et al., 2012; Mitrofanov et al., 2013]. Интрузии более молодого Имандровского комплекса (с возрастом около 2.45 млрд лет) расслоены от ортопироксенитов до феррогаббро. Важной их особенностью является комагматическая связь с вулканитами [Chashchin et al., 2008].

Породы двух разновозрастных комплексов характеризуются и своими отличительными геохимическими особенностями. Для пород Мончегорского и Федорово-Панского комплексов наблюдается отчетливая зависимость накопления РЗЭ от основности пород, нефракционированный «плоский» характер спектра РЗЭ и незначительно проявленные положительные Eu аномалии, тогда как в породах Имандровского комплекса уровень накопления РЗЭ сравнительно более высокий. Спектр РЗЭ в них отличается более фракционированным характером легких РЗЭ при «плоском» распределении тяжелых РЗЭ и отчетливо выраженными Eu аномалиями.

Для пород всех палеопротерозойских комплексов расслоенных интрузий характерны преимущественно отрицательные величины параметра ε_{Nd} (T). В то же время в породах Мончетундровского массива и Мончегорского плутона распределение ε_{Nd} характеризуется некоторой гетерогенностью по сравнению с породами Федорово-Панского комплекса, в которых значения ε_{Nd} более гомогенны. Вероятно, такая особенность изотопного состава этих пород является следствием ряда процессов. Среди них могут быть различия в подтоках флюидов и флюидизированных расплавов во время активности долгоживущего мантийного плюма, а также корово-мантийное взаимодействие расплавов в процессе подъема магмы и заполнения промежуточных очагов.

Расслоенные интрузии ИВС обладают значительным минерагеническим потенциалом. С ними ассоциируют два месторождения хрома, два комплексных ЭПГ-Cu-Ni месторождения и шесть крупных малосульфидных Pt-Pd месторождений.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-05-12055).

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Amelin Yu.V., Heaman L.M., Semenov V.S., 1995. U-Pb geochronology of layered mafic intrusions in the eastern Baltic Shield: implications for the timing and duration of Paleoproterozoic continental rifting. Precambrian Research 75 (1–2), 31–46. http://dx.doi.org/10.1016/0301-9268(95)00015-W.
- Amelin Yu.V., Semenov V.S., 1996. Nd and Sr isotopic geochemistry of mafic layered intrusions in the eastern Baltic shield: implication for the evolution of Paleoproterozoic continental mafic magmas. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 124 (3–4), 255–272. http://dx.doi.org/10.1007/s004100050190.
- Arzamastsev A.A., Bea F., Arzamastseva L.V., Montero P., 2001. The Proterozoic intrusion of Soustov, Kola Peninsula: a model of formation of alkaline magmas with anomalous Sr-Nd isotopic characteristics due to the crust-mantle interaction. In: Proceedings of the Scientific School on Alkaline Magmatism of the Earth. GEOKHI RAS, Moscow, p. 10–11 (in Russian) [*Apsamacyee A.A., Беа Ф., Apsamacyeea Л.B., Монтеро П.* Протерозойская интрузия Соустова, Кольский полуостров: модель образования щелочных магм с аномальными Sr-Nd изотопными характеристиками в результате корово-мантийного взаимодействия // Труды научной школы «Щелочной магматизм Земли». М.: ГЕОХИ РАН, 2001. С. 10–11].

Balashov Yu.A., Bayanova T.B., Mitrofanov F.P., 1993. Isotope data on the age and genesis of layered basic-ultrabasic intru-

sions in the Kola Peninsula and northern Karelia, northestern Baltic Shield. Precambrian Research 64 (1-4), 197-205.

- *Bayanova T.B.*, 2004. The Age of Reference Geological Complexes in the Kola Region and the Duration of Magmatic Processes. Nauka, St. Peterburg, 174 p. (in Russian) [*Баянова Т.Б.* Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма. СПб.: Наука, 2004. 174 с.].
- Bayanova T.B., Nerovich L.I., Mitrofanov F.P., Zhavkov V.A., Serov P.A., 2010. The Monchetundra basic massif of the Kola region: new geological and isotope geochronological data. Doklady Earth Sciences 431 (1), 288–293. http://dx.doi.org/ 10.1134/S1028334X10030050.
- Bayanova T.B., Sherstennikova O.G., Sharkov I.V., 1993. Correlation between geological and geochronological data on volcanic rocks of the Seidorechka suites and the Imandra lopolith, Kola Peninsula. In: Geology of the Baltic Shield. Abstracts of the 7th Conference of Young Scientists. KSC RAS, Apatity, p. 16–18. (in Russian) [Баянова Т.Б., Шерстенникова О.Г., Шарков И.В. Корреляция геологических и геохронологических данных между вулканитами сейдореченской свиты и Имандровским лополитом (Кольский п-ов) // Геология Балтийского щита. Тезисы 7-й конференции молодых ученых. Апатиты: КНЦ РАН, 1993. С. 16–18].
- Berkovskii A.N., Semenov V.S., Korneev S.I., Yakovleva O.A., Belyatskii B.V., Grinevich N.G., 2000. Burakovskii–Aganozero layered complex: composition and petrologic applications. *Petrology* 8 (6), 585–606.
- *Chashchin V.V.*, 1999. Paleoproterozoic complex of layered intrusions of the Kola Peninsula and its metallogeny (Russia). *Geology of Ore Deposits* 41 (2), 114–125.
- Chashchin V.V., Bayanova T.B., Levkovich N.V., 2008. Volcanoplutonic association of the early-stage evolution of the Imandra-Varzuga rift zone, Kola Peninsula, Russia: geological petrogeochemical and isotope-geochronological data. *Petrology* 16 (3), 279–298. http://dx.doi.org/10.1134/S0869591108030041.
- Chashchin V.V., Galkin A.S., Ozeryanskii V.V., Dedyukhin A.N., 1999. Sopcha lake chromite deposit and its platinum potential, Monchegorsk pluton, Kola Peninsula (Russia). Geology of Ore Deposits 41 (6), 460–468.
- Dokuchaeva V.S., Zhangurov A.A., Fedotov Zh.A., 1980. The chromiferous norite-cabbro-norite complex of the Imandra-Varzuga structural zone. In: Magmatic formations and ore-bearing capacities of basic-ultrabasites of the Kola Peninsula. Kola Branch of the USSR Academy of Science, Apatity, p. 36–50 (in Russian) [Докучаева В.С., Жангуров А.А., Федотов Ж.А. Хромитоносный норит-габбро-норитовый комплекс Имандра-Варзугской структурной зоны // Магматические формации и рудоносность базит-гипербазитов Кольского полуострова. Апатиты: КолФАН СССР, 1980. С. 36–50].
- *Dokuchaeva V.S., Zhangurov A.A., Fedotov Zh.A.,* 1982. Imandra lopolith a new large layered intrusive structure in the Kola Peninsula. *Doklady AN* 265 (6), 1231–1234 (in Russian) [Докучаева В.С., Жангуров А.А., Федотов Ж.А. Имандровский лополит новый крупный расслоенный интрузив на Кольском полуострове // Доклады АН СССР. 1982. Т. 265. № 5. С. 1231–1234].
- Gabov D.A., 2009. PGE and Au minerals from low-sulphide ores of the Pansky Tundras massif, Kola Peninsula. Zapiski *RMO* CXXXVIII (3), 112–118 (in Russian) [*Габов Д.А.* Минералы ЭПГ и Аu из малосульфидных руд массива Панских тундр (Кольский полуостров) // Записки РМО. 2009. Ч. CXXXVIII. № 3. С. 112–118].
- *Galimzyanova R.M., Mitrofanov F.P., Bayanova T.B., Fedotov Zh.A., Levkovich N.V.,* 1998. Origin and U–Pb age of granophyres of the Imandra differentiated intrusion, Kola region. *Doklady Earth Sciences* 363 (9), 1301–1303.
- Gorbunov G.I., 1982. The Imandra-Varzuga Zone of Karelides (Geology, Geochemistry, and Evolution History). Nauka, Leningrad, 280 p. (in Russian) [Горбунов Г.И. Имандра-Варзугская зона карелид (геология, геохимия, история развития). Л.: Наука, 1982. 280 с.].
- Grokhovskaya T.L., Bakaev G.F., Shelepina E.P., Lapina V.I., Laputina I.P., Muravitskaya G.N., 2000. PGE Mineralization in the Vuruchuaivench Gabbronorite Massif, Monchegorsk Pluton (Kola Peninsula, Russia). Geology of Ore Deposits 42 (2), 133–146.
- Grokhovskaya T.L., Ivanchenko V.N., Karimova O.V., Griboedova I.G. Samoshnikova L.A., 2012. Geology, mineralogy, and genesis of PGE mineralization in the South Sopcha massif, Monchegorsk complex, Russia. Geology of Ore Deposits 54 (5), 347–369. http://dx.doi.org/10.1134/S1075701512050029.
- Groshev N.Yu., 2010. The Two-Phase Platinum-Containing Massif of the Fedorovo Tundra (Kola Peninsula): Geology and Types of Low-Sulfide PGE Mineralization. Synopsis of PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). KSC RAS, Apatity, 24 p. (in Russian) [Грошев Н.Ю. Двухфазный платиноносный массив Федоровой тундры (Кольский полуостров): геология и типы малосульфидного ЭПГ оруденения: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Апатиты: КНЦ РАН, 2010. 24 с.].
- *Groshev N.Yu., Nitkina E.A., Mitrofanov F.P.,* 2009. Two-phase mechanism of the formation of platinum-metal basites of the Fedorova Tundra intrusion on the Kola Peninsula: new data on the geology and isotope geochronology. *Doklady Earth Sciences* 427 (2), 1012–1016. http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X09060270.
- Hanski E.J., Huhma H., Smolkin V.F., Vaasjoki M., 1990. The age of ferropicritic volcanism comagmatic with Ni-bearing intrusions at Pechenga, Kola Peninsula, USSR. *Bulletin Geological Survey of Finland* 62, 123–133.
- Huhma H., Cliff R.A., Perttunen V., Sakko M., 1990. Sm-Nd and Pb isotopic study of mafic rocks associated with early Proterozoic continental rifting: the Peräpohja schist belt in the northern Finland. Contributions to Mineralogy and Petrology 104 (3), 369–379. http://dx.doi.org/10.1007/BF00321491.

V.V. Chashchin, F.P. Mitrofanov: The Paleoproterozoic Imandra-Varzuga rifting structure...

- Ivanchenko V.N., Davydov P.S., Dedeev V.A., Knauf V.V., 2008. Major features of the Vurechuaivench deposit's geological structure. In: International cooperation and exchange of experiences in geological prospecting and surveys of PGE deposits in the Northern Fennoscandia. KSC RAS, Apatity, p. 82–87 (in Russian) [Иванченко В.Н., Давыдов П.С., Дедеев В.А., Кнауф В.В. Основные черты строения месторождения Вурэчуайвенч // Международное сотрудничество и обмен опытом в геологическом изучении и разведке платинометальных месторождений северной части Фенноскандии. Апатиты: КНЦ РАН, 2008. С. 82–87].
- Korchagin A.U., Mitrofanov F.P., 2008. PGE deposits in the western part of the Fedorovo-Pana tundra (Fedorovo and Malaya Pana): the status and development prospects. In: International cooperation and exchange of experiences in geological prospecting and surveys of PGE deposits in the Northern Fennoscandia. KSC RAS, Apatity, p. 42–51 (in Russian) [Kopчагин А.У., Митрофанов Ф.П. Месторождения МПГ западной части Федорово-Панских тундр (Федорово и Малая Пана): состояние и перспективы освоения // Международное сотрудничество и обмен опытом в геологическом изучении и разведке платинометальных месторождений северной части Фенноскандии. Апатиты: КНЩ РАН, 2008. С. 42–51].
- *Kozlov E.K.*, 1973. Natural Series of Rocks of Nickeliferous Intrusions and Their Metallogeny. Nauka, Leningrad, 288 р. (in Russian) [*Козлов Е.К.* Естественные ряды пород никеленосных интрузий и их металлогения. Л.: Наука, 1973. 288 с.].
- *Krivolutskaya N.A., Smolkin V.F., Svirskaya N.M., Mamontov V.P., Fanygin A.S., Belyatskii B.V., Roshchina I.A.,* 2010. Geochemical features of the drusite massifs, the central part of the Belomorian mobile belt: I. Distribution of major and trace elements in the rocks. *Geochemistry International* 48 (5), 465–491. http://dx.doi.org/10.1134/S0016702910050046.
- *Milanovsky E.E.*, 1976. Rift Zones of Continents. Nedra, Moscow, 279 p. (in Russian) [*Милановский Е.Е.* Рифтовые зоны континентов. М.: Недра, 1976. 279 с.].
- *Milanovsky E.E.*, 1983. Rifting in the History of the Earth (Rifting of Old Platforms). Nedra, Moscow, 280 p. (in Russian) [*Милановский Е.Е.* Рифтогенез в истории Земли (Рифтогенез на древних платформах). М.: Недра, 1983. 280 с.].
- Mints M.V., Glaznev V.N., Konilov A.N., Kunina N.M., Nikitichev A.P., Raevsky A.B., Sedykh Yu.N., Stupak V.M., Fonarev V.I., 1996. The Early Precambrian of the North-Eastern Baltic Shield: Paleogeodynamics, Crustal Structure and Evolution. Nauchny Mir, Moscow, 287 p. (in Russian) [Минц М.В., Глазнев В.Н., Конилов А.Н., Кунина Н.М., Никитичев А.П., Раевский А.Б., Седых Ю.Н., Ступак В.М., Фонарев В.И. Ранний докембрий северо-востока Балтийского щита: палеогеодинамика, строение и эволюция континентальной коры. М.: Научный мир, 1996. 287 с.].
- *Mitrofanov F.P.*, 2005. New types of mineral raw material in the Kola province: discoveries and perspectives. In: Proceedings of the Conference on the scientific heritage of Academician V.N. Smirnov. IGEM RAS, Moscow, p. 39–53 (in Russian) [*Митрофанов Ф.П.* Новые виды минерального сырья Кольской провинции: открытия и перспективы // Материалы конференции «Научное наследие акад. В.Н. Смирнова». М.: ИГЕМ РАН, 2005. С. 39–53].
- Міtrofanov F.P., Balagansky V.V., Balashov Yu.A., Gannibal L.F., Dokuchaeva V.S., Nerovich L.I., Radchenko M.K., Ryungenen G.I., 1993. The U-Pb age of gabbro-anorthosite massifs of the Kola Peninsula. Doklady AN 331 (1), 95–98 (in Russian) [Митрофанов Ф.П., Балаганский В.В., Балашов Ю.А., Ганнибал Л.Ф., Докучаева В.С., Нерович Л.И., Радченко М.К., Рюнгенен Г.И. U-Pb возраст габбро-анортозитов Кольского полуострова // Доклады АН. 1993. Т. 331. № 1. С. 95–98].
- *Mitrofanov F.P., Bayanova T.B.*, 1999. Duration and timing of ore-bearing Paleoproterozoic intrusions of Kola province. In: Mineral deposits: Processes to Processing. Balkena, Rotterdam, p. 87–93.
- Mitrofanov F.P., Bayanova T.B., Korchagin A.U., Groshev N.Yu., Malitch K.N., Zhirov D.V., Mitrofanov A.F., 2013. East Scandinavian and Noril'sk plume mafic large igneous provinces of Pd–Pt ores: geological and metallogenic comparison. Geology of Ore Deposits 55 (5), 305–319. http://dx.doi.org/10.1134/S107570151305005X.
- *Mitrofanov F.P., Smol'kin V.F.*, 2004a. Layered Intrusions of Monchegorsk Ore Region: Petrology, Mineralization, Isotopes, and Deep Structure. KSC RAS, Apatity, Vol. 1, 177 p. (in Russian) [*Митрофанов Ф.П., Смолькин В.Ф.* Расслоенные интрузии Мончегорского рудного района: петрология, оруденение, изотопия, глубинное строение. Апатиты: КНЦ РАН, 2004а. Ч. 1. 177 с.].
- *Mitrofanov F.P., Smol'kin V.F.*, 2004b. Layered Intrusions of Monchegorsk Ore Region: Petrology, Mineralization, Isotopes, and Deep Structure. KSC RAS, Apatity, Vol. 2, 177 p. (in Russian) [*Митрофанов Ф.П., Смолькин В.Ф.* Расслоенные интрузии Мончегорского рудного района: петрология, оруденение, изотопия, глубинное строение. Апатиты: КНЦ РАН, 2004b. Ч. 2. 177 с.].
- Nerovich L.I., Bayanova T.B., Savchenko E.A., Serov P.A., Ekimova N.A., 2009. New data on geology, petrography, isotope geochemistry and PGE mineralization of the Monchetundra massif. Vestnik MGTU 12 (3), 461–477 (in Russian) [*Hepo-*вич Л.И., Баянова Т.Б., Савченко Е.А., Серов П.А., Екимова Н.А. Новые данные по геологии, петрографии, изотопной геохимии и ЭПГ минерализации Мончетундровского массива // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12. № 3. С. 461– 477].
- Nitkina E.A., 2006. The Geology and Geochronological Criteria for Identification of Ore-Bearing and Barren Rock Associations of the Western Part of the Platinum-Bearing Fedorovo-Pansky Massif. Synopsis of PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). VSU, Voronez, 30 p. (in Russian) [Ниткина Е.А. Геология и геохронологические критерии выделения рудных и безрудных породных ассоциаций западной части платиноносного Федорово-Панского массива: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Воронеж: ВГУ, 2006. 30 с.].

Patchett P.J. Bridgwater D., 1984. Origin of continental crust of 1.9-1.7 Ga age defined by Nd isotopes in the Ketilidian

terrain of South Greenland. Contributions to Mineralogy and Petrology 87 (4), 311–318. http://dx.doi.org/10.1007/BF00381287.

- Pripachkin P.V., Rundkvist T.V., Grebnev R.A., Sergeev S.A., 2012. U-Pb (SHRIMP-II) dating of single zircon grains from the Vurechuayvench deposit of platinoferous reef rocks. In: Geology and strategic mineral resources of the Kola region. Proceedings of the 9th All-Russia Fersman Scientific Session (with international participation) devoted to the 60th anniversary of the Geological Institute, KSC RAS. KSC RAS, Apatity, p. 195–198 (in Russian) [Припачкин П.В., Рундквист Т.В., Гребнев Р.А., Сергеев С.А. U-Pb (SHRIMP-II) датирование единичных зерен цирконов из пород платиноносного рифа месторождения Вурэчуайвенч // Геология и стратегические полезные ископаемые Кольского региона: Труды IX Всероссийской (с международным участием) Ферсмановской научной сессии, посвященной 60-летию Геологического института КНЦ РАН. Апатиты: КНЦ РАН, 2012. С. 195–198].
- Puchtel I.S., Haase K.M., Hofmann A.W., Chauvel C., Kulikov V.S., Garbe-Schonberg C.D., Nemchin A.A., 1997. Petrology and geochemistry of crustally contaminated komatiitic basalts from the Vetreny belt, southeastern Baltic Shield: evidence for an early Proterozoic mantle plume beneath rifted Archean continental lithosphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61 (6), 1205–1222. http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7037(96)00410-3.
- Puchtel I.S., Hofmann A.W., Amelin Yu.V., Garbe-Schonberg C.-D., Samsonov A.V., Shchipansky A.A., 1999. Combined mantle plume-island arc model for the formation of the 2.9 Ga Sumozero-Kenozero greenstone belt, SE Baltic shield: isotope and trace element constraints. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63 (21), 3579–3595. http://dx.doi.org/10.1016/ S0016-7037(99)00111-8.
- Schissel D., Tsvetkov A.A., Mitrofanov F.P., Korchagin A.U., 2002. Basal platinum-group element mineralization in the Fedorov Pansky layered mafic intrusion, Kola Peninsula, Russia. Economic Geology 97 (8), 1657–1677. http://dx.doi.org/ 10.2113/gsecongeo.97.8.1657.
- Serov P.A., 2008. Age Boundaries of PGE Mineralization of the Fedorovo-Pana Layered Intrusion According to Sm-Nd and Rb-Sr Isotopic Characteristics. Synopsis of PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). KSC RAS, Apatity, 19 p. (in Russian) [*Серов П.А.* Возрастные рубежи формирования платинометального оруденения Федорово-Панского расслоенного интрузива по Sm-Nd и Rb-Sr изотопным характеристикам: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Апатиты: КНЦ РАН, 2008. 19 с.].
- *Sharkov E.V., Bogatikov O.A., Krasivskaya I.S.,* 2000. The role of mantle plumes in the early Precambrian tectonics of the eastern Baltic Shield. *Geotectonics* 34 (2), 85–106.
- Smith A.D., Ludden J.N., 1989. Nd isotopic evolution of the Precambrian mantle. Earth and Planetary Science Letters 93 (1), 14–22. http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X(89)90180-5.
- *Smol'kin V.F.*, 1992. Komatiitic and Picritic Magmatism of the Early Precambrian Baltic Shield. Nauka, St. Petersburg, 274 р. (in Russian) [*Смолькин В.Ф.* Коматиитовый и пикритовый магматизм раннего докембрия Балтийского щита. СПб.: Наука, 1992. 274 с.].
- Smol'kin V.F., Bayanova T.B., 1999. The origin and age of gabbro of the Zhdanov deposits of Cu-Ni ores (Pechenga). In: Abstracts of International conference on the Precambrian rifting, Magmatism and Metallogeny. Correlation of geological complexes of Fennoscandia. KarSC RAS, Petrozavodsk, p. 150–151 (in Russian) [Смолькин В.Ф., Баянова Т.Б. Происхождение и возраст габбро Ждановского месторождения Cu-Ni руд (Печенга) // Тезисы международной конференции «Рифтогенез, магматизм, металлогения докембрия. Корреляция геологических комплексов Фенноскандии». Петрозаводск: КарНЦ, 1999. С. 150–151].
- Svetov S.A., Huhma H., 1999. Geochemistry and Sm–Nd systematics of the archean komatiitic–tholeiitic associations of the Vedlozero–Segozero greenstone belt, central Karelia. *Doklady Earth Sciences* 369 (8), 1204–1207.
- *Vrevsky A.B., Matrenichev V.A., Ruzheva* M.S., 2003. Petrology of komatiites from the Baltic shield and isotope geochemical evolution of their mantle sources. *Petrology* 11 (6), 532–561.



Чащин Виктор Васильевич, канд. геол.-мин. наук, с.н.с. Геологический институт КНЦ РАН 184209, Апатиты, ул. Ферсмана, 14, Россия Тел.: 8(81555)79217; ⊠ e-mail: chashchinv@mail.ru

Chashchin, Victor V., Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher Geological Institute KSC RAS 14 Fersman Street, Apatity 184209, Russia Tel.: 8(81555)79217; ⊠ e-mail: chashchinv@mail.ru

V.V. Chashchin, F.P. Mitrofanov: The Paleoproterozoic Imandra-Varzuga rifting structure...



Митрофанов Феликс Петрович, академик РАН, профессор, докт. геол.-мин. наук, г.н.с., консультант-советник РАН Геологический институт КНЦ РАН 184209, Апатиты, ул. Ферсмана, 14, Россия Тел.: 8(81555)68428; e-mail: felix@geoksc.apatity.ru

Mitrofanov, Felix P., Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Academician of RAS, Chief Researcher, Science Advisor of RAS Geological Institute KSC RAS 14 Fersman Street, Apatity 184209, Russia Tel.: 8(81555)68428; e-mail: felix@geoksc.apatity.ru PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2014 VOLUME 5 ISSUE 1 PAGES 257-290

http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0127

ISSN 2078-502X

THE FIELD OF RECENT TECTONIC STRESSES IN CENTRAL AND SOUTH-EASTERN ASIA

Yu. L. Rebetsky¹, R. S. Alekseev^{1, 2}

¹Schmidt Institute of the Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia

² Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract: The publication presents results of the study aimed at reconstruction of recent crustal stresses for Central and South-Eastern Asia with application of the method of cataclastic analysis of displacements caused by ruptures, which was proposed by Yu.L. Rebetsky. Two sources of seismic data were referred to: (1) the catalog comprising data from publications covering the period from 1904 to 1992, and (2) the Global Centroid Moment Tensor (CMT) Database of earthquake mechanisms (http://earthquake.usgs.gov/eqarchives/sopor), which covers the period from 1978 to 2010. The method of cataclastic analysis in its earliest version was applied in 1996 and 1997 when seismic data from the first catalog were analyzed, and it yielded only parameters of stress ellipsoids; the reconstructions were published in a Russian-Chinese journal (it does not exist now). In this paper, these reconstructions are presented in new graphical formats of GIS. Data from the Global CMT Database were analyzed by the method of cataclastic analysis in the new revision with application of its stages 1 and 2. Based on the calculations, orientations of axes of principal stresses, types of ellipsoids, correlations between spherical and deviatoric components of stress tensors, and reduced stresses were determined. The two sets of reconstructions are compared in this paper. The catalog of earthquake focal mechanisms for the period from 1904 to 1992 consolidated information provided by different authors, and thus focal data for many seismic events were highly inconsistent; therefore, the reliability of reconstructions based on such data seems to be lower than that on the basis the Global CMT Database for the period from 1978 to 2010. Some of the reconstructed stress tensor parameters are mapped. For the areas which data are given in the Global CMT Database and considered as more reliable, mapping is based on stress parameters calculated from such data. For the areas that are not covered by the Global CMT Database, reconstructions based on the first catalog are mapped. In the maps showing consolidated patterns of the state of stresses, spacious areas of horizontal extension of the crust in Tibet are clearly identified. In the south, such areas are bordered by regions of horizontal compression of the crust in Himalaya; in the north and north-east, they are bordered by regions of horizontal shear of the crust in East Kunlun. According to results of calculations at stage 2 of the method of cataclastic analyses, the crust in the central part of Tibet is subject to intensive confining pressure and lateral compression that is reduced in the neighboring regions. The crust in the southern and northern parts of Pamir is also subject to horizontal extension and shear. Regions of horizontal compression are located to the north, west and south of Pamir. Regulations of the field of recent tectonic stresses of Tibet and Pamir, which are revealed in this study, can be explained by the concept of 'tectonic spreading' of these regions due to gravity, which causes intensive horizontal spreading of the crust in Himalaya when the southern boundary of Tibet bends outwards and spreads over the Indian 'indenter' moving in the north-northeastern direction. It is suggested by the data on horizontal extension of the crust in Tibet and underthrusting shear stresses over the horizontal zones that the impact Indian 'indenter' does not go beyond the crust of Pamir and the crust of the central parts of Tibet which is located above the long-term active mantle plume.

Key words: tension, mechanisms of seismic focus, cataclastic flow, frail strength, destruction, geodynamic mode, crust deformation mechanism.

Recommended by V.A. San'kov

Citation: *Rebetsky Yu.L., Alekseev R.S.* 2014. The field of recent tectonic stresses in Central and South-Eastern Asia. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (1), 257–290. doi:10.5800/GT-2014-5-1-0127.

ПОЛЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ СРЕДНЕЙ И ЮГО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ

Ю. Л. Ребецкий¹, Р. С. Алексеев^{1, 2}

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия ² Московский государственный университет, Москва, Россия

Аннотация: В работе представлены результаты реконструкции современных напряжений в коре Средней и Юго-Восточной Азии при использовании метода катакластического анализа разрывных смещений Ю.Л. Ребецкого. Основой реконструкции напряжений служили два различных каталога. Первый являлся сборным, созданным из разнородных сейсмологических данных, полученных разными авторами за период наблюдений 1904–1992 гг., а второй – каталог механизмов Global CMT (http://earthquake.usgs.gov/eqarchives/sopor) 1978-2010 гг. Реконструкция по сейсмологическим данным первого каталога выполнялась в 1996–1997 гг. по самой ранней модификации метода катакластического анализа, позволявшей получать только параметры эллипсоида напряжений. Результаты этой реконструкции были опубликованы в российско-китайском журнале, который уже не издается. В настоящей работе эти результаты представлены в новых графических формах, выполненных в ГИС. Реконструкция по данным второго каталога выполнялась по современной версии метода катакластического анализа с использованием процедур первого и второго его этапов. Таким образом, в этих расчетах были получены данные не только об ориентации осей главных напряжений и о виде его эллипсоида, но и о соотношении шаровой и девиаторной компонент тензора напряжений, а также о редуцированных напряжениях. В работе делается сравнительный анализ обеих реконструкций. Поскольку каталог механизмов очагов землетрясений первого расчета за 1904–1992 гг. содержал большое число событий с существенно отличающимися данными об очагах, полученными разными авторами, достоверность результатов этой реконструкции представляется меньшей, чем по данным каталога Global CMT за 1978–2010 гг. В работе построены суммарные карты некоторых параметров тензора напряжений по данным обеих реконструкций. При этом в тех областях, где были получены данные о напряжениях по каталогу Global CMT, эти данные считались более надежными, и именно их параметры здесь приводились. Результаты реконструкции первого сборного каталога показаны там, где не было данных по результатам расчета второго каталога. Суммарные карты напряженного состояния выявили наличие обширных областей горизонтального растяжения в коре Тибета, которые с юга ограничены областями горизонтального сжатия коры Гималаев, а с севера и северо-востока – областями горизонтального сдвига коры Восточного Куньлуня. Расчеты второго этапа метода катакластического анализа показали, что в центральной части коры Тибета наблюдается интенсивное эффективное давление и латеральное сжатие, которое ослабевает в областях его окружения. Южная и северная части коры Памира также испытывают соответственно состояние горизонтального растяжения и сдвига. С севера, запада и юга кора Памира окружена областями горизонтального сжатия. Выявленные закономерности поля современных напряжений Тибета и Памира находят свое объяснение в явлении тектонического «растекания» этих областей под собственным весом, что создает обстановку интенсивного горизонтального расплющивания коры Гималаев при выгибе южной границы Тибета, «набегающей» на двигающийся на север – северо-восток Индийский индентор. Данные о горизонтальном растяжении в коре Тибета вместе с поддвиговыми касательными напряжениями на горизонтальных площадках показывают, что влияние Индийского индентора не распространяется далее коры Памира и центральных областей коры Тибета, которая располагается над длительно действующим мантийным плюмом.

Ключевые слова: напряжения, механизмы очагов землетрясения, катакластическое течение, хрупкая прочность, разрушение, геодинамический режим, механизм деформирования коры.

1. Введение

В изучении природных напряжений, действующих в земной коре сейсмоактивных областей, в последние годы наметился существенный прогресс, так как получили развитие подходы не только по расчету ориентации главных осей тензора напряжений, но и по оценке величин напряжений [*Angelier*, 1989; *Michael*, 1984; *Hardebeck*, *Hauksson*, 2001; *Rebetsky*, 1994, 2003, 2005]. В ИФЗ РАН во второй половине 90-х годов прошлого века получил развитие метод катакластического анализа разрывных смещений (MKA) [*Rebetsky*, 1996, 1997, 1999], в рамках которого переход от параметров эллипсоида напряжений (ориентация осей главных напряжений и значение коэффициента Лоде-Надаи) к соотношению шаровой и девиаторных компонент тензора напряжений (второй этап МКА) делается на основе обобщения результатов экспериментов по разрушению образцов горных пород [*Byerlee*, 1968, 1978; *Brace*, 1978]. Подобное обобщение определяет попадание на диаграмме Мора напряженных состояний на плоскостях хрупких трещин (реализованная нодальная плоскость в механизме очага землетрясения) в полосу разрушения [*Rebetsky*, 2007а].



Рис. 1. Топография территории Высокой Азии и примыкающей к ней территории – области реконструкции напряжений в работе [*Rebetsky et al.*, 1997].

Название тектонических провинций по работам [Stuwe, 2007; Kunin et al., 1988; Burtman, 2012; Levi, Sherman, 2005; Laverov et al., 2006]. Прямоугольником выделена область, для которой в настоящей работе выполнялась новая реконструкция напряжений.

Fig. 1. Topography of High Asia and neighbouring territories for which stresses were reconstructed in [Rebetsky et al., 1997].

Tectonic names correspond to those in [*Stuwe, 2007; Kunin et al., 1988; Burtman, 2012; Levi, Sherman, 2005; Laverov et al., 2006*]. The box shows the area which new stress reconstructions are presented in this study.

Если данные об ориентации осей главных напряжений можно использовать для выявления типов геодинамических режимов исследуемых областей [*Gu-shchenko*, 1996], то данные о шаровой и девиаторной компонентах тензора напряжений уже позволяют выполнять тектонофизическое районирование земной коры с целью выделения участков коры различной степени опасности формирования сильного землетрясения [*Rebetsky*, 2007a, 2007b, 2007c, 2007d, 2007e]. Эти данные расширяют возможности в понимании генезиса напряжений в коре исследуемых территорий, а также могут являться ключевыми в построении геодинамических моделей развития этих областей.

В настоящей работе будут представлены результаты реконструкции напряженного состояния для коры Средней и Юго-Восточной Азии (рис. 1), выполненные МКА в разное время. Первая реконструкция осуществлялась в середине 90-х годов прошлого века [*Re*-
betsky et al., 1997], когда программный алгоритм МКА только разрабатывался и в большей своей части носил следы своего предшественника – кинематического метода О.И. Гущенко [Gushchenko, 1979]. В то время МКА был одноэтапным и позволял определять только параметры эллипсоида напряжений. Новая реконструкция напряжений этого района выполнялась по современному алгоритму МКА, содержащему четыре этапа расчета напряжений [Rebetsky, 2007a], реализованному в компьютерной программе STRESSseism. Некоторые элементы расчета ранее были опубликованы в материалах конференций [Alekseev, Rebetsky, 2011, 2012]. В настоящей статье мы представим и сравним результаты обеих реконструкций напряженного состояния.

Описание основной части статьи предварим разъяснением используемых в статье тектонофизических терминов. Прежде всего отметим, что термин «реконструкция напряжений» отвечает обратной задаче тектонофизики, в рамках которой по данным о разрывных смещениях разного типа (сейсмологические индикаторы – механизмы очагов землетрясений, геологические индикаторы – зеркала скольжения) определяются параметры напряженного состояния. Эта обратная задача отличается от прямой задачи тектонофизики, в которой данные о напряжениях и деформациях рассчитывают либо прямо измеряют при решении краевой задачи механики или при физическом моделировании.

