

**TECTONOPHYSICAL ZONING OF THE TIEN SHAN ACTIVE FAULTS – DETERMINISTIC STRONG EARTHQUAKE PREDICTION**

K.E. Abdrakhmatov¹, O.M. Beloslyudtsev², A.V. Vilayev³, A.T. Danabayeva², T.L. Ibragimova⁴, R.S. Ibragimov⁴, V.A. Ismailov⁴, A.Zh. Zhunusova², Z.A. Kalmeteva⁵, S.I. Kuzikov⁶, A.V. Marinin⁷, M.A. Mirzaev⁴, A.M. Muraliyev¹, Yu.L. Rebetsky⁷, N.A. Sycheva⁷, G.Ya. Khachikyan², R.A. Umurzakov⁸

¹ Institute of Seismology of the National Academy of Sciences of Kyrgyzstan, 7-8 Aaly Tokombaev St, Bishkek 720060, Kyrgyzstan

² National Scientific Center for Seismological Observations and Research, Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan, 75a Al-Farabi Ave, Almaty 050060, Kazakhstan

³ Institute of Ionosphere, Almaty 050020, Kazakhstan

⁴ Mavlyanov Institute of Seismology, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, 3 Zulfiyahonima St, Tashkent 100128, Uzbekistan

⁵ Central-Asian Institute for Applied Geosciences, 73-2 Timur Frunze St, Bishkek 720027, Kyrgyzstan

⁶ Research Station, Russian Academy of Science, Bishkek 720049, Kyrgyzstan

⁷ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia

⁸ Tashkent State Technical University, 2 Universitetskaya St, Tashkent 100095, Uzbekistan

ABSTRACT. The January 23, 2024 M7.0 Wushi earthquake (China) put an end to the period of strong earthquake quiescence that had lasted for about 33 years in the Tien Shan. The risk of occurrence of new strong earthquakes in the coming years has been discussed among scientists. As a result of the conference on the basis of RS RAS in Bishkek in 2024, a team of the Russian, Kyrgyz, Kazakh and Uzbek seismologists, geophysicists and tectonophysicists has been formed to collaborate on a study of seismic prediction in the Tien Shan to reach a new level of understanding of this problem and to obtain the possibility to solve it. In the last few decades, a large Tien Shan earthquake database has been compiled and catalogued involving not only place, time and intensity of an event but also earthquake focal mechanisms. For the last years, M.V. Gzovsky laboratory of tectonophysics, IPE RAS, dealt with the development of new approaches which allow the stresses, extracted from the seismological database, to be recalculated into the Coulomb stresses on active faults. The recalculation experience showed that the fault zones with high Coulomb stresses can also be distinguished as more intensive seismic regime areas. Those are areas along which there is an occurrence of earthquakes, both moderate to strong and catastrophic (retrospective prediction for the 2008 Wenchuan and 2023 Pazarcik earthquakes). Thus, it becomes possible to perform tectonophysical zoning of faults which can be considered as a long-term earthquake prediction. The joint research program also involves a new level of development of approach to moderate-term earthquake prediction as applied to certain faults.

KEYWORDS: earthquakes; focal mechanisms; stressed state; Coulomb stresses; geodynamic regime; active faults; hazardous fault segments; seismic hazard; earthquake prediction

FUNDING: The studies conducted by the Russian group into the development of new principles of hazardous fault segments zoning are supported on state assignment of the IPE RAS. The studies are also funded by the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Scientific Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under Program No. BR 24992763 and by the Institute of Seismology on a budgetary basis of the NAS KR.



EDN: KYJKFM

RESEARCH ARTICLE**Correspondence:** Yuri L. Rebetsky, reb@ifz.ru

Received: September 2, 2024

Revised: January 30, 2025

Accepted: February 14, 2025

FOR CITATION: Abdrakhmatov K.E., Beloslyudtsev O.M., Vilayev A.V., Danabayeva A.T., Ibragimova T.L., Ibragimov R.S., Ismailov V.A., Zhunusova A.Zh., Kalmeteva Z.A., Kuzikov S.I., Marinin A.V., Mirzaev M.A., Muraliyev A.M., Rebetsky Yu.L., Sycheva N.A., Khachikyan G.Ya., Umurzakov R.A., 2025. Tectonophysical Zoning of the Tien Shan Active Faults – Deterministic Strong Earthquake Prediction. *Geodynamics & Tectonophysics* 16 (2), 0822. doi:10.5800/GT-2025-16-2-0822

ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ ТЯНЬ-ШАНЯ – ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЙ ПРОГНОЗ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

К.Е. Абдрахматов¹, О.М. Белослюдцев², А.В. Виляев³, А.Т. Данабаева², Т.Л. Ибрагимова⁴,
Р.С. Ибрагимов⁴, В.А. Исмаилов⁴, А.Ж. Жунусова², З.А. Кальметьева⁵, С.И. Кузиков⁶, А.В. Маринин⁷,
М.А. Мирзаев⁴, А.М. Муралиев¹, Ю.Л. Ребецкий⁷, Н.А. Сычева⁷, Г.Я. Хачикян², Р.А. Умурзаков⁸

¹ Институт сейсмологии НАН КР, 720060, Бишкек, ул. Аалы Токомбаева, 7/8, Кыргызстан

² Национальный научный центр сейсмологических наблюдений и исследований МЧС РК, 050060, Алматы, пр-т Аль-Фараби, 75а, Казахстан

³ Институт ионосферы, 050020, Алматы, Казахстан

⁴ Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз, 100128, Ташкент, ул. Зулфияхонима, 3, Узбекистан

⁵ Централь-Азиатский институт прикладных исследований Земли, 720027, Бишкек, ул. Тимура Фрунзе 73/2, Кыргызстан

⁶ Научная станция РАН, 720049, Бишкек, Кыргызстан

⁷ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия

⁸ Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова, 100095, Ташкент, ул. Университетская, 2, Узбекистан

АННОТАЦИЯ. После произошедшего в Китае 23.01.2024 Ушинского землетрясения с $M=7.0$ закончился период затишья на сильные землетрясения на Тянь-Шане, продолжавшийся около 33 лет. Опасность возникновения новых сильных землетрясений в ближайшие годы обсуждается в научном сообществе. По результатам конференции, прошедшей в 2024 г. на Научной станции РАН в г. Бишкеке, возник коллектив сейсмологов, геофизиков и тектонофизиков из четырех стран – России, Кыргызстана, Казахстана и Узбекистана, которые решили объединить свои работы в решении проблемы прогноза сейсмических опасностей Тянь-Шаня на новом уровне современного понимания этой проблемы и возможности ее решения. В частности, за последние десятилетия накоплен большой банк данных о землетрясениях Тянь-Шаня, представленный не только в виде каталога места, времени и силы событий, но и также в виде каталога механизмов очагов землетрясений. В ИФЗ РАН в лаборатории тектонофизики им. М.В. Гзовского в последние годы были разработаны новые подходы, позволяющие получаемые из сейсмологических данных напряжения пересчитывать в кулоновы напряжения на активных разломах. Опыт их расчета показал, что зоны разломов с высоким уровнем кулоновых напряжений выделяются и как участки более интенсивного сейсмического режима. Вдоль них происходят не только среднесильные землетрясения, но и катастрофические (ретроспективный прогноз для Венчуаньского землетрясения 2008 г. и Пазарджыкского землетрясения 2023 г.). Таким образом, появился инструмент тектонофизического районирования разломов, который можно рассматривать как долгосрочный прогноз землетрясения. В ходе намеченных совместных исследований также будут на новом уровне развиваться подходы среднесрочного прогноза землетрясений, привязанного к конкретным разломам.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: землетрясения; механизмы очагов; напряженное состояние; кулоновы напряжения; геодинамический режим; активные разломы; опасные участки разломов; сейсмическая опасность; прогноз землетрясений

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работы российской группы, связанные с отработкой новых принципов районирования сейсмоопасных участков разломов, финансируются в рамках госзадания ИФЗ РАН. Исследования также проводятся в рамках бюджетного финансирования АН РУз, Комитетом науки Министерства науки и высшего образования РК по Программе № BR 24992763 и при поддержке Института сейсмологии в рамках бюджетного финансирования НАН КР.

1. ВВЕДЕНИЕ

23.01.2024 г. в южной части предгорий Центрального Тянь-Шаня – адыры хребта Кокшаал-Тоо – на территории Китайской Народной Республики произошло сильное землетрясение Уши (Айкол – NEIC) с $M=7.0$, которое может означать начало усиления сейсмической активности всего региона. Последнее столь сильное землетрясение на Тянь-Шане – Суусамырское – с $M=7.3$

произошло в 1992 г. Таким образом, на Тянь-Шане 32 года не было землетрясений с $M>7.0$.

Предыдущий цикл из 17 сильных землетрясений с магнитудой $M=6.8-8.3$ начался в 1885 г. с Беловодского землетрясения ($M=6.9$), эпицентр которого располагался в 46 км к западу от г. Бишкека. Все эти землетрясения, за исключением Суусамырского, произошли в северных и южных предгорьях Тянь-Шаня (рис. 1). Если

рассматривать Суусамырское землетрясение, произошедшее во внутригорной Суусамырской впадине как определенное исключение из этого правила, то последним землетрясением в предгорьях Тянь-Шаня было Кашгарское землетрясение с $M=7.0$, произошедшее в 1985 г. на территории КНР.

Таким образом, в наиболее сейсмоактивной части Тянь-Шаня – его предгорьях – с Ушинским землетрясением закончился период затишья на сильные землетрясения, продолжавшийся почти 40 лет. При этом предыдущий цикл сейсмической активности сильных землетрясений в предгорьях Тянь-Шаня длился около 100 лет и здесь сильное землетрясение с магнитудой около 7.0 и более происходило в среднем раз в 5–6 лет.

Важно отметить следующий момент. Беловодское землетрясение с $M=6.9$ по каталогу [New Catalog..., 1977] в эпицентральной области имело сейсмические проявления в 9–10 баллов по шкале MSK-64 [Kal'meteva et al., 2009]. Согласно работе [Landgraf et al., 2016] вышедший на дневную поверхность разлом имел протяженность около 20 км между реками Сокулук и Аксу, параллельную горному фронту, и ширину от 0.2 до 2.1 м. Землетрясение ощущалось на большой территории. Оно также вызвало камнепады и оползни, некоторые из которых временно перекрыли реки Сокулук и Аксу. В результате землетрясения были полностью разрушены населенные пункты Беловодское, Кара-Балта и Сокулук, 54 человека погибли. В работе [Krüger et al.,

2018] были пересмотрены магнитуды крупных землетрясений Центральной Азии: для Беловодского землетрясения вместо магнитуды $M=6.9$ была установлена магнитуда $M=7.6$.

Эпицентр Беловодского землетрясения располагался в 54 км от современной столицы Кыргызстана г. Бишкека. Этот населенный пункт в Российской империи был основан в 1825 г. и в момент землетрясения уже имел статус города. Известно, что в 1876 г. в Пишпекке проживало 58 семейств – 182 человека, а в 1897 г. численность города составляла уже 6615 человек. Низкая плотность населения и малая этажность строений позволили обойтись без жертв и серьезных разрушений жилых зданий. Выполненные в работе [Kal'meteva et al., 2009] исследования показали, что в его пределах можно было ожидать сейсмические проявления от 7 до 8 баллов. Согласно шкале MSK-64 здесь были возможны сильные повреждения зданий. При этом землетрясении в земле отмечались трещины шириной до 2 м, обвалы, осыпи, оползни. На следующий день был толчок почти такой же силы.