Тензор напряжений характеризует напряженное состояние в точке среды. В механике часто под термином «тип напряженного состояния» понимается как спектр параметров, определяющих характер тензора напряжений в точке (напряженное состояние чистого сдвига, одноосного сжатия и т.д.), так и особенности деформирования отдельных областей или элементов конструкций (изгибное напряженное состояние, напряженное состояние кручения, напряженное состояние в окрестности включения и т.д.). В тектонофизике особенности параметров напряженного состояния в точке среды, полученные тем или иным способом (прямая или обратная задача тектонофизики), представляют на основе данных об ориентации осей главных напряжений, при этом термин «тип напряженного состояния» здесь применяется совершенно не так, как это делается в механике. В настоящей статье будем использовать термин «геодинамический тип напряженного состояния», который характеризует ориентацию главных осей напряжений в географической системе координат точки, для которой параметры тензора напряжений получены. При этом ключевым элементом разделения на различные геодинамические типы является близость к оси на зенит одной из осей главных напряжений.

Для описания вида эллипсоида напряжений (это понятие в механике эквивалентно виду тензора напряжений) будем использовать коэффициент Лоде – Надаи, значения которого позволяют выделять эллипсоид одноосного сжатия и растяжения, а также промежуточный между ними вид эллипсоида чистого сдвига.

Термин «поле напряжений» означает, что в исследуемом участке коры существует набор определений тензора напряжений в различных точках пространства, связанных между собой единым временным периодом. В свете данной работы речь идет о поле современных напряжений.

При анализе напряженного состояния принимается, что σ_1 – алгебраически наибольшее напряжение, σ_2 – промежуточное главное напряжение и σ_3 – алгебраически наименьшее напряжение (максимальное сжатие). В наших работах, так же как в классической механике, принято, что растягивающие напряжения положительны, а сжимающие отрицательны. Это отличается от правила знаков, принятого в горном деле, где положительными являются сжимающие напряжения.

В настоящее время на западе при тектонофизических исследованиях используется правило знаков, применяемое в горном деле. В советской и российской тектонофизике часть исследователей (ИФЗ РАН, МГУ и др.) применяет правило знаков классической механики, а часть (ИЗК СО РАН и др.) – горного дела.

Это, казалось бы, несущественное различие на самом деле имеет определенные последствия. Дело в том, что, приняв за положительные напряжения значения напряжений сжатия, необходимо в дальнейшем и для деформаций выдерживать такое же правило знаков, т.е. полагать деформацию укорочения положительной, а деформацию удлинения отрицательной. В противном случае надо менять определяющую формулу связи напряжений и деформаций в законе Гука. Если принятие сжатия в качестве положительного напряжения не вызывает особых возражений, то принятие укорочения (уменьшения длины) за положительную деформацию явно расходится с нашим житейским опытом и принятыми со школьной скамьи правилами связи алгебраических значений физических параметров. Алгоритм МКА, используемый в наших работах, использует правило знаков, введенное в классической механике.

2. СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И ИСТОРИЯ ВОПРОСА О РЕКОНСТРУКЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ СРЕДНЕЙ И ЮГО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ

Методы тектонофизической реконструкции природных напряжений при расчетах современного напряженного состояния опираются на сейсмологические данные о механизмах очагов землетрясений. С середины 70-х годов прошлого века, когда началось создание этих методов, для реконструкции напряжений обычно использовались региональные каталоги механизмов очагов землетрясений, опубликованные в научной литературе. Данные о механизмах в подобных каталогах обычно получают в приближении очага землетрясения в виде двойного диполя на основе анализа знаков первых вступлений продольной волны [Wickens, Hodgson, 1967; Earthquakes in the USSR; Catalogues of Earthquake]. При такой методике определения механизма очага может иметь место несоответствие его характеристик и магнитуды события. Дело в том, что первые вступления продольной волны могут отвечать начальному малому по протяженности разрушающемуся дефекту, параметры которого (положение плоскости смещения) будут сильно отличаться от параметров основного сейсмогенерирующего разрыва, определяющего энергию землетрясения.

В середине 70-х годов прошлого века сейсмологами были заложены методические основы определения механизмов очагов не по данным о знаках первых выступлений продольных волн, а на основе анализа общей волновой картины [Dzievonski, 1977–1996]. В этом подходе используются записи широкополосных цифровых сейсмических станций (см. например [Pavlov, Abubakirov, 2012]). Подобный подход прежде всего позволяет выполнить определение механизма очага землетрясения меньшим числом станций (в некоторых случаях число станций снижается до 2–3). Поскольку такие определения осуществляются по общей волновой картине, эти механизмы будут отвечать фазе сильных движений в очаге, а не начальному этапу, как это имеет место при определении механизмов по данным первых вступлений. Реализация данного метода решения обратной задачи сейсмологии в рамках проекта Harward CMT (с 2004 г. Global CMT) осуществляется Геологической службой США (USGS) по сейсмологическим данным глобальной сейсмической сети IRIS (http://www.iris.edu). Особое значение созданный и постоянно наращиваемый сейсмологический каталог имеет в связи с тем, что он открыт для общего доступа в сети Интернет на серверах Геологической службы США (http://earthquake.usgs.gov/eqarchives/sopor). В настоящее время в подобном ключе осуществляются определения механизмов очагов землетрясений Японским Метеорологическим Агентством (http://www.fnet. bosai.go.jp), а также Центром данных Института наук о Земле Тайваня (http://bats.earth.edu.tw).

Глобальный сейсмологический каталог, созданный в 1978 г. Геологической службой США, являлся наиболее перспективным для расчета параметров напряженного состояния как с сейсмологических, так и с тектонофизических позиций. Но в начале 80-х годов прошлого века, когда только начали создаваться первые программы по реализации кинематического метода (А.О. Мострюков, Обсерватория Борок, и Ю.Л. Ребецкий, ИФЗ РАН), этот каталог был ограничен временным интервалом в 5–10 лет и не позволял только на его основе выполнять реконструкцию напряжений в сейсмоактивных регионах. Кроме того, для отдельных регионов имелись каталоги механизмов, полученные разными авторами в разные, частично пересекающиеся временные интервалы. В связи с этим в те годы при реконструкции напряжений для крупных регионов и мегарегионов приходилось совмещать каталоги различных типов, полученные не только разными авторами, но и на разных принципах решения обратной задачи сейсмологии (по знакам первых вступлений или по общей волновой картине).

При подобном совмещении в суммируемом каталоге появлялись землетрясения с несколькими вариантами механизмов. Сопоставляя данные о механизмах очагов землетрясений средней силы ($M_b = 4.5-6.5$) региональных сетей, определяемых, как правило, по знакам первых вступлений продольных волн, с данными о механизмах этих же землетрясений, полученными в рамках проекта Global CMT (Harward CMT), можно найти немало примеров их несовпадения. В качестве одного из примеров подобных разночтений можно привести землетрясение 1979 г. с M_b = 5.8, произошедшее в земной коре камчатского сектора северо-западного участка Тихоокеанской сейсмофокальной области (таблица). Для этого землетрясения имеются данные о механизме очага из каталога проекта Harward CMT (Dze) и три разных механизма очага из каталогов, публиковавшихся в журнале «Землетрясения в СССР» [1979] (ССС). Другой пример – это землетрясение на севере Пакистана с $M_b = 5.7$, также произошедшее в 1979 г. Здесь существовало три варианта определения механизма очага. Одно – из данных Harward CMT (Hrw), одно – опубликованное в [Землетрясения в *СССР*, 1979] (ССС) и одно – рассчитанное А.О. Мострюковым [Mostryukov, Petrov, 1994] (Mostr). Как видно из таблицы и рис. 2, разные варианты механизмов этих землетрясений могут достаточно сильно отличаться друг от друга.

Подобные различия в механизмах одних и тех же землетрясений приводили к необходимости их учета при реконструкции напряжений, что отражалось в алгоритмах расчета ориентации главных осей напряжений [Gushchenko et al., 1990, 1991; Petrov et al., 1994]. В рамках алгоритма кинематического метода О.И. Гущенко для землетрясений, которые имели несколько вариантов механизмов, область возможного положения оси максимального сжатия σ_3 представляла собой сумму квадрантов, содержащих оси Р (максимальное сжатие снимаемых напряжений) этих механизмов [Gushchenko et al., 1991, 1994a, 1994b]. То же самое необходимо было предусмотреть и при определении возможного положения оси σ₁. Поскольку основу кинематического метода составляет нахождение взаимного пересечения квадрантов сжатия и растяжения, содержащих соответственно оси Р и Т (максимальное растяжение снимаемых напряжений), подобная модификация алгоритма расчета приводила к необходимости привлечения большего числа данных о механизмах очагов землетрясений для расчета главных осей одного стресс-состояния, чем в случаях, когда механизмы очагов определены однозначно. Следствием подобной необходимости являлось и большее усреднение на-

			-	-	-				
Номер	Bap.	Дата	Время	Долг.	Шир.	Глуб.	Р	Т	Ист.
8355	4	79.05.23	00.40.43	159.90	50.10	50	108/77	312/12	Hrw 258
							160/70	261/04	CCC 16
							357/40	194/51	CCC 41
							006/44	209/44	CCC 42
8501	4	79.06.26	03.04.51	71.20	36.60	230	15/78	188/12	Hrw 24
							22/10	265/70	CCC 96
							194/08	312/73	Mostr 380

Механизм очагов двух землетрясений из многовариантного каталога

Mechanism of the centers of two earthquakes from the multiple catalog

Примечание. В колонках для Ри Т показаны азимуты и углы погружения осей.

N o t e. Azimuths and plunge angles of axles are shown in the columns P and T.

пряжений как в пространстве, так и по времени.

Именно в таких условиях в середине 90-х годов прошлого века была выполнена реконструкция природных напряжений по данным о механизмах очагов землетрясений для мегарегиона Юго-Восточной Азии и Океании [*Rebetsky et al., 1997*]. Для реконструкции использовался МКА, который в тот момент времени не очень сильно отличался от кинематического метода О.И. Гущенко [*Gushchenko, 1975*]. Собранный для расчета напряжений каталог механизмов очагов землетрясений состоял из 15 региональных каталогов, дополненных глобальным каталогом сейсмологической обсерватории Гарвардского университета. Для участка коры Средней и Юго-Восточной Азии этот каталог насчитывал данные для более 9000 событий для периода времени с 1904 по 1994 г. при магнитудах $M_b > 4$.

Все данные каталога прошли предварительное тестирование и выверку, что позволило исправить большое количество ошибок как систематического, так и случайного характера. Реконструкция по данным этого каталога механизмов осуществлялась с усреднением по времени > 50 лет, по латеральному расстоянию 100–200 км, по глубине 40 км [Gushchenko et al., 1993, 1994a, 1994b].

Первая реконструкция напряжений для коры Юго-Восточной Азии, выполненная в рамках кинематического метода О.И. Гущенко, была представлена в работах [*Petrov et al.*, 1994, 2008]. Некоторое отличие результатов в сравнении с работой [*Rebetsky et al.*, 1997] было вызвано не столько различием методик реконструкции, сколько определенными расхождениями исходных сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений. В работе [*Petrov et al.*, 1994] в качестве основного каталога механизмов использовался авторский каталог, созданный А.О. Мострюковым [*Mostryukov, Petrov, 1994*] по данным о знаках первых вступлений *P*-волн, опубликованных в Бюллетене Китайской сейсмологической службы [*Catalogue of earthquake..., 1980*].

Реконструкция напряжений, выполненная нами [*Rebetsky et al.*, 1997] во второй половине 90-х годов прошлого века, проведена по региону в градусном

диапазоне по долготам от 50° в.д. до 170° в.д. и по широтам от 10° ю.ш. до 70° с.ш. Новая реконструкция напряжений, представляемая в настоящей работе, выполнена для меньшей территории (65–100° в.д. и 20– 45° с.ш.), которая соответствует району Средней и Юго-Восточной Азии, именуемому как Высокая Азия [*Burtman*, 2012].

Следует также заметить, что в современном виде МКА состоит из четырех этапов, в рамках которых определяются разные компоненты напряженного состояния. Тот вариант МКА, который использовался на момент времени конца прошлого века, отвечал сегодняшнему первому этапу МКА в несколько урезанном виде. Так, на первом этапе современной версии МКА определение параметров эллипсоида напряжений и параметров эллипсоида приращений сейсмотектонических деформаций ведется совместно. В версии МКА 1997 г. этого не было.

Другой метод расчета параметров тензора напряжений для коры Китая был использован в работе Зхонгхуа Ху [Zhonghuai et al., 1992]. Теоретические его основы ближе к известному у нас в стране методу расчета квазиглавных напряжений В.Д. Парфенова [Parfenov, 1984]. В этой работе, как и почти во всех далее представленных, анализировалась ориентация главных осей рассчитываемых параметров напряженно-деформированного состояния коры и осуществлялось сопоставление с тектоническими структурами района исследований.

В работе [*Trifonov et al.*, 2002] для коры Альпийско-Гималайского коллизионного пояса были выполнены расчеты тензора приращений сейсмотектонических деформаций (СТД) по методике Ю.В. Ризниченко [*Riznichenko*, 1968] с применением уточнений, сделанных в работе [*Kostrov*, 1975]. При этом использовались каталоги механизмов очагов землетрясений с магнитудами $M_b \ge 5$ [*Mostryukov*, *Petrov*, 1994; *Balakina et al.*, 1996] и ТИССС АН Таджикистана. Параметры тензора приращений СТД рассчитывались в центрах окон с размерами 1°×1.25° и 3°×3.75° с перекрытием на 1° и 1.25°. Такой режим расчета отвечает усреднению тензора СТД соответственно около 120 и 360 км по ла-



Рис. 2. Сравнение механизмов очагов, полученных разными авторами для одного и того же землетрясения (см. таблицу).

Показаны четыре варианта решения механизма очага первого землетрясения (I*a*-*d*) и три варианта решения механизма очага второго землетрясения (I*Ia*-*c*).

Fig. 2. Comparison of focal mechanisms reconstructed by different researchers for the same earthquakes (see Table).

Four variants of focal mechanism solution for the first earthquake (Ia–d) and three variants of focal mechanism solution for the second earthquake (IIa–c) are shown.

терали и по всей мощности коры. В более поздней работе О.А. Кучай [*Kuchai*, *Bushenkova*, 2009] изучение напряженно-деформированного состояния коры Высокой Азии от Гималаев до Алтая и Саян также выполнялось на основе расчета тензора приращений СТД. Эти данные дополнялись анализом ориентации осей *P* и *T* сброшенных напряжений в очагах сильных землетрясений,

Так же широко известны результаты проекта «World stress map» [*Zobak*, 1992], в рамках которого в мировую карту напряжений были включены данные об ориентации осей главных снимаемых напряжений *P* и *Т* в очагах наиболее сильных землетрясений ($M_b \ge 7$). На карту в точке, отвечающей эпицентру очага сильного землетрясения, наносились проекции осей *P* на горизонтальную плоскость. Выполнялось разделение напряженных состояний по кинематическим типам очага землетрясения: взброс, сброс, сдвиг по простиранию. В работе [*Zobak*, 1992] фактически утверждалось, что оси *P* и *T* механизмов очагов сильных землетрясений совпадают по ориентации с осями главных тектонических напряжений.

Позднее в работе [Sherman, Lunina, 2001] карта напряжений М.Л. Зобак в областях, где в ней отсутствовали данные, была дополнена информацией о напряжениях, полученных в работах других исследователей, а также на основе интерпретации серии региональных тектонических карт и Международной тектонической карты Мира [International tectonic map..., 1984]. На карте глобального напряженного состояния С.И. Шермана и О.В. Луниной не строились оси главных напряжений. Здесь разным цветом закрашены участки коры с различными типами геодинамической обстановки: горизонтального растяжения, сжатия, сдвига и т.д.

В продолжение подхода М.Л. Зобак в работах [Coblentz, Richardson, 1995; Heidbach et al., 2007, 2008, 2010] с использованием только механизмов очагов землетрясений получены новые данные о поле глобальных напряжений. Здесь результаты проекта «World stress map» [Zobak, 1992] в части механизмов очагов были дополнены новыми сейсмологическими данными о более поздних сильных землетрясениях. С целью более плотного покрытия поверхности Земли данными о напряженном состоянии ее коры в указанных выше работах выполнялось усреднение и интерполяция ориентации проекций на горизонтальную плоскость осей *P* на участки коры, где данных о сильных землетрясениях не было. Радиус усреднения составлял от 100 до 1000 км. Этот же способ построения карты глобальных напряжений был применен в работе [Koptev et al., 2011]. Подобный подход по усреднению механизмов в чем-то схож с методом расчета среднего механизма по С.Л. Юнге [Yunga, 1990]. Здесь данные о напряжениях получают на основе усреднения и последующей интерполяции механизмов очагов землетрясений, с главными осями которых отождествляют главные оси искомых главных напряжений.

В нашей работе будет проведено сопоставление результатов исследований современного напряженного состояния, полученного в предыдущих работах, с нашими новыми результатами реконструкции напряжений.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В предыдущем разделе было отмечено, что ранее для коры Высокой Азии разными методами было выполнено несколько реконструкций напряженного состояния по сейсмологическим данным о механизмах очагов землетрясений. Эти результаты имеют как определенную общность, так и достаточно сильные различия. Подобная ситуация предопределяет возникновение вопроса об отношении к этим результатам. Отвечая на него, надо прежде всего оценить качество методов, используемых для реконструкции напряжений.

Начнем наш анализ с методики расчета тензора приращений СТД в том виде, как она была применена в работе [*Trifonov et al., 2002*]. Ее методические про-

блемы и возможные ошибки расчета достаточно подробно рассмотрены в работе [Rebetsky, 2007а]. Самая главная проблема подобного подхода состоит в том, что в нем суммирование вкладов сейсмотектонических деформаций, приписываемых затем данной точке пространства, возможно даже в случае диаметрально противоположных механизмов очагов, таких как взброс и сброс с одинаковым простиранием нодальных плоскостей. В этом случае при близких магнитудах землетрясения сумма двух таких вкладов будет равна нулю. Вторая очень важная проблема в подходе, реализованном в работе [Trifonov et al., 2002], состоит в том, что наиболее сильное землетрясение, попавшее в окно расчета с магнитудой, на 0.5 превышающей остальные из этого же окна, фактически и определит параметры тензора приращений СТД. В работах С.Л. Юнги [Yunga, 1990] эта проблема была решена путем расчета тензора средних механизмов, но проблема суммирования разнотипных механизмов сохранилась и при нахождении среднего механизма.

В МКА также рассчитываются компоненты тензора приращений СТД. Однако их расчет осуществляется только для тех событий (механизмов очагов), которые прошли проверку критериями однородности [*Rebetsky*, 2007*a*]. Данные о параметрах СТД в МКА используются для получения единственного решения в виде параметров эллипсоида напряжений, для которого при рассчитанном тензоре приращений СТД достигается максимум диссипации энергии упругих деформаций.

Если говорить о кинематическом методе О.И. Гущенко [Gushchenko, 1979], используемом в работе [Petrov et al., 1994, 2008], то МКА следует рассматривать как его развитие. В МКА содержится целый ряд положений кинематического метода: однородные выборки механизмов очагов землетрясений; возможность несовпадения на плоскости разрыва касательных напряжений, действовавших до его активизации с направлением относительного смещения бортов и др. Эти положения были дополнены новыми требованиями, вытекающими из представлений современной теории пластичности: упорядоченностью приращений необратимых деформаций по отношению к главным осям напряжений; взаимосвязью искомого тензора напряжений и тензора приращений сейсмотектонических деформаций и др. Опыт сравнения результатов реконструкции напряжений в части ориентации осей главных напряжений, полученной этими двумя методами, показывает, что между ними нет серьезных различий.

Другая ситуация складывается с методом, используемым в статье [*Zobak*, 1992] и в работах последователей. Здесь в качестве осей главных тектонических напряжений принимаются направления осей *P* и *T* механизмов очагов сильных землетрясений. Это фактически означает, что предполагается совпадение плоскости разрыва в очаге с плоскостью действия максимальных касательных напряжений. Подобные представления существовали в геологии и в сейсмологии в



Рис. 3. Диаграмма Мора (*a*) и схема ориентации главных осей напряжений, плоскостей скалывания и максимальных касательных напряжений (*б*), определяющие взаимосвязь параметров механизма очага землетрясения и главных напряжений. *A*, *B*, *P*, *T* – индексы для напряженных состояний на двух нодальных плоскостях и для нормальных напряжений вдоль главных осей сжатия и растяжения снимаемых напряжений для первого варианта очага, *A*', *B*', *P*', *T*' – такие же индексы для второго варианта очага.

Оба землетрясения имеют одну нодальную плоскость, совпадающую с одной из сопряженных плоскостей скалывания. Пояснение в тексте.

Fig. 3. The Mohr diagram (*a*) and scheme of orientations of principal stress axes, fault planes and maximum shear stresses (δ) which determine correlations between parameters of earthquake focal mechanisms and the principal stresses. *A*, *B*, *P*, *T* – indices for the states of stresses at the two nodal planes and for normal stresses along principal axes of compression and extension of released stresses for earthquake I; *A*', *B*', *P*', *T*' – similar indices for earthquake II.

Both earthquakes have one nodal plane coincident with one of the conjugated shear planes. See explanation in the text.

первой половине прошлого века, но после экспериментальных исследований [Mogi, 1964; Byerlee, 1968, 1978; Brace, 1978; Stavrogin, Protosenya, 1992] были отвергнуты. В экспериментах было показано, что трецины в изначально однородных и ненарушенных образцах горных пород развиваются вблизи положения плоскости скалывания. Для образцов, имевших предварительно подготовленные внутренние дефекты прочности, хрупкое разрушение может развиваться на плоскостях трещин, имеющих достаточно сильное отклонение от ориентации плоскости скалывания [Rebetsky, 2007b].

Таким образом, при обсуждении методических основ работы [Zobak, 1992] нам приходится вернуться на 40 лет назад к известным дискуссиям, возникшим в работах Б.В. Кострова [Kostrov, 1975] и А.В. Введенской [Vvedenskaya, 1969], о том, можно ли в качестве тектонических напряжений прямо использовать данные об ориентации снимаемых напряжений в очагах единичных сильных землетрясений. И хотя в теоретических работах Б.В. Кострова и в практических реконструкциях [Gushchenko, 1996; Rebetsky, 2007a] было показано, что этого делать нельзя, многие авторы продолжают идти этим более простым путем, который является менее достоверным по получаемым результатам.

Иллюстрация неточности в понимании взаимосвязи тензора напряжений с морфологией хрупкого разрушения, вытекающая из подхода А.В. Введенской и М.Л. Зобак, приведена на рис. З, а. Для хрупкого разрушения однородно деформируемых образцов характерно совпадение положения плоскости трещин с плоскостью скалывания горной породы. Плоскости скалывания представляют собой сопряженную пару, каждая из которых отклоняется от плоскости действия максимальных касательных напряжений в сторону оси максимального сжатия (σ_3) на угол φ_f (рис. 3, б). На диаграмме Мора (рис. 3, a) нормальному σ_n и касательному т_n напряжениям на этих плоскостях отвечают точки А и А', лежащие на большом круге Мора соответственно в верхнем и нижнем его секторах. Углу между этими плоскостями и плоскостями действия максимального касательного напряжения au (точки C и С') в моровой параметрической области отвечает угол

 $2\varphi_f$. На моровой параметрической области все углы между нормалями *n* к плоскостям, попадающим на большой круг Мора, увеличиваются вдвое по отношению к нашему трехмерному пространству (рис. 3, *б*). Считается, что для горных пород угол φ_f может изменяться в диапазоне 13–18°.

Будем полагать, что точка *А* определяет напряжения, действующие на плоскости очага землетрясения (первая нодальная плоскость). Т.е. плоскость очага землетрясения совпадает с плоскостью скалывания для тензора напряжений, действующего в окрестности очага. Отметим, что наши исследования [*Rebetsky*, 2007a] показывают, что чем выше магнитудный уровень землетрясения, тем чаще встречается ситуация, когда реализованная в очаге плоскость на диаграмме Мора близко расположена к плоскости скалывания. Это не является правилом, а лишь встречается в какихто районах более, а в каких-то менее часто.

Найдем на диаграмме Мора напряжения, отвечающие второй нодальной плоскости, сопряженной с плоскостью А. Этой плоскости будет отвечать точка В. Нормали к плоскостям для этих точек отличаются в моровом пространстве на 180°, что в нашем пространстве как раз и дает необходимые 90°. Мы видим, что точка В очень далеко отстоит от точки А', определяющей положение сопряженной плоскости скалывания. Это говорит о том, что вторая нодальная плоскость не может реализоваться в качестве разрыва в данном напряженном состоянии. Сопряженной паре нодальных плоскостей А и В механизма очага землетрясения будут отвечать главные снимаемые напряжения, действующие на плоскостях, отклоняющихся от плоскостей A и B на 45° в нашем пространстве и на 90° в моровом. На рис. З, а, напряжения, действовавшие на этих плоскостях до активизации разрыва, показаны точками Р и Т. Видно, что на этих плоскостях действовали касательные напряжения, а нормальные напряжения отличаются как по величине, так и по направлению (в нашем пространстве на угол φ_f) от главных напряжений соответственно σ_3 и σ_1 .

Если теперь сопряженную плоскость скалывания A', рассматриваемого на рис. 3, a, напряженного состояния, принять в качестве плоскости очага другого землетрясения, то ей будет отвечать сопряженная нодальная плоскость B' и снимаемые напряжения P' и T'. Мы видим, что оси этих снимаемых напряжений, так же как и для первого очага землетрясения, отличаются от положения осей главных напряжений σ_3 и σ_1 на угол φ_f , который при этом отсчитывается в противоположном направлении.

Результаты выполненного анализа говорят о следующем: если для какого-то участка коры будут существовать два землетрясения, плоскости очага которых совпадали с сопряженными плоскостями скалывания действующего здесь напряженного состояния, то ориентации соответственно *P* и *T* осей этих землетрясений будут отличаться на угол $2\varphi_f$. При этом оси *P* и *T* каждого из землетрясений будут отличаться от ориентации главных напряжений на угол φ_f (рис. 3, б).

Таким образом, применение подхода А.В. Введенской и М.Л. Зобак помимо высокой неустойчивости ориентации главных осей напряжений, определяемых по положению осей Р и Т механизмов очагов сильных землетрясений, имеют систематическую ошибку 13-18°. Это положение может подправить методика В.Д. Парфенова по определению в качестве квазиглавных напряжений центра облака выходов на единичную полусферу соответственно осей Р и Т отдельных механизмов. Однако здесь более важно само непонимание авторов, применяющих эти подходы, закономерности взаимосвязи морфологии хрупкого разрушения и параметров тензора напряжений, которое затем проявляется и в интерпретации получаемых данных о напряженном состоянии.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕКОНСТРУКЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ КОРЫ ВЫСОКОЙ АЗИИ ЗА ПЕРИОД 1904–1992 ГГ.

В рамках настоящей статьи по результатам расчетов 1996–1997 гг. [*Rebetsky et al., 1997*] были вновь построены карты некоторых параметров напряженного состояния для коры в пределах района Высокой Азии (60–100° в.д. и 20–55° с.ш.), включающих районы горных областей Памира, Афганского поднятия, Гиндукуша, Тянь-Шаня, Гималаев, Куньлунь и Тибета (см. рис. 1). Территория этих горных поднятий к северу сопрягается с крупнейшей в Азии впадиной Таримской плиты, Предтяньшаньской и Ал Шань впадинами, а также с пустыней Гоби. С востока рассматриваемая область ограничивается зоной сдвигов Красной реки, Сычуанской котловиной и Китайским лессовым плато. С запада ограничениями являются впадина Гильменд и Афганская депрессия.

Расчеты напряжений производились на нерегулярной сетке, отвечающей латеральным координатам эпицентров очагов относительно сильных землетрясений, и глубине 20 км. Расчет напряжений, приведенный в работе [Rebetsky et al., 1997], выполнялся для большей территории (Юго-Восточная Азия и Океания), чем в настоящей работе. В нем были получены данные о параметрах тензора напряжений для 5883 доменов коры. Из этого объема исходных данных были выбраны 1286 доменов, попадающих в исследуемый нами район Высокой Азии. Поскольку эпицентры землетрясения часто формировали кластеры, то при построении некоторых параметров тензора напряжений (ориентации главных осей и направления поддвиговых касательных напряжений на горизонтальных площадках) для улучшения изображения выполнялось прореживание результатов расчетов (убирались одинаковые и рядом расположенные ориентации соответствующих векторов). После прореживания для оставшихся 385 доменов коры были показаны соответствующие параметры тензора напряжений.

На рис. 4 представлены данные об ориентации осей главных напряжений σ_1 и σ_3 . Здесь построены проекции погружения осей этих напряжений на сферическую поверхность Земли. Из результатов реконструкции видно, что для исследуемой части коры Высокой Азии оси σ_1 и σ_3 образуют радиально-концентрическую систему линий.

Большинство осей σ_1 субпараллельны границе столкновения Индийской и Евразийской плит и создают систему обтекания в пределах восточного угла Индийской плиты и сложного сопряжения для коры Памира. Оси напряжений максимального сжатия на большой территории субгоризонтальны, имеют северо-восточную ориентацию и практически субортогональны северной границе Индийской плиты. Они сохраняют такую свою ориентацию на больших расстояниях, несколько разворачиваясь на восток вблизи югозападных границ Байкальской рифтовой системы.

Существенный разворот анализируемых осей главных напряжений наблюдается в юго-восточном секторе исследуемого региона в пределах синтаксиса Намче Барва и зоны сдвигов Красной реки. Здесь оси σ_3 испытывают разворот на 180°, сменяя направление погружения с северо-восточного на юго-западное. Также на 180° меняют свое погружение и оси σ_1 .

Подобная ориентация осей главных напряжений хорошо соответствует идеям об индентерном влиянии Индийской плиты на напряженное состояние коры Высокой Азии, рассматривавшимся в известной работе [Molnar, Tapponnier, 1975].

Наибольшие отклонения от субгоризонтального положения осей максимального сжатия наблюдаются в коре Северо-Кызылкумской впадины (рис. 4, б). Здесь оси этого напряжения субвертикальны. Также наблюдаются достаточно крутые погружения осей σ_3 для участков коры Центрального Памира и Восточного Тибета.

В коре Гималаев, Западного Памира, Гиндукуша, а также Западного и Центрального Тянь-Шаня оси алгебраически наибольшего из главных напряжений σ₁ субвертикальны (рис. 4, *a*). Оси промежуточного главного напряжения σ₂ субвертикальны для большинства областей Тибета и в коре зоны сдвигов Красной реки.

Далее на рис. 5 представлены параметры, характеризующие геодинамический тип напряженного состояния и тип тензора напряжений. При геодинамическом районировании коры использовалось деление напряженных состояний на шесть типов, отвечающих различным углам оси на зенит в октанте, построенном на трех главных осях напряжений (врезка рис. 5, *a*) [*Gushchenko*, 1996; *Gushchenko et al.*, 1990; *Sherman*, *Dneprovsky*, 1989; *Rebetsky*, 2007*a*]. Как видно из рис. 5, *a*, большая часть коры Высокой Азии отвечает режиму горизонтального сдвига с субвертикальной ориентацией промежуточной оси главного напряжения (Тибет, Центральный Тянь-Шань, Афганское поднятие, зона сдвигов Красной реки). Так же широко представлен режим горизонтального сжатия с субвертикальной ориентацией оси алгебраически максимального напряжения (горные области Центральных Гималаев, Северный Памир и Гиндукуш, Западный и Восточный Тянь-Шань, северный борт Таримской плиты). В коре центральной части Памира и Северо-Кызылкумской впадины наблюдается режим горизонтального растяжения с субвертикальной осью максимального сжатия.

Еще одна характеристика напряжений – коэффициент Лоде – Надаи (μ_{σ}), определяющий тип эллипсоида (тензора) напряжений, – в пределах исследуемого региона также испытывает максимально возможные изменения (рис. 5, б). Для коры Афганского поднятия, Восточного Тянь-Шаня и Монгольского Алтая к западу от зоны сдвигов Красной реки наблюдается тип тензора, близкий к одноосному сжатию. Тензор, близкий к одноосному растяжению, характерен для коры синтаксиса Намче Барвы, западной части Таримской плиты и Западного Памира. Области коры с тензором одноосного растяжения и одноосного сжатия разделяются зонами коры с тензором, близким к чистому сдвигу. Коре центральной части Тибета также отвечает тензор, близкий к чистому сдвигу.

Из результатов геомеханического теоретического анализа известно, что тип напряженного состояния играет большую роль в разрушении геоматериалов [*Makarov*, 2010]. Повреждения в виде хрупких трещин и разрывов в областях одноосного растяжения – чистого сдвига ($\mu_{\sigma} < 0$) начинают копиться при существенно меньших напряжениях, чем при $\mu_{\sigma} > 0$ в областях одноосного сжатия – чистого сдвига. Скорости накопления повреждений для локальных областей, где $\mu_{\sigma} < 0$, также существенно выше, чем в областях, где $\mu_{\sigma} > 0$. Эти положения геомеханики следует использовать при интерпретации результатов реконструкции природных напряжений, при прогнозе сейсмического режима территорий, при сейсмическом районировании.

Конечным итогом реконструкции первого этапа МКА являются данные об эллипсоиде напряжений, которые определяют средние для коры компоненты девиатора напряжений, нормированного на значение максимальных касательных напряжений. Имея данные о значениях редуцированного девиатора напряжений, мы знаем, в каком направлении действуют касательные напряжения на любой площадке в земной коре и как это касательное напряжение соотносится с максимальным касательным напряжением.

Данные о девиаторе напряжений позволяют увидеть взаимосвязь деформаций коры с мантией. Для этого необходимо построить направления касательных напряжений, действующих на горизонтальных площадках. Если изобразить эти направления для площадок, нормали которых смотрят к центру Земли (ось Z),



Рис. 4. Проекции на горизонтальную плоскость осей главных напряжений: *a* – σ_1 ; *б* – σ_3 по результатам реконструкции [*Rebetsky et al.*, 1997].