Эпицентр Вернинского землетрясения в 1887 г. с $M=7.3$ располагался в 18 км от современного центра г. Алматы. Утром в 4 ч 30 мин 28 мая по старому стилю (9 июня по новому стилю) произошел форшок интенсивностью 5 баллов, спустя 5 мин – подземный гул и сильные толчки 9–10 баллов, продолжавшиеся около двух минут, г. Верный был полностью разрушен

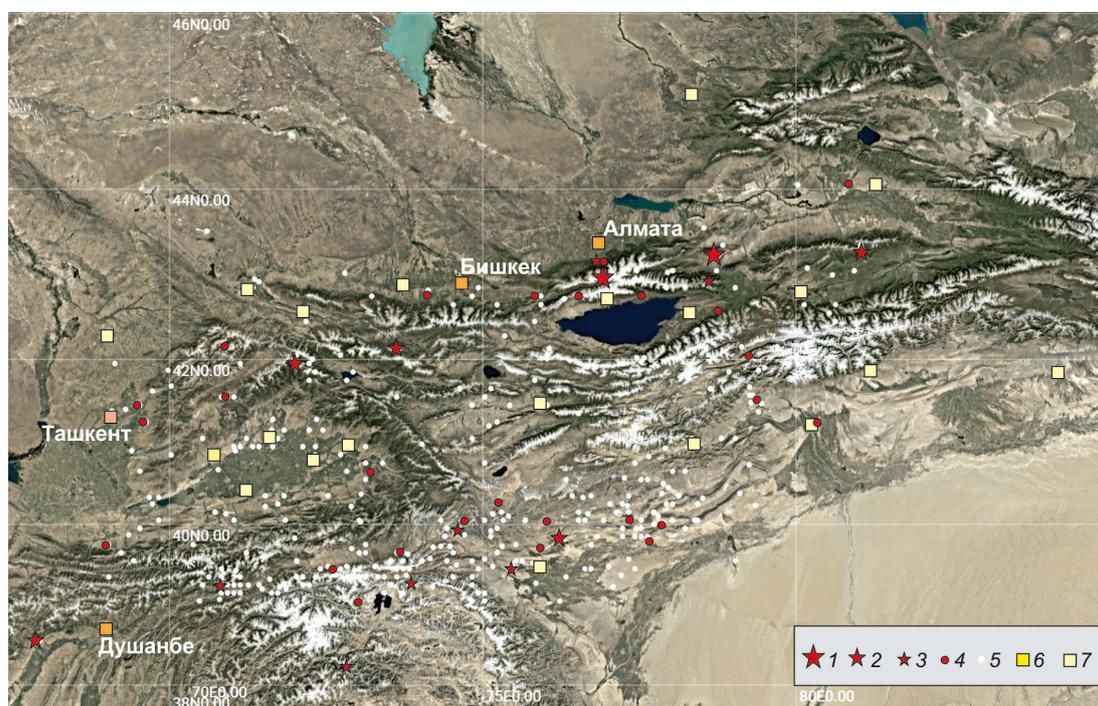


Рис. 1. Расположение эпицентров сильнейших землетрясений Тянь-Шаня с конца XIX в.

Землетрясения: 1 – $M_{ин} \geq 8.0$; 2 – $M_{ин} \geq 7.5$; 3 – $M_{ин} \geq 7.0$; 4 – $M_{ин} \geq 6.5$; 5 – $M_{ин} \geq 4.5$; 6 – столицы; 7 – города. Карта построена с использованием данных З.А. Кальметьевой [Kal'meteva et al., 2009].

Fig. 1. Locations of epicenters of the strongest earthquakes which have occurred in the Tien Shan since the end of the XIX century. Earthquakes: 1 – $M_{ин} \geq 8.0$; 2 – $M_{ин} \geq 7.5$; 3 – $M_{ин} \geq 7.0$; 4 – $M_{ин} \geq 6.5$; 5 – $M_{ин} \geq 4.5$; 6 – capitals; 7 – cities. The map was compiled based on Z.A. Kal'meteva's data [Kal'meteva et al., 2009].

в 4 ч 50 мин. Многочисленные трещины, оползни и поверхностные сдвиги, а также около 400 повторных толчков произошли в течение года. Погибло 330–360 человек, разрушено 2792 дома (из них 1799 каменных, 839 деревянных, остальные – глинобитные и каркасные). Площадь землетрясения составила до 3–4 млн км².

В декабре (январь по новому стилю) 1911 г. вблизи г. Верный произошло очередное разрушительное землетрясение – Кеминское. Максимальная сила толчков составила семь баллов. Эпицентр землетрясения располагался в малонаселенной горной местности, поэтому жертв было не так много. Погибли 452 и были ранены 740 человек, разрушено 1094 дома.

В районе произошедшего землетрясения Уши значимых разрушений и жертв не было, так как этот район не имеет крупных городов и промышленных объектов. В то же время в Алматы и Бишкеке, имеющих здания высокой этажности и находящихся на расстоянии около 200 км от эпицентра Ушинского землетрясения, сейсмические проявления отвечали 5–6 баллам. Поскольку эпицентры очагов Вернинского 1887 г. ($M=7.3$) и Беловодского 1885 г. ($M=7.6$, по [Krüger et al., 2018]) землетрясений были расположены на расстоянии соответственно 18 км и 54 км от центров столиц Алматы и Бишкека, у населения и правительств этих стран возникли определенные опасения о последствиях возможных сильных землетрясений.

Сделанный в этом разделе вывод о том, что в ближайшие 5–10 лет в регионе Тянь-Шаня, в его южных и северных предгорьях возможно возникновение нескольких сильных землетрясений с магнитудой более 7.0, ставит перед сейсмологами, геофизиками и геологами, занимающимися проблемой оценки сейсмической опасности, задачу выделения зон подготовки таких землетрясений. При этом речь идет о сейсмическом районировании территорий на основе данных о ранее произошедших землетрясениях, в рамках которого можно оценить наибольшие сейсмические воздействия в баллах на ближайшие 5–10 тыс. лет. Такого типа данные востребованы в сейсмостойком строительстве [Ulomov, Shuymilina, 1999; Melnikov et al., 2000].

Задача состоит в необходимости научного обоснования, где в ближайшие 5–10 лет может произойти следующее сильное землетрясение с магнитудой 7.0 и более. Это крайне важно из-за высокой численности населения ряда городов, расположенных в предгорьях Тянь-Шаня (Ташкент – 3.075, Андижан – 1.742, Алматы – 2.211, Урумчи – 3.112, Душанбе – 1.228 млн чел.) в зонах активных разломов.

Сложность решения такой задачи заключается в необходимости как объединения усилий ученых стран Средней Азии, так как закономерности сейсмической активизации не имеют границ, так и фактического перехода от вероятностного долгосрочного прогноза к детерминированному среднесрочному. Такой прогноз при всех его издержках позволит провести профилактические работы по усилению конструкций и отработ-

ке мероприятий реагирования на внештатные ситуации на производствах и на социальных объектах.

2. РАЗВИТИЕ В ИФЗ РАН ИДЕЙ Г.А. ГАМБУРЦЕВА И М.В. ГЗОВСКОГО ПО ДЕТЕРМИНИРОВАННОМУ ПРОГНОЗУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Проблема прогноза мест сильных землетрясений в СССР стала актуальной после катастрофического Ашхабадского землетрясения 1948 г. Начавшиеся исследования в этой области возглавил Г.А. Гамбурцев, который в то время разрабатывал первые сейсмические методы изучения внутреннего строения коры [Gamburtsev, 1955], поэтому вполне объяснимо, что движение в направлении решения данной важнейшей проблемы он видел в изучении строения и физического состояния зон разломов. В заключении ученого совета Геофизического института АН СССР, прошедшего в декабре 1951 г., в разделе, связанном с изучением условий возникновения землетрясений и развития методов прогноза, первым научным пунктом исследования было «изучение механизма тектонических деформаций методами полевых тектонофизических наблюдений и лабораторного моделирования». Эти исследования, по убеждению Г.А. Гамбурцева, должны были проводиться вместе с изучением глубинного строения и состояния разломов геофизическими методами (ГСЗ и КМИЗ), с развитием сейсмологических методов изучения динамических параметров очагов, с изучением региональной сейсмичности инструментальными, сеймотектоническими и тектонофизическими методами. Опору на методы геотектоники (сеймотектоники) и геофизики можно считать детерминированным подходом в прогнозе землетрясений. Его конечной целью было нахождение места подготовки будущих сильных землетрясений.

Вторым направлением исследований в области прогноза, которое отдельным пунктом вошло в постановление ученого совета Геофизического института АН СССР, было «изыскание предвестников землетрясений». Здесь основные исследования были связаны с выявлением закономерностей вариации электрических, магнитных, деформационных (наклономеры) и других полей на стадии непосредственно перед землетрясением. Считалось, что комплексное использование данных геотектоники и геофизики позволит указать место будущего сильного землетрясения, а предвестники позволят разработать технологию предупреждения приближающейся опасности – прогноз времени землетрясения. При этом и здесь Г.А. Гамбурцев считал, что «необходимо находить такие физические характеристики явлений, которые могли бы нас избавить от необходимости прибегать к методу статистики».

Соратником этих идей Г.А. Гамбурцева был и один из основателей тектонофизики в СССР – М.В. Гзовский. Он разрабатывал геологические критерии сейсмичности [Gzovsky, 1957a, 1957b], к которым относил области повышенных касательных напряжений [Gzovsky, 1956] и больших вертикальных градиентов движения поверхности Земли [Gzovsky, 1963]. С поправкой на

представления тех лет о механизмах хрупкого разрушения в современном их понимании речь должна идти о зонах повышенных кулоновых напряжений (КН) и участках высокоградиентных движений поверхности, т.е. о разломных зонах.

К сожалению, после смерти Г.А. Гамбурцева первое и главное, с его точки зрения, направление постепенно было отодвинуто на второй план. Сейсмологи и геофизики в основном сосредоточились на статистических методах прогноза и методе поиска предвестников землетрясений.

В этой статье будет представлен новый подход к проблемам сейсмической опасности, продолжающий идеи Г.А. Гамбурцева и М.В. Гзовского, базисом которого является изучение природного напряженного состояния тектонофизическими методами. Алгоритмы этих методов с середины прошлого века начали создаваться в ИФЗ РАН под руководством М.В. Гзовского, и в настоящее время они позволяют решать задачу по количественному районированию сейсмически опасных участков разломов.

Благодаря регулярному проведению с середины нулевых годов ряда крупных международных конференций в Казахстане (Казахстанско-Китайский международный симпозиум «Прогноз землетрясений, оценка сейсмической опасности и сейсмического риска Центральной Азии», Институт сейсмологии, г. Алматы), Кыргызстане (Международный симпозиум «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов», Научная станция РАН в г. Бишкеке) и Узбекистане (Международная научная конференция «Геофизические методы решения актуальных проблем современной сейсмологии», Институт сейсмологии, г. Ташкент) постепенно сформировался круг ученых этих стран, обративших внимание на работы сотрудников ИФЗ РАН в области тектонофизики. Возникла научная кооперация сотрудников лаборатории тектонофизики им. М.В. Гзовского ИФЗ РАН (г. Москва) сначала с учеными из Кыргызстана, а затем и из Узбекистана и Казахстана.