Вектор из точки, отвечающей эпицентру землетрясения, направлен в сторону погружения оси главного напряжения. Точка в середине вектора означает субгоризонтальное положение оси (±15°). Длина проекции характеризует крутизну погружения вектора. Построение проекций выполнялось на прореженной нерегулярной сетке результатов расчетов.

Fig. 4. Projections of principal stress axes to the horizontal plane: $a - \sigma_1$; $\delta - \sigma_3$ as reconstructed in [*Rebetsky et al.*, 1997].

Vectors from points corresponding to earthquake epicenters are directed towards dips of principal stresses. Points at the middle of vectors show subhorizontal positions of axes ($\pm 15^{\circ}$). Projection lengths characterize the steepness of vector plunge. Projections are done at the subsampled grid of calculation results.



Рис. 5. Геодинамический тип напряженного состояния и вид тензора напряжений (коэффициент Лоде – Надаи) в коре Высокой Азии по результатам реконструкции [*Rebetsky et al.*, 1997].

Построение выполнялось на полной нерегулярной сетке результатов расчетов. В нижней части рисунка приведено расположение выделяемых геодинамических типов в октанте, построенном на осях главных напряжений. Попадание оси на зенит в соответствующий сектор этого октанта определяет один из шести типов напряженного состояния, принятых в геодинамике.

Fig. 5. The geodynamic type of the state of stresses and the stress tensor (the Lode – Nadai coefficient) of the crust in High Asia as reconstructed in [*Rebetsky et al.*, 1997].

The full subsampled grid of calculation results is used. Locations of identified geodynamic types in the octant constructed at the axes of principal stresses are shown at the bottom of the figure. One of the six types of the state of stresses accepted in geodynamics is determined by positioning of the axis at the zenith of the corresponding sector of the octant.



Рис. 6. Ориентации поддвиговых касательных напряжений, действующие на горизонтальных площадках с нормалями к центру Земли по результатам реконструкции [*Rebetsky et al.*, 1997].

Построение выполнялось на прореженной нерегулярной сетке результатов расчетов.

Fig. 6. Orientations of underthrusting shear stresses acting at the horizontal planes and normals to the center of the Earth as reconstructed in [*Rebetsky et al.*, 1997].

The full subsampled grid of calculation results is used.

то они будут указывать направления относительного смещения вещества коры и мантии. Данные касательные напряжения τ_z можно именовать поддвиговыми, так как они характеризуют вертикальную неоднородность кинематики коры.

На рис. 6 показаны направления таких касательных напряжений в коре исследуемого региона. Видно, что для Гималаев они везде ориентированы в северо-восточном направлении, что говорит о большей скорости смещений мантии относительно коры в этом направлении. Здесь эти горизонтальные площадки также достаточно близки к площадкам действия максимальных касательных напряжений. Подобное распределение этих осей может иметь двойную интерпретацию. Первая говорит о том, что подошва коры Гималаев испытывает интенсивное воздействие со стороны мантии в направлении на северо-восток. Результатом такого воздействия должно быть смещение коры также на северо-восток.

Другой вариант интерпретации говорит о смещении на юго-запад коры Тибета относительно мантии и ее надвигании на Индийскую плиту. Оба варианта интерпретации имеют право на существование, и оба этих варианта не противоречат известным данным GPS- геодезии.

Уже в пределах коры южной части Тибета эта стабильная ориентация осей τ_z пропадает, и здесь можно увидеть совершенно разные ориентации касательных напряжений на горизонтальных площадках, включая противоположные – юго-западные. При этом в коре всего Тибета уровень касательных напряжений τ_z очень низкий. Устойчивые определения ориентации поддвиговых напряжений и высокий их уровень в коре Тибета наблюдаются пятнами. Так, в северной части коры существует область с устойчивой ориентацией поддвиговых касательных напряжений на юг, а в северо-восточном сегменте – на восток – северо-восток. Немного восточнее это направление сменяется субмеридиональным направлением на юг. Во всех остальных доменах с данными о напряжениях τ_z горизонтальные площадки достаточно сильно отклонены от плоскостей действия максимальных касательных напряжений, что определяет низкий уровень этих напряжений и достаточно сильный разброс в их ориентации.

Полученные данные о направлениях поддвиговых касательных напряжений в коре Тибета (отсутствие одного направления) отражают относительно стабильное сосуществование коры и мантии, т.е. здесь на по-



Рис. 7. Диаграммы распределения числа событий из каталога в период 1978–2010 гг. по годам (*a*), по магнитудам (*б*) и глубинам (*в*).

Fig. 7. Diagrams showing distribution of numbers of events from the catalog for the period from 1978 to 2010 years by years (*a*), magnitudes (*6*) and depths (*b*).

дошве коры не наблюдается значимых сил, которые должны были бы возникать при индентерном воздействии Индийской плиты на Тибет. Это говорит либо о том, что такого воздействия здесь нет, либо о том, что горизонтальному сжатию подвержена не только кора, но и вся литосфера, и здесь нет проскальзывания на север утолщенной коры Тибета (около 70 км) относительно мантии.

В коре Памира поддвиговые касательные напряжения ориентированы достаточно хаотично, а в коре Тянь-Шаня в целом дают восточно – юго-восточное направление. Так же слабо выражены единые ориентации этих напряжений в коре синтаксиса Намче Барва.

Анализ полученных результатов показал, что главные особенности реконструированного поля современных тектонических напряжений Юго-Восточной Азии состоят в том, что изменение ориентаций осей главных напряжений носит закономерный характер с высоким уровнем равномерности. В зоне сочленения Индийской и Евразийской плит оси главных сжимающих напряжений также направлены по нормали к простиранию Памиро-Гималайской сейсмоактивной области с направлением падения под Индийскую плиту. Отметим характерное радиальное субгоризонтальное распределение направлений осей этого напряжения для обширных областей Средней Азии и Китая. Направления осей двух других главных напряжений образуют здесь радиально-концентрическое поле траекторий главных напряжений. На основании описанной выше возможности кинематической интерпретации траекторий главных нормальных напряжений можно сделать заключение, что Индийская плита надвигается на Евразийскую плиту в северо-восточном направлении (отклонение от направления на север в пределах 30–40°), не испытывая при этом поворота.

Новые результаты реконструкции напряжений для коры Высокой Азии за период 1978–2010 гг.

С момента нашего предыдущего расчета параметров напряженного состояния для коры Средней и Юго-Восточной Азии прошло более 15 лет. За этот период времени каталог Global CMT (http://earthquake.usgs.gov /eqarchives/sopor) расширился данными о механизмах очагов землетрясений по исследуемому региону в несколько раз. На момент расчета напряжений 1996 г. СМТ каталог имел данные только за 15 лет наблюдений, а сейчас период наблюдений составляет уже более 30 лет (данные о механизмах очагов помещаются в каталог с задержкой в два года). Кроме того, за прошедшее время серьезное развитие получил и MKA. В нем появились этапы расчета, позволяющие определить не только ориентацию главных осей напряжений, но и величины напряжений [Rebetsky, 2007a]. Все это подтолкнуло нас возвратиться в данный регион и выполнить повторную реконструкцию напряженного состояния.

Сформированный из каталога Global CMT региональный каталог механизмов насчитывал 1294 события с диапазоном магнитуд $4.5 \le M_b \le 8$ за период времени с 1976 г. по 2010 г. Для сопоставления отметим, что для этой же территории в каталоге механизмов очагов предыдущего расчета [*Rebetsky et al.*, 1997] насчитывалось около 4500 событий.

Как следует из данных рис. 7, основной глубинный диапазон каталога механизмов очагов землетрясений лежит в интервале от 10 до 35 км. Наиболее представительным является диапазон магнитуд от 5.0 до 6.0, что связано с достаточно большими расстояниями между сейсмическим станциями IRIS. Наблюдается увеличение во времени числа событий, для которых оп-



Рис. 8. Карта распределения для коры Высокой Азии эпицентров землетрясений из каталога механизмов очагов землетрясений (кружочки розового цвета) и механизмы очагов для магнитуд M_b > 6.0, топография и основные разрывы.

На круговых роза-диаграммах в нижней части рисунка красной и синей заливкой показана представительность механизмов очагов с разной азимутальной ориентировкой и углами погружения соответственно осей *T* (синий) и *P* (красный).

Fig. 8. The map of the crust of High Asia showing distribution of earthquake epicenters from the catalog of earthquake focal mechanisms (pink circles), focal mechanisms of events with $M_b > 6.0$, topography and main faults.

In the rose diagrams at the bottom of the figure, red and blue shading shows the representativeness of focal mechanisms with different azimuthal orientations and plunge angles of T (blue) and P (red) axes, respectively.

ределяются механизмы очагов землетрясений (пик приходится на 2006–2008 гг.). В следующие годы уровень сейсмичности в данном диапазоне магнитуд вернулся к значениям начала двухтысячных годов. Вероятно, данное увеличение числа сейсмических событий можно связывать с возросшей активностью региона после произошедшего 26.12.2004 г. катастрофического Суматро-Андаманского землетрясения.

На рис. 8 показано распределение эпицентров из этого каталога и механизмы очагов наиболее сильных землетрясений (M_b > 6). Данные каталога механизмов очагов достаточно хорошо покрывают Памир, Гиндукуш и Куньлунь. Пятнами наблюдается покрытие районов Тибета и Гималаев. В соответствии с этим распределением эпицентров событий можно ожидать и получение сведений о напряженном состоянии коры исследуемой территории.

Предварительный анализ каталога (см. диаграмму рис. 8) показал, что в нем содержится 39 % механизмов очагов, отвечающих взбросам, 24 % – сдвигам и 12 % – сбросам. Остальные события относятся к промежуточным кинематическим типам разрывообразования, сочетающим эти основные типы. На рис. 8 на круговых диаграммах показана представительность азимутальных простираний и погружений осей *P* и *T* их механизмов. Как видно, ориентация этих осей имеет достаточный разброс в определении азимутов. Оси *P* имеют преимущественное простирание на север и на юг при среднестатистическом пологом погружении. На диаграмме погружения этой оси проглядывается небольшой пик значений, отвечающий крутому погружению.

Оси *Т* имеют в основном субширотное простирание, но также достаточно много определений с другими ориентациями. На диаграмме погружения осей *Т* имеется два ярко выраженных пика значений. Один из них отвечает пологому положению осей, а другой – субвертикальному.

Реконструкция напряжений осуществлялась для масштаба осреднения, отвечающего коре в целом (50–70 км). Шаг сетки составлял 0.25° . При реконструкции использовались механизмы землетрясения с магнитудой от 4.5 до 6.5 (исключено 50 событий с $M_b > 6.5$). Опыт работы алгоритма МКА показывает, что использование диапазона магнитуд, большего, чем 2.5–3.0 единицы, приводит к завышению роли сильных землетрясений за счет того, что размер их области упругой разгрузки начинает доминировать над землетрясениями меньших магнитуд. Механизмы этих сильных событий начинают участвовать в определениях напряжений большинства доменов, существенно усредняя результаты расчетов.

Расчеты выполнены для 576 квазиоднородных доменов при минимальном числе землетрясений в однородной выборке 6. Напомним, что, в отличие от этой реконструкции, в результатах, представленных на рис. 4, расчет выполнялся не по равномерной сетке, а в эпицентрах очагов землетрясений каталога механизмов.

Вполне естественно, что в результатах нового расчета ориентации осей главных напряжений (рис. 9) во многом похожи на ориентацию этих же осей для предыдущей реконструкции напряженного состояния (см. рис. 4). Так, в частности, похожа ориентация осей максимального сжатия σ_3 в коре западного сегмента исследуемой области, относящейся к горным поднятиям Тянь-Шаня, Памира, Куньлуня, Гиндукуша и синтаксиса Намче Барва. Здесь оси максимального сжатия закономерно сменяют свою ориентацию, оставаясь практически везде субгоризонтальными. Исключение такого субгоризонтального положения этих осей составляет кора Памира, для которой в обоих результатах реконструкции существуют домены с субвертикальной ориентацией осей максимального сжатия.

Для коры Высокой Азии наиболее обширные участки с субвертикальной ориентацией осей алгебраически максимального главного напряжения σ_1 наблюдаются для Гиндукуша, Афганского поднятия и Тянь-Шаня, что определяет наличие здесь геодинамического режима горизонтального сжатия (рис. 5, *a*, 10, *a*). Для коры южной части Памира оси σ_1 субгоризонтальны, что вместе с субвертикальной ориентацией осей σ_3 определяет геодинамический тип напряженного состояния коры как горизонтальное растяжение. В коре северной части Памира ось максимального сжатия становится субгоризонтальной, что приводит к формированию здесь режима горизонтального сдвига.

Существенные различия в ориентации осей главных напряжений наблюдаются в коре центральной части Тибета и восточного сегмента Гималаев. Здесь оси максимального сжатия в результатах новой реконструкции имеют субвертикальную ориентацию, в то время как в расчетах, представленных на рис. 4, *a*, они субгоризонтальны (есть только несколько определений с субвертикальной ориентацией оси σ_3 для небольшого юго-восточного участка Тибета). Поскольку ориентация осей максимальных алгебраических напряжений σ_1 для обеих реконструкций похожа, это приводит к отличиям в геодинамических режимах. По результатам предыдущих расчетов (рис. 5, *a*), здесь фиксируется режим горизонтального сдвига, а по результатам новых расчетов – горизонтальное растяжение (рис. 10, *a*).

В результатах нового расчета кора Южного и Восточного Тибета отличается по ориентации главных осей на зенит и, следовательно, отличается по геодинамической обстановке. Здесь (рис. 10, *a*) существуют большие участки коры с режимом горизонтального растяжения. В расчетах 1997 г. здесь везде режим горизонтального сдвига. Для коры Гималаев, Гиндукуша, Памира и Тянь-Шаня обе реконструкции дают близкие результаты. Также близкие результаты получены и для коры юго-восточного сектора реконструкции напряжений (кора синтаксиса Намче Барва). Диаграмма распределения числа доменов с разными типами геодинамических обстановок (в нижней части рис. 10, *a*) показывает существенное преимущество режима горизонтального сжатия.

Большие площади коры Тибета, находящиеся в режиме горизонтального растяжения (ось напряжений максимального сжатия субвертикальна), сложно интерпретировать в контексте превалирующего на сегодняшний день взгляда на геодинамику исследуемого региона. С позиции тектоники плит здесь должно наблюдаться наибольшее горизонтальное сжатие, которое передается на тысячи километров вплоть до Байкала [*Molnar, Tapponnier, 1975; Seminskii, 2008*]. Именно этим горизонтальным сжатием в настоящее время объясняется пятикилометровое поднятие Тибета.

Результаты новой реконструкции в расчетах коэффициента Лоде–Надаи μ_{σ} также имеют существенные различия с данными 1997 г. Как видно из рис. 10, б, в новых результатах для Гималаев и Тибета больше представлены домены с отрицательными значениями μ_{σ} т.е. здесь тензор напряжений имеет вид, промежуточный между чистым сдвигом и одноосным растяжением. В результатах за 1997 г. для этих участков коры больше доменов с положительными значениями μ_{σ}







Рис. 9. Погружение осей главных напряжений, полученных по результатам новой реконструкции: *a* – алгебраически максимального (максимального девиаторного растяжения); *б* – промежуточного; *в* – алгебраически минимального (максимального сжатия).

На круговых роза-диаграммах в нижней части рисунка для каждой из осей главных напряжений показана представительность ее азимутальной ориентировки и углов погружения. Точка – центр квазиоднородного домена, для которого выполнена реконструкции напряжений. Вектор из точки, отвечающий эпицентру землетрясения, направлен в сторону погружения оси главного напряжения. Точка в середине вектора означает субгоризонтальное положение оси (±15°). Изображаемая на рисунке длина проекции характеризует крутизну погружения вектора.

Fig. 9. Plunge of principal stress axes according to the new reconstructions: a – algebraically maximum (maximum deviatoric extension); δ – intermediate; e – algebraically minimum (maximum compression).

In the rose diagrams at the bottom of the figure, representativeness of azimuthal orientations and dip angles is shown for each principal stresses axis. Points show centers of quasi-uniform domains for which the stresses are reconstructed. Vectors from points corresponding to earthquake epicentres are directed towards dips of the principal stress axes. Points at the middle of the vectors show subhorizontal positions of the axes (\pm 15°). Projection lengths characterize the steepness of the vector plunges.

отвечающими тензору, промежуточному между чистым сдвигом и одноосным сжатием. Существенные различия в результатах для μ_{σ} наблюдаются также для юго-восточного сектора реконструкции (кора синтаксиса Намче Барва). Для коры Памира, Гиндукуша и Тянь-Шаня, наоборот, наблюдается схожесть результатов обеих реконструкций.

Сравним теперь ориентацию поддвиговых касательных напряжений, действующих на горизонтальных площадках, полученную в новых расчетах (рис. 11) и по предыдущему расчету (см. рис. 6). Видно, что для коры Гималаев ориентация τ_z в обоих расчетах дает северо-восточное направление при высоком уровне этих напряжений (отметим, что в новых расчетах для этого участка имеется мало данных). Такое же направление этих напряжений наблюдается в коре Куньлунь. Важным отличием новых расчетов является северо-восточная область Тибета, где поддвиговые касательные напряжения имеют прямо противоположную ориентацию – юго-восточную при среднем уровне напряжений. Для коры южной части Тибета в обеих реконструкциях наблюдается разворот осей τ_z на 90°. Здесь они имеют северо-западную ориентацию. Ориентация τ_z для «угловых» секторов» Индийской плиты



Рис. 10. Геодинамический тип напряженного состояния (*a*) и вид тензора напряжений (*б*), определяемый значениями коэффициента Лоде – Надаи, по результатам новой реконструкции.

На диаграмме в нижней части рисунков показана представительность определений соответствующих значений каждого из параметров.

Fig. 10. The geodynamic type of the state of stresses (*a*) and the stress tensor (*6*) determined by values of the Lode – Nadai coefficient according to the new reconstructions.

In the diagram at the bottom of the figure, representativeness of determined values of each parameter is shown.



Рис. 11. Ориентация поддвиговых касательных напряжений на горизонтальных площадках и их относительные значения (нормировка на модуль максимального касательного напряжения) по результатам новой реконструкции.

В нижней части рисунка показана роза-диаграмма простираний осей поддвиговых касательных напряжений и диаграмма представительности различного уровня поддвиговых касательных напряжений.

Fig. 11. Orientations of underthrusting shear stresses over the horizontal planes and their relative values (normalized to the maximum tangential stress module) according to the new reconstructions.

In the diagrams at the bottom of the figure, strikes of the underthrusting shear stresses and representativeness of various levels of the tangential stresses of subduction are shown.

в новой реконструкции выглядит более упорядоченной, хотя для коры Памира она меняется от северозападной до юго-восточной.

Из роза-диаграммы рис. 11 видно, что преимущественным направлением действия поддвиговых касательных напряжений является субмеридиональное на север – северо-восток. Как выше уже было отмечено, основной вклад в него вносят области коры Памира, Тянь-Шаня, Куньлуня и Гималаев.

На втором этапе МКА производится расчет редуцированных значений максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления (разность между тектоническим давлением и давлением флюида в трещинно-поровом пространстве) [*Rebetsky*, 2003, 2005, 2009a, 2009b; *Rebetsky et al.*, 2012; *Rebetsky*, *Tatevossian*, 2013]. Здесь на диаграмме Мора для каждого домена реконструкции напряжений анализируются расположения точек, характеризующих напряжения на плоскости очага землетрясений (рис. 12). Подобный анализ выполняется по данным однородной выборки землетрясений, отвечающей каждому домену. При этом в алгоритме МКА существует критерий выбора одной из нодальных плоскостей в качестве очага землетрясения. Этот критерий опирается на положение о близости точки, характеризующей напряжения на плоскости разрушения, плоскостям скалывания горных пород (касательная к большому кругу Мора на рис. 12).

На втором этапе МКА анализируется распределение точек на диаграмме Мора для каждой однородной выборки механизмов очагов землетрясений. Считается, что эти точки должны располагаться в *полосе разрушения* (область светло-серой заливки на рис. 12), отсекаемой внутри большого и снаружи малых кругов Мора (область возможных напряженных состояний на произвольно ориентированных плоскостях) линией



Рис. 12. Полоса разрушения и распределения точек с данными о напряжениях в очагах землетрясений из однородных выборок на диаграмме Mopa [*Rebetsky*, 2007*a*].

Точка К определяет положение линии минимального сопротивления сухого трения без сцепления (пунктир), сплошная линия – предел прочности пород с величиной внутреннего сцепления *T*₁.

Fig. 12. The band of destruction and distribution of points with data on stresses in earthquake foci from the homogeneous data sets in the Mohr diagram [*Rebetsky*, 2007*a*].

Point K determines the position of the line of the minimum dry friction resistance without cohesion (dashed line). The solid line shows the yield strength of rocks with the magnitude of internal cohesion.

минимального сопротивления кулонового трения. При этом предполагается, что все анализируемые напряженные состояния являются предельными, т.е. их большие круги Мора касаются линии предела внутренней прочности. Также считается, что предел внутренней прочности можно представить линией на диаграмме Мора, параллельной линии минимального сопротивления поверхностного статического трения. На основе этого анализа осуществляется оценка величин напряжений, определяемых с точностью до неизвестного значения внутреннего сцепления массивов горных пород, т.е. рассчитываются напряжения, редуцированные на неизвестное значение внутреннего сцепления T_f .

Определение величин напряжений и прочности (T_f) в МКА производится на третьем и четвертом этапах метода. В настоящей работе будут представлены результаты расчета напряжений по алгоритму МКА только первых двух его этапов.

На рис. 13, *а*, показаны относительные значения эффективного всестороннего давления $p^* = p - p_{fl}$ (всестороннее тектоническое давление минус флюидное давление), нормировано на величину неизвестного внутреннего сцепления горных пород (T_f) [*Rebetsky*, 2007*a*]. Напомним, что согласно экспериментальным данным и теории хрупкой прочности горных пород уровень эффективного давления определяет и уровень девиаторных напряжений, которые горная порода способна выдержать без разрушения (см. рис. 12), поэтому участкам коры пониженного эффективного давления p^* отвечают и пониженные значения максимального касательного напряжения τ . Соответственно там, где в коре p^* имеет повышенные значения, существует и повышенный уровень τ . На рис. 13, a, на врезке представлена диаграмма, определяющая взаимосвязь p^* и τ в доменах коры, для которых в результате реконструкции получены данные о напряжениях.

Из данных рис. 13, *а*, видно, что кора Северного Тянь-Шаня испытывает высокий уровень эффективного давления ($p^*/T_f > 10$). Этот участок коры характеризуется геодинамическим режимом горизонтального сжатия (см. рис. 10, *a*), здесь главное напряжение максимального сжатия и промежуточное главное напряжение субгоризонтальны (напряжение наименьшего сжатия σ_1 субвертикально). Таким образом, для этого участка коры между полученным относительным уровнем эффективного давления и ориентациями главных осей напряжений устанавливается вполне прогнозируемая взаимосвязь.

Совершенно иная ситуация наблюдается в коре южной части Тянь-Шаня, Памира и его ближайшего окружения. Согласно данным рис. 12, *a*, здесь широко представлены области пониженного эффективного давления ($p^* / T_f < 10$). Заметим, что именно в коре Южного Тянь-Шаня и окружения Памира, согласно данным рис. 10, *a*, действует геодинамический режим



Рис. 13. Величины редуцированных значений эффективного давления (*a*), а также максимального (красные тона) и минимального (зеленые тона) сжатия (*б*), действующих в горизонтальном направлении, и ориентация этих осей по результатам реконструкции напряжений, выполненной в данной работе.

В нижней части рисунков показаны прямоугольные диаграммы распределения числа доменов с разными значениями редуцированного эффективного давления (*a*) и латеральных напряжений (б), диаграмма соотношения нормированных значений максимальных касательных напряжений и эффективного давления (*a*), роза-диаграмма простирания осей максимального горизонтального сжатия (б).

Fig. 13. Values of reduced effective pressure (*a*), maximum (shade of red) and minimum (shade of green) compression (*6*) operating in the horizontal direction, and orientation of axes according to stress reconstructions in the present study.

At the bottom of the figures: rectangular diagrams showing distribution of numbers of domains with different values of reduced effective pressure (*a*) and lateral stresses (δ), the diagram showing correlation between normalized ratio values of maximum shear stresses and effective pressure (*a*), and the rose diagram showing strikes of maximum horizontal compression axes (δ).

горизонтального сжатия. В поле значений эффективного давления Памир, в коре которого выделяются режимы горизонтального сдвига и горизонтального растяжения, не выглядит менее интенсивно сжатым, чем кора его окружения. Скорее наоборот, в коре его южной части, отвечающей режиму горизонтального растяжения, уровень эффективного давления выше.

Таким образом, из проведенного анализа следует, что геодинамический режим горизонтального сжатия прямо не определяет повышенный уровень девиаторных напряжений и эффективного давления, действующих в коре. Итак, мы обнаружили первое противоречие с теорией тектоники литосферных плит, определяющей именно горизонтальные напряжения в качестве основного фактора, влияющего на уровень девиаторных напряжений внутри континентальной коры.

Если продолжить наш анализ закономерности распределения эффективного давления в коре Высокой Азии, то, согласно данным рис. 13, а, наиболее обширные области повышенного эффективного давления выделяются в коре Тибетского плато, там, где существует геодинамический режим горизонтального растяжения и горизонтального сдвига. Заметим, что области горизонтального растяжения расположены ближе к Индийскому индентору, и лишь в восточной и северной части коры Тибета режим горизонтального сдвига представлен повсеместно. Кора Гималаев значительно меньше представлена в результатах новой реконструкции, чем это было сделано в расчетах [Rebetsky et al., 1997], поэтому здесь мы имеем данные только для двух небольших участков коры Западных Гималаев вблизи Гиндукуша и в Центральных Гималаях (в коре Центральных Гималаев соседствуют участки повышенного и низкого уровня эффективного давления). Можно сказать, что для них наблюдается повышенный уровень эффективного давления при геодинамическом режиме горизонтального сжатия.

Таким образом, кора центральной части Тибетского плато и, возможно, Гималаев характеризуется наибольшим уровнем девиаторных напряжений при существенно разных действующих здесь геодинамических режимах. Этот факт сложно объяснить с позиции активного источника горообразования в виде давления Индийской плиты.

Если принять в качестве прочности внутреннего сцепления $T_f = 6$ МПа (такое значение этого параметра было получено для коры Алтая и Саян в работах [*Rebetsky et al., 2013; Rebetsky, Pogorelov, 2013*]), то наиболее представительными для коры Высокой Азии будут значения эффективного давления 45 МПа, а верхний их уровень будет определяться значениями порядка 200 МПа. Согласно практическим результатам реконструкции напряжений в областях подготовки сильных землетрясений, выполненной в предыдущие годы [*Rebetsky, Marinin, 2006a, 2006b; Rebetsky, 2009a, 2009b; Rebetsky, Tatevossian, 2013*], областям, опасным с точки зрения развития крупномасштабного разруше-

ния, отвечают участки коровых разломов, вдоль которых выделяются протяженные области пониженного эффективного давления, и при этом данные участки ограничены хотя бы с одной стороны зоной повышенного эффективного давления. Зона высокого градиента напряжений представляет собой участок разлома, где зарождается землетрясение. Распространение очага идет в направлении области пониженного эффективного давления. С этих позиций разломная зона северозападного фланга Памира (рис. 13, а) представляет собой наиболее опасную область для формирования сильного землетрясения. Протяженность области пониженного эффективного давления здесь порядка 200-250 км, что говорит о возможности возникновения землетрясения с магнитудой около 8. Этот вывод следует рассматривать как сугубо предварительный, его необходимо проверять более детальными исследованиями, используя современные региональные сейсмические каталоги Казахстана, Кыргызстана.

На рис. 13, б, показана ориентация осей напряжений максимального и минимального сжатия, действующих в горизонтальном направлении. Направления осей этих напряжений легко получить, построив горизонтальное сечение эллипсоида напряжений. Относительные величины этих напряжений (нормировка на T_f) получены в результате применения алгоритма второго этапа МКА.

Как видно из этого рисунка, наибольшие величины латерального сжатия испытывает кора Тянь-Шаня и Северо-Восточного Тибета. Напомним, что в большинстве этих областей имеет место геодинамический тип напряженного состояния горизонтального растяжения, т.е. здесь максимальное сжатие ориентировано субвертикально. В коре Южного Тибета, ближе к Гималаям, уровень латерального сжатия ниже, чем в указанных областях. Наиболее низкий уровень латерального сжатия, занимающий достаточно большие площади, наблюдается в коре Памира, северо-западного обрамления Таримской плиты и в северо-восточной части коры Тибета. Промежуточный уровень этих напряжений действует в коре Афганского поднятия и синтаксисе Намче Барва.

В коре Гималаев имеется только несколько определений параметров тензора напряжений для западного и центрального участков. Здесь наблюдается повышенный уровень латерального сжатия.

Согласно суммирующей роза-диаграмме, приведенной на рис. 13, оси максимального латерального сжатия ориентированы в большинстве на север – северозапад, субмеридионально и на север – северо-восток. Заметим, что разворот псевдоглавных осей латерального сжатия наблюдается для коры синтаксиса Намче Барва в соответствии с изменяющейся ориентацией разломов. В коре Памира и Гиндукуша наблюдается блочная картина в ориентации этих осей. Здесь существуют 4–5 блоков с ориентацией осей латерального сжатия, отличающейся на 30–40°.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ПО ДВУМ КАТАЛОГАМ

Результаты реконструкции современного напряженного состояния, выполненной по двум разным каталогам механизмов очагов землетрясений, показали, что в них присутствует большое число участков коры, имеющих одинаковые или близкие параметры напряженного состояния. Однако находятся отдельные участки коры, где данные о напряжениях противоречат друг другу. Так, резко отличающаяся ориентация осей максимального сжатия наблюдается в коре центральной части Тибетского плато (см. рис. 4, б, и рис. 9, в), а осей максимального девиаторного растяжения – в коре Восточного Тянь-Шаня, Гиндукуша и западной части Памира. Подобные изменения ориентации осей главных напряжений привели к появлению в результатах реконструкции по каталогу 1978–2010 гг. обширной области геодинамического режима горизонтального растяжения в коре центральной части Тибета (см. рис. 10, *a*), в то время как в реконструкции по каталогу 1904–1992 гг. здесь наблюдалась область горизонтального сдвига (см. рис. 5, *a*). Более ярко в реконструкции по каталогу 1978–2010 гг. проявился геодинамический режим горизонтального растяжения для коры Памира и Гиндукуша, находящийся в окружении режима горизонтального сжатия.

Полученные разночтения в результатах реконструкции напряжений требуют объяснения. Мы их связываем с двумя факторами. Во-первых, с тем, что при построении механизма очага землетрясения в виде двойного диполя на основе анализа знаков первых вступлений продольной волны может иметь место несоответствие его характеристик и магнитуды события (это выше уже было отмечено). В то же время механизмы, полученные на основе анализа общей волновой картины, отвечают фазе сильных движений в очаге. Если с этих позиций интерпретировать различия в напряженном состоянии обеих реконструкций, то тогда можно говорить о существенной зависимости характера напряженного состояния от масштабного фактора и об иерархичности напряжений выделенных участков коры.

Второй причиной разночтений двух реконструкций является неоднозначность определений механизмов очагов землетрясений, проявившаяся в каталоге 1904– 1992 гг., где одному и тому же землетрясению могли отвечать достаточно сильно различающиеся механизмы, полученные разными авторами по разным региональным сейсмическим сетям, окружающим эпицентр землетрясения. Методика расчета напряжений, примененная к таким данным, позволяла выполнять реконструкцию и в этом случае. Систематические различия в механизмах очагов, полученных по данным разных региональных сейсмических сетей, могут быть связаны с односторонним окружением эпицентра землетрясения и высокой раздробленностью данных участков коры. Таким образом, здесь на результат расчетов напряжений могут влиять ошибки определения механизмов, фактически характеризующие сложность строения участков коры.

Выполненный сравнительный анализ результатов двух реконструкций показывает, что, несмотря на отдельные различия, в них наблюдается хорошая преемственность. В то же время исходные для реконструкции напряжений каталоги механизмов очагов землетрясений не равнозначны. Более достоверным является каталог механизмов очагов землетрясений в виде двойного диполя Global CMT (механизмы очагов по общей волновой картине) для временного периода 1978–2010 гг., поэтому предлагается для тех участков коры, где имеются результаты реконструкции напряжений по данному каталогу, использовать их в качестве наиболее достоверных. Там, где данных расчетов по этому каталогу нет, но есть результаты расчетов напряжений по каталогу 1904–1992 гг. (механизмы очагов по данным о первых вступлениях), следует использовать эти данные.

На основе применения предложенного приоритета достоверности результатов этих двух реконструкций, на рис. 14 представлены карты, суммирующие некоторые параметры напряженного состояния коры Высокой Азии. Как видно из рис. 14, а, дополнение данных об ориентации осей максимального сжатия, полученных по механизмам очагов землетрясений каталога 1978–2010 гг., результатами реконструкции 1997 г. практически везде дает хорошее согласие. Дополнительные данные существенно увеличивают область знания об ориентации этих осей. Вопросы возникают в отношении некоторого числа доменов с субгоризонтальной ориентацией осей σ₃ в коре южной части Тибета, рассекающих области с крутопогруженных осей σ₃ новой реконструкции 1978–2010 гг. Анализ геодинамического типа напряженного состояния (рис. 14, б) показывает, что эти домены имеют состояние горизонтального сдвига, который в результатах новой реконструкции здесь также присутствует, правда в областях, расположенных несколько восточнее и севернее.

Обратим внимание, что на карте суммарных напряженных состояний по их геодинамическому типу кора Тибета в центральном и южном его сегментах, в Восточном Куньлуне к югу от Западного Куньлуня широко представлена доменами горизонтального растяжения. В коре самого Западного Куньлуня имеет место сочетание горизонтального растяжения со сдвигом. Таким образом, режим горизонтального растяжения присутствует в коре Тибете везде до Цайдамской впадины на севере, до Гималаев на юге и до 95° в.д. на востоке. На западе этот тип напряженного состояния включает в себя также южную часть коры Памира. В коре Тибета западнее 90° в.д. практически повсеместно присутствует горизонтальный сдвиг, а в коре Циалин Шаня и Нань Шаня имеет место горизонтальное сжатие.