В настоящее время пришло общее понимание ученых о необходимости проведения работы не по отдельным участкам Тянь-Шаня в разных странах, а для всего региона в рамках единой концепции. В статье, кроме описания теоретических основ тектонофизического подхода к оценке сейсмической опасности, будет представлен инструментальный и материальный базис в виде накопленных за длительное время баз данных, необходимых для работы в области решения указанной проблемы.

3. НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИЗУЧЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ В СВЯЗИ С ПРОБЛЕМОЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ОПАСНОСТЕЙ

В последние три десятилетия возникли новые направления изучения деформационных процессов на земной поверхности методами спутникового дистан-

ционного зондирования, а также произошло развитие новых подходов в оценке сейсмических опасностей в рамках тектонофизических и геомеханических методов исследований. На основе этих методов фактически имеется возможность осуществлять мониторинг изменений напряженно-деформированного состояния земной коры или ее поверхности, поэтому в настоящее время возникли предпосылки для возврата к развитию методов прогноза землетрясений в той трактовке, которая была сформулирована выдающимися советскими учеными Г.А. Гамбурцевым и М.В. Гзовским.

Геомеханический подход. После работ [Stein et al., 1992; King et al., 1994; Harris et al., 1995] для выявления зон повышенной сейсмической активности стали применять районирование участков разломов по приращениям КН $\Delta\tau_c$, возникающим из-за изменения уровня напряжений после сильного землетрясения, произошедшего в исследуемом регионе. Подобные расчеты, как правило, опирались на упругую модель трещины сдвига, которая отвечала возникшему очагу землетрясения. Первоначально аналитические или численные расчеты выполнялись для территорий, где имел место геодинамический режим напряженного состояния горизонтального сдвига – район разлома Сан-Андреас (США) [King et al., 1994; Mallman, Zoback, 2007], позднее подобный подход был распространен и на участки коры с другими режимами (горизонтальное сжатие или растяжение) [Ganas et al., 2006].

$$\Delta\tau_c = \Delta\tau_n + k_f \Delta\sigma_{nn}^*, \Delta\sigma_{nn}^* = \Delta\sigma_{nn} + \Delta p_f < 0. \quad (1)$$

Здесь $\Delta\tau_n$ и $\Delta\sigma_{nn}$ – приращения касательных и нормальных на разрыве напряжений, Δp_f – приращение флюидного давления в трещинно-поровом пространстве пород, а $\Delta\sigma_{nn}^*$ – приращения эффективных нормальных на разрыве напряжений, в которых учитывается разупрочняющее воздействие давления флюида. Положительные значения $\Delta\tau_n$ и Δp_f определяют соответственно увеличение уровня касательных напряжений на плоскости разлома и флюидного давления в трещинно-поровом пространстве пород, а отрицательные значения $\Delta\sigma_{nn}$ отвечают увеличению уровня напряжений сжатия, нормальных к разлому.

Выражение (1) по своему характеру соответствует расчету полных КН, которые таким образом определяются как разность между касательными напряжениями на разрыве, создающими условия для смещения его бортов, и напряжениями сил трения, препятствующими этому смещению. Критическое состояние в этом случае определяется достижением КН предела поверхностной прочности разрыва. Из этого выражения понятна разница между разрушением, наблюдающимся в металлических конструкциях, где предельное состояние связывается только с девиаторными напряжениями (простейший случай – максимальные касательные напряжения), и в горных породах.

Следует отметить, что в задаче об очаге землетрясения в виде трещины сдвига (мех.) среда представляет

собой упругое однофазное твердое тело, поэтому отсутствует возможность расчета изменений флюидного давления. В этой связи в расчетах приращений КН фактически считается, что до и после сильного землетрясения флюидное давление в породах не изменяется, $\Delta p_f = 0$, что является сильным упрощением реального природного процесса.

Предложенный в работах [Stein et al., 1992; King et al., 1994] подход первоначально применялся для обоснования проявления повышенной плотности афтершоков именно в участках коры, для которых были получены положительные значения приращений кулоновых напряжений. Вслед за этими работами последовала известная серия работ на тему «Изменение кулоновых напряжений», в рамках которой для областей сильных землетрясений (как правило, магнитуда более 7.0) производится сопоставление КН в очаге до и после этого землетрясения. Считается, что начальное напряженное состояние известно (либо задается априорно, либо оценивается из данных GPS-смещений, например, для Калифорнии), а его изменение получают путем численных или аналитических расчетов (упругая модель), используя сейсмологические данные о величине снимаемых напряжений в очагах сильных землетрясений. По знаку этих изменений судят об увеличении или уменьшении опасности возникновения афтершоков в окрестности произошедшего землетрясения. В случае, если КН возрастают, опасность увеличивается, если падают – уменьшается. Таким образом, можно сказать, что данный подход отвечает только стадии афтершокового развития сейсмического процесса и для начальной стадии (до землетрясения) поле напряжений только интегрально близко к истинному природному напряженному состоянию (в масштабе усреднения 300–500 км по латерали).

В последнее время этот же подход стал использоваться и для обоснования миграции сильных землетрясений вдоль разломных зон [Pang, 2022; Sunbul, 2019; Chen et al., 2023]. При этом учитываются изменения напряжений, вызываемые отдельными сильными землетрясениями, вязкая релаксация напряжений и дополнительные напряжения, возникающие из-за действия граничных сил (обычно задаются горизонтальные скорости в границах региона, получаемые из данных GPS-наблюдения).