Рис. 14. Параметры тензора напряжений, полученные путем суммирования двух реконструкций: *а* – проекции на горизонтальную плоскость осей погружения напряжений максимального сжатия (векторы красного цвета отвечают реконструкции напряжений, выполненной в данной работе (2013 г.), а темно коричневые – 1997 г. [*Rebetsky et al., 1997*]); *б* – геодинамический тип напряженного состояния (квадраты большего размера отвечают реконструкции 1997 г.); *в* – поддвиговые касательные напряжения (стрелки красных оттенков отвечают реконструкции 2013 г., фиолетовые – 1997 г.).

Fig. 14. Parameters of the stress tensor obtained by summing the two reconstructions: a – projections to the horizontal plane of dip axes of maximum compression stresses (red vectors – stress reconstructions in the present study (2013); dark brown vectors – stress reconstructions in [*Rebetsky et al.*, 1997]); δ – geodynamic types of the state of stresses (big squares – stress reconstructions obtained in 1997; e – underthrusting shear stresses (red arrows – stress reconstructions obtained in 2013; purple arrows – stress reconstructions obtained in 1997).

Анализируя выявленную обстановку горизонтального растяжения в коре Тибетского плато, отметим, что это отвечает геологическим данным, показывающим наличие в южной и западной части коры грабенов меридиональной ориентации, а в центральной части коры – разрывов сбросо-сдвигового типа широтной и северо-западной ориентации [*Milanovsky*, 1991; *Molnar, Tapponnier, 1978*]. Все это хорошо согласуется с данными о современном напряженном состоянии коры региона.

Смена геодинамического режима горизонтального растяжения в пределах Тибетского плато к северу от Восточного Куньлуня и к востоку от 95° в.д. происходит постепенно через режим горизонтального сдвига. На юге подобная смена режима происходит резко. В коре Гималаев повсеместно расположены домены горизонтального сжатия. Здесь очень хорошо сочетаются результаты обеих реконструкций.

Кора Высокого Памира, испытывающего обстановку растяжения (южная часть) и сдвига (северная часть), так же как и кора плато Тибета, окружена областями, находящимися в состоянии горизонтального сжатия. Отметим, что восточнее, в коре Афганской впадины, также наблюдается обстановка горизонтального растяжения.

На рис. 14, в, представлены результаты суммирования обеих реконструкций для поддвиговых касательных напряжений, действующих на горизонтальных площадках, нормали к которым направлены в глубь Земли. Здесь прежде всего выделим полосу коры, отвечающую Гималаям, где повсеместно векторы этих напряжений направлены от Индийской плиты на северо-восток. В коре западной части Тибета эта ориентация поддвиговых касательных напряжений прослеживается вплоть до южных границ Таримской плиты, в коре восточной части Тибета севернее 30° с.ш. наблюдается обратная ориентация этих касательных напряжений.

Таким образом, суммарные карты напряженного состояния коры Высокой Азии дают достаточно целостную картину собственной роли высокогорных орогенов. Памир, который в центральной части имеет достаточно плоский рельеф без высоких пиков, и плато Тибета имеют особенность напряженного состояния, близкую к центрально-симметрическому типу. В эту концепцию встраивается и наличие областей повышенного эффективного давления и латерального сжатия в коре центральной части Тибета (см. рис. 13), и характер разломной тектоники Памира, и форма границ Тибета.

В начале статьи мы представили спектр работ по изучению современного напряженного состояния коры Высокой Азии другими исследователями. В большинстве этих работ не было выявлено главного элемента – обширного геодинамического режима горизонтального растяжения в коре Тибетского плато. Это прежде всего относится к работам [*Zobak*, 1992; *Coblentz*, *Richardson*, 1995; *Trifonov et al.*, 2002; *Heidbach et al.*, 2007, 2008, 2010]. В них для коры Тибетского плато практически везде показана субгоризонтальная ориентация осей максимального сжатия. Это связано либо с использованием данных только о сильных землетрясениях ($M_b \ge 7$) [*Zobak*, 1992; *Coblentz*, *Richardson*, 1995], либо с проблемами усреднения и интерполяции [*Heidbach et al.*, 2007, 2008, 2010].

В работе [*Trifonov et al.*, 2002] для коры Западного Куньлуня и для нескольких точек коры Памира получены области горизонтального растяжения, но для коры Тибета здесь приводится режим горизонтального сжатия и горизонтального сдвига. Вероятно, это связано с большими окнами горизонтального усреднения при расчете тензора сейсмотектонических деформаций и ролью отдельных сильных землетрясений в его параметрах. В исследованиях, выполненных в работе [*Koptev et al.*, 2011], кора Тибета и Памира представлена пятью точками с данными о «напряженном состоянии». Они отвечают горизонтальному растяжению (три точки) и горизонтальному сдвигу с растяжением (две точки).

На картах из работы [Sherman, Lunina, 2001] для южной части коры Тибета показан геодинамический тип напряженного состояния горизонтального сдвига с растяжением, а для небольшой площади юго-восточной части коры – чистое горизонтальное растяжение. Это с определенной оговоркой похоже на полученный в нашей работе результат. Но на этой карте кора Памира представлена режимом горизонтального сжатия со сдвигом, что не отвечает результатам нашей реконструкции.

В работе [*Kuchai*, *Bushenkova*, 2009] в результате только анализа механизмов очагов землетрясений в чистом виде для коры Тибета и Памира были выявлены области, отвечающие чисто сбросовым механизмам и сбросам со сдвигами. Но здесь не производилось площадное картирование геодинамических типов напряженного состояния, поэтому сложно сказать, насколько площади режимов горизонтального растяжения, выявленные в этой работе, совпадают с областями, полученными в наших исследованиях.

В исследованиях [Petrov et al., 2008] также получены данные о наличии в коре западного сектора Тибета горизонтального растяжения. Основные же области коры Тибета здесь представлены геодинамическим типом напряженного состояния в виде горизонтального сжатия со сдвигом и октаэдрическим типом (ось на зенит равноудалена от всех осей главных напряжений). Коре Памира в этой реконструкции в основном отвечает октаэдрический геодинамический тип напряженного состояния. Такие отличия в результатах от наших данных связаны не с особенностями используемого в работе [Petrov et al., 2008] метода, а с разным типом исходных данных в виде каталога механизмов очагов землетрясений. В этой работе ее авторы выполнили самостоятельный анализ знаков первых вступлений в Р-волне при создании своего каталога.

В любом случае, в результатах анализа напряженного состояния коры Высокой Азии указанных выше авторов фигурируют только ориентации главных осей и типы геодинамических режимов. Эти параметры тензора напряжений в наших исследованиях являются лишь одним из аргументов в пользу модели напряженного состояния с центром симметрии в центральной части Тибета. Два других параметра – распределение поддвиговых касательных напряжений на горизонтальных площадках и площадное распределение эффективного давления и редуцированных латеральных напряжений – в этих работах не рассматривались (последний параметр в них не может быть даже определен).

7. Выводы

Результаты реконструкции современных напряжений в коре Высокой Азии, выполненной в настоящей работе, с одной стороны, подтвердили представления о роли Индийской литосферной плиты. Это, в частности, отражает близкое к радиально-концентрическому распределение ориентации осей латерального максимального и минимального сжатия, соответственно, «разбегающихся» от Гималаев. Здесь следует заметить, что данная ориентация лучше прослеживается в результатах реконструкции по данным каталога 1904–1992 гг. (см. рис. 4), чем каталога 1978–2010 гг. (см. рис. 9). Об этом же говорит ориентация поддвиговых касательных напряжений на горизонтальных площадках, действующих в коре Гималаев. Они ориентируются на север – северо-восток, определяя ведущую роль подкоровой мантии в соответствующем движении Индийского индентора.

Как уже отмечалось выше, возможна двойная интерпретация данных о поддвиговых касательных напряжениях. В первой активным источником подобного напряженного состояния является мантия, двигающаяся из-под Индийской плиты на северо-восток; во второй активным источником является кора Тибетского плато, которая, надвигаясь на Гималаи, смещает его кору относительно мантии на юго-запад. Оба этих варианта интерпретации не противоречат известным данным GPS-геодезии [Zubovich et al., 2007], если трактовать их как относительные перемещения, возникающие в первом случае в предположении стабильной Сибирской платформы, а во втором для стабильного Тибетского плато. В этом случае скорость движения Индийской плиты на север-северо-восток будет составлять порядка 15-20 мм/год, а скорость движения Сибирской пластформы на юг – юго-восток будет около 25 мм/год.

В пользу второго варианта интерпретации говорит и анализ общей картины направлений действия касательных напряжений на горизонтальных площадках (рис. 14, в). Он показывает, что для коры Тибета эти напряжения ориентируются от периферии к центру. Данной обстановке вполне отвечает интерпретация, определяющая механизм растекания утолщенной коры высокого Тибетского плато [Artyushkov, 1972]. С севера это растекание сдерживается движением на север-северо-восток Индийской плиты. Между этой плитой и надвигающимися на нее горными массивами Тибета возникает область интенсивного раздавливания, формирующего Гималаи, которые, как известно, не имеют корней в низах коры [Kunin et al., 1988]. Согласно работе [*Pogrebnoi*, *Sabitova*, 2001], в мантии под Тибетом имеется крупный мантийный плюм, который, с одной стороны, может рассматриваться как источник, определивший изменение механических свойств горных пород литосферы, а с другой – говорить о длительности расположения Тибета в данной области. Если бы движение на север-северо-восток Индийской плиты происходило со скоростью около 40 мм/год, как это имеет место в предположении стабильной Сибирской платформы, то за 45 млн лет смещение в этом направлении плато Тибета должно было составлять около 1800 км. Т.е. южная граница Тибета в момент начала коллизии должна была бы находиться на 15° с.ш., а сам Тибет не располагался бы над длительно действующим мантийным плюмом.

Пожалуй, наиболее весомо в пользу этой гипотезы говорит напряженное состояние центральной части коры Тибета, где наблюдается режим горизонтального растяжения (рис. 14, б) с субвертикальной ориентаци-

ей осей максимального сжатия (рис. 14, *a*). На рис. 8 видно, что для коры Тибета имеется достаточно большое число решений механизмов очагов землетрясений средней силы (магнитуды, близкие к 6) сбросового типа. Это отмечалось также в работе [*Kuchai*, *Bushenkova*, 2009]. Отметим, что кора Тибета с севера и юга окружена корой, в которой превалирует режим горизонтального сжатия.

Также режим горизонтального растяжения и его сочетание со сдвигом получены и для коры Памира (см. рис. 10, а). Здесь результаты обеих реконструкций совпадают (см. рис. 5, а). К северо-востоку и юго-западу от коры Памира наблюдаются обширные участки коры с режимом горизонтального сжатия. Подобную ситуацию, когда в коре соседствуют два диаметрально противоположных геодинамических режима (горизонтальное сжатие и растяжение), следует анализировать, добавляя вполне логичное требование равенства сил, действующих в латеральном направлении. Из этого анализа следует, что напряжение максимального сжатия, действующее вертикально в коре Высокого Памира, больше, чем напряжение максимального сжатия, действующее горизонтально в коре его ближайшего окружения. Этот факт означает, что горизонтальное сжатие не является фактором, обеспечивающим современное поднятое состояние Памира.

Тот же анализ можно провести и для коры Тибета, где наиболее представлен режим горизонтального растяжения и горизонтального сдвига. В коре Гималаев, отделяющей Тибет от Индийской плиты, наблюдается режим горизонтального сжатия. Большее по величине вертикальное сжатие в коре Тибета следует рассматривать как активное усилие, а напряжения, действующие в горизонтальном направлении, как реактивные силы. Эти горизонтальные реактивные силы должны уравновешиваться коровыми горизонтальными напряжениями со стороны Гималаев. Согласно данным современного напряженного состояния, горные области Гималаев выглядят как область выдавливания вверх коры между жесткой Индийской плитой и наваливающимися на нее с севера горными массами Тибетского плато. На севере, где нет мощного сдерживающего фактора для растекания коры Тибета, действует меньший уровень горизонтального сжатия в северовосточном направлении (см. рис. 13, б). Выполненная нами трактовка геодинамического режима коры Высокой Азии согласуется с представлениями о большой роли в формировании современного поля напряжений областей поднятий и находящейся под ними разогретой мантии [Logatchev, Zorin, 1987], определяя в качестве основного механизма генерации напряжений латеральное растекание высокогорных плато Тибета и Центрального Памира под действием гравитационных сил [Artyushkov, 1972].

Отметим, что в наших последних исследованиях современного напряженного состояния коры горноскладчатых орогенов Центральной Азии (Северный Тянь-Шань и Алтае-Саяны) [Rebetsky, 2012a, 2012b; Rebetsky et al., 2012; Rebetsky et al., 2013; Rebetsky, Pogorelov, 2013; Rebetsky, Tatevossian, 2013] показано, что в большинстве случаев (65–75 %) в коре горных поднятий действует геодинамический режим горизонтального сжатия. В то же время в рядом расположенных участках коры прогибов в большинстве случаев наблюдается режим горизонтального растяжения. В работах [Rebetsky, 2012a, 2012b; Rebetsky et al., 2013; Rebetsky, Pogorelov, 2013] делается предположение, что эти режимы длительное время рядом сосуществуют из-за внутрикорового течения, объединяющего напряженное состояние этих двух динамо-пар в единый механизм деформирования, и процессов денудации горных поднятий и осадконакопления в областях прогибов. Вероятно, подобная ситуация возникает в коре для стадии активно развивающихся орогенов, когда несмотря на нивелирующее действие экзогенных процессов идет интенсивный рост амплитуд рельефа. В случае, когда континентальный ороген находится в завершающей стадии своего состояния, т.е. при выравнивании рельефа его поверхности, эта выявленная закономерность напряженного состояния не работает. Здесь действует иной характер внутрикорового течения, которое определяет геодинамические режимы коры. Эти изменения должны начинаться с центральных частей орогенов и распространяться к периферии, что мы и наблюдаем для коры Тибетского плато и Памира.

Таким образом, заключаем, что результаты реконструкции напряжений в коре Высокой Азии дали возможность увидеть ряд его особенностей, которые не позволяют трактовать механизм их генерации однозначно с позиции тектоники литосферных плит. Выявленные закономерности напряженного состояния коры Тибета и его окружения вместе с ранее полученными данными о распределении напряжений в коре Северного Тянь-Шаня и Алтае-Саян требуют дополнительного анализа, в рамках которого следует привлекать результаты тектонофизического моделирования.

Работа выполнена при поддержке грантов по программе № 6 ОНЗ РАН, РФФИ № 13-05-00892а, № 12-05-00234а, № 12-05-33066 вед_мол_а, № 12-05-00550, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», соглашение № 8615.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Alekseev R.S., Rebetsky Yu.L., 2011. The tectonophysical field of recent stresses in Central Asia. In: Modern tectonophysics. Methods and results. Proceedings of the 2nd tectonophysical workshop held on 17–21 October 2011. IPE RAS, Moscow, p. 284–289 (in Russian) [*Алексеев Р.С., Ребецкий Ю.Л.* Тектоническое поле современных напряжений Средней Азии // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы Второй тектонофизической школысеминара 17–21 октября 2011 г. М.: ИФЗ РАН, 2011. С. 284–289].
- Alekseev R.S., Rebetsky Yu.L., 2012. The tectonophysical field of recent stresses in the South-Eastern Asia. In: Tectonophysics and top issues of the Earth Sciences. Proceedings of the 3rd tectonophysical conference held in IPE RAS on Workshop held on 8–12 October 2012. IEP RAS, Moscow, p. 139–142 (in Russian) [*Алексеев Р.С., Ребецкий Ю.Л.* Тектоническое поле современных напряжений Юго-Восточной Азии // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. Третья тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Материалы докладов конференции 8–12 октября 2012 г. М.: ИФЗ РАН, 2012. С. 139–142].
- *Angelier J.*, 1989. From orientation to magnitude in paleostress determinations using fault slip data. *Journal of Structural Geology* 11 (1–2), 37–49. http://dx.doi.org/10.1016/0191-8141(89)90034-5.
- Artyushkov E.V., 1972. The origin of large stresses in the Earth's crust. *Izvestiya AN SSSR. Seriya Fizika Zemli (Izvestiya AN SSSR. Earth Physics Series)* 8, 22–36 (in Russian) [Артюшков Е.В. Происхождение больших напряжений в земной коре // Известия АН СССР. Серия Физика Земли. 1972. № 8. С. 22–36].
- Balakina L.M., Zakharova A.I., Moskvina A.M., Chepkunas L.S., 1996. The regular relationship between earthquake focal mechanism and regional geological settings. Fizika Zemli 3, 33–52 (in Russian) [Балакина Л.М., Захарова А.И., Москвина А.М., Чепкунас Л.С. Закономерная связь механизмов очагов землетрясений с геологическими строениями районов // Физика Земли. 1996. № 3. С. 33–52].
- Brace W.F., 1978. Volume changes during fracture and frictional sliding: A review. Pure and Applied Geophysics 116 (4–5), 603–614. http://dx.doi.org/10.1007/BF00876527.
- Burtman V.S., 2012. The Tien Shan and the High Asia. Geodynamics in the Cenozoic. Geos, Moscow, 188 p. (in Russian) [Буртман В.С. Тянь-Шань и Высокая Азия. Геодинамика в кайнозое. М.: Геос, 2012. 188 с.].
- Byerlee J.D., 1968. Brittle-ductile transition in rocks. Journal of Geophysical Research 73 (14), 4741–4750. http://dx.doi. org/10.1029/JB073i014p04741.
- Byerlee J.D., 1978. Friction of Rocks. Pure and Applied Geophysics 116 (4–5), 615–626. http://dx.doi.org/10.1007/BF00876 528.
- Catalogues of Earthquake Focal Mechanisms in China, 1980. 400 p. (in Chinese) [Каталог механизмов очагов землетрясений Китая. 1980. 400 с.
- Coblentz D., Richardson R.M., 1995. Statistical trends in the intraplate stress field. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 100 (B10), 20245–20255. http://dx.doi.org/10.1029/95JB02160.

Dziewonski A.M. et al., 1977–1996. Centroid-moment tensor solutions for... Physics of Earth and Planetary Interiors.

- *Earthquakes in the USSR from 1964 to 1989.* Nauka, Moscow, 1967–1992 (in Russian) [Землетрясения в СССР в 1964 ... 1989 гг. М.: Наука, 1967 ... 1992].
- Gushchenko O.I., 1975. The kinematical principle of reconstruction of directions of major stresses (from geological and seismological data). Doklady AN SSSR 225 (3), 557–560 (in Russian) [Гущенко О.И. Кинематический принцип реконструкции направлений главных напряжений (по геологическим и сейсмологическим данным) // Доклады АН СССР. 1975. Т. 225. № 3. С. 557–560].
- *Gushchenko O.I.*, 1979. The method of kinematic analysis of destruction structures in reconstruction of tectonic stress fields. In: Fields of stress and strain in the lithosphere. Nauka, Moscow, 7–25 (in Russian) [*Гущенко О.И*. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука, 1979. С. 7–25].
- *Gushchenko O.I.*, 1996. Seismotectonic stress monitoring of the lithosphere: the structural kinematic principle and basic features of the algorithm. *Doklady Earth Sciences* 346 (1), 144–147.
- Gushchenko O.I., Mikhailova A.V., Nikitina E.S., Rebetsky Yu.L., Lomakin A.A., Arefieva T.P., 1994a. The recent crustal deformation mechanism in the Caucasus-Iran seismically active region according to regional stress monitoring data and tectonophysical modeling. In: Abstracts of Reports at the 1st International Workshop on Stresses in the Lithosphere. IGiRGI Publishing House, Moscow, p. 49–50 (in Russian) [Гущенко О.И., Михайлова А.В., Никитина Е.С., Ребецкий Ю.Л., Ломакин А.А., Арефьева Т.П. Современный механизм деформирования земной коры Кавказо-Иранской сейсмо-активной области по данным регионального стресс-мониторинга и тектонофизического моделирования // Тезисы докладов первого международного семинара: Напряжения в литосфере (глобальные, региональные, локальные). М.: Издательство ИГиРГИ, 1994а. С. 49–50].
- Gushchenko O.I., Mostryukov A.O., Petrov V.A., 1990. The structure of the recent stress field in seismically active regions of the crust in the eastern part of the Mediterranean mobile belt. Doklady AN SSSR 312 (4), 830–835 (in Russian) [Гущенко О.И., Мострюков А.О., Петров В.А. Структура поля современных напряжений сейсмоактивных областей земной коры восточной части Средиземноморского подвижного пояса // Доклады АН СССР. 1990. Т. 312. № 4. С. 830–835].
- *Gushchenko O.I., Rebetsky Y.L, Michailova A.V.*, 1993. The recent regional field of stresses and the mechanism of the lithosphere deformation of seismoactive East-Asia region. In: Abstract supplement EUG VII. TERRA nova, Strasbourg, V. 5 (1), p. 259.
- Gushchenko O.I., Rebetsky Yu.L., Mikhailova A.V., Rossanova G.V., Kuok L.M., Fursova E.V., 1994b. The recent regional field of stresses in Eurasia (from seismological data on crustal earthquake focal mechanisms. In: Abstracts of Reports at the 1st International workshop on stresses in the lithosphere. IGiRGI Publishing House, Moscow, p. 50–51 (in Russian) [Гущенко О.И., Ребецкий Ю.Л., Михайлова А.В., Россанова Г.В., Куок Л.М., Фурсова Е.В. Современное региональное поле напряжений Евразии (по сейсмологическим данным о механизмах очагов коровых землетрясений) // Тезисы докладов первого международного семинара: Напряжения в литосфере (глобальные, региональные, локальные). М.: Издательство ИГиРГИ, 1994b. С. 50–51].
- Gushchenko O.I., Rebetsky Yu.L., Mikhailova A.V., Rossanova G.V., Lomakin A.A., Arefieva T.P., 1991. Regional stress monitoring and the crustal deformation mechanism in the Caucasus-Iran seismically active region. In: The mechanics of structure formation in the lithosphere and seismicity. IPE RAS, Moscow, p. 165–166 (in Russian) [Гущенко О.И., Ребецкий Ю.Л., Михайлова А.В., Россанова Г.В., Ломакин А.А., Арефьева Т.П. Региональный стресс-мониторинг и механизм деформирования земной коры Кавказо-Иранской сейсмоактивной области // Механика структурообразования в литосфере и сейсмичность. М.: ИФЗ РАН, 1991. С. 165–166].
- Hardebeck J.L., Hauksson E., 2001. Crustal stress field in southern California and its implications for fault mechanics. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 106 (B10), 21859–21882. http://dx.doi.org/10.1029/2001JB000292.
- Heidbach O., Reinesker J., Tingay M., Muller B., Sperener B., Fuchs K., Wenzel F., 2007. Plate boundary forces are not enough: Second- and third-order stress pattern highlighted in the World Stress Map database. *Tectonics* 26 (6), TC6014. http://dx.doi.org/10.1029/2007/TC002133.
- Heidbach O., Tingay M., Batrth A., Reinesker J., Kurfeb D., Muller B., 2008. The Word Stress Map. Commission for the Geological Map of the World. Release 2008. Paris.
- *Heidbach O., Tingay M., Batrth A., Reinesker J., Kurfeb D., Muller B.,* 2010. Global crustal stress pattern based on the Word Stress Map data base release 2008. *Tectonophysics* 482 (1–4), 3–15. http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2009.07.023.
- International tectonic map of the world. Scale: 1:15 000 000. Academy of Sciences of the USSR, Moscow, 1984.
- Koptev A.I., Ershov A.V., Malovichko E.A., 2011. Interpolation and extrapolation of the World Stress Map data. In: Methods and results. Proceedings of the 2nd tectonophysical workshop held on 17–21 October 2011. IPE RAS, Moscow, p. 130–138 (in Russian) [Konmes A.U., Ершов А.В., Маловичко Е.А. Интерполяция и экстраполяция данных «мировой карты напряжений» // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы Второй тектонофизической школы-семинара 17–21 октября 2011 г. М.: ИФЗ РАН, 2011. С. 130–138].
- *Kostrov B.V.*, 1975. Mechanics of Tectonic Earthquake Foci. Nauka, Moscow, 176 p. (in Russian) [*Kocmpos Б.B.* Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 176 с.].

Kuchai O.A., Bushenkova N.A., 2009. Earthquake focal mechanisms in Central Asia. Fizicheskaya Mezomekhanika (Physical

Mesomechanics) 12, 12–24 (in Russian) [*Кучай О.А., Бушенкова Н.А.* Механизмы очагов землетрясения Центральной Азии // Физическая мезомеханика. 2009. № 12. С. 12–24].

- Kunin N.Ya., Ioganson L.I., Afonsky M.N., Abetov A.E., Doukaev S.Zh., 1988. Continental Basins of Central and Eastern Asia (Regularities of Deep Structure and Development). Publishing House of IPE AS USSR, Moscow, 168 p. (in Russian) [Кунин Н.Я., Иогансон Л.И., Афонский М.Н., Абетов А.Е., Даукаев С.Ж. Континентальные впадины Центральной и Восточной Азии (закономерности глубинного строения и развития). М.: Изд-во ИФЗ АН СССР, 1988. 168 с.].
- Laverov N.P., Aitmatov I.T., Bakirov A.B., Leonov Yu.G., Zeigarnik V.A., Makarov V.I., Novikov A.M., Shchelochkov G.G., 2006. Recent Geodynamics of Regions of Intracontinental Collisional Mountain Formation. Nauchny Mir, Moscow, 400 p. (in Russian) [Лаверов Н.П., Айтматов И.Т., Бакиров А.Б., Леонов Ю.Г., Зейгарник В.А., Макаров В.И., Новиков А.М., Щелочков Г.Г. Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия). М.: Научный мир, 2006. 400 с.].
- Levi K.G., Sherman S.I., 2005. Top Issues of Recent Geodynamics of Central Asia. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 294 p. (in Russian) [Леви К.Г., Шерман С.И. Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2005. 294 с.].
- Logatchev N.A., Zorin Yu.A., 1987. Evidence and causes of two-stage development of the Baikal rift. Tectonophysics 143 (1–3), 225–234. http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(87)90092-8.
- Makarov P.V., 2010. Self-organized criticality of deformation and prospects for fracture prediction. Physical Mesomechanics Journal 13, (5–6), 292–305. http://dx.doi.org/10.1016/j.physme.2010.11.010.
- Michael A.J., 1984. Determination of stress from slip data: faults and folds. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 89 (B13), 11517–11526. http://dx.doi.org/10.1029/JB089iB13p11517.
- *Milanovsky E.E.*, 1991. Main Stages of Rifting in the Territory of China. Nedra, Moscow, 148 p. (in Russian) [*Милановский Е.Е.* Основные этапы рифтогенеза на территории Китая. М.: Недра, 1991. 148 с.].
- *Mogi K.*, 1964. Deformation and fracture of rocks under confining pressure (1): compression test on dry rock sample. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo* 42 (3), 491–514.
- *Molnar P., Tapponnier P.,* 1975. Cenozoic tectonics of Asia: effects of continental collision. *Science* 189 (4201), 419–426. http://dx.doi.org/10.1126/science.189.4201.419.
- Molnar P., Tapponnier P., 1978. Active tectonics of Tibet. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 83 (B1), 5361– 5375. http://dx.doi.org/10.1029/JB083iB11p05361.
- *Mostryukov A.O., Petrov V.A.*, 1994. Catalogues of Earthquake Focal Mechanisms, 1964–1990. Materials from the World Data Centre. IPE RAS, Moscow, 87 p. (in Russian) [*Мострюков А.О., Петров В.А.* Каталог механизмов очагов землетрясений, 1964-1990 гг. Материалы мирового центра данных. М.: ИФЗ РАН, 1994. 87 с.].
- *Parfenov V.D.*, 1984. On the method of tectonophysical analysis of geological structures. *Geotectonika* 1, 60–72 (in Russian) [*Парфенов В.Д.* К методике тектонофизического анализа геологических структур // *Геотектоника*. 1984. № 1. С. 60–72].
- Pavlov V.M., Abubakirov I.R., 2012. Algorithm for calculation of seismic moment tensor of strong earthquakes using regional broadband seismograms of body waves. Bulletin of Kamchatka regional association «Educational-scientific center». Earth sciences 2 (20), 149–158.
- Petrov V.A., Anfu N., Smirnov V.B., Mostryukov A.O., Zhixiong L., Ponomarev A.V., Zaisen J., Xuhui S., 2008. Field of tectonic stresses from focal mechanisms of earthquakes and recent crustal movements from GPS measurements in China. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 44 (10), 846–856. http://dx.doi.org/10.1134/S1069351308100121.
- Petrov V.A., Mostrukov A.O., Lykov V.I., 1994. The recent field of tectonic stresses over territory of China Journal of Earthquake Prediction Research 3 (4), 509–527.
- *Pogrebnoi V.N., Sabitova T.M.,* 2001. Manifestation of the Tibet plume structure and seismicity of High Asia in regional geophysical fields. *Russian Geology and Geophysics* 42 (10), 1532–1542.
- Rebetsky Yu.L., 1994. Reconstruction of relative values of components of total tensors of tectonic stresses. In: Abstracts of reports at the 1st International workshop on stresses in the lithosphere. IGiRGI Publishing House, Moscow, p. 146–147 (in Russian) [Ребецкий Ю.Л. Реконструкция относительных величин компонент полного тензора тектонических напряжений // Тезисы докладов первого международного семинара: Напряжения в литосфере (глобальные, региональные, локальные). М.: Издательство ИГиРГИ, 1994. С. 146–147].
- Rebetsky Yu.L., 1996. Stress-monitoring: Issues of reconstruction methods of tectonic stresses and seismotectonic deformations. Journal of earthquake prediction research 5 (4), 557–573.
- Rebetsky Yu.L., 1997. Paragenesises of quasiplastic deformation of fractured mediums. In: Proceedings of meeting on structural paragenesises and their ensembles. GEOS, Moscow, p. 144–146 (in Russian) [Ребецкий Ю.Л. Парагенезы квазипластического деформирования трещиноватых сред // Материалы совещания "Структурные парагенезы и их ансамбли". М.: ГЕОС, 1997. С. 144–146].
- *Rebetsky Yu.L.*, 1999. Methods for Reconstructing Tectonic Stresses and Seismotectonic Deformations Based on the Modern Theory of Plasticity. *Doklady Earth Sciences* 365 (3), 370–373.

- *Rebetsky Yu.L.*, 2003. Development of the method of cataclastic analysis of shear fractures for tectonic stress estimation. *Doklady Earth Sciences* 388 (1), 72–76.
- *Rebetsky Yu.L.*, 2005. Estimation of relative values of tensions as a second stage of reconstruction according to the data on rupture dislocations. *Geophysical Journal* 27 (1), 39–54.
- *Rebetsky Yu.L.*, 2007a. Tectonic Stresses and Strength of Rock Massifs. Akademkniga, Moscow, 406 p. (in Russian) [*Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Академкнига, 2007a. 406 с.].
- Rebetsky Yu.L., 2007b. Tectonic stresses and areas of occurrence of earthquake triggering mechanism. Fizicheskaya Mezomekhanika (Physical Mesomechanics) 1 (10), 25–37 (in Russian) [Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и области триггерного механизма возникновения землетрясений // Физическая мезомеханика. 2007b. Т. 1. № 10. С. 25–37].
- *Rebetsky Yu.L.*, 2007c. Condition and problems of theories of earthquakes prediction. Analysis of bases from position of appointed approach. *Geophysical Journal* 29 (4), 92–110.
- *Rebetsky Yu.L.*, 2007d. New data on natural strains within the area of preparation for strong earthquake. The model of the earthquake source. *Geophysical journal* 29 (6), 92–110.
- Rebetsky Yu.L., 2007e. Stressed state corresponding to the formation of large-scale brittle failure of rocks. Doklady Earth Sciences 417 (8), 1216–1220. http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X07080181.
- *Rebetsky Yu.L.*, 2009a. The third and the fourth stages of strains reconstruction in the method of cataclastic analysis of shift ruptures. *Geophysical Journal* 31 (2), 93–106.
- Rebetsky Yu.L., 2009b. Estimation of stress values in the method of Cataclastic analysis of shear fractures. Doklady Earth Sciences 428 (7), 1202–1207. http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X09070368.
- *Rebetsky Yu.L.*, 2012a. Achievements of tectonophysic researches in Russia: perspective tectonophysic problems. *Comptes Rendus Geoscience* 344 (3–4), 116–124. http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2011.12.007.
- Rebetsky Yu.L., 2012b. On a new form of instability of continental crust. In: Sedimentary basins and geological assumptions for forecasting of new oil and gas promising facilities. Proceedings of the XLIV tectonic meeting. GEOS, Moscow, Vol. II, p. 355–359 (in Russian) [*Ребецкий Ю.Л.* Об одной новой форме неустойчивости континентальной коры // Осадочные бассейны и геологические предпосылки прогноза новых объектов, перспективных на нефть и газ. Материалы XLIV тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2012b. Т. II. С. 355–359].
- *Rebetsky Yu.L., Kuchay O.A., Marinin A.V.* 2013. Stress state and deformation of the Earth's crust in the Altai-Sayan mountain region. *Russian Geology Geophysics* 54 (2), 206–222. http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2013.01.011.
- *Rebetsky Yu.L., Marinin A.V.,* 2006a. Stressed state of the Earth's crust in the western region of the Sunda subduction zone before the Sumatra–Andaman earthquake on December 26, 2004. *Doklady Earth Sciences* 407 (2), 321–325.
- *Rebetsky Yu.L., Marinin A.V.,* 2006b. Preseismic stress field before the Sumatra-Andaman earthquake of 26.12.2004: a model of Metastable state of Rocks. *Russian Geology and Geophysics* 47 (11), 1192–1206.
- Rebetsky Yu.L., Mikhailova A.V, Rosanova G.V, Fursova E.V., 1997. Stress-monitoring: The modern field of regional stresses in South-East Asia and Oceania. Principles of quasiplastic deforming of fractured media. Journal of Earthquake Prediction Research 6 (1), 11–36.
- Rebetsky Yu.L., Pogorelov V.V., 2013. Tectonophysical model of loading mechanism and evolution of stress-and-strain state of the lithosphere in mountainous folded regions. In: Geological history, potential mechanisms and problem of formation of basins in continental lithosphere provinces. Proceedings of the XLV Tectonic Meeting. GEOS, Moscow, Vol. II, p. 181–185 (in Russian) [*Peбецкий Ю.Л., Погорелов В.В.* Тектонофизическая модель механизма нагружения и эволюции напряженно-деформированного состояния литосферы континентальных горно-складчатых областей // Геологическая история, возможные механизмы и проблема формирования впадин с субокеанической и аномально тонкой корой в провинциях с континентальной литосферой. Материалы XLV тектонического совещания. М.: Издательство ГЕОС, 2013. Т. II. С. 181–185].
- *Rebetsky Yu.L., Sycheva N.A., Kuchay O.A., Tatevossian R.E.,* 2012. Development of inversion methods on fault slip data. Stress state in orogenes of the Central Asia. *Tectonophysics* 581, 114–131. http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2012.09.027.
- Rebetsky Yu.L., Tatevossian R.E., 2013. Rupture propagation in strong earthquake sources and tectonic stress field. Bulletin de la Société Géologique de France 184 (4–5), 335–346. http://dx.doi.org/10.2113/gssgfbull.184.4-5.335.
- Riznichenko Yu.V., 1968. An energy model of seismic regime. Izvestia AN SSSR. Seriya Fizika Zemli (Izvestia AN SSSR. Earth's Sciences Series) 5, 3–9 (in Russian) [Ризниченко Ю.В. Энергетическая модель сейсмического режима // Известия АН СССР. Серия Физика Земли. 1968. № 5. С. 3–9].
- Seminskii K.Zh., 2008. Hierarchy in the zone-block lithospheric structure of Central and Eastern Asia. Russian Geology and Geophysics 49 (10), 771–779. http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2007.11.017.
- Sherman S.I., Dneprovsky Yu.I., 1989. Stress Fields of the Earth's Crust. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 155 p. (in Russian) [Шерман С.И., Днепровский Ю.И. Поля напряжений земной коры. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1989. 155 с.].
- Sherman S.I., Lunina O.V., 2001. A New Map Representing Stressed State of the Upper Part of the Earth's Lithosphere. Doklady Earth Sciences 379 (5), 553–555.