Важно обратить внимание, что в этом случае фактически речь идет о детерминированном прогнозе мест будущих сильных землетрясений.

Сильной стороной геомеханического метода прогноза опасных участков разломов является возможность просчета разных вариантов быстрых изменений напряженного состояния разломных зон, возникающих в случае разной последовательности сейсмической активизации сложно построенных разломных зон, так, как это было при Караманмарашских землетрясениях [Rebetsky, 2023; Smirnov et al., 2023].

Тектонофизический подход. Другое направление исследований КН было рассмотрено в работе [Morris et

al., 1996] в связи с обеспечением безопасности буровых работ, добычи углеводородов и фундаментов сооружений. Здесь исходные данные о напряжениях получают *in situ* методами в масштабе усреднения первые метры – десятки метров, т.е. эти напряжения установлены непосредственно из данных наблюдения в природном массиве, а не путем решения задачи геомеханики. Предложено на основе *in situ* данных рассчитывать отношение касательных напряжений (τ_n) на геологических разрывах к модулю эффективных нормальных напряжений (σ_{nn}^*) [Morris et al., 1996]

$$T_d = \frac{\tau_n}{|\sigma_{nn}^*|}, \quad (2)$$

которое определили как тенденцию к скольжению разрывов, поскольку рост значений T_d действительно определяет увеличение уровня КН (1). В дальнейшем параметр T_d стали связывать со способностью пород к проявлению дилатансии [Ferrill, Morris, 2003].

Сейчас расчет параметра T_d входит в стандарт МАГАТЭ при оценке опасности разрывов, выделенных на площадках строительства атомных станций. В качестве примера можно привести АС Ханхикиви-1 в Финляндии, для которой такие работы выполнялись в 2018–2019 гг. При этом в качестве исходных данных были использованы замеры напряжений *in situ*, полученные в горном деле [Kivinen, Varis, 2009; Pohjatekniikka, 2018].

В силу объекта применения такого подхода (горные выработки, скважины и др. с глубиной до 2–3 км) методы *in situ* вполне способны с некоторым усреднением давать относительно корректные данные о величинах и направлениях действия главных напряжений вблизи поверхности. Однако эти данные нельзя использовать для оценки величины напряжения в масштабах усреднения в первые километры и десятки километров для глубины 5 км и более, что требуется для прогноза землетрясений с большими магнитудами ($M > 6.5$). Для решения таких задач необходимо использовать тектонофизические методы инверсии напряжений из данных о разрывных смещениях в массивах пород, к которым относятся сейсмологические данные о механизмах очагов землетрясений и геологические данные о разрывах со смещениями.

В работах [Rebetsky, Kuzikov, 2016; Rebetsky et al., 2021, 2024; Rebetsky, 2023] показана возможность выполнять районирование опасных участков разломов на основе результатов тектонофизической реконструкции напряжений в природном объекте. Источником данных для реконструкции напряжений являются сейсмологические или геологические индикаторы разрывных деформаций, а алгоритм разработанного в лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН катакластического метода [Rebetsky, 2003; Rebetsky et al., 2017] предусматривает расчет не только параметров эллипсоида напряжений (ориентация его главных осей и форма, определяемая коэффициентом Лоде – Надаи), но и величины напряжений, нормированной на прочность

сцепления массива породы. Эти данные должны дополняться информацией о положении и геометрии разломов, выделяемых геологическими методами как активные на неотектоническом этапе (рис. 2).

Указанная совокупность исходных данных позволяет рассчитывать КН на поверхности разлома, по абсолютным или относительным значениям которых можно районировать участки разломов разной степени опасности. При этом сам алгоритм реконструкции напряжений опирается на данные о хрупком разрушении в виде трещин сдвига (мех.) с направлениями смещения их бортов. По этой причине в результатах тектонофизических расчетов для нормальных напряжений учитывается роль флюидного давления. Таким образом, алгоритм тектонофизической инверсии катакластического метода позволяет получать данные об эффективных нормальных напряжениях σ_{nn}^* . Этот факт существенно отличает тектонофизический подход от геомеханического в решении проблемы учета влияния флюидов в трещинно-поровом пространстве пород.

Работы по изучению распределения опасности активных разломов по результатам тектонофизической реконструкции природных напряжений начали проводиться относительно недавно. В этом отношении они существенно уступают опыту работ по изучению закономерности изменений КН на основе математического моделирования [Stein et al., 1992; Okada, 1992; Harris et al., 1995; и др.]. В последние несколько лет ал-

горитм катакластического метода и компьютерная программа, в которой он реализован, развивались в направлении уточнения результатов расчетов ориентации главных напряжений для зон со специфической морфологией разрывов (участки отсутствия второй сопряженной системы сколов – зоны простого сдвига) [Rebetsky, Marinin, 2024], а также величины напряжения [Rebetsky et al., 2024], что крайне важно для правильных оценок КН на разломах. В ближайшие годы в рамках алгоритма катакластического метода предстоит исследовать возможности установления физических параметров, которые могут указывать на приближение состояния разломов к критическому – неустойчивое состояние геосреды.

Метод дистанционного зондирования земной поверхности. Современные методы исследования результатов поверхности спутникового зондирования дают возможность получать данные об изменениях рельефа поверхности с точностью до первых сантиметров и даже менее. Для этого используются спутниковые технологии GNSS-позиционирования и радарной интерферометрической съемки. Для последней не нужна установка специальных приемников сигналов на поверхности земли. В спутниковой радарной интерферометрии применяются дополнительные отражающие элементы при необходимости увеличения точности измерений. В настоящее время чаще всего этот метод используют при расчетах косейсмических деформаций,



Рис. 2. Карта активных разломов Тянь-Шаня.