Yu.L. Rebetsky, R.S. Alekseev: The field of recent tectonic stresses...

- *Stavrogin A.N., Protosenya A.G.,* 1992. Mechanics of Rock Deformation and Destruction. Nedra, Moscow, 223 p. (in Russian) [*Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г.* Механика деформирования и разрушения горных пород. М.: Недра, 1992. 223 с.].
- Stuwe K., 2007. Geodynamics of the Lithosphere. An Introduction. 2nd Edition. Springer, Berlin Heidelberg, 493 p.
- Trifonov V.G., Soboleva O.V., Trifonov P.V., Vostrikov G.A., 2002. Recent Geodynamics of the Alpine-Himalayan Collisional Belt. GEOS, Moscow, 224 p. (in Russian) [Трифонов В.Г., Соболева О.В., Трифонов Р.В., Востриков Г.А. Современная геодинамика Альпийско-Гималайского коллизионного пояса. М.: ГЕОС, 2002. 224 с.].
- Vvedenskaya A.V., 1969. Studies of Stresses and Fractures in Earthquake Foci by the Theory of Dislocations. Nauka, Moscow, 136 p. (in Russian) [Введенская А.В. Исследования напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. 136 с.].
- Wickens A.J., Hodgson J.H., 1967. Computer re-evaluation of earthquake mechanism solutions 1922–1962. In: Publications of the dominion observatory Ottawa. Vol. XXXIII, No 1, 560 p.
- *Yunga S.L.*, 1990. Methods and Results of Studies of Seismotectonic Deformations. Nauka, Moscow, 190 p. (in Russian) [Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. М.: Наука, 1990. 190 с.].
- Zhonghuai Xu., Suyun W., Yurui H., Ajia G., 1992. Tectonic stress field of China inferred from a large number of small earthquakes. Journal of Geophysical Research 97 (B8), 11867–11878. http://dx.doi.org/10.1029/91JB00355.
- Zobak M.L., 1992. First- and second order pattern of stress in the lithosphere: The Word stress map project. Journal of Geophysical Research 97 (B8), 11703–11728. http://dx.doi.org/10.1029/92JB00132.
- Zubovich A.V., Makarov V.I., Kuzikov S.I., Mosienko O.I., Shchelochkov G.G., 2007. Intracontinental Mountain Building in Central Asia As Inferred from Satellite Geodetic Data. *Geotectonics* 41 (1), 13–25. http://dx.doi.org/10.1134/S0016852 107010037.



Ребецкий Юрий Леонидович, докт. физ.-мат. наук, зав. лабораторией тектонофизики им. М.В. Гзовского Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН 123995, ГСП-5, Москва Д-242, ул. Большая Грузинская, 10, Россия Тел.: 849925493050; ⊠ e-mail: reb@ifz.ru

Rebetsky, Yuri L., Doctor of Physics and Mathematics, Head of M.V. Gzovsky Laboratory of Tectonophysics Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS 10 Bol'shaya Gruzinskaya street, Moscow D-242 123995, GSP-5, Russia Tel.: 849925493050; ⊠ e-mail: reb@ifz.ru



Алексеев Роман Сергеевич, инженер лаборатории тектонофизики им. М.В. Гзовского, студент 6-го курса Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН 123995, ГСП-5, Москва Д-242, ул. Большая Грузинская, 10, Россия Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет 119991, ГСП-2, Москва, Ленинские горы, д. 1, строение 2

Alekseev, Roman S., engineer of M.V. Gzovsky Laboratory of Tectonophysics, student of 6th year Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS 10 Bol'shaya Gruzinskaya street, Moscow D-242 123995, GSP-5, Russia Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics 1 Leninskie Gory, building 2, Moscow 119991, GSP-2, Russia PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2014 VOLUME 5 ISSUE 1 PAGES 291-303

http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0128



ISSN 2078-502X

GEODYNAMIC WAVES AND GRAVITY

A. V. Vikulin¹, A. A. Dolgaya¹, S. A. Vikulina²

¹ Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia ² Kamchatka Branch, Geophysical Survey of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Abstract: Gravity phenomena related to the Earth movements in the Solar System and through the Galaxy are reviewed. Such movements are manifested by geological processes on the Earth and correlate with geophysical fields of the Earth. It is concluded that geodynamic processes and the gravity phenomena (including those of cosmic nature) are related.

The state of the geomedium composed of blocks is determined by stresses with force moment and by slow rotational waves that are considered as a new type of movements [*Vikulin, 2008, 2010*]. It is shown that the geomedium has typical rheid properties [*Carey, 1954*], specifically an ability to flow while being in the solid state [*Leonov, 2008*]. Within the framework of the rotational model with a symmetric stress tensor, which is developed by the authors [*Vikulin, Ivanchin, 1998; Vikulin et al., 2012a, 2013*], such movement of the geomedium may explain the energy-saturated state of the geomedium and a possibility of its movements in the form of vortex geological structures [*Lee, 1928*]

The article discusses the gravity wave detection method based on the concept of interactions between gravity waves and crustal blocks [*Braginsky et al., 1985*]. It is concluded that gravity waves can be recorded by the proposed technique that detects slow rotational waves. It is shown that geo-gravitational movements can be described by both the concept of potential with account of gravitational energy of bodies [*Kondratyev, 2003*] and the nonlinear physical acoustics [*Gurbatov et al., 2008*]. Based on the combined description of geophysical and gravitational wave movements, the authors suggest a hypothesis about the nature of spin, i.e. own moment as a demonstration of the space-time 'vortex' properties.

Key words: geodynamics, force moment, rotational waves, rheid flow, gravitational waves.

Recommended by S.I. Sherman

Citation: Vikulin A.V., Dolgaya A.A., Vikulina S.A. 2014. Geodynamic waves and gravity. *Geodynamics & Tec*tonophysics 5 (1), 291–303. doi:10.5800/GT-2014-5-1-0128.

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ И ГРАВИТАЦИЯ

А. В. Викулин¹, А. А. Долгая¹, С. А. Викулина²

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

² Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Аннотация: Проводится обзор гравитационных явлений, связанных с движениями Земли в Солнечной системе и Галактике. Эти движения и их вариации отражаются в геологических процессах, происходящих в Земле, и коррелируют с ее геофизическими полями. Формулируется вывод о существовании взаимосвязи между геодинамическими процессами и гравитационными (космической природы в том числе) явлениями.

Состояние геосреды, являющейся блоковой по своему строению, определяется напряжениями с моментом силы и новым типом движений – медленными ротационными волнами [Vikulin, 2008a, 2008b, 2010]. Показано, что для гео-

среды характерны реидные [*Carey*, 1953] свойства – способность течь в твердом состоянии [*Leonov*, 2008]. Такое движение геосреды позволяет в рамках развиваемой авторами ротационной модели с симметричным тензором напряжений [*Vikulin*, *Ivanchin*, 1998; *Vikulin et al.*, 2012a, 2013] объяснить ее энергонасыщенное состояние и возможность движения в виде вихревых геологических структур [*Lee*, 1928].

Обсуждается метод регистрации гравитационных волн, в основе которого заложена идея их взаимодействия с блоками земной коры [*Braginsky et al.*, 1985]. Формулируется вывод о том, что в рамках такой методики с использованием в качестве детектора медленных ротационных волн оказывается возможным зарегистрировать гравитационные волны. Описание геогравитационных движений возможно в рамках как теории потенциала с учетом гравитационной энергии тел [*Kondratiev*, 2003], так и нелинейной физической акустики [*Gurbatov et al.*, 2008]. Обобщение геофизических и гравитационных волновых движений позволило авторам предложить гипотезу о природе спина – собственного момента как проявления «вихревых» свойств пространства–времени.

Ключевые слова: геодинамика, момент силы, ротационные волны, реидное течение, гравитационные волны.

1. INTRODUCTION

Abundant geological and physical data suggest a close relationship between processes that take place on Earth and in space. Indeed, Earth is a body rotating around its axis at a speed of 465 m/s at the equator and around Sun at a speed higher by an order of magnitude, about 30 km/s. Together with Sun and other planets of the solar system, it rotates around the center of our galaxy with an average speed that is also higher by an order of magnitude, 270 km/s. Parameters of all rotational movements are subject to quite specific changes in time, and all of them are reflected in the geological processes. Gravity and other influences exerted on our planet by other bodies of the solar system itself, as well as those in the more distant Universe, should be taken into account. Recently, both rotation and space factors attract wider attention of researchers as modern technical capabilities of such studies have increased immeasurably.

The generally accepted view is that global processes take place on Earth cyclically with typical periods of 10^{7} – 10^{8} years, and this is the most important scientific concept of modern geology. The idea of recurrent global cycles of the Earth development was originated by J. Hutton at the end of the 18th century. In the 19th and early 20th centuries, E. Haug, M. Bertrand, E. Suess and H. Stille were among the major advocates of Hutton's ideas, and the cyclicity concept was further developed by many geologists. Their researches have provided arguments confirm-

There is no 'relativity of rotation'. A rotating system is *not* an inertial frame, and the laws of physics are different.

R. Feynman [Feynman et al., 1964]

The geological time scale is close to the scale of the Universe. Geologists have a chronicle that records events of the history of Earth and the Universe.

D.V. Nalivkin [Nalivkin, 1969]

ing the existence of global cycles, which is now undebatable, and the focus of geological studies has shifted from detection and proof of the cycles to issues of the nature and causes of the cycles. Cyclicity is typical of almost all the processes which occur on Earth, such as glaciation, formation of rocks, erosion, sea-level changes, extinction of flora and fauna, seismicity and volcanism etc. Besides, many of these processes are confidently correlated with cycles of some astronomical phenomena [*Khain, Khalilov,* 2009].

Through centuries, studies have been devoted to effects of the Earth rotation on processes, associated with the evolution of its interiors. Founders of Geology J. Hutton, J. Playfair and C. Lyell and astronomer W. Herschel established that differentiation of the Earth core and its crust is associated with rotation of the planet. A possible link between deformation of the Earth's crust and rotational forces of the planet was mentioned by A.P. Karpinski, D.I. Mushketov, N.S. Shatsky, B.L. Lichkov, A.L. Yanshin, V.E. Khain etc.

Our study shows that natural oscillations of the Earth reflect movements in the interior, which are considered elastic, according to earthquake records in seismograms, and gravitational at the same time, according to gravity measurements. Apparently, for this very reason, D.D. Ivanenko, who is one of the most prominent physicists conducting theoretical studies of gravity, has demonstrated a keen interest in problems of geology and gravity [*Vladimirov*, 2011]. In January 1961, he initiated establishment

of Gravity Group in Gravimetry Department of Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University. The most prominent Russian surveyors, Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences Y.D. Boulanger (IPE Institute) and Associate Professor of Moscow State University N.P. Grushinskiy were among the members of the Gravity Commitee of the Scientific and Technical Council of the USSR Ministry of Education. A number of symposiums on related problems of the theory of gravity, geology and gravimetry were held in Moscow. Many of the symposiums, as well as weekly workshops conducted by D.D. Ivanenko at the Physics Department of Moscow State University, were devoted to specific geological and geophysical topics, such as the Titius-Bode law (of distances between the planets and the Sun) as a manifestation of the laws of quantum mechanics across the solar system, the pear-shaped asymmetrical form of the Earth etc.

The conclusion about the existence of the relationship between the geodynamic processes and space phenomena is in full compliance with Mach's principle of the universal interconnectedness of all processes in the Universe. In such a relationship, only gravity can be viewed as a 'cosmic' link that unites all the parts of the universe. A 'terrestrial' link in the relationship between the geodynamic processes and phenomena in space may be slow geodynamic waves (their velocities are by many orders of magnitude lower than those of seismic waves) [*Bykov*, 2005, 2008; Gershenzon et al., 2009]. For the block rotating medium, i.e. geomedium, slow movements are typical in the same way, as volume elastic longitudinal (V_P) and transverse (V_S) waves [*Vikulin, 2008a, 2008b, 2010; Vikulin, Ivanchin, 2013; Vikulin et al., 2013*].

The existence of the close relationship between gravity and wave geodynamic movements as 'a fact of the simultaneous action of potential energy and kinetic energy inside the Earth' is discussed in [*Ferronsky V.I., Ferronsky S.V., 2007, p. 65–66*]. Searching for a common ground between concepts of geodynamics and gravity is also discussed in our publications [*Vikulin, 2010, 2011, 2012*].

2. GEODYNAMIC ROTATIONAL WAVES

Block structure of geomedium. The wave nature of geodynamic movements is now undoubted [Bykov, 2005, 2008]. It is evidenced by the so-called 'ground waves' propagating from foci of strong earthquakes [Aki, Richards, 2002; Shebalin, 2003; Lomnitz, 1970; Lomnitz, Castanos, 2006; Matuzawa, 1925], geodynamic earthquake precursors [Mogi, 1985; Rikitake, 1976; Sobolev, 1993] and visually observed and geodetically recorded slow motion of the Earth surface [Karryev, 2009; Kuznetsov, 2009; Leonov, 2008, p. 5; Popkov et al., 2013], which is observed both before and after earthquakes and without any recordable activation of seismic and volcanic activity. All the above-mentioned movements are of the single wave geodynamic nature. The rationale of the concept of block structure of geomedium [*Pieve*, 1961; Sadovsky, 1979] is an important achievement in the Earth Sciences. Variability in time, strong non-linearity, activity, energy saturation and possible rheid movements (i.e. superplastic flow in the solid state [*Leonov*, 2008; Carey, 1953]) are fundamental properties of such a medium. All of these properties, including slow motion of the Earth surface, as part of the rotational model [*Vikulin, Ivanchin, 1998; Vikulin, 2006*], are due to geodynamic waves of a new type which are termed as 'rotational waves' [*Vikulin, 2008a; Vikulin et al., 2013*]. Rotational waves are typical of geomedium in the same way as elastic waves are typical of solid bodies [*Vikulin, 2010; Vikulin, Ivanchin, 2013*].

Spatial and temporal patterns of seismic and volcanic activity were studied within the three most active zones of the planet – the Pacific margin, the Alpine-Himalayan belt and the Mid-Atlantic Ridge. Mathematical simulation of their block geomedium [*Vikulin, 2012; Vikulin et al., 2012a, 2012b*] shows that migration of geodynamic activity is the wave process, which properties are determined by solutions of the sine-Gordon (SG) equation [*Vikulin, 2008a*]:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} = \sin \theta \,. \tag{1}$$

where

$$V_{sol} \le c_0 \approx \sqrt{V_S V_R} \approx (1 - 10) \text{ cm/s}$$
 (2)

and

$$c_0 < V_{ex} \le V_S \,. \tag{3}$$

Characteristic velocities V_{sol} and c_0 define a new type of perturbations termed rotational, which is typical of the rotating block medium, i.e. geomedium – solitons (V_{sol}) and excitons (V_{ex}), respectively [*Vikulin*, 2010]. Here $\theta = \beta/2$, $\xi = k_0 z$ and $\eta = c_0 k_0 t$ are dimensionless coordinates; z is distance along the chain of blocks; and t is time. In solutions for the terminal velocity (2), it is assumed that the wave length is similar to the block size, $\lambda \approx R_0$, and the wave number equals $k_0=2\pi/R_0$, where the assumed block size is $R_0 \approx 100$ km at medium density $\rho \approx 3$ g/cm³ and its shear modulus $G \approx 10^{12}$ Dyn/cm²; $V_S = \sqrt{G/\rho}$ is the velocity of transversal seismic waves; and $V_R = \Omega R_0$, $\Omega=7.3\cdot10^{-5}$ rad/s is the angular velocity of rotation of Earth around its axis.

Excitons, in fact, are the solutions of the linearized SG equation (see solution II in Figure 5, and solution 2 in Figure 6 in [*Vikulin*, 2010]), which degenerate into conventional seismic waves [*Davydov*, 1982].

Rotational stress of geomedium. All the space objects in the Universe, as well as other bodies and particles of mi-

cro-and macrocosm, have angular momentum. Rotation is a movement of special quality [*Feynman et al., 1964*], which cannot be confined to translational motion as the result of two rotations at the final angles is not equal to the amount of rotations and depends on the sequence of such turns. Therefore, it is not correct to apply an approximation based on Euler (D'Alembert-Euler) theorem on equivalence of translation along the surface of the sphere and the turn, which is traditionally used in solutions of tectonic problems within the framework of global tectonics [*Zonenshain, Kovaleva, 1974; Morgan, 1968*]¹. Let us approach the problem with reference to more general terms of mechanics.

The lithosphere is in constant motion, and its blocks are moving at the Earth surface in translational way. For example, a block from position M_1 moves gradually to position M_2 (Figure, a), and this defines specific rotational properties of the block lithosphere. Angular velocity Ω , with which the coordinate system rigidly associated with the body (Earth) rotates at every given moment, is completely independent of this system. At a specified moment, all such systems rotate around the axes, which are parallel to each other, at velocity Ω of the same absolute value [Landau, Lifshitz, 1976]. It follows that regardless of its size, each block (and / or plate) of the lithosphere is characterized by equal angular momentum *M* directed parallel to the axis of rotation of the body (i.e. Earth): $M = m \cdot \Omega$. Here m is momentum of inertia of block / plate, which magnitude during movement and consecutively possible deformation are changeable. Movements of the lithosphere should lead to a change in the direction of the angular momentum, $M_1 \rightarrow M_2$. However, it is impossible – the momentum should be maintained as this block has to rotate together with Earth at angular velocity Ω . This leads to momentum of force *K*, which is applied to the block by its host medium, i.e. the lithosphere (Figure, b).

A theoretical exercise to determine the value and direction of the momentum of force *K* may be as follows. First, the block (assumed to be a homogeneous ball-shaped body) is stopped in position M_2 by applying elastic stresses with momentum of force P_2 . Then, the block is propelled to its initial state in position M_1 by applying elastic stresses with momentum of force P_1 . Assuming that in each case, conversion of kinetic energy of block rotation into elastic stress and vice versa occurs without any energy loss, i.e. $|P_1| = |P_2| = P$, momentum of force *K* is as follows [*Vikulin, Ivanchin, 2013*]:

$$|K| = 2P\sin\beta/2.$$
⁽⁴⁾

Important: the elastic stresses with momentum of force K are applied to the block by its host medium, i.e. the lithosphere.

Thus, we obtain a model that describes the block motion in the rotating medium Ω as mechanically equivalent to the block motion in a non-rotating medium under its *intrinsic* angular momentum *M* (i.e. equivalent to rotating the block by angle β), which creates an elastic field with momentum of force (4) in the host medium around the block. The elastic stress field generated by such rotational motion of the block occurs according to the law of conservation of angular momentum.

In fact, 'internal' (or intrinsic) momentum M or spin has a specific feature in terms of geodynamics – it cannot be somehow 'taken away' from the lithosphere by plastic deformation of the block. Therefore, as a result of translational movement of the block (i.e. due to an increasing angle of block rotation β), rotational stresses with momentum of force (4) shall be accumulated in the lithosphere, which clearly explains such a property of geomedium as its energy saturation [*Vikulin, 2011, p. 384–394; Vikulin, Ivanchin, 2013*].

Actually, stresses with momentum of force (4) determine the form of the model equation of motion (1) or nonlinear SG and properties of its solutions corresponding to such an equation.

It is assumed that in the space around the lithospheric block turning under its intrinsic angular momentum, elastic stresses with momentum of force (4) are generated. To determine the value of elastic stresses σ generated by the ball-shape block R_0 , that rotates due to its intrinsic angular momentum K in an infinite solid body with $r \ge R_0$, the task was set [*Vikulin, Ivanchin, 1998*] in the framework of the classical² theory of elasticity [*Landau, Lifshitz, 1986*]. In the spherical coordinate system (r, θ , φ) (starting r = 0 in the center of the block; plane $\theta=0$ orthogonal to K), the solution of this task [*Vikulin, 2006; Vikulin, Ivanchin, 2013*] is as follows:

$$\sigma_{r\varphi} = \sigma_{\varphi r} = 4\Omega R_0^4 r^{-3} \sqrt{\frac{\rho G}{5\pi}} \sin \theta \sin \beta / 2, \ r \ge R_0.$$
 (5)

The remaining stress components are zero.

It is important that the stress field in the rotational model, according to (5), is symmetrical, which allows us not to refer to the essentially mathematical model of couple stresses, which is widely applied to solving geodynamic problems (e.g., [*Nikolaevsky*, 1995, 1996]); it is based on Cosserat mathematical continuum that has not been mathematically and physically justified [*Hirth, Lothe, 1968, p. 26*].

'Superconductivity' (rheidity) of geomedium and Chandler fluctuation. Based on the review of the evolution of

¹ Incorrect application of Euler's theorem to movements along the surface of the Earth is also tied with the absence of a fixed point on the Earth, while this is one of the requirements of the theorem.

² As opposed to the momentum [*Nikolaevsky*, 1995] mathematical theory of elasticity with asymmetric stress tensor (see e.g. [*Nikolaevsky*, 1995]), the theory of elasticity with symmetrical stress tensor [*Landau*, *Lifshitz*, 1986] is called classical here.



Movement of a block of the lithosphere from its position with angular momentum M_1 to position M_2 (the block turn at angle β) (*a*) is accompanied by 'generation' of stresses in the lithosphere with force momentum K (*b*), which are applied to the block by its surrounding medium. See explanations in the text.

Движение блока литосферы из положения с моментом импульса M_1 в положение M_2 (поворот блока на угол β) (*a*), сопровождающееся «генерацией» в литосфере прикладываемыми к блоку со стороны окружающей его среды напряжениями с моментом силы K (*b*), пояснения в тексте.

concepts of rheological properties of Earth [*Vikulin*, 2009, *p*. 239–247], Debye temperature θ_d for the geological medium can be given as follows [*Zharkov*, 1983, *p*. 199]:

$$\theta_d \approx 10^{-3} V(H) \sqrt[3]{\rho(H)}, \qquad (6)$$

where \overline{V} [cm/s] is average velocity of excitations in geomedium; ρ [g/cm³] is density of the medium; *H* [km] is depth. At an average velocity determined by values of longitudinal and transverse seismic velocities (that may vary in the range of 1–10 km/s for the lithosphere and upper mantle), the Debye temperature is high enough; for depth H = 100 km, it is $\theta_d \approx 660$ K ≈ 1000 °C and closely corresponds to the widely accepted model of the Earth Physics [*Magnitskiy*, 1967; Stacey, 1969].

The situation is radically changed with transition to rotational mode c_0 (2) defined by collective motion of the complete set of geophysical blocks, tectonic plates and geological structures [*Vikulin, 2011, p. 391–392; Vikulin, Ivanchin, 2013*]. Value c_0 , that is characteristic of this mode according to (1), is smaller by five orders of magnitude than the transverse and longitudinal seismic velocities, and its Debye temperature (6) is negligible, $\theta_d \approx 10^{-2}$ K, which determines the possibility of quantum no-friction superfluid motion of geomedium, i.e. its rheidity [*Carey, 1953*], and / or super-plastic flow in the solid state [*Leonov, 2008*]. Debye temperature is proportional to the potential maximum oscillation frequency of constituent particles and / or mesovolume of the solid body and / or geophysical blocks, tectonic plates and other geological structures of the Earth. According to [*Vikulin, Krolevets, 2002*], this frequency for Earth is Chandler frequency that is characteristic of all the blocks comprising a seismotectonic belt.

It is obvious that, on the one hand, under the rotational model it is possible to combine the ideas of the classical theory of elasticity with symmetrical stress tensor and the concepts of non-linear properties of geological medium, i.e. its energy saturation. On the other hand, energy saturation of geomedium and / or its rheid properties – the ability to flow 'super-plastically' in the solid state [*Leonov, 2008*] – is the factor predetermining a possibility of describing geo-gravity movements within the framework of theoretical hydrostatic models (see below).

3. GEO-GRAVITATIONAL EFFECTS

Surface tension of Earth. By minimizing the gravitational energy of Earth, it is possible to determine its "surface tension" [*Kuznetsov, 2008, p. 101*], which is actually a balance between the attractive force (i.e. gravity) and the geodynamic field determining the structure of the substance of the geoid's surface, which should be basically of the planetary scale. In this balance, gravity can be repre-
sented by geoid waves [*Magnitskiy*, 1967, p. 215–221]. Geodynamic planetary field, that controls movements of the rotating block medium, is manifested by slow motion of the Earth surface. The surface tension of the geoid is quite high and amounts to 10^{19} erg/cm² [*Kuznetsov*, 2008, p. 101]; it is significantly higher than the surface tension of liquids and solids in laboratory experiments, which values are recorded in the range of $1-10^4$ erg/cm². The above data suggest that the relationship between gravity (i.e. geoid waves with momentum nature [*Vikulin*, 2009, p. 160–161]) and geodynamic movements can be 'quite strong'.

According to [*Krylov*, *Sobolev*, *1998*], gravitational waves were recorded in their Eötvös torsion balance observations; sources of such waves were earthquake foci in moving blocks of the lithosphere. A possibility of the influence of super-long gravitational waves of cosmic origin on geodynamic processes is described in principle in [*Khain*, *Khalilov*, *2009*]; this publication presents a positive experience of short-term prediction of strong distant earthquakes on the basis of long-period gravitational precursors.

Float oscillations are fluctuations of the entire Earth which means planet orbiting movement in the direction of its axis of rotation. The existence of such oscillations is suggested by analyses of drifting zero levels of seismographs and gravimeters and the transverse mode of ocean tides of the northern and southern hemispheres [Lin'kov, 1987, p. 144–163]. Actually, float oscillations of Earth can be explained as geodynamic movements only with regard to gravitational movements of other cosmic bodies around Earth, primarily other planets of the Solar system. In this case, all the geodynamic movements, including float fluctuations, correlate with the amount of solar activity, which in its turn depends on orbital and rotational movements of the planets, mostly the giant planets Jupiter and Saturn, around their axes [Vikulin, 2009, p. 380-381; Dolgachev et al., 1991; Timashev, 2003].

Variations of gravitational constant and geophysical fields. The gravitational constant *G* is a fundamental empirical physical constant. According to the current measurements, $G = (6.67\pm0.01)\cdot10^{-8} \text{ dyn}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-2}$, and the accuracy of its determination, $\Delta G/G=10^{-3}$ is low, considering *G* as an empirical physical constant [*Yavorsky*, *Detlaf*, 1979].

For more than two centuries, measurements of *G* were taken by researchers in independent laboratories located in different places of the Earth, and a quite dense set of quantitative values of *G* has been collected. The accuracy of single determinations of *G* is gradually increasing, and it was estimated as 10^{-4} in the period from the end of the 20th century to the beginning of the 21st century. However, more accurate determinations of *G* have demonstrated more differences between the quantitative values. To the present, the two most accurate measurements of *G* have been obtained independently by groups of scientists from the University of Washington, USA and the International Bureau of Weights and Measures (BIPM), France. In both experiments, errors amounted to 10^{-4} , and devia-

tions between the obtained values were in excess of the marginal error by 10 times [*Khain*, *Khalilov*, 2009, *p*. 252–259].

Large enough differences are revealed not only between individual definitions of *G*, but also between large series of observations comprising dozens of thousands (!) measurements. In the targeted studies conducted from 1985 to 1997, almost 40 thousand measurements of *G* were obtained, and an average value of *G* was estimated as $G=(6.6729\pm0.0002)\cdot10^{-8}$ dyn·cm²·g⁻². In shorter time intervals, statistically significant deviations (+/–) from the average were noted, e.g.:

19 October 1995 – 25 January 1996 – $G=(6.6726\pm0.0001)\cdot10^{-8} \text{ dyn}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-2};$ 21 March 1993 – 13 July 1993 – $G=(6.6737\pm0.0002)\cdot10^{-8} \text{ dyn}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-2}$ [*Khain, Khalilov, 2009, p. 276–277*].

The long-term observations give evidence that the recorded fluctuations of *G* values [*Khain, Khalilov, 2009, p. 284*] cannot be caused by any of the impact factors, such as changes in the geomagnetic field, instability of temperature and atmospheric pressure, the flow of residual gas in the vacuum chamber of the instrument, changing its tilt and the influence of the gravitational field associated with the change in the relative positions of Earth, Moon and Sun.

It is still unclear what is the cause of the abovementioned contrasting determinations of the fundamental physical constant, and researchers have different hypothesis in this respect. According to P. Dirac [*Dirac*, 1937] and other physicists, *G* is not constant over time and its value is decreasing inversely in proportion with time in the same way as values of a number of other fundamental physical constants in the Big Bang model.

Time series of *G* values were analyzed by many researchers. A basic conclusion is that regular periods of 85, 53, 39, 23, 21, 17 days are typical of *G* variations in the third decimal place. It is revealed that solar activity varies in the same periods. Based on results of analyses of the time series, many researchers assume that variations of the gravitational constant are 'associated with a variety of space and geophysical phenomena ..., which directly or indirectly affect the results of measurements' [*Khain*, *Khalilov*, 2009, p. 279].

Cosmic phenomena are discussed below. As for the 'geophysical processes', it may be noted that, according to [*Khmelevsky*, 2007, p. 320; Stacey, 1969], there is a close relationship between magnetic and gravity anomalies, which locations, strike and shapes are often coincident. A correlation between seismic activity of the Earth and variations in values of the gravitational constant *G* is discussed in [*Khain, Khalilov, 2009*]. Seismologists, volcanologists and surveyors [*Vikulin, 2011, p. 388–389*] have collected data which suggest that there is a correlation between patterns of seismic activity at the Earth surface and anomalies of its shape in the form of geoid waves,

which, in fact, are planetary gravitational anomalies [*Magnitskiy*, 1967].

The reviewed geophysical data support the above conclusion that the analyses of variations in measurements of the gravity constant do not actually reveal any changes in the value of the gravitational constant, but identify variations of the gravity field due to geophysical processes taking place when G is instrumentally measured on site.

4. GRAVITATIONAL WAVES AND COSMIC FACTORS

Earth in the Solar system and the Galaxy. The available data suggest that local geophysical and global gravity processes can interact with each other, and this conclusion is supported by relevant long-term observations. In [*Bagby, 1973*], it is stated that seismic activity is influenced by positions of Neptune and Uranus and lunar-solar tides. In [*Fedorov, 2001, 2007*], it is concluded that in the 20th century the amount of the Earth's volcanic activity depended on both the Earth's position at its orbit and distances from Earth to Sun and Mars.

Based on historical records, it is believed that the approach of Mars to Earth causes a variety of disasters, including hurricanes, typhoons, earthquakes and droughts or, on the contrary, floods. Anomalous natural phenomena and events associated with the 'great' approach of Mars to Earth on August 28, 2003 (when the distance between the planets was only 55.7 mln km versus a 'normal' distance of about 400 mln km) are analyzed in [Khain, Khalilov, 2009, p. 337–341] as follows: (1) 'From July to late September 2003, hurricanes and typhoons occurred on Earth twice more frequently than in similar periods in the past'; (2) 'Both atmospheric and geological disasters were anomalously highly active. The degree of activity of the atmospheric and geological manifestations of the planet's energy (typhoons and hurricanes, and earthquakes and volcanoes, respectively) exceeded the background values by a factor of 2.5 to 3'.

In the solar system, Earth revolves around the center of the galaxy at a highly eccentric orbit. It completes one revolution in 200–250 million years. Some researchers have already noted the fact that the duration of this period is generally coincident with the duration of Bertrand tectonic cycle, during which Earth periodically approaches to the center of the galaxy (perigalaction) and then moves away from it (apogalaction) and, naturally, Earth is subject to either stronger of weaker influence of gravity of the masses located in the center of the galaxy.