Карта построена на основе базы данных «Активные разломы Евразии», размещенной на сервере ГИН РАН [Trifonov et al., 2002; Bachmanov et al., 2017; Zelenin et al., 2022].

Fig. 2. Active faults map of the Tien Shan.

The map compiled based on the Active Faults of Eurasia Database which is hosted on the GIN RAS server [Trifonov et al., 2002; Bachmanov et al., 2017; Zelenin et al., 2022].

возникающих в результате землетрясения или вулканизма. Для этого необходимо получить два снимка эпицентральной области до и после землетрясения или вулканической активизации. Эту технологию можно применять и для выяснения накопления деформаций вблизи активных разломов.

Ограниченность этого подхода связана с тем фактом, что результатом расчетов является двумерный тензор деформаций, так же как это имеет место при использовании данных GNSS. Однако применение таких данных радарной интерферометрии совместно с результатами тектонофизической инверсии напряжений может позволить достроить этот тензор до трехмерного. Такая возможность существует при применении катакластического метода инверсии напряжений, так как его алгоритм предусматривает параллельный расчет двух тензоров: тектонических напряжений и приращений сейсмостектонических деформаций.

Все три рассмотренных выше подхода к оценке сейсмического риска следует рассматривать как детерминистические, которые позволяют выполнять мониторинг состояния активных разломов, выделяя для разных участков разный магнитудный уровень ожидаемых сильных землетрясений.

4. О ДЕТЕРМИНИРОВАННОМ ПРОГНОЗЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ДАННЫМ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

В геомеханике разработаны критерии, позволяющие оценить близость состояния массива горных пород к хрупкому разрушению (см. например [Nikolaevsky, 2010a, 2010b, 2012]). Эти представления можно распространить и на разломы для установления момента его активизации. Согласно современным положениям геомеханики критическое состояние на формирующейся новой трещине или на активизирующейся старой, частично залеченной, трещине (участок разрыва) определяется соотношением действующих здесь касательных напряжений, сил трения и прочности сцепления бортов разрыва. При этом значение КН τ_c сопоставляется с прочностью сцепления τ_f :

$$\tau_c = \tau_n + k_s \sigma_{nn}^* \leq \tau_f, \sigma_{nn}^* < 0, \tau_n > 0, \quad (3)$$

где $k_s = \text{tg} \varphi_s$ – коэффициент статического трения (φ_s – угол трения) (рис. 2). На основе этого критерия при численном геомеханическом моделировании поведения разлома устанавливается критическое состояние для какой-то его части и рассчитываются амплитуды смещения крыльев, т.е. под КН понимается разница между касательными напряжениями (τ_n), действующими на разрыве, и напряжениями сил трения, вызываемыми нормальными к разрыву напряжениями, при учете разупрочняющей роли флюидного давления в трещинах и порах (1). Здесь и далее используется правило знаков, принятое в механике сплошной среды – напряжение растяжения положительное.

Равенство в выражении (3) выполняется для трещин скалывания с максимальной суммарной прочностью, складывающейся из прочности сцепления и сил трения ($\tau_f - k_s \sigma_{nn}^*$). Отрицательные значения КН соответствуют случаю, когда силы трения превышают уровень касательных напряжений на разрыве. Рост уровня КН до положительных значений характеризует приближение напряженного состояния к критическому, определяющему возможность хрупкого разрушения пород.

Приложение геомеханического расчета кулоновых напряжений, полученного из результатов тектонофизической инверсии напряжений, действующих в природных массивах, относится к так называемым активным разломам. Активными называют разломы, подвижки по которым происходили в недавнем прошлом и потому могут ожидать в ближайшем будущем [Wallace, 1968; Kozhurin et al., 2008]. Согласно работе [Nikonov, 1995] для активного разлома возможно повторное оживление в течение последних 400 тыс. лет. Существует понятие «живой» разлом [Trifonov, 2001], проявляющий активность в позднем плейстоцене и голоцене (10–130 тыс. лет).

В работе [Kuzmin, 1999] предложено под современным активным разломом понимать разрывную структуру, в которой произошли какие-либо современные короткопериодические (первые месяцы и годы), пульсационные и/или знакопеременные деформации. Согласно работам [Kuzmin, 2004, 2005; Kuzmin, Zhukov, 2004] современный активный разлом следует классифицировать как опасный разлом, способный к формированию техногенных катастроф. С учетом определения Ю.О. Кузьмина можно рассматривать в качестве опасных участков активных разломов такие участки, где уровень КН достигает 50 % и более от значения прочности сцепления разрыва. В таком случае можно говорить о возможности выделения опасного участка активного разлома, способного генерировать сильное землетрясение на современном этапе. При этом протяженность опасного участка разлома с высоким уровнем КН будет определять возможную магнитуду землетрясения.

Следует отметить, что более 35 лет назад в работе [Trifonov et al., 1989] предлагалось при выделении участков активных разломов, где вероятны сильные землетрясения сегодня, использовать «оценку физической предпосылки сильного землетрясения – возможности высокой концентрации тектонических напряжений в значительном объеме горных пород».

Если следовать общим представлениям геомеханики с их приложением к результатам тектонофизической реконструкции напряжений, то протяженные участки, где будут получены высокие уровни КН, являются наиболее опасными для формирования землетрясения. Однако опыт тектонофизического районирования активных разломов в зонах произошедших сильных землетрясений показал, что это не всегда так.