Quadrupole deformation of Earth. Based on data from ground-based instrumental observations in the period from 1976 to 1981, irregular global changes of gravity at the Earth's surface, Δg [*Bulange*, 1981] and angular velocities of the Earth rotation, $\Delta \omega$ were studied [*Pariysky*, 1984], and it was found that these parameters are well correlated as functions of time. Moreover, positive values of Δg correspond to negative values of $\Delta \omega$, instead of positive values

ues, which would correlate with general compression of Earth. The above shows that compression of Earth at an insitu measurement location is correspondent to an overall increase of the Earth momentum of inertia, which is possible only if expansion takes place elsewhere on the globe [*Bulange*, *1981*]. Obviously, in this case, the Earth deformation is also quadrupole.

Analyses of satellite laser ranging (SLR) data reveal variations of values of second moment J_2 in decomposition of the Earth gravitational potential by spherical harmonics [*Cox, Chao, 1998*], which reflects the dynamics of the ratio of equatorial *A* (*a*) and pole *C* (*c*) moments of inertia (radii) of Earth as follows: $J_2 = (C-A)/MR_E^2 \approx \varepsilon$, $J_{2n-1} = 0$, $J_{2n} \approx \varepsilon^2$, n = 2, 3, ..., and it is quadrupole too [*Vikulin, 2009, p. 52–55, 149; Grushinsky, 1976, p. 225; Zharkov, 1983, p. 66; Magnitskiy, 1967, p. 209–215*]. Here $J_0 = 1$, $J_1 = 0$, *M* is the Earth mass; $R_E = (a+c)/2$ and $\varepsilon = (a-c)/a \approx \approx 0.003$ are the Earth average radius and compression, respectively.

The analysis shows that J_2 and variations of the measured gravitational constant *G* correlate with each other [*Khain*, *Khalilov*, 2009, p. 309–313].

It was noted in [*Ivanenko, Frolov, 1984*] that only one mechanism can explain quadrupole deformation of Earth as a result of the gravitational effect, in which the globe is in the gravitational field of the incident gravitational wave, and Earth behaves as its detector. Indeed, according to the general theory of relativity, a gravitational wave has two degrees of freedom, and in case of its interaction with the body in the plane perpendicular to the wave propagation direction, deformation typical of quadrupole oscillations will be noted [*Chiu, Hoffmann, 1964*].

Identification of quadrupole deformations of Earth and establishment of their correlation with variations of the gravitational constant allow us to further develop the above conclusion and to suggest that gravitational waves emitted from sources external to Earth may be a space factor that influences the values of the gravitational constant. It is known that any gravitational field is no more than a change in the space-time metrics. This important fact means that the geometric properties of space-time (its metrics) are defined by physical phenomena, but are not unchangeable properties of space and time'' [Landau, Lifshitz, 1980, p. 307].

Thus, the above data and obtained results suggest that variations of the gravitational constant G, which are revealed by many researchers, seem to be dependent on processes taking place on sites where field measurements of G are taken by detectors. Two types of such processes are distinguished: (1) local geophysical processes manifested by rotational waves that occur on sites where the detectors are installed; properties of such waves are described above; (2) global processes associated with deformation of the entire Earth, which take place when gravitational waves from sources external to Earth are passing through Earth.

5. DISCUSSION OF RESULTS

The accumulated instrumental database is large and gives grounds to conclude that variations of geophysical fields can be described as a non-linear response of the discrete fractal medium with time-varying fractional dimension. According to the general theory of relativity, changes of the metrics (curvature) of space-time must be accompanied by gravitational waves [*Chiu*, *Hoffmann*, *1964*; *Einstein*, *1918*] and determined by geophysical phenomena [*Landau*, *Lifshitz*, *1980*], as described above. Now the existence of the close relationship between gravity and geodynamic processes seems fairly obvious.

With regard to the block structure of geomedium and its characteristic stresses with momentum of force, a fundamentally new approach can be proposed for a better understanding of both geological and geophysical processes and their relationship with gravitational phenomena. The results obtained in our study provide for consideration of the problem of detection of gravitational waves at a new level of quality on the basis of the idea of interactions between the crustal blocks and the gravitational waves [*Braginsky et al., 1985*].

The effective cross section of the detector [*Chiu*, *Hoffmann*, *1964*] recording gravitational waves is as follows: $\sigma \approx m|r|^2$, where $m|r|^2$ is the quadrupole momentum of the antenna. The effective cross section reaches its maximum when the distance between the two masses |r| is close to the acoustic wavelength. Here acoustic waves mean elastic waves; in the case of Earth, acoustic waves mean longitudinal and / or transverse seismic waves. The sensitivity of this method proves insufficient when records are taken of short gravitational waves in their interaction with the crustal blocks and / or the entire Earth. According to estimates in [*Braginsky et al.*, *1985*], in order to ensure confident detection of gravitational waves by this method, the antenna's sensitivity should be increased by at least one or two orders of magnitude.

The situation can be radically changed, should rotational geodynamic perturbations c_0 (2) be referred to as a 'working tool', instead of elastic seismic waves. If rotational geodynamic perturbations are used to detect gravitational waves, other things being equal, the antenna's sensitivity of the antenna can be increased, and thus the task of detection of gravitational waves by the method described in [*Braginsky et al.*, 1985] can be completely solved. Apparently, using the Eötvös torsion balance in the function of a seismograph to record slow movements of the Earth's surface can make it possible to detect gravitational waves [*Krylov, Sobolev, 1998*] and to successfully predict strong remote earthquakes on the basis of long-term gravitational precursors [*Khain, Khalilov, 2009*].

Under the conservation law of angular momentum, it is impossible or poorly probable that rotational stresses may be released by plastic deformation, and, consequently, the rotational stresses are accumulated in geomedium, i.e. elastic mantle, and convert it into the energy-saturated substance. Due to this property of stress preservation or the geomedium's lasting 'memory' of its previous state, the 'elementary' angle of the block's rotation, which reflects the dynamics of movement of the block's geomedium, cannot be considered small for long-term periods (equation 4, Figure 1). The sum of turns at the final angles does not have the additive property – it depends on the sequence of execution of such turns. Some of the fundamental provisions of global tectonics, which are based on Euler's theorem (D'Alembert-Euler) [*Zonenshain, Kovaleva, 1974; Le Pichon, 1968; Isaks et al., 1968; Morgan, 1968*] should to be revised.

The rheid property of geomedium or its potential superplastic flow in the solid state [*Leonov*, 2008; *Carey*, 1953] can be considered as a physical justification of the new paradigm of geology – the momentum vortex geodynamics [*Vikulin, Tveritinova, 2008; Vikulin et al., 2011*], under which the equilibrium shape of Earth is achieved by vortex motions of Dirichlet-Dedekind-Riemann and / or vortex geological structures [*Vikulin et al., 2013*], which were introduced in geology by J.S. Lee [*Lee, 1928*] (see also [*Vikulin, 2003, 2008b; Melekestsev, 1979; Milanovsky, 2007; Sleznak, 1972; Xie, 2004*]).

Studies of vortex flows with regard to gravitational energy of the bodies [*Kondratiev*, 2003] and data on vortex geological structures [*Vikulin*, 2003; *Milanovsky*, 2007] prove the existence of internal motions with vortex nature in rotating system, such as planets, stars and galaxies. A fundamentally important outcome of the above consideration is another possibility of obtaining new data on physical properties of planetary materials, such as viscosity, compressibility, magnetic field intensity, etc.

Under the rotary approach [*Vikulin, 2006, 2008a, 2010, 2011; Vikulin, Ivanchin, 1998, 2013; Vikulin et al., 2011, 2012a, 2012b, 2012c, 2013; Vikulin, Krolevets, 2002; Vikulin, Tveritinova, 2008*], the concepts of mechanics, gravity and geology are conforming and thus allow using the theory of potential, that takes into account the gravitational energy [*Kondratiev, 2003*], as a basis to describe geogravitational movements of Earth and its state of equilibrium. It is also likely that under this approach, the equilibrium state of Earth can also be described via a 'transfer' of gravitational energy in the energy of the state of stresses [*Ferronsky V.I., Ferronsky V.S., 2007*].

An alternative description of geodynamic (rheid) motions can be also provided in terms of non-linear (physical) acoustics as it considers that, aside from variables such as pressure, oscillation velocity and displacement, constant forces, such as the radiation pressure, occur in the acoustic field. The origin of the radiation pressure is related with changes of a time-average wave-carried impulse (momentum of force and / or angular momentum) in a certain volume. Such a pressure always occurs in continuous media because nonlinear effects take place even at relatively low intensities of sound (seismic wave amplitude). In its turn, the radiation pressure causes movements of the substance of the medium itself and the occurrence of acoustic flows [*Krasil'nikov, Krylov, 1983*] or, in terms of geodynamics, rheid superplastic movements, including vortex geological structures. In the nonlinear physical acoustics, hydrodynamic and acoustic parameters are closely 'intertwined' with each other when the phenomenon of rotational flow or 'sound wind' is considered [*Gurbatov et al., 2008; Rudenko, Soluyan, 1975*].

Thus, the rotary approach, that is being further developed by the authors, provides justifications both in theory and practice for the existence of the Dirichlet-Dedekind-Riemann vortex flows in rotating gravitating non-viscous liquids. Such movements for the block rotating Earth, which substance is shown above to have rheid (superplastic) properties, can be also described in terms of physical acoustics.

6. SUMMARY

The data and results presented in this article do not only confirm the relationship between geodynamics and gravity. Such data suggest the existence of a close relationship between the geodynamic and gravitational wave movements. It occurs that geodynamic waves and quadrupole gravitational changes of the Earth's shape are strongly interrelated. Therefore, the geodynamic waves can be referred to as a detector of gravitational perturbations, i.e. waves. Under such an approach, it becomes clear why, despite strenuous efforts recently made by many research teams, gravity and geodynamic (tectonic) waves have not been detected yet - they seems to be 'strongly' related phenomena requiring their joint recording [Vikulin, 2011, p. 384–394]. Results published in [Krylov, Sobolev, 1998; Khain, Khalilov, 2009; Sherman, 2013] are encouraging and supportive of the above statement.

In natural science, searching for an explanation of the physical mechanism that provides for the relationship between geological and gravitational phenomena is a fundamental challenge. An attempt to resolve the problem is described in [*Dmitrievsky et al.*, 1993] under the concept of the system motion of substance on the basis of the new theory of vacuum and inertial fields, which combines the fundamental theoretical concepts of physics and geodynamics.

In our study, based on the available geodynamic data, it is concluded that the block motion in the rotating medium is equivalent to its own movement, but with its intrinsic momentum in the non-rotating coordinate system, and this conclusion can serve as a 'key' to understand the nature of spin [Vilulin, 2009, p. 275]. Indeed, it is known [Levich et al., 1971, p. 38] that "Schrodinger wave equation plays the same role in quantum mechanics as Newton's equation plays in classical mechanics". In quantum mechanics, the relationship between angular momentum and symmetry properties with regard to rotational motion "is particularly close, becoming essentially the main content of the concept of momentum. ... A momentum acquires the sense of a quantum number, ... and an issue of its origin becomes insignificant, and we naturally come to the concept of its 'intrinsic' momentum, which should be attributed to a particle regardless of whether it is 'complex' or 'elementary'" [Landau, Lifshitz, 1981, p. 234–235]. The stream of thought of geologist A.V. Peive becomes clear - based on analyses of geological data, he viewed 'the intrinsic potential of movements of the block' [Pieve, 1961] - in fact, its spin!

Therefore, a unified description of geodynamic and gravitational wave movements allow us to interpret the intrinsic momentum of a geological block (plate) and spin of an elementary particle as a manifestation of rotational (turning, momentum, vortex) properties of space-time.

Our results fully support the conclusion by V.I. Vernadsky [*Vernadsky*, *1991*]: 'In the geologic history of our planet, there are time periods of higher or lower intensity of geological processes... We do not know any explanation of these facts, and it seems erroneous that most of the geologists believe that the cause is to be found inside the planet'. In other words, developing the theory of geological movements is also a 'key' to understanding the nature of time and space [*Aksenov*, *2012*].

This study was supported by the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Grant 12-III-A-08-164.

7. References

Aki K., Richards P.G., 2002. Quantitative Seismology. University Science Books, San Francisco, 700 p.

- *Aksenov G.P.*, 2012. V.I. Vernadsky's Views on the Nature of Time and Space. LIBROKOM, Moscow, 352 p. (in Russian) [*Аксенов Г.П.* В.И. Вернадский о природе времени и пространства. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. 352 с.].
- Bagby D.P., 1973. Further evidence of tidal influence on earthquake incidence. *The Moon* 6 (3–4), 398–404. http://dx.doi. org/10.1007/BF00562214.
- Braginsky V.B., Mitrofanov V.P, Rudenko V.N., 1985. Searching for low-frequency bursts of gravitational radiation. Uspehi fizicheskih nauk (Achievements of Physical Sciences) 147, 422–424 (in Russian) [Брагинский В.Б., Митрофанов В.П., Руденко В.Н. О поисках низкочастотных всплесков гравитационного излучения // Успехи физических наук. 1985. Т. 147. С. 422–424].
- *Bulange Yu.D.*, 1981. Some results of studies of non-tidal changes of gravity. *Doklady AN SSSR* 256 (6), 1330–1331 (in Russian) [*Буланже Ю*,Д. Некоторые результаты изучения неприливных изменений силы тяжести // Доклады АН СССР. 1981. Т. 256. № 6. С. 1330–1331].

- Bykov V.G., 2005. Strain waves in the Earth: Theory field data, and models. Russian Geology and Geophysics 46 (11), 1176–1190.
- *Bykov V.G.*, 2008. Stick-slip and strain waves in the physics of earthquake rupture: experiments and models. *Acta Geophysica* 56 (2), 270–285. http://dx.doi.org/10.2478/s11600-008-0002-5.
- Carey S.W., 1953. The Rheid concept in geotectonics. Journal of the Geological Society of Australia 1 (1–2), 67–117. http:// dx.doi.org/10.1080/14400955308527848.
- Chiu H-Y., Hoffmann W.F., 1964. Gravitation and Relativity. W.A. Benjamin, Inc., New York, Amsterdam, 544 p.
- *Cox C., Chao B.F.*, 2002. Detection of a large-scale mass redistribution in the Terrestrial system since 1998. *Science* 297 (5582), 831–833. http://dx.doi.org/10.1126/science.1072188.
- Davydov A.S., 1982. Solitones in quasi-one-dimensional molecular structures. Uspehi fizicheskih nauk (Achievements of Physical Sciences) 138 (4), 603–643 (in Russian) [Давыдов А.С. Солитоны в квазиодномерных молекулярных структурах // Успехи физических наук. 1982. Т. 138. Вып. 4. С. 603–643].
- Dirac P.A.M., 1937. The cosmological constants. Nature 139, 323.http://dx.doi.org/10.1038/139323a0.
- Dmitrievsky A.N., Volodin I.A., Shipov G.I., 1993. The Earth's Energy Structure and Geodynamics. Nauka, Moscow, 154 р. (in Russian) [Дмитриевский А.Н., Володин И.А., Шипов Г.И. Энергоструктура Земли и геодинамика. М.: Наука, 1993. 154 с.].
- Dolgachev V.A., Domozhilova L.M., Khlystov A.I., 1991. Specific features of movements of the Sun's central mass relative to the barycenter. In: Proceedings of P.K. Shternberg State Astronomic Institute. Vol. 62, p. 111–115 (in Russian) [Долгачев В.А., Доможилова Л.М., Хлыстов А.И. Особенности движения центра масс Солнца относительно барицентра // Труды Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга. 1991. Т. 62. С. 111–115].
- Einstein A., 1918. Uber gravitationwellen. Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. V. 1. P. 154–167.
- Fedorov V.M., 2001. Comparison of the chronology of volcanic activity of the Earth and characteristics of its orbital movement // Vulkanologia i Seismologia (Russian Journal of Volcanology and Seismology) 5, 65–67 (in Russian) [Федоров В.М. Сопоставление хронологии вулканической активности Земли с характеристиками ее орбитального движения // Вулканология и сейсмология. 2001. № 5. С. 65–67].
- *Fedorov V.M.*, 2007. A multidimensional analysis and the chronologic structure of the Earth's geodynamic activity. *Moscow University Geology Bulletin* 62 (4), 234–243. http://dx.doi.org/10.3103/S0145875207040047.
- *Ferronsky V.I., Ferronsky S.V.*, 2007. The Earth Dynamics. Theory of the Planet's Motion Based on Dynamics Equilibrium. Moscow: Scientific World, 336 p.
- *Feynman R.P., Leighton R.B., Sands M.*, 1964. The Feynman Lectures on Physics. V. 2. Massachusetts, Palo Alto, London: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 296 p.
- *Gershenzon N.I., Bykov V.G., Bambakidis G.,* 2009. Strain waves, earthquakes, slow earthquakes, and afterslip in the framework of the Frenkel-Kontorova model. *Physical Review* E 79 (056601), 1–13. http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.79. 056601.
- Grushinsky N.P., 1976. The Theory of the Earth's Shape. Nauka, Moscow, 512 p. (in Russian) [Грушинский Н.П. Теория фигуры Земли. М.: Наука, 1976. 512 с.].
- Gurbatov S.N., Rudenko O.V., Saichev A.I., 2008. Waves and Structures in Nonlinear Medium without Dispersion. FIZMATLIT, Moscow, 496 p. (in Russian) [Гурбатов С.Н., Руденко О.В., Саичев А.И. Волны и структуры в нелинейных средах без дисперсии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 496 с.].
- Hirth J.P., Lothe J., 1968. Theory of dislocations. McGraw-Hill, New York, 600 p.
- Isaks B., Oliver J., Sykes L.R., 1968. Seismology and the new global tectonics. Journal of Geophysical Research 73 (18), 5855–5899. http://dx.doi.org/10.1029/JB073i018p05855.
- *Ivanenko D.D., Frolov B.N.*, 1984. Deformation of the Earth and the modern theory of gravitation. In: Problems of expansion and pulsation of the Earth. Nauka, Moscow, p. 93–97 (in Russian) [Иваненко Д.Д., Фролов Б.Н. Деформация Земли и современная теория гравитации // Проблемы расширения и пульсации Земли. М.: Наука, 1984. С. 93–97].
- Karryev B.S., 2009. An Earthquake Has Occurred. SIBIS, 2009, 410 p. (in Russian) [Каррыев Б.С. Вот произошло землетрясение. SIBIS, 410 с.].
- *Khain V.E., Khalilov E.N.,* 2009. Cycles in Geodynamic Processes: Their Possible Nature. Scientific World, Moscow, 520 p. (in Russian) [*Хаин В.Е., Халилов Э.Н.* Цикличность геодинамических процессов: ее возможная природа. М.: Научный мир, 2009. 520 с.].
- *Khmelevskoy V.K.*, 2007. Geophysics. Textbook. KDU, Moscow, 320 p. (in Russian) [*Хмелевской В.К.* Геофизика. Учебник. М.: КДУ, 2007. 320 с.].
- *Kondratiev B.*, 2003. The Theory of Potential and Equilibrium Figures. Institute of Computer Sciences, Moscow and Izhevsk, 624 p. (in Russian) [*Кондратьев Б.П.* Теория потенциала и фигуры равновесия. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 624 с.].
- Krasil'nikov V.A., Krylov V.V., 1983. Introduction of Physical Acoustics. Nauka, Moscow, 400 p. (in Russian) [Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984. 400 с.].

- Krylov S.M., Sobolev G.A., 1998. About vortex-type gravity fields of natural and artificial nature and their wave properties // Vulkanologia i Seismologia (Russian Journal of Volcanology and Seismology) 3, 78–92 (in Russian) [Крылов С.М., Соболев Г.А. О вихревых гравитационных полях естественного и искусственного происхождения и их волновых свойствах // Вулканология и сейсмология. 1998. № 3. С. 78–92].
- *Kuznetsov V.V.*, 2008. Introduction of Physics of the Hot Earth. Kamchatsky State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, 367 p. (in Russian) [*Кузнецов В.В.* Введение в физику горячей Земли. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2008. 367 с.].
- Киznetsov V.V., 2009. The shock-wave model of earthquakes. Strong movements due to an earthquake as an egress of a shock wave to the surface. *Fizicheskaya Mezomekhanika (Russian Journal of Physical Mesomechanics)* 12 (6), 87–96 (in Russian) [*Кузнецов В.В.* Ударно-волновая модель землетрясения. Сильные движения землетрясения как выход ударной волны на поверхность // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. № 6. С. 87–96].

Landau L.D., Lifshitz E.M., 1976. Mechanics. Course of Theoretical Physics. Butterworth-Heinemann, V. 1, 224 p.

- Landau L.D., Lifshitz E.M., 1980. The Classical Theory of Fields. Course of Theoretical Physics. Butterworth-Heinemann, V. 2, 402 p.
- Landau L.D., Lifshitz E.M., 1981. Quantum Mechanics: Non-Relativistic Theory. Course of Theoretical Physics. Butterworth-Heinemann, 3 ed., 689 p.
- Landau L.D., Lifshitz E.M., 1986. Theory of Elasticity. Course of Theoretical Physics. Butterworth-Heinemann, V. 7, 195 p.
- Le Pichon X., 1968. Sea-floor spreading and continental drift. Journal of Geophysical Research 73 (12), 3661–3697. http:// dx.doi.org/ 10.1029/JB073i012p03661.
- *Lee J.S.*, 1928. Some characteristic structural types in Eastern Asia and their bearing upon the problems of continental movements. *Geological Magazine* 66 (11), 501–522. http://dx.doi.org/10.1017/S0016756800105400.
- *Leonov M.G.*, 2008. Tectonics of the consolidated crust. Nauka, Moscow, 457 p. (in Russian) [*Леонов М.Г.* Тектоника консолидированной коры. М.: Наука, 2008. 457 с.].
- Levich V.G., Vdovin Yu.A., Myamlin V.A., 1971. The Course of Theoretic Physics. Nauka, Moscow, V. II, 936 p. (in Russian) [Левич В.Г., Вдовин Ю.А., Мямлин В.А. Курс теоретической физики. М.: Наука, 1971. Т. II. 936 с.].
- Lin'kov E.M., 1987. Seismic Events. Publishing House of Leningrad State University, Leningrad, 248 p. (in Russian) [Линьков Е.М. Сейсмические явления. Ленинград: Изд-во ЛГУ, 1987. 248 с.].
- Lomnitz C., 1970. Some observations of gravity waves in the 1960 Chile earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America 60 (2), 669–670.
- Lomnitz C., Castanos H., 2006. Earhquake hazard in the Valley of Mexico: entropy, structure, complexity. In: R. Teisseyre, M. Takeo, E. Majewski (Eds.), Earthquake source asymmetry, structural media and rotation effects. Springer, New York, p. 347–364.
- Magnitskiy V.A., 1967. The internal structure and physics of the Earth. NASA, Washington D.C., 447 p.
- *Matuzawa T.*, 1925. On the possibility of gravitational waves in soil and allied problems. *Japanese Journal of Astronomy and Geophysics* 3, 145–155.
- *Melekestsev I.V.*, 1979. The vortex-type volcanism hypothesis and prospects of its application. in: problems of deep volcanism. Nauka, Moscow, p. 125–155 (in Russian) [*Мелекесцев И.В.* Вихревая вулканическая гипотеза и некоторые перспективы ее применения // Проблемы глубинного вулканизма. М.: Наука, 1979. С. 125–155].
- *Milanovsky E.E.*, 2007. Rotation Processes in Geology and Physics. KomKniga, Moscow, 528 p. (in Russian) [*Милановский E.E.* Ротационные процессы в геологии и физике. М.: КомКнига, 2007. 528 с.].
- Mogi K., 1985. Earthquake prediction. Tokyo, Academic Press, 355 p.
- *Morgan W.J.*, 1968. Rises, trenches, great faults and crustal blocks. *Journal of Geophysical Research* 73 (6), 1959–1982. http://dx.doi.org/10.1029/JB073i006p01959.
- Nalivkin D.V., 1969. Hurricanes, Storms and Tornadoes. Nauka, Leningrad, 487 p. (in Russian) [Наливкин Д.В. Ураганы, бури и смерчи. Ленинград: Наука, 1969. 487 с.].
- Nikolaevsky V.N., 1995. Mathematical simulation of single deformational and seismic waves. Doklady RAN 341 (3), 403–405 (in Russian) [Николаевский В.Н. Математическое моделирование уединенных деформационных и сейсмических волн // Доклады РАН. 1995. Т. 341. № 3. С. 403–405].
- Nikolaevskiy V.N., 1996. Geomechanics and Fluidodynamics. Kluwer Academic Publishers, London, 351 p.
- Pariysky N.N., 1984. About irregular changes of the Earth rotation velocity and their potential relations with deformations of the Earth and changes of gravity. In: Problems of Expansion and Pulsation of the Earth. Nauka, Moscow, p. 84–93 (in Russian) [Парийский Н.Н. О нерегулярных изменениях скорости вращения Земли и возможной связи их с деформациями Земли и изменениями силы тяжести // Проблемы расширения и пульсации Земли. М.: Наука, 1984. С. 84–93].
- *Pieve A.V.*, 1961. Tectonics and magmatism. *Izvestia AN SSSR. Geology Series* (3), 36–53 (in Russian) [*Пейве А.В.* Тектоника и магматизм // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1961. № 3. С. 36–54].

Popkov V.I., Fomenko V.A., Glazyrin E.A., 2013. The catastrophic tectonic event at the Taman Peninsula in summer 2011.

Doklady RAN 448 (60), 1–4 (in Russian) [*Попков В.И., Фоменко В.А., Глазырин Е.А.* Катастрофическое тектоническое событие лета 2011 г. на Таманском полуострове // Доклады РАН. 2013. Т. 448. № 6. С. 1–4].

Rikitake T., 1976. Earthquake prediction. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Co, 357 p.

- Rudenko O.V., Soluyan S.I., 1975. Theoretical Bases of Nonlinear Acoustics. Nauka, Moscow, 288 p. (in Russian) [Руденко О.В., Солуян С.И. Теоретические основы нелинейной акустики. М.: Наука, 1975. 288 с.].
- Sadovsky M.A., 1979. Natural lumpiness of rocks. Doklady AN SSSR 247 (4), 829–831 (in Russian) [Садовский М.А. Естественная кусковатость горных пород // Доклады АН СССР. 1979. Т. 247. № 4. С. 829–831].
- Shebalin N.V., 2003. Quantitative macroseismics. Vychislitelnaya Seismologia (Russian Journal of Computational Seismology) 34, 57–200 (in Russian) [Шебалин Н.В. Проблемы макросейсмики // Вычислительная сейсмология. Вып. 34. С. 57–200].
- Sherman S.I., 2013. Deformation waves as a trigger mechanism of seismic activity in seismic zones of continental lithosphere (Geodynamics & Tectonophysics) 4 (2), 83–117 (in Russian) [Шерман С.И. Деформационные волны как триггерный механизм сейсмической активности в сейсмических зонах континентальной литосферы // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4. № 2. С. 83–117]. http://dx.doi.org/10.5800/GT-2013-4-2-0093.
- *Slenzak O.I.*, 1972. Vortex-Type Systems of the Lithosphere and the Precambrian Structures. Naukova Dumka, Kiev, 182 р. (in Russian) [*Слензак О.И.* Вихревые системы литосферы и структуры докембрия. Киев: Наукова Думка, 1972. 182 с.].
- Sobolev G.A., 1993. Fundamentals Earthquake Forecasting. Nauka, Moscow, 313 p. (in Russian) [Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.].
- Stacey F.D., 1969. Physics of the Earth. John Wiley&Sons, London, 343 p.
- *Timashev S.F.*, 2003. About basic principles of 'the new dialogue with nature'. In: Nikolaev A.V. (Ed.), Problems of geophysics in the 21st century (in two volumes). Nauka, Moscow, V. 1, p. 104–141 (in Russian) [*Тимашев С.Ф.* О базовых принципах «нового диалога с природой» // Проблемы геофизики XXI века: в 2 кн. Кн. 1 / Под ред. А.В. Николаева. М.: Наука , 2003. С. 104–141].
- *Vernadsky V.I.*, 1991. Scientific Thought as a Planetary Phenomenon. Nauka, Moscow, 271 p. (in Russian) [*Вернадский В.И.* Научная мысль как планетное явление. М.: Наука, 1991. 271 с.].
- *Vikulin A.V.*, 2003. Vortex-Related Events in Geological Processes. Kamchatsky State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, 297 p. (in Russian) [*Викулин А.В.* Вихри в геологических процессах. Петропавловск-Камчатский: КГТУ, 2003. 297 с.].
- *Vikulin A.V.*, 2006. Earth rotation, elasticity and geodynamics: earthquake wave rotary model. In: R. Teisyre, M. Takeo, E. Majewski (Eds.), Earthquake source asymmetry, structural media and rotation effects. Springer, Berlin–Heidelberg, p. 273–289.
- *Vikulin A.V.*, 2008a. Energy and moment of the Earth's rotation elastic field. *Russian Geology and Geophysics* 49 (6), 422–429. http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2007.11.012.
- *Vikulin A.V.*, 2008b. The World of Vortex Movements. Kamchatsky State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, 230 p. (in Russian) [*Викулин А.В.* Мир вихревых движений. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2008b. 230 с.].
- *Vikulin A.V.*, 2009. Physics of the Earth and Geodynamics. Kamchatsky State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, 463 р. (in Russian) [*Викулин А.В.* Физика Земли и геодинамика. Петропавловск–Камчатский: КамГУ, 2009. 463 с.].
- Vikulin A.V., 2010. New type of elastic rotational waves in geo-medium and vortex geodynamics. Geodynamics & Tectonophysics 1 (2), 119–141. http://dx.doi.org/10.5800/GT-2010-1-2-0010.
- Vikulin A.V., 2011. Seismicity. Volcanism. Geodynamics. Selected Works. Kamchatsky State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, 407 p. (in Russian) [Викулин А.В. Сейсмичность. Вулканизм. Геодинамика. Сборник трудов. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2011. 407 с.].
- Vikulin A.V., 2012. Geodynamics and gravity. In: Recent geodynamics of Central Asia and hazardous natural processes: results of quantitative studies. Proceedings of the All-Russia Conference and Youth Workshop. IEC SB RAS, Irkutsk, V. 1, p. 23–26 (in Russian) [Викулин А.В. Геодинамика и гравитация // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе. Материалы Всероссийского совещания и молодежной школы. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. Т. 1. С. 23–26].
- Vikulin A.V., Akmanova D.R., Dolgaya A.A., 2012a. Migration of seismic and volcanic activity as display of wave geodynamic process. Geodynamics & Tectonophysics 3 (1), 1–18. http://dx.doi.org/10.5801/GT-2012-3-1-0558.
- Vikulin A.V., Akmanova D.R., Dolgaya A.A., 2012b. Migration of seismic and volcanic activity as display of wave geodynamic process. New Concepts in Global Tectonics 64, 94–110.
- Vikulin A.V., Ivanchin A.G., 1998. Rotational model of seismic process. Tikhookeanskaya Geologiya (Russian Journal of Pacific Geology) 17 (6), 94–102 (in Russian) [Викулин А.В., Иванчин А.Г. Ротационная модель сейсмического процесса // Тихоокеанская геология. 1998. Т. 17. № 6. С. 94–102].
- Vikulin A.V., Ivanchin A.G., 2013. Modern concept of block hierarchy in the structure of geomedium and its implications in geosciences. Journal of Mining Science 49 (3), 395–408. http://dx.doi.org/10.1134/S1062739149030076.

- Vikulin A.V., Ivanchin A.G., Tveritinova T.Yu., 2011. Moment vortex geodynamics. Moscow University Geology Bulletin 66 (1), 29–35. http://dx.doi.org/10.3103/S014587521101008X.
- *Vikulin A.V., Krolevets A.N.,* 2002. Seismotectonic processes and the Chandler oscillation. *Acta Geophysica Polonica* 50 (3), 395–412.
- Vikulin A.V., Melekestsev I.V., Akmanova D.R., 2012c. Computerized systems for modeling of seismic and volcanic processes as a basis for studies of wave-related geodynamic phenomena // Kompyuternye Tekhnologii (Russian Journal of Computational Technologies) 17 (3), 34–53 (in Russian) [Викулин А.В., Мелекесцев И.В., Акманова Д.Р. Информационно-вычислительная система моделирования сейсмического и вулканического процессов как основа изучения волновых геодинамических явлений // Вычислительные технологии. 2012c. Т. 17. № 3. С. 34–53].
- Vikulin A.V., Tveritinova T.Yu., 2008. Momentum-Wave nature of geological medium. Moscow University Geology Bulletin 63 (6), 368–371. http://dx.doi.org/10.3103/S0145875208060033.
- Vikulin A.V., Tveritinova T.Yu., Ivanchin A.G., 2013. Wave moment geodynamics. Acta Geophysica 61(2), 245–263. http://dx.doi.org/10.2478/s11600-012-0079-8.
- *Vladimirov Yu.S.*, 2010. Between Physics and Metaphysics. Following Clifford and Einstein. Book 2. LIBROKOM, Moscow, 248 p. (in Russian) [*Владимиров Ю.С.* Между физикой и метафизикой. Книга 2. По пути Клиффорда-Эйнштейна. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 248 с.].
- Xie Xin-sheng., 2004. Discussion on rotational tectonics stress field and the genesis of Circum-Ordos landmass fault system. Acta Seismologica Sinica. 17 (4), 464–472. http://dx.doi.org/10.1007/s11589-004-0026-0.
- *Yavorsky B.M., Detlaf A.A.,* 1979. Guide to Physics. Nauka, Moscow, 943 p. (in Russian) [*Яворский Б.М., Детлаф А.А.* Справочник по физике. М.: Наука, 1979. 943 с.].
- Zharkov V.N., 1983. Inner Structures of the Earth and Planets. Nauka, Moscow, 416 p. (in Russian) [Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983. 416 с.].
- Zonenshain L.P., Kovaleva A.A., 1974. New Global Tectonics. Mir, Moscow, 472 p. (in Russian) [Зоненшайн Л.П., Ковалева А.А. Новая глобальная тектоника. М.: Мир, 1974. 472 с.].



Викулин Александр Васильевич, д.ф.-м.н, в.н.с. Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН 683006, Петропавловск-Камчатский, б-р Пийпа, 9, Россия ⊠ e-mail: vik@kscnet.ru



Dolgaya, Anna A., junior researcher Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, 9, Boulevard Piip, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia e-mail: adolgaya@kscnet.ru

Долгая Анна Андреевна, м.н.с. Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН 683006, Петропавловск-Камчатский, б-р Пийпа, 9, Россия e-mail: adolgaya@kscnet.ru



Vikulina, Svetlana A., researcher Kamchatka branch, Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences 9, Boulevard Piip, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia

Викулина Светлана Алексеевна, н.с. Камчатский филиал Геофизической службы РАН 683006, Петропавловск-Камчатский, б-р Пийпа, 9, Россия PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2014 VOLUME 5 ISSUE 1 PAGES 305-319

http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0129



ISSN 2078-502X

TECTONOPHYSICAL INTERPRETATION OF EARTHQUAKE FOCAL MECHANISMS OF THE ZAGROS SYSTEM Y. M. Volfman, O. B. Gintov, E. Ya. Kolesnikova, A. V. Murovskaya

S.I. Subbotin Institute of Geophysics, NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine

Abstract: Structural-paragenetic and kinematic methods of tectonophysics are applied to study earthquake focal mechanisms of the Zagros system. Nodal planes of focal mechanisms are identified as L-, L'- and R-, R'-shears by the first method, whereby coordinates of principal stress axes P, T and N (i.e. in tectonophysics, σ_1 , σ_3 and σ_2 , if $\sigma_1 \ge \sigma_2 \ge \sigma_3$) are defined. 'Working' nodal planes corresponding to activated ruptures are revealed. Axes of the main normal stresses are combined into local groups on the basis of the kinematic identity of planes of seismogenic ruptures (Figure 2). The second method is applied to construct stereograms of the main axes P, T and N, to construct and interpret stereograms of vectors of seismogenic shifts (Figure 3), and to more clearly define coordinates of principal axes σ_1 , $\sigma_3 \mu \sigma_2$. As evidenced by their comparison, coordinates of the principal axes obtained by the two tectonophysical methods are well coincident (see Figure 2). Five groups of seismogenesis are distinguished; they differ in combination of deformation regimes and kinematic conditions. Locations are determined of the areas wherein earthquake foci of similar parameters are located. This means that seismogenic zones are distinguished; structural and kinematic characteristics of such zones are determined by parameters of stereographic models of corresponding types of seismogenesis (Figures 4 and 5). It is established that the region is dominated by shear and upthrust deformation regimes due to regional submeridional compression and SW-NE compression (see Figures 4 and 5). Submeridional subhorizontal compression is explained by the northward movement of the Arabian plate, and SW-NE compression is explained by divergent processes within the limits of the Red Sea rift. The time pattern of the seismogenic processes from 1979 to 2001 shows that submeridional compression and SW-NE compression are associated with different deep mechanisms. Processes of SE-NW compression, which are observed in the northern part of the Arabian plate, are caused by its interaction with the Eastern Black Sea microplate.

Key words: earthquake focal mechanisms, deformation regime, seismogenic zone, tectonophysical method of structural paragenesises, kinematic method, stress axis.

Recommended by V.S. Imaev

Citation: Volfman Y.M., Gintov O.B., Kolesnikova E.Ya., Murovskaya A.V. 2014. Tectonophysical interpretation of earthquake focal mechanisms of the Zagros system. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (1), 305–319. doi: 10.5800/GT-2014-5-1-0129.

ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СИСТЕМЫ ЗАГРОС

Ю. М. Вольфман, О. Б. Гинтов, Е. Я. Колесникова, А. В. Муровская

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина

Аннотация: При интерпретации механизмов очагов землетрясений системы Загрос применены структурно-парагенетический и кинематический методы тектонофизики. Первым методом нодальные плоскости механизмов очагов идентифицированы как *L*-, *L'*- и *R*-, *R'*-сколы, на основании чего уточнены координаты главных осей напряжений Р, Т и N (в тектонофизике σ_1 , σ_3 и σ_2 , при $\sigma_1 \ge \sigma_2 \ge \sigma_3$). Определены «рабочие» нодальные плоскости, соответствующие реальным разрывам. Оси главных нормальных напряжений объединены в локальные группы по признаку кинематической идентичности плоскостей сейсмогенных разрывов (рис. 2). Вторым методом построены стереограммы распределения главных осей Р, Т и N, построены и проинтерпретированы стереограммы векторов сейсмогенных подвижек (рис. 3) и уточнены координаты главных осей напряжений. Сопоставление координат главных осей, полученных двумя тектонофизическими методами, показало их хорошую сходимость (рис. 2). Обосновано пять типов сейсмогенеза, характеризуемых разными комбинаторными сочетаниями деформационных режимов и кинематических обстановок; локализованы участки размещения очагов со сходными параметрами, то есть выделены сейсмогенные зоны, структурно-кинематическая характеристика которых определяется параметрами стереографических моделей соответствующих типов сейсмогенеза (рис. 4, 5). Установлено, что доминирующими в регионе являются сдвиговый и взбросовый деформационные режимы, обусловленные обстановками субмеридионального и ЮЗ-СВ регионального сжатия (рис. 4, 5). Субмеридиональное субгоризонтальное сжатие объясняется движением Аравийской плиты на север, а ЮЗ-СВ сжатие – дивергентными процессами в пределах Красноморского рифта. Временная развертка сейсмогенных процессов за 1979–2001 гг. показывает, что субмеридиональное и ЮЗ-СВ сжатие связано с разными глубинными механизмами. Процессы ЮВ-СЗ сжатия, фиксируемые в северной части Аравийской плиты, обусловлены ее взаимодействием с Восточно-Черноморской микроплитой.

Ключевые слова: механизмы очагов землетрясений, деформационный режим, сейсмогенная зона, тектонофизический метод структурных парагенезисов, кинематический метод, оси напряжений.

1. Введение

Тектонофизическую интерпретацию подвижек по плоскостям сейсмогенных разрывов для мелкофокусных землетрясений впервые предложил Д. Маккензи [McKenzie, 1969]. Им же был сформулирован ряд принципов определения ориентировок главных осей нормальных напряжений по результатам полевого изучения сейсмогенных зон. Необходимость такой интерпретации была вызвана тем, что в близповерхностных условиях сейсмогенный разлом, как правило, представляет собой систему разноориентированных плоскостей более мелких разрывов, объединяемых общей причиной – разрядкой поля напряжений, накопленных в зоне землетрясения. Аналогичные принципы положены в основу кинематического метода тектонофизики (КМТ), разработанного О.И. Гущенко [Gushchenko, 1973, 1979], которым предложена система построения стереограмм векторов подвижек по зеркалам скольжения, а также механизмов очагов землетрясений, определяемых по методике А.В. Введенской [Vvedenskaya, 1969]. Удобство такой системы заключается в том, что на одной стереограмме может быть изображено большое число механизмов очагов без потери информации о нодальных плоскостях и ориентировке осей напряжений. Это, в свою очередь, предопределяет возможность дифференциации очагов землетрясений по сходству параметров полученных решений их механизмов. В дальнейшем методика была усовершенствована Ю.Л. Ребецким, предложившим метод катакластического анализа сейсмогенных разрывных нарушений [Rebetsky, 2003] и вплотную приблизившимся к возможности расчета всех компонент полного тензора напряжений [Rebetsky, 2005] применительно к сейсмически активным регионам. Использование КМТ облегчается созданием целого ряда компьютерных программ, почти полностью автоматизирующих процесс обработки и интерпретации (в данной работе использована программа Win TENSOR [*Delvaux, Sperner, 2003*]).

Теория прочности Кулона-Мора, лежащая в основе построения механизмов очагов по методике А.В. Введенской, является базовой и для другого полевого тектонофизического метода – структурно-парагенетического (СПМТ), которым исследуется внутренняя структура разрывных зон, в том числе сейсмогенных.

Таким образом, методы полевой тектонофизики и сейсмологии обрели общую точку соприкосновения, позволяющую выполнять тектонофизическую интерпретацию решений механизмов очагов землетрясений для сейсмотектонических и геодинамических реконструкций.

Близкие результаты при решении таких задач, в частности по определению направлений главных осей нормальных напряжений, дают и методы статистического анализа фокальных механизмов, обобщенные в работе С.Л. Юнга [*Yunga*, 1996] и примененные им для исследования геодинамических процессов в складчатых поясах Северной Евразии. Но авторам данной статьи, паралельно ведущим как сейсмологические, так и полевые исследования тектонических деформаций в пределах Украины, кажется более интересным именно тектонофизический подход, так как классификация деформационных режимов земной коры в тектонофизике разработана более детально, а изображение результатов исследований в таком подходе более близко к пониманию геологами.

2. ЦЕЛЬ И ОБЪЕКТ РАБОТЫ

Целью настоящей работы является тектонофизическая интерпретация сейсмологических данных на статистически представительном материале – решениях



Рис. 1. Положение системы Загрос в структуре Альпийско-Гималайского складчатого пояса (структурная основа – по [*Ba-zhenov, Burtman*, 1990]): *а* – простирание складок; *б* – надвиги, фронт шарьяжей; *в* – сдвиги; *г* – движение литосферных плит относительно Евразии в новейшее время; *д* – главные тектонические течения в новейшее время; *е* – исследуемый регион (система Загроса).

Цифры в кружках – зоны региональных разломов: 1 – Загроса, 2 – Анатолийского, 3 – Северо-Анатолийского.

Fig. 1. The position of the Zagros system in the structure of the Alpine-Himalayan folded belt [*Bazhenov*, *Burtman*, 1990]: a – strike of folds; δ – thrusts, overthrust fronts; e – shear faults; z – recent movement of the lithospheric plates against Eurasia; ∂ – region under study (Zagros system).

Numbers in circles show zones of regional faults: 1 – Zagros, 2 – Anatolian, 3 – North Anatolian.

механизмов очагов землетрясений системы Загрос. Выбор объекта исследований предопределен следующими его особенностями:

• Система является геоструктурным выражением зоны конвергенции Аравийской плиты и окраины Евразии; в современной геодинамической трактовке она позиционируется как северо-восточный фланг Аравийского Синтаксиса протяженностью более 2 тыс. км, что позволяет отнести ее к разряду геоструктур планетарного масштаба (рис. 1).

• Несомненно влияние этой системы на геодинамические особенности Восточно- и Западно-Черноморской микроплит и Крымского полуострова, которые являются главными объектами интересов авторов статьи.

• Протягиваясь в северо-западном направлении от Оманского залива до центральной части Восточной Турции, система Загрос образует тектонический узел с Восточно-Анатолийским и Северо-Анатолийским разломами (вершина Синтаксиса) [Bazhenov, Burtman, 1990; Khain, 2001; и др.]. Структурная выраженность системы позволяет четко ограничить ее площадь и обеспечить тем самым формирование адекватной выборки данных по механизмам очагов землетрясений. При этом объем выборки является вполне репрезентативным для изучения особенностей сейсмогенеза региона.

3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И СПОСОБЫ ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Фактологической основой исследований послужили решения механизмов очагов землетрясений, заимствованные из сейсмологического каталога Гарвардского университета (США) за 1977–2001 гг. (http://globalcmt.org/CMTsearch.html) и на сайте Геофизической службы РАН (http://www.ceme.gsras.ru//cgibin/info_quake.pl) для области 25–40° с. ш. и 40–60° Y.M. Volfman et al.: Tectonophysical interpretation of earthquake focal mechanisms...



Рис. 2. Стереограмма (нижняя полусфера) проекций осей сжатия (P) и растяжения (T) по сейсмологическим данным (100 механизмов очагов).

1, 2 – изолинии концентрации осей P (1) и T (2). Результаты тектонофизической интерпретации методом структурных парагенезисов (зеленое) и с помощью программы Win TENSOR (черное): 3 – оси сжатия (σ₁), 4 – оси растяжения (σ₃), 5 – линии, соединяющие парные оси σ₁ и σ₃, и номера типов сейсмогенеза, показанных на рис. 4, 5, 7.

Fig. 2. The stereogram (lower hemisphere) showing projections of compression (P) and extension (T) axes from seismological data (100 foci mechanisms).

1, 2 – concentration isolines of axes P (1) and T (2). Results of tectonophysical interpretation by the method of structural paragenesises (green) and Win TENSOR software (black): 3 – compression axes (σ_1), 4 – extension axes (σ_3), 5 – connection lines between couple axes σ_1 and σ_3 , and numbers of seismogenesis types shown in Figures 4, 5, and 7.

в. д. На этой территории система Загрос выражена линейной зоной относительно обособленного скопления очагов землетрясений. Полученная выборка насчитывает 100 решений механизмов преимущественно коровых очагов с M > 4.0.

Дифференциация очагов по типам деформационных режимов осуществлялась в соответствии с классификацией, предложенной в работе [*Gushchenko et al.*, 1991]. Она основана на принятых в тектонофизике параметрах – углах наклона γ^1 , γ^2 и γ^3 главных осей нормальных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3^{-1} (в решениях механизмов очагов землетрясений – соответственно, Р, N и T) к горизонту.

На стереограмме (рис. 2) механизмы очагов, характеризуемые однотипными деформационными режимами и проекциями осей Р и Т, образуют обособленные скопления в пределах весьма ограниченных сегментов. Эти совокупности анализировались на предмет географического расположения очагов и соответствия осей сжатия и растяжения конкретному землетрясению, что позволило сформировать (на качественном уровне) квазиоднородные выборки механизмов землетрясений по типу деформационного режима и локализации очагов в определенных структурах. Позиции этих совокупностей во многих случаях настолько различаются, что могут рассматриваться как проявления разных условий сейсмогенеза. Это позволило осуществить реконструкцию и идентификацию кинематических обстановок сейсмогенного разрывообразо-

¹ Сжатие принято положительным при $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Углы наклона осей к горизонту, соответственно, γ^1, γ^2 и γ^3 .

вания. Помимо типа деформационного режима определялся тип сдвига, ориентировка главных осей сжатия или растяжения и рабочая ось, то есть какая «тектоническая сила» – сжатие или растяжение – являлась первичной. Очаги, имеющие близкие параметры, были объединены в группы, рассматриваемые в качестве стереографической модели определенного типа сейсмогенеза, а в случае закономерного или компактного расположения этих очагов – в качестве модели сейсмогенной или очаговой зоны.

Особенность этой процедуры заключалась в анализе сейсмологических данных с позиций СПМТ. Поскольку сейсмологическое решение механизма очага и тектонофизическое решение обратной задачи по реконструкции условий разрывообразования характеризуют одно и то же явление – быстрое хрупкое разрушение горного массива, такой подход представляется вполне допустимым. Это допущение обусловлено исходными сейсмологическими данными и параметрами решения механизма очага землетрясения, получаемыми в процессе исследования напряжений и разрывов в очагах [Vvedenskaya, 1969]. В таких решениях априори заложена структурно-кинематическая идентификация сейсмогенных разрывов, отвечающих положению нодальных плоскостей: они соответствуют L- и L'-сколам тектонофизической модели, совпадающим с плоскостями максимальных касательных напряжений. Следовательно, и само решение будет отражать реальную ситуацию лишь при условии, что разрывы в очаге представлены *L*- и *L*´-сколами.

Однако экспериментально установлено и подтверждено полевыми тектонофизическими исследованиями [Stoyanov, 1977; Sherman et al., 1988; Gintov, 2005; Novik, Volfman, 1997; Murovskaya, 2012; и др.], что деформирование горного массива происходит либо посредством образования сопряженных систем L-, L'-, *R*-, *R*[′]-сколов и трещин отрыва, составляющих единый структурный парагенезис, либо активизацией подвижек по уже существующим разломам. Поскольку в процессе деформирования реализуются, как правило, не все вышеперечисленные типы разрывов, а только некоторые из них (например, сколы Риделя) или их комбинации, весьма вероятно, что и в механизме очага одна из нодальных плоскостей соответствует активному разрыву типа *R*-скола, как первоочередному и наиболее распространенному элементу структурного парагенезиса. В таком случае в окончательное решение механизма очага могут быть внесены коррективы. Допустив, что сейсмогенные разрывы в очагах с близкими параметрами могли реализоваться по типу как Lсколов, так и R-сколов, подобные очаги можно объединить в один структурно-кинематический парагенезис. Он характеризует сейсмогенную зону как совокупность сколов названных типов, сформированных в едином поле тектонических напряжений. Величины углов скалывания полученных систем (α = 25–35°) вполне согласуются с результатами экспериментов,

моделирующих условно-мгновенное разрушение осадочных и магматических образований. Таким образом, подход к сейсмотектоническому анализу системы Загрос с позиций СПМТ позволил построить схемы ориентации главных осей *региональных* полей напряжений и тектонических сил, действовавших в системе Загрос в период с 1979 по 2001 г., и гипотетически связать с этими силами всю позднеальпийскую историю ее развития.

Данные каталогов обработаны также КМТ с помощью программы Win TENSOR, что дало возможность сопоставить два независимых способа тектонофизической интерпретации. Были построены и проинтерпретированы стереограммы векторов подвижек и главных осей региональных полей напряжений по 88 землетрясениям (рис. 3). В исходные данные программы Win TENSOR по каждому механизму включались обе нодальные плоскости без выделения плоскости реального разрыва, поэтому на стереограммах (рис. 3) количество векторов подвижек вдвое больше, чем обработанных механизмов.

Полученные ориентировки главных осей напряжений в основном согласуются между собой в обоих подходах (см. рис. 2). При некоторых расхождениях результатов интерпретации предпочтение было отдано первому подходу как менее формальному, позволяющему производить дифференциацию и анализ данных с учетом геологических и географических факторов.

4. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Анализ решений механизмов очагов землетрясений, локализованных в пределах Загроса, указывает на преобладание очагов, возникших в условиях субмеридионального и ЮЗ-СВ сжатия. По данным СПМТ, с субмеридиональным сжатием связаны 58 % очагов. При этом проявились преимущественно сдвиговый (25 %), взбросо- (4 %) и сбросо- (2 %) сдвиговый, а также взбросовый (27 %) деформационные режимы сейсмогенеза. Вторая группа очагов (35 % от общего количества) указывает на наличие обстановок ЮЗ-СВ сжатия. Возникновение сейсмогенных разрывов в очагах этих землетрясений происходило главным образом в условиях взбросового (20 %), сдвигового (9 %), взбрососдвигового (4 %) и сбросо-взбросового (2 %) деформационных режимов [Volfman, 2013]. Интерпретация по программе Win TENSOR дает практически равное количественное соотношение обстановок субмеридионального и ЮЗ-СВ сжатия: 45 и 43 %. Расхождение соотношений по двум методам обусловлено разным количеством использованных решений механизмов.

Группа очагов достаточно сильных землетрясений (4 %) отражает условия ЮВ-СЗ сжатия и сдвигового деформационного режима. На нее обращено внимание потому, что очаги локализованы в пределах системы



Рис. 3. Стереограммы векторов подвижек и осей напряжений 1–4-го типов сейсмогенеза (номера типов указаны в правых верхних углах), построенные с помощью программы Win TENSOR.

Оси напряжений: 1 – σ_1 , 2 – σ_3 , 3 – σ_2 ; 4 – генеральное направление сжатия; 5 – генеральное направление растяжения. Относительное количество (% от 100 механизмов) векторов подвижек, отражающих типы сейсмогенеза: 1-й – 32, 2-й – 13, 3-й – 32, 4-й – 11.

Fig. 3. Stereograms of displacement vectors and stress axes of seismogenesis types 1 to 4 (type numbers are shown in top right corners) as per Win TENSOR.

Stress axes: $1 - \sigma_1$, $2 - \sigma_3$, $3 - \sigma_2$; 4 - general strike of compression; 5 - general strike of extension. Relative number (percentage from 100 mechanisms) of displacement vectors that reflect types of seismogenesis: Type 1 - 32, Type 2 - 13, Type 3 - 32, and Type - 11.

широтных разломов, продолжающих на востоке Северо-Анатолийскую зону правого сдвига, и с некоторыми из них связаны катастрофические землетрясения.

Небольшое количество (4 %) очагов землетрясений (часть из которых имели разрушительные последствия) отражает условия растяжения, а также субширотного сжатия (3 %). Эти очаги распределены на всей территории хаотически и представляют собой, скорее всего, локальные тектонические подвижки, поэтому детально не анализировались.

Очаги землетрясений, отражающие разные обстановки сейсмогенеза, в пределах изучаемой территории распределены группами, и в большинстве случаев представилось возможным локализовать участки размещения очагов, характеризуемых однотипными параметрами, то есть выделить сейсмогенные зоны, структурно-кинематическая характеристика которых определяется параметрами соответствующих стереографических моделей типов сейсмогенеза (рис. 4, 5).

Большинство имеющихся решений механизмов очагов отражает наличие пяти типов сейсмогенеза, которые формируют сейсмотектонический климат региона:

Субмеридиональное субгоризонтальное сжатие:

1-й тип: СПМТ – 31 очаг; деформационные режимы – сдвиговый, взбросо- и сбросо-сдвиговый (см. рис. 4); КМТ – 19 очагов; деформационные режимы – сдвиговый, взбросо-сдвиговый;

2-й тип: СПМТ – 27 очагов; деформационный режим – взбросовый (см. рис. 4); КМТ – 10 очагов; деформационный режим – взбросовый.

ЮЗ-СВ субгоризонтальное сжатие:

3-й тип: СПМТ – 22 очага; деформационный режим



Рис. 4. Стереографические модели сейсмогенеза 1 и 2-го типов (стереограммы) и особенности площадного распределения соответствующих очагов землетрясений (схемы), сформировавшихся в обстановке субмеридионального субгоризонтального сжатия.

На схемах: 1 – очаги землетрясений (а – 1-го типа, б – 2-го типа, в – иных типов); 2 – сейсмогенные разрывы (а – сдвиги, б – взбросы и надвиги, бергштрихи – в направлении падения разрывов); 3 – границы сейсмогенных зон: *а* – 1-го типа, *б* – 2-го типа; *на стереограммах*: 4 – проекции главных осей напряжений: максимального (а), минимального (б) сжатия, промежуточной (в); 5 – проекции плоскостей главных осей нормальных напряжений; 6 – проекции плоскостей вероятных сейсмогенных разрывов (*L*, *L*['], *R* – типы сколов) и их структурно-кинематическая идентификация; 7 – направление перемещения *лежачего* крыла разрыва; затенены – квадранты растяжения; 8 – направление регионального сжатия. Здесь и далее – все построения на нижней полусфере. Врезка в левом нижнем углу – магнитуды землетрясений.

Fig. 4. Stereographic models of Type 1 and Type 2 seismogenesis (stereograms), and specific features of spatial distribution of corresponding earthquake foci (schemes) which formed under submeridional subhorizontal compression.

Schemes: 1 – earthquake foci (a – Type 1, 6 – Type 2, B – other types); 2 – seismogenic faults (a – shear faults, 6 – thrusts and overthrusts, hachure – direction of fault dip); 3 – boundaries of seismogenic zones: a – Type 1, 6 – Type 2; *stereograms*: 4 – projections of major stress axes: maximum (a), minimum (6) compression, intermediate (B); 5 – projections of major normal stress axes; 6 – projections of planes of inferred seismogenic faults (*L*, *L*', *R* – types of shear) and their structural and kinematical indicators; 7 – displacement direction of the *lying* wing of the fault; quadrants of extension are shaded; 8 – direction of regional compression. *All the reconstructions are done in the lower hemisphere (the same refers to the figures below).* The insert in the bottom left corner – magnitudes of earthquakes.



Рис. 5. Стереографические модели сейсмогенеза 3 и 4-го типов (стереограммы) и особенности площадного распределения соответствующих очагов землетрясений (схемы), сформировавшихся в обстановке CB-ЮЗ субгоризонтального сжатия.

На схемах: кружки – очаги землетрясений (синие – 3-го типа, красные – 4-го типа, незалитые – иных типов). Остальные условные обозначения на рис. 4.

Fig. 5. Stereographic models of Type 3 and Type 4 seismogenesis (stereograms), and specific features of spatial distribution of corresponding earthquake foci (schemes) which formed under NE-SW subhorizontal compression.

In the *schemes*, circles show earthquake foci (blue – Type 3, red – Type 4, white – other types). See also the legend for Fig.4.

 – взбросовый (рис. 5); КМТ – 26 очагов; деформационный режим – взбросовый;

4-й тип: СПМТ – 13 очагов; деформационные режимы – сдвиговый, взбросо- и сбросо-сдвиговый (рис. 5); КМТ – 15 очагов; деформационный режим – сдвиговый.

ЮВ-СЗ субгоризонтальное сжатие:

5-й тип: СПМТ – 4 очага; деформационный режим – сдвиговый (рис. 5); КМТ – 12 очагов; деформационный режим – сдвиговый.

5. Особенности проявления сейсмогенеза 1-го и 2-го типа

Стереографическая модель сейсмогенеза 1-го типа представлена сейсмогенными разрывами в виде крутопадающих правых сдвигов типа L- и R-сколов с простираниями, соответственно, 305° и 328°, а также L'-сколов с простиранием 35–40° (см. рис. 4). Ориентировки главных осей напряжений реконструированного регионального поля составляют: $P=172\angle 2^\circ$ и T=82∠3° (нижняя полусфера). Реализация второй нодальной плоскости (*L*´-скола) как левого сдвига не противоречит полученному тензору напряжений и вполне очевидна, особенно на СЗ фланге системы Загрос – в области ее пересечения с зоной Восточно-Анатолийского разлома СВ простирания.

Очаги землетрясений 1-го типа локализованы (хоть и неравномерно) вдоль внешней части СВ фланга Аравийского Синтаксиса, образуя протяженную (более 2000 км) правосдвиговую сейсмогенную зону СЗ простирания. Разрывы в этих очагах представлены преимущественно *R*-сколами, в меньшей мере проявлены *L*-сколы. Почти такое же количество очагов 1-го типа расположено, как уже отмечалось, в области сочленения системы Загрос с зонами Анатолийских разломов.

Выборка землетрясений 1-го типа содержит наибольшее количество (шесть) катастрофических событий с $M \ge 6.0$, вызвавших разрушения зданий и сооружений и повлекших многочисленные человеческие жертвы. Часть этих землетрясений локализована в области сочленения системы Загрос с зоной Восточно-Анатолийского разлома: 24.11.1976 г. (M=6.1),30.10.1983 г. (М=6.9), 08.03.2010 г. (М=6.1). По кинематическим характеристикам механизмов очагов и особенностям их местоположения сейсмогенный разрыв первого из них идентифицируется как L-скол общезагросского простирания. В двух других очагах равновероятно возникновение как L-сколов C3 простирания, так и L'-сколов СВ ориентировки. Три катастрофических землетрясения – 03.05.1989 г. (М=6.2), 01.03.1994 г. (М=6.0), 06.05.1999 г. (М=6.3) - произошли на ЮВ фланге системы Загрос, при этом параметры сейсмогенных разрывов в очагах позволяют идентифицировать их как R-сколы общезагросского C3 простирания.

Группа взбросовых землетрясений 2-го типа сейсмогенеза аппроксимирована моделью, которая также отражает обстановку субмеридионального субгоризонтального сжатия (P=186∠8°, T=50∠78°, N=277∠8°), но с субвертикально ориентированной осью Т, чем обусловлено возникновение в очагах субширотных разрывов взбросового типа с южным падением по типу *L*- и *R*-сколов. *L*-сколы, имеющие более крутой угол падения (193∠54°), характеризуются как взбросы, а более пологие *R*-сколы (202∠28°) – как надвиги на стереограмме (рис. 4). В этой же модели нодальная плоскость с северным падением соответствует положению *L*'-сколов, формирование которых в указанных условиях также вполне вероятно.

Указанные очаги локализованы в пределах нескольких относительно узких непротяженных зон субширотной ориентировки, пространственно приуроченных (примыкающих) к сейсмогенной зоне 1-го типа и косопоперечных по отношению к ней (см. рис. 4). Относительно недавно в их пределах произошло три катастрофических события с $M \ge 6.0$ (22.06.2002 г., M=6.2; 27.11.2005 г. с M=6.1 и самое крупное землетрясение в Турции за последние годы – 23.11.2011 г., *М*=7.1), повлекших многочисленные жертвы и разрушения.

6. Особенности проявления сейсмогенеза 3- и 4-го типа.

Значительная часть землетрясений Загроса, очаги которых характеризуются взбросовыми деформационными режимами, формировалась в условиях ЮЗ–СВ сжатия (3-й mun). Параметры очагов этого типа образуют вполне компактные скопления на стереограмме (см. рис. 2) и соответствуют одной стереографической модели. Ориентировки реконструированных осей Р и Т модели составляют $39\angle12^\circ$ и $266\angle72^\circ$. Одна из вероятных плоскостей сейсмогенного разрыва представляет собой левый сдвиго-надвиг (надвиг с небольшой левосдвиговой составляющей), падающий в юго-западном направлении ($205\angle31^\circ$), вторая идентифицируется как взброс противоположного падения ($51\angle58^\circ$).

Полученной модели удовлетворяют 22 % всех очагов землетрясений. Они локализованы на юго-восточном фланге и в центральной части изучаемой геоструктуры (схема на рис. 5). Так же, как и очаги 1-го типа, землетрясения 3-го типа относительно неравномерно распределены вдоль зоны северо-западного простирания, элементы залегания и структурно-кинематическая характеристика которой определяются по типу нодальных плоскостей, отождествляемых с сейсмогенными разрывами. Хотя простирание обеих плоскостей согласуется с ориентировкой сейсмогенной зоны, в случаях однонаправленных разрывов в очаге наиболее вероятной является активизация взбросов северо-восточного падения, пространственно-кинематические параметры которых соответствуют положению зоны палеосубдукции Аравийской плиты под Евразийский континент. При этом сдвиговая зона Загроса (1-го типа) как бы «подпирает» последнюю со стороны Евразии, ограничивая область распространения взбросовых очагов пределами внутреннего (по отношению к Аравии) северо-восточного края Аравийского синтаксиса.

Из числа землетрясений данного типа только одно характеризуется магнитудой M=6.0. Оно локализовано на юго-восточном фланге системы Загрос; сейсмогенный разрыв в очаге идентифицирован как взброс общезагросского простирания с падением на северовосток, что согласуется с пространственно-кинематическими характеристиками остальных очагов этого типа.

Основными элементами модели сейсмогенеза 4-го muna, происходившего в условиях ЮЗ–СВ сжатия, являются крутопадающие левые сдвиги типа L- и R-сколов с простираниями, соответственно, $\approx 90^{\circ}$ и $\approx 70^{\circ}$ (стереограмма на рис. 5). Ориентировка осей региональных полей напряжений составляет: $P=42\angle 6^{\circ}$,

Т=135∠14°. В этих же условиях возможно образование и правосдвиговых сейсмогенных разрывов меридиональной ориентировки – L′-сколов. Однако рассматриваемые очаги локализованы в основном в пределах относительно узкой зоны субширотного простирания (схема на рис. 5), поэтому наиболее вероятно, что сейсмогенным разрывам отвечают нодальные плоскости, ориентированные именно в широтном направлении. В количественном отношении *L*- и *R*-сколы представлены примерно одинаково, однако единственное землетрясение данного типа с магнитудой, превышающей 6.0 (11.08.1988 г., *M*=6.1), реализовалось по типу левосдвигового *R*-скола.

Усложняющими данную модель сейсмогенеза элементами можно считать единичные землетрясения взбросо-сдвигового типа, сформировавшиеся в условиях ЮЗ–СВ сжатия, которые отражают локальные трансформации поля напряжений сдвигового типа.

7. ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ СЕЙСМОГЕНЕЗА 5-го типа

Землетрясений, возникших при сдвиговом деформационном режиме в условиях ЮВ-СЗ сжатия, немного. Первое из них (13.04.1998 г., *М*=4.8; Р=136∠14°, T=228∠8°, N=345∠74°, деформационный режим сдвиговый), случилось в области сочленения системы Загрос и зон Анатолийских разломов. Относительно недавно произошло еще три землетрясения подобного типа. Два из них (25.03.2004 г., М=5.0 и 28.03.2004 г., *М*=5.3) локализованы в непосредственной близости от очага 13.04.1998 г. и по решениям механизмов являются полным его аналогом: расхождения в их параметрах составляют всего несколько градусов. Это позволило указанные очаги отнести к одному – 5-му – типу сейсмогенеза. Параметры его модели составляют: Р=138∠12°, Т=230∠2°; одна из плоскостей (*L*-скол) представляет собой субвертикальный правый сдвиг широтного простирания, вторая (L'-скол) – субвертикальный левый сдвиг меридиональной ориентировки (на стереограмме рис. 6). Третье землетрясение (точнее, два толчка с *М*=6.5 и *М*=6.4, последовавшие один за другим с интервалом менее 10 минут) произошло 11.08.2012 г. в Северо-Западном Иране к востоку от предыдущих. Оно вызвало сильные разрушения; число жертв среди населения превысило 300 человек, более 2 тыс. человек получили ранения (http://www.ceme. gsras.ru/cgi-bin/info_quake.pl). Решение механизма этого очага (Р=308∠24°, Т=48∠21°; правый сдвиг широтной ориентировки) также можно считать вполне удовлетворяющим условиям полученной модели сейсмогенеза 5-го типа. По-видимому, во всех этих случаях сейсмогенным разрывам отвечают плоскости широтного простирания, которые можно рассматривать как активизировавшиеся фрагменты Северо-Анатолийского разлома.

8. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Таким образом, 97 % имеющихся решений механизмов очагов исследуемой территории можно аппроксимировать пятью стереографическими моделями (рис. 4, 5, 7). Эти модели отражают основные деформационные режимы и кинематические обстановки сейсмогенного разрывообразования в регионе и являются критериями для структурно-кинематической идентификации сейсмогенных разрывов и зон, в пределах которых локализованы очаги определенного типа.

Построенные стереографические модели основных типов сейсмогенеза в пределах системы Загрос характеризуют главным образом две доминирующие кинематические обстановки – субмеридионального и ЮЗ-СВ сжатия, обусловленные геодинамическими особенностями изучаемой территории. Первая из этих обстановок отражает продолжающееся в настоящее время движение Аравийской плиты в северном направлении. При этом пограничные с ней структуры испытывают, в первую очередь, сдвиговые деформации: на западе (система разломов Акаба – Мертвое море) – левые сдвиги, на востоке (Загрос) – правые. Возникновение условий ЮЗ-СВ сжатия вызвано процессами дивергенции в пределах Красноморского рифта, вследствие чего Аравийский полуостров перманентно оказывает давление на Евразию в СВ направлении.

Двойственная геодинамическая природа системы Загрос (правосдвиговая и палеосубдукционная – взбросо-надвиговая или шарьяжная), нашедшая отражение в палеогеодинамических реконструкциях и геолого-тектонических построениях [Zonenshain et al., 1987; Bazhenov, Burtman, 1990; и др.], подтверждается и характером регионального сейсмогенеза. Проявление указанных обстановок в виде дискретных событий - землетрясений того или иного типа - свидетельствует о том, что рассматриваемая геодинамическая система постоянно находится в состоянии неустойчивого равновесия, подвергаясь сжатию в двух направлениях. Ее современные деформации, в частности сейсмогенные разрывы, как правило, отражают не суммарное воздействие указанных типов региональных полей напряжений как некоего результирующего поля, а поочередное преобладание напряжений одного типа поля над другим. Развертка сейсмических событий во времени (рис. 7) указывает на разный характер сейсмичности, обусловленной субмеридиональным и ЮЗ-СВ сжатием. В первом случае наблюдается относительно равномерное распределение землетрясений во времени и вспышка событий в 1992–1994 гг. Во втором – отчетливо видно затухание событий в 1983-1984 гг. и более мощный всплеск в 1988–1989 гг. Разный характер и смещение во времени между максимумами событий (равное 4-5 годам) подтверждают вывод о различных причинах субмеридионального и ЮЗ-СВ сжатия.

Попарное комбинаторное сочетание сдвиговых и



Рис. 6. Временная развертка деформационных режимов субмеридионального (залитые кружки) и ЮЗ-СВ сжатия. Данные, взятые из каталога, сглажены путем осреднения.

Fig. 6. Time range of deformation regimes of submeridional (filled circles) and SW-NE compression. The data from the catalogue are averaged.

взбросовых деформационных режимов при одном направлении сжатия характерно не только для района Загроса, но и для других изученных авторами складчатых систем альпийского пояса – Карпат и Горного Крыма. Сдвиги, как правило, сопровождают все этапы развития складчатой системы – доскладчатый, соскладчатый и послескладчатый, формируясь по краям перемещающихся массивов. Взбросы и надвиги характерны в основном для коротких периодов формирования горного рельефа и возникают также при сжатии уже сформированной горной системы. Складчатая система Загрос имеет преимущественное СЗ простирание, поэтому ЮЗ-СВ сжатие должно сопровождаться более выраженным взбросовым деформационным режимом, чем субмеридиональное. Это подтверждается и механизмами очагов землетрясений: в условиях субмеридионального сжатия сдвиговый и взбросовый режимы проявляются в количественном отношении приблизительно одинаково, тогда как в условиях ЮЗ-СВ сжатия взбросовый режим существенно превалирует над сдвиговым.

Анализ пространственного распределения основных типов сейсмогенеза показал, что соответствующие этим типам очаги землетрясений локализованы в пределах зон разной ориентировки и протяженности. Очаги 1-го типа неравномерно распределены вдоль внешней части северо-восточного фланга Аравийского Синтаксиса в виде протяженной правосдвиговой зоны северо-западного простирания, а также в области сочленения системы Загрос с зонами Анатолийских разломов, где равновероятна реализация сейсмогенных разрывов как общезагросского направления, так и отвечающих ориентировкам Восточно- и Северо-Анатолийской зон. Очаги 2-го типа размещены в тех же районах, но субперпендикулярно оси сжатия и косопоперечно по отношению к первым. Взбросовый деформационный режим в этих очагах связан, скорее всего, с тем, что ориентация оси сжатия отличается от предыдущей на 14° в сторону более крутого угла по отношению к направлению складчатости Загроса. На изученном отрезке времени субмеридиональная ось сжатия, по-видимому, неоднократно изменяла свою ориентировку со 172° на 186°, так как очаги 1-го и 2-го типа возникали, чередуясь, почти ежегодно (кроме отрезка времени между 1989 и 1992 гг.). Протяженность сейсмогенных зон 2-го типа меньше, и они не выходят за пределы системы Загрос. Вероятно, некоторые из них являются фрагментами зон разломов, секущих эту систему, однако сейсмичность на их флангах проявлена относительно слабо и концентрируется главным образом в пределах самой системы.

Пространственно-кинематические особенности проявлений сейсмогенеза 3-го типа, локализованных вдоль зоны палеосубдукции Аравийской плиты под Евразийский континент, свидетельствуют о периодически продолжающемся в настоящее время поддвиге



Рис. 7. Карта юго-восточной части Циркумчерноморского региона и стереографическая модель 5-го типа сейсмогенеза.

Зоны разломов (цифры в квадратах): 1 – Центрально-Черноморская, 2 – Северо-Анатолийская, 3 – Восточно-Анатолийская, 4 – Северовосточно-Анатолийская. Плиты и микроплиты (границы показаны контурами с зубцами): АрП – Аравийская, ВЕП – Восточно-Европейская, АнМП – Анатолийская, ВЧМП – Восточно-Черноморская. Стрелки: большая черная – направление движения АрП, средняя синяя – направление давления северной части системы Загрос, малые синие – оси субгоризонтального сжатия в стереографической модели 5-го типа сейсмогенеза, красная – направление нажима ВЧМП на Крымский полуостров.

Fig. 7. The map of the south-eastern part of the Circum Black Sea, and the stereographic model of Type 5 seismogenesis.

Fault zones (numbers in circles): 1 – Central Black Sea, 2 – North Anatolian, 3 – East Anatolian, 4 – North-East Anatolian. Plates and microplates (boundaries are shown by indented contours): $Ap\Pi$ – Arabian, $BE\Pi$ – East European, $AHM\Pi$ – Anatolian, $BYM\Pi$ – East Black Sea. Arrows: big black – movement direction of the Arabian plate ($Ap\Pi$), medium-size blue – pressure direction of the Zagros system, small-size blue – axes of subhorizontal compression in the stereographic model of Type 5 seismogenesis, red – direction of pushing of the East Black Sea microplate onto the Crimea peninsula.

первого из этих сегментов тектоносферы под другой. Очаги 4-го типа образуют несколько относительно узких непротяженных зон субширотной ориентировки, пространственно приуроченных к сейсмогенным зонам 1-го и 3-го типа и косопоперечных по отношению к ним. Таким образом, упорядоченный характер распределения землетрясений разных типов позволяет рассматривать полученные стереографические модели сейсмогенеза в качестве структурно-кинематических моделей соответствующих сейсмогенных зон. Отметим, что очаги землетрясений, сформировавшихся в условиях субмеридионального сжатия (1-го и 2-го типа), как в количественном выражении, так и с точки зрения их энергетического потенциала, превалируют над очагами иных (3–5-го) типов. Их количество в анализируемой выборке составляет более 68 %, и именно они характеризуются предельными для изучаемого региона магнитудами: в 10 землетрясениях этих типов значения магнитуд превышают M=6.0 (достигая M=7.1), в то время как предельные магнитуды очагов 3-го и 4-го типа не превышают величин *M*=6.0–6.1 и проявляются менее часто (всего два события).

С геодинамической точки зрения интересен 5-й тип сейсмогенеза. Очаги этого типа сосредоточены в самой северной части системы Загрос между 38° и 40° с.ш. и не фиксируются в других ее местах. Однако еще севернее – в Горном Крыму и Северном Причерноморье – напряжения ЮВ-СЗ сжатия устанавливаются повсеместно как по тектонофизическим, так и по сейсмологическим данным [Pustovitenko, 2002; Gintov, 2005; Volfman et al., 2012; Murovskaya, 2012] и объясняются давлением Восточно-Черноморской микроплиты на Крым с ЮВ. На рис. 7 видно, что движение Аравийской плиты на север, в сочетании с кинематикой системы Анатолийских зон разломов, создает субширотные секторы растяжения и субмеридиональные секторы сжатия, а в сочетании с формой Восточно-Черноморской микроплиты вызывает давление последней на Кавказский регион в направлении СВ и на Крым в направлении СЗ. Предполагается также ограниченная субдукция этой микроплиты под Кавказ и некоторое ее поддвигание под Восточный Крым [Volfman et al.,

2004; Gintov, 2005]. Можно утверждать, что установленные сейсмогенные зоны 5-го типа отражают сложную картину взаимодействия северного края Аравийской плиты с окружающими микроплитами.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенная тектонофизическая интерпретация сейсмологических данных (механизмов очагов землетрясений) позволяет дополнить их некоторыми новыми параметрами и сведениями – типами деформационных режимов, направлениями подвижек, более точным выбором «рабочих» нодальных плоскостей, характером связи с известными разрывными структурами – и, главное, представить объективно обобщенную картину региональных полей напряжений, которая отражает направление действия основных тектонических сил в регионе. В конечном итоге это приближает исследователей к познанию истории геодинамического развития Циркумчерноморского региона в целом.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Bazhenov M.L., Burtman V.S., 1990. Structural arcs of the alpine belt: Carpathians Caucasus Pamir. Nauka Publishing House, Moscow, 167 p. (in Russian) [Баженов М.Л., Буртман В.С. Структурные дуги альпийского пояса: Карпаты Кавказ Памир. М.: Наука, 1990. 167 с.].
- *Delvaux D., Sperner B.,* 2003. New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. In: Nieuwland D.A. (Ed.) New insights into structural interpretation and modelling. *Geological Society, London, Special Publications*, V. 212, p. 75–100. http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.212.01.06.
- *Gintov O.B.*, 2005. Field Tectonophysics and Its Using by Studying the Deformations of the Earth's Crust of Ukraine. *Fenix Publishing House*, Kiev, 572 р. (in Russian) [*Гинтов О.Б.* Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: Феникс, 2005. 572 с.].
- *Gushchenko O.I.*, 1973. Analysis of orientations of shear displacements and their tectonophysical interpretation by reconstruction of paleostress fields. *Doklady AN SSSR* 210 (2), 331–334 (in Russian) [*Гущенко О.И*. Анализ следов тектонических смещений и их тектонофизическая интерпретация в ходе реконструкции палеонапряжений // Доклады АН СССР. 1973. Т. 210. № 2. С. 331–334].
- *Gushchenko O.I.*, 1979. The method of kinematic analysis of the fractures in the reconstruction of tectonic stress fields. In: Stress and strain fields in the lithosphere. Nauka Publishing House, Moscow, p. 7–25 (in Russian) [*Гущенко О.И.* Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука, 1979. С. 7–25].
- Gushchenko O.I., Mostryukov A.O., Petrov V.A., 1991. The structure of the regional stress field of the earth crust of the Eastern Mediterranean active belt. Doklady AN SSSR 312 (4), 830–835 (in Russian) [Гущенко О.И., Мострюков А.О., Петров В.А. Структура поля современного регионального напряжения сейсмоактивных зон земной коры восточной части Средиземноморского активного пояса // Доклады АН СССР. 1991. Т. 312. № 4. С. 830–835].
- *Khain V.E.*, 2001. Tectonics of Continents and Oceans. Nauchny Mir Publishing House, Moscow, 606 p. (in Russian) [*Хаин В.Е.* Тектоника континентов и океанов (год 2000). М.: Научный мир, 2001. 606 с.].
- *McKenzie D.P.*, 1969. The relation between fault plane solutions for earthquakes and the directions of the principal stresses. *Bulletin of the Seismological Society of America* 59 (2), 591–602.
- *Murovskaya A.V.*, 2012. Stress-strained state of the Western Mountain Crimea in Oligocene-Quaternary according to tectonophysical data. *Geophysical Journal* 34 (2), 109–119 (in Russian) [*Муровская А.В.* Напряженно-деформированное состояние Западного Горного Крыма в олигоцен-четвертичное время по тектонофизическим данным // *Геофизический журнал.* 2012. Т. 34. № 2. С. 109–119].
- Novik N.N., Volfman Y.M., 1997. Evolution of planetary stress fields within seismically active regions of Ukraine, the latest breaks and discontinuous shift. In: Geodynamics Crimean Black Sea region. Simferopol, p. 81–90 (in Russian) [*Новик Н.Н., Вольфман Ю.М.* Эволюция планетарных полей напряжений в пределах сейсмоактивных регионов Украины, новейшие разрывы и разрывные смещения // Геодинамика Крымско-Черноморского региона. Симферополь, 1997. С. 81–90].

Y.M. Volfman et al.: Tectonophysical interpretation of earthquake focal mechanisms...

- Pustovitenko B.G., 2002. Mechanisms of sensible earthquakes of Crimea-Black Sea region during last 20 years. In: Seismological Bulletin of Ukraine for 2000th. IG NANU, KES, Sevastopol, p. 59–64 (in Russian). [Пустовитенко Б.Г. Механизм очагов ощутимых землетрясений Крымско-Черноморского региона последних 20 лет // Сейсмологический бюллетень Украины за 2000 год. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2002. С. 59–64].
- Rebetsky Y.L., 2003. Stress-strained state and mechanical properties of natural massifs according to the mechanisms of earthquake centres and structural-kinematic characteristics of cracks. Synopsis of PhD Thesis (Candidate of Physics and Mathematics), Moscow, 54 p. (in Russian) [*Ребецкий Ю.Л.* Напряженно-деформированное состояние и механические свойства природных массивов по данным о механизмах очагов землетрясений и структурно-кинематическим характеристикам трещин: Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. М.: ОИФЗ, 2003. 54 с.].
- *Rebetsky Y.L.*, 2005. Evaluation of the relative stress values the second stage of reconstruction according to discontinuous shifts data. *Geophysical Journal* 27 (1), 20–38 (in Russian) [*Ребецкий Ю.Л.* Оценка относительных величин напряжений второй этап реконструкции по данным о разрывных смещениях // Геофизический журнал. 2005. Т. 27. № 1. С. 20–38].
- Sherman S.I., Gintov O.B., Bornyakov S.A., Isai V.M., Kobylyansky V.B., 1988. The nature of faulting in the consolidated crust and modeling of shear zones. *Geophysical Journal* 10 (1), 13–21 (in Russian) [Шерман С.И., Гинтов О.Б., Борняков С.А., Исай В.М., Кобылянский В.Б. Характер разломообразования в консолидированной коре и моделирование зон скалывания // Геофизический журнал. 1988. Т. 10. № 1. С. 13–21].
- *Stoyanov S.S.*, 1977. The mechanism of formation of fault zones. Nedra Publishing House, Moscow, 144 p. (in Russian) [*Стоянов С.С.* Механизм формирования разрывных зон. М.: Недра, 1977. 144 с.].
- Volfman Y.M., 2013. Structural and kinematic identification of seismogenic zones of the Zagros system (according to mechanisms decisions of earthquake centres). *Geophysical Journal* 35 (2), 38–64 (in Russian) [Вольфман Ю.М. Структурнокинематическая идентификация сейсмогенных зон системы Загроса (по данным решений механизмов очагов землетрясений) // Геофизический журнал. 2013. Т. 35. № 2. С. 38–64].
- Volfman Y.M., Gintov O.B., Ostanin A.M., Kolesnikova E.Y., Lazarenko O.E., Pryadun M.L., 2004. Peculiarities of tectonophysical interpretation of thrust structures of the South-western and Eastern Crimea. In: Proceedings of the 8-th International Scientific and Practical Conference "Oil and Gas of Ukraine 2004", V. 1. Kiev, p. 57–58 (in Russian) [Вольфман Ю.М., Гинтов О.Б., Останин А.М., Колесникова Е.Я., Лазаренко О.Е., Прядун М.Л. Особенности тектонофизической интерпретации надвиговых структур Юго-Западного и Восточного Крыма // Материалы 8-й Международной научно-практической конференции «Нефть и газ Украины – 2004». Т. 1. Київ, 2004. С. 57–58].
- Volfman Y.M., Kolesnikova E.Y., Pustovitenko A.A., 2012. Kinematic conditions of tectonic faulting and seismicity in the Crimean region. In: Seismology and geophysical studies in the seismic regions. Proceedings of the conference-seminar. "Spolom" Publishing House, L`viv, p. 33–36 (in Russian) [Вольфман Ю.М., Колесникова Е.Я., Пустовитенко А.А. Кинематические обстановки тектонического разрывообразования и сейсмичности в Крымском регионе // Сейсмологічні та геофізичні дослідження в сейсмоактивних регіонах: Матеріали наукової конференції-семінару. Львів: В-во «СПОЛОМ», 2012. С. 33–36].
- Vvedenskaya A.V., 1969. Study of stresses and displacements in earthquake centres using the theory of dislocations. Nauka Publishing House, Moscow, 136 p. (in Russian) [Введенская А.В. Исследования напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. 136 с.].
- *Yunga S.L.*, 1996. Seismotectonic deformation of the Northern Eurasian fold belts in the neotectonic phase. *Izvestiya*, *Physics of the Solid Earth* 32 (12), 955–974.
- Zonenshain L.P., Derkur J., Kazmin V.G., Rick L.-E., Knipper A.L., Le Pichon K., Sbortshikov I.M., Grandzhake S., Pechersky M.D., Zheyssan J., Lepvrier S., Savostin L.A., Sorokhtin O.G., Boelen J., Sibue J.-C., Bazhenov M.L., Westphal M.V., Lauer J.P., Biju-Duval B., 1987. The evolution of the Tethys. In: Story of the Tethys. Institute of Geological Sciences of AS of the USSR, Moscow, p. 104–115 (in Russian) [Зоненшайн Л.П., Деркур Ж., Казьмин В.Г., Рику Л.-Э., Книппер А.Л., Ле Пишон К., Сборициков И.М., Гранджаке С., Печерский Д.М., Жейссан Ж., Лепвриер С., Савостин Л.А., Сорохтин О.Г., Булен Ж., Сибуэ Ж.-К., Баженов М.Л., Вестфаль М.В., Лауэр Ж.П., Бижу-Дюваль Б. Эволюция Тетиса // История океана Тетис. М.: Институт геологических наук АН СССР, 1987. С. 104–115].



Вольфман Юрий Михайлович, канд. геол.-мин. наук, с.н.с., заведующий отделом сейсмологии Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины Тел.: +38(0652)620537, +38(050)1905404; ⊠ e-mail: seism.volf@gmail.com

Volfman, Yuriy M., Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher, Head of the Seismology Division S.I. Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine Tel.: +38(0652)620537, +38(050)1905404; ⊠ e-mail: seism.volf@gmail.com



Гинтов Олег Борисович, член-корреспондент НАН Украины, докт. геол.-мин. наук, профессор, г.н.с. отдела тектонофизики Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины Тел.: +38(044)4240300; моб. +38(097)1720971; e-mail: oleg.gintov@gmail.com

Gintov, Oleg B., Corresponding Member of NAS of Ukraine, Doctor of Geology and Mineralogy, professor, Chief Researcher of Division of Tectonophysics S.I. Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine Tel.: +38(044)4240300; mobile +38(097)1720971; e-mail: oleg.gintov@gmail.com



Колесникова Екатерина Яковлевна, инженер отдела сейсмологии Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины Тел.: +38(0652)620537; e-mail: seism.volf@gmail.com

Kolesnikova, Ekaterina Ya., Engineer, the Seismology Division S.I. Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine Tel.: +38(0652)620537; e-mail: seism.volf@gmail.com



Муровская Анна Валериевна, канд. геол.-мин. наук, м.н.с. отдела тектонофизики Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины Тел.: +38(044)4240300, моб. +38(098)5238820; e-mail: murovskaya@gmail.com

Murovskaya, Anna V., Candidate of Geology, Junior Researcher of Division of Tectonophysics S.I. Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine Tel.: +38(044)4240300, mobile +38(098)5238820; e-mail: murovskaya@gmail.com

PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2014 VOLUME 5 ISSUE 1 PAGES 321-326

http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0130



ISSN 2078-502X

THE 9TH INTERNATIONAL WORKSHOP "PHYSICS AND FORECASTING OF ROCK DESTRUCTION"

V. V. Ruzhich¹, A. D. Zavyalov², A. A. Dobrynina¹, S. A. Bornyakov¹

¹ Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

² Schmidt Institute of the Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia

Abstract: The 9th International Workshop "Physics and Forecasting of Rock Destruction" was held in the Institute of the Earth's Crust, SB RAS, in Irkutsk on 02–06 September 2013. The article reviews the main events of this scientific forum and briefly describes its discussion results concerning prediction / forecasting of dynamic destruction of rocks due to loading in various regimes and scales. Also reviewed are options for improvement of forecast methods and their application to practice.

Key words: physics and mechanics of fracture, earthquake prediction / forecasting, rock bump, earthquake precursors, modeling / simulation, physical experiments.

Recommended by K.Zh. Seminsky

Citation: *Ruzhich V.V., Zavyalov A.D., Dobrynina A.A., Bornyakov S.A.* 2014. The 9th International workshop "Physics and forecasting of rock destruction". *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (1), 321–326. doi:10.5800/GT-2014-5-1-0130.

IX МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКОЛА-СЕМИНАР «ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД»

В. В. Ружич¹, А. Д. Завьялов², А. А. Добрынина¹, С. А. Борняков¹

¹ Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Аннотация: В кратком сообщении представлена хроника проведения IX международной школы-семинара «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород», состоявшейся в Иркутске, в Институте земной коры CO PAH, 2–6 сентября 2013 г. Освещаются основные события этого представительного форума ученых России и некоторых стран зарубежья. Сформулированы главные итоги 5-дневного обсуждения разнообразных насущных вопросов, связанных с прогнозированием явлений динамического разрушения в массивах горных пород при различных режимах и на разных масштабных уровнях. Рассмотрены пути совершенствования методов прогноза и практического применения результатов.

Ключевые слова: физика и механика разрушения, прогноз землетрясений, горные удары, предвестники землетрясений, моделирование, физические эксперименты.

V.V. Ruzhich et al.: The 9th International workshop "Physics and forecasting of rock destruction"...

Первая школа-семинар «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород» состоялась в 1982 г. в г. Боржоми (Грузинская ССР). Со временем менялся ее статус: сначала это было всесоюзное мероприятие, затем всероссийское, а с 2001 г. – международное. Традиционно работой всех школ-семинаров руководил Оргкомитет, возглавляемый сопредседателями Геннадием Александровичем Соболевым (членкорреспондент РАН, д.ф.-м.н., зав. отделением ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН) и Виктором Степановичем Куксенко (д.ф.-м.н., зав. лабораторией ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН). Важную организационную работу всегда выполняли ученые секретари школ: до 2003 г. – Елизавета Николаевна Седова (к.ф.-м.н., научный сотрудник Межведомственного совета по сейсмологии и сейсмостойкому строительству, а затем Сейсмологического центра Института геоэкологии РАН), а с 2003 г. – Алексей Дмитриевич Завьялов (д.ф.-м.н., зав. лабораторией ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН). Одним из достоинств проведения подобных школ-семинаров, особенно для молодого поколения ученых, следует считать возможность неформального общения участников, в том числе и с ведущими специалистами в области физики и прогнозирования разрушения горных пород.

Для проведения в 2013 г. IX международной школы-семинара в Иркутске (где, кстати, в 1988 г. уже проходило такое мероприятие) сопредседателями Оргкомитета также были избраны Г.А. Соболев и В.С. Куксенко. От принимающей стороны (ИЗК СО РАН) в состав Оргкомитета вошли: зам. председателя Оргкомитета, председатель локального оргкомитета В.В. Ружич (г.н.с., д.г.-м.н.); ученый секретарь – С.А. Борняков (с.н.с., к.г.-м.н.), а также секретарь программного оргкомитета А.А. Добрынина (м.н.с., к.г.-м.н.).

В работе школы-семинара приняли очное и заочное участие **175** ученых, представляющих **50** научных, производственных и образовательных учреждений России, а также стран ближнего и дальнего зарубежья – Украины, Казахстана, Кыргызстана, Таджикистана, Монголии, Вьетнама, Индии и США. На заседаниях



Фото 1. Интервью Геннадия Александровича Соболева по итогам проведения школы-семинара во время ознакомления со строением зоны Ангарского разлома на берегу Байкала.

Photo 1. Interview with Gennady A. Sobolev about results of the workshop. The photo is taken on the shore of Lake Baikal where the participants observed the Angarsky fault zone.



Фото 2. Посещение геодинамического полигона в п. Листвянка, где на плоскости зоны Ангарского разлома проводятся натурные эксперименты по изучению механизмов возникновения источников сейсмических колебаний.

Photo 2. Visit to the Listvyanka geodynamic monitoring ground wherein experiments are conducted in nature at the plane of the Angarsky fault zone in order to study mechanisms that can generate seismic vibration sources.

школы было заслушано 12 пленарных и 44 секционных доклада, из которых 10 были сделаны молодыми учеными. Стендовая секция была представлена 9 докладами. К началу работы совещания был издан 115-страничный сборник, в который вошли тезисы 102 заявленных докладов.

Первый день заседаний был посвящен пленарным докладам, тематика которых наиболее соответствовала направлению школы-семинара. Они проводились в формате лекций ведущих специалистов. Совещание открылось вступительным сообщением Г.А. Соболева о современном состоянии проблемы прогнозирования разрушения в геологической среде. Оно было продолжено его же докладом о триггерном механизме влияния больших тайфунов и землетрясений на инициацию других сильных землетрясений. Далее были представлены пленарные доклады-лекции ряда ведущих специалистов Российской академии наук: А.Д. Завьялова, С.И. Шермана, В.И. Веттегреня, В.В. Ружича, Г.Г. Кочаряна, Ю.П. Стефанова, С.Ц. Акопяна, Л.М. Богомолова, А.К. Юркова, В.И. Уткина, Е.Е. Дамаскинской.

В последующем работа школы-семинара проходила в рамках четырех секций, организованных в соответ-

ствии с проблематикой заявленных докладов и общей тематической направленностью мероприятия. По завершении программы заседаний каждой секции проводилось обсуждение представленных докладов и дискуссия по вопросам, связанным с их тематикой. Работа всех секций последовательно проходила в конференцзале института, что обеспечивало возможность присутствия участников совещания на всех заявленных докладах. Тематика секций приводится ниже.

Секция І. Модели, предвестники и результаты прогнозирования землетрясений. *Конвинеры*: Ю.Л. Ребецкий (ИФЗ РАН), Ю.П. Стефанов (ИФПМ СО РАН).

Секция II. Математическое и физическое моделирование разномасштабных деформаций геосреды. *Конвинеры*: В.А. Саньков (ИЗК СО РАН), В.А. Салтыков (КФ ГС РАН).

Секция III. Сейсмичность, напряженное состояние и разрывные структуры литосферы. *Конвинеры*: В.С. Имаев (ИЗК СО РАН), А.В. Коновалов (ИМГиГ ДВО РАН).

Секция IV. Мониторинг деформаций и связанных с ними процессов. *Конвинеры*: С.И. Шерман (ИЗК СО РАН), О.А. Хачай (ИГ УрО РАН).



Фото 3. Участники школы-семинара в день завершения заседаний в Институте земной коры.

Photo 3. Participants of the workshop on the final discussion day at the Institute of the Earth's Crust.

Пятого сентября под председательством Г.А. Соболева, А.Д. Завьялова и В.В. Ружича состоялось заседание Круглого стола, посвященное следующим трем важным темам:

1) проблемы и перспективы совершенствования прогноза землетрясений и горных ударов;

2) точность и значимость прогноза в снижении инженерно-сейсмического риска;

3) возможности совместного использования данных среднесрочного прогноза землетрясений в сочетании с применением техногенных управляющих воздействий на высоконапряженные геологические объекты для их безопасной разгрузки.

Помимо научных сотрудников в работе Круглого стола принимали участие также представители Главного управления МЧС Республики Бурятия, Иркутской области и корреспонденты краевых и федеральных средств массовой информации. В процессе активного обсуждения выступающие много внимания уделяли различным методам прогноза землетрясений, проблемам развития и совершенствования наблюдательных сетей, улучшения доступа к более детальным сведениям геофизического и сейсмического мониторинга в районах возникновения сильных землетрясений, а также более совершенной организации в Иркутске работы экспертного совета в рамках регионального центра прогноза землетрясений по Байкальскому региону - с его включением в межрегиональную сеть. Состоялось весьма оживленное обсуждение вопросов ответственности и объективности специалистов в области сейсмических прогнозов. В выступлении Г.А. Соболева подчеркивалось, что методы среднесрочного прогноза землетрясений, представленные учеными для практического использования, должны быть протестированы на степень их надежности и эффективности в соответствующих координационных прогностических центрах (см. "Operational earthquake forecasting. State of knowledge and guidelines for utilization // Annals of geophysics, 54, 4, 2011; doi:10.4401/ag-5350). В части, касающейся лиц, принимающих решения на уровне административных органов, указывалось и на их ответственность за принятие мер по обеспечению безопасности населения. Для успешного внедрения и практического использования данных вероятностного

среднесрочного прогноза подчеркивалась необходимость разработки соответствующих протоколов взаимодействия между учеными и администрацией сеймоактивных регионов с указанием перечней превентивных и спасательных мер, принимаемых до и после землетрясения.

Отметим наиболее важные выводы, вытекающие из работы школы-семинара.

В первую очередь, они касаются недостаточности достоверной информации о параметрах физико-механических процессов в зонах разломов на глубинах зарождения очагов будущих землетрясений. Для восполнения этого недостатка необходимо привлечение к исследованиям геофизиков и геологов, имеющих более полное представление о строении разломов, их формировании в условиях повышенных температур, давлений и флюидного насыщения. Все эти основополагающие параметры пока остаются за пределами внимания физиков, механиков и специалистов в области трибологии как быстро развивающейся науки о трении.

Становится очевидным, что методы численного моделирования без знания важнейших параметров разрушения породных массивов на глубине, а также применение методов физического моделирования только в лабораторных условиях на небольших образцах уже не могут способствовать эффективной ликвидации дефицита информации, необходимой для дальнейшего совершенствования методов сейсмического прогнозирования. Остаются неустановленными природа и параметры деформационно-волновых энергетических источников, действующих в твердой оболочке нашей планеты, под влиянием которых происходят изменения режимов неустойчивости в зонах разломов.

В итоге становится понятным, что для более точного прогноза землетрясений требуется, прежде всего, значительное расширение сети наблюдательных полигонов и создание новой аппаратурной базы, а также проведение крупномасштабных натурных испытаний и необходимых инструментальных измерений в тех сегментах разломов, где формируются современные опасные очаги землетрясений. Все это, соответственно, потребует значительного увеличения затрат на научные исследования.

В ходе обсуждения было отмечено, что любые достижения в прогнозе, который так и останется вероятностным, не позволят избежать огромного ущерба при будущих сейсмических катастрофах. Следовательно, не случайно все чаще и настойчивее поднимается вопрос о необходимости разработки методов техногенного управления деформациями в разломах, чтобы в существенной мере смягчить проявление губительных сейсмических воздействий в будущем. Этот путь не является фантастическим и уже может реализовываться в решении проблемы обеспечения безопасности горных ударов в глубоких выработках. Но совершенствование способа защиты от динамического разрушения в массивах горных пород путем упреждающих техногенных воздействий требует огромных усилий научных коллективов и, несомненно, должного финансирования. Кроме того, без скоординированного взаимодействия межгосударственных сообществ ученых и правительственной поддержки научных работ в этом направлении решить проблему эффективного противодействия природным и техногенным сейсмическим катастрофам не получится. Следует также согласиться с тем, что в ближайшей перспективе эта возможность остается неопределенной.

Шестого сентября, после завершения научных заседаний, в соответствии с программой совещания состоялся выезд большой группы ученых на геодинамический полигон, расположенный на байкальском побережье в районе истока р. Ангары, вблизи п. Листвянка. В ходе рабочей поездки участники были ознакомлены с геологическим строением зоны Ангарского сейсмоактивного разлома. Во время посещения самого полигона специалисты ИЗК СО РАН (В.В. Ружич, С.А. Борняков и Е.Н. Черных) ознакомили присутствующих с детальным устройством фрагмента Ангарского разлома, на котором проводятся натурные эксперименты по возбуждению микроземлетрясений при движении блока породы по шероховатой плоскости скольжения разлома.

В заключение Оргкомитет IX международной школы-семинара выражает благодарность всем ее участникам за активную работу, а также Отделению наук о Земле РАН и Российскому фонду фундаментальных исследований – за оказанную финансовую поддержку (проект № 13-05-06054). Сборник тезисов докладов IX международной школы-семинара можно загрузить с web-сайта Института земной коры СО РАН (http://crust.irk.ru/images/upload/newsfond153/396.pdf).



Ружич Валерий Васильевич, докт. геол.-мин. наук, г.н.с. Институт земной коры СО РАН 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия Тел. (3952)422776; ⊠ e-mail: ruzhich@crust.irk.ru

Ruzhich, Valery V., Doctor of Geology and Mineralogy, Chief Researcher Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS 128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia Tel. +7(3952)422776; ⊠ e-mail: ruzhich@crust.irk.ru

V.V. Ruzhich et al.: The 9th International workshop "Physics and forecasting of rock destruction"...



Завьялов Алексей Дмитриевич, докт. физ.-мат. наук Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН 123995, ГСП-5, Москва Д-242, ул. Большая Грузинская, 10, Россия e-mail: zavyalov@ifz.ru

Zavyalov, Aleksei D., Doctor of Physics and Mathematics Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS 10 Bol'shaya Gruzinskaya street, Moscow D-242 123995, GSP-5, Russia e-mail: zavyalov@ifz.ru



Добрынина Анна Александровна, канд. физ.-мат. наук Институт земной коры СО РАН 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия e-mail: dobrynina@crust.irk.ru

Dobrynina, Anna A., Candidate of Physics and Mathematics Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS 128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia e-mail: dobrynina@crust.irk.ru



Борняков Сергей Александрович, канд. геол.-мин. наук, с.н.с. Институт земной коры СО РАН 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия e-mail: bornyak@crust.irk.ru

Bornyakov, Sergei A., Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS 128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia e-mail: bornyak@crust.irk.ru