Оказалось, что в очаге Веньчуаньского землетрясения 2008 г. [Rebetsky et al., 2021] участки повышенного

уровня КН прерывались зонами их низких положительных значений и даже малыми по протяженности участками отрицательных значений КН. Результаты исследований для землетрясений, произошедших в провинции Караманмараш в Турции в 2023 г., подтвердили эти выводы. Очаг Пазарджыкского землетрясения с $M=7.8$ с протяженностью более 300 км не являлся однородным по напряжениям и содержал как зоны высокого уровня положительных значений КН, так и участки отрицательных значений. Эти данные были получены в результате тектонофизического районирования разломов этого региона после произошедших сильных землетрясений [Tikhotsky et al., 2023; Rebetsky, 2023]. Подобный результат косвенно подтверждают и исследования изменения интенсивности направленности сейсмического излучения [Pavlenko O.V., Pavlenko V.A., 2023].

Отсюда следует, что ожидаемый максимальный магнитудный уровень прогнозируемого сейсмогенного участка разлома, получаемый из результатов анализа КН, будет определяться не только областью наиболее высокого уровня КН, но и всей прерывистой зоной их положительных значений. Можно предположить, что такой эффект связан не только с перестройкой напряженного состояния вблизи разлома после начала сейсмического события, но, возможно, в большей степени с процессами, происходящими во фронте активизирующегося разлома. Здесь рост локальных деформаций и микротрещинообразования может приводить к эффекту Ребиндера, создавая условия для стресс-метаморфических реакций дегидратации пород [Rebetsky, 2006]. В таком случае рождающаяся в породе дополнительная водная масса увеличивает давление флюида в трещинно-поровом пространстве разломной зоны, приводя к резкому снижению прочности (росту КН). Вероятно, серьезным ограничением сейсмогенной активизации развития разломов следует считать только протяженные зоны отрицательных КН.

Таким образом, существует определенное расхождение в теоретических геомеханических основах процесса хрупкого разрушения и практике изучения распределения КН в очагах сильных землетрясений. Дальнейшие исследования закономерности распределения КН в очаговых зонах сильных землетрясений, полученные при ретроспективном расчете, должны позволить выработать единый взгляд на эту проблему.

5. ОСОБЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ КАТАКЛАСТИЧЕСКОГО МЕТОДА

Главной отличительной особенностью катакластического метода инверсии тектонических напряжений из данных о разрывных смещениях [Rebetsky, 2003; Rebetsky, Polets, 2018] является возможность определения не только параметров эллипсоида напряжений (ориентация осей главных напряжений и форма эллипсоида), но и величин напряжений. Алгоритм метода предусматривает четыре последовательных этапа расчета. На первом этапе на основе сейсмологических

или геологических индикаторов разрывных смещений определяется ориентация главных осей и коэффициента Лоде – Надаи двух тензоров. Это тензор напряжений и тензор приращений сеймотектонических деформаций. Расчет параметров этих тензоров производится совместно. При этом в последней модификации программного комплекса STRESSseism используется специальный функционал, определяющий достижения максимума выделившейся энергии упругих волн [Rebetsky, Sycheva, 2024]. Этот функционал отличается от функционала в виде максимума диссипации упругой энергии деформаций (критерий Валлеса и Ботта [Wallace, 1951; Bott, 1959]), который в той или иной форме используется в других методах, созданных в России и за рубежом (методы С.Л. Юнги, Ж. Анжелье, А. Майкла, Дж. Гепхарда и др.). Главным результатом этих отличий является то, что в случае наличия данных только об одной из сопряженных систем сколов методы, в которых используются функционалы, связанные с критерием Валлеса и Ботта, будут давать ошибку около 15° в определении осей главных напряжений. Уменьшение этой ошибки будет происходить по мере выравнивания сколов в двух сопряженных системах.

В более ранней версии катакластического метода также применялся функционал, связанный с максимумом диссипации энергии упругих деформаций, но его влияние компенсировалось принципом формирования однородных выборок сколов (механизмов очагов землетрясений), в котором использовались определяющие неравенства метода. На их основе производилось суммирование отдельно квадрантов сжатия (Р) и растяжения (Т) механизмов очагов землетрясений, и в области их пересечения могли находиться соответственно оси максимального и минимального сжатия искомых главных напряжений. Подобный подход также был реализован в одном из методов Ж. Анжелье [Angelier, Mechler, 1977] и О.И. Гущенко [Gushchenko, Kuznetsov, 1979]. В этих работах искомое положение осей наибольшего и наименьшего сжатия принималось в центрах таких «свернутых» областей. В катакластическом методе в отличие от методов Анжелье и Гущенко истинное их положение обеспечивал критерий максимума определяющего функционала. Такое сочетание неравенств и максимального принципа давало возможность более достоверно определять положение осей главных напряжений в зонах субдукции, где имеет место много близких по ориентации механизмов очагов землетрясений. Этот алгоритм также реализован в программе WIN-TENSOR [Delvaux, Sperner, 2003].

На втором этапе катакластического метода производится расчет нормированных на прочность сцепления величин максимального касательного напряжения и эффективного давления (тектоническое давление минус давление флюида в трещинно-поровом пространстве пород). Для этого используется диаграмма Мора и положение о том, что напряженные состояния хрупких трещин на этой диаграмме могут попадать между линией максимальной прочности и линией минимального

сопротивления сухого трения. Для пород линия максимальной прочности представляет собой выпуклую кривую (рис. 3, а), уплощающуюся в области больших величин напряжений. В предыдущей версии программы STRESSseism огибающая максимальной прочности аппроксимировалась прямой, параллельной линии минимального сухого трения (рис. 3, б), т.е. коэффициент внутренней прочности k_f и статического трения k_s

равны. В новой версии программы линия максимальной прочности представляет собой прямую, имеющую угол наклона, меньший, чем у прямой, отвечающей сопротивлению сухого трения (рис. 3, в), т.е. $k_f < k_s$.

Такая замена формы диаграммы прочности была сделана из-за необходимости более правильного расчета КН. Как видно из данных рис. 3, а, вертикальное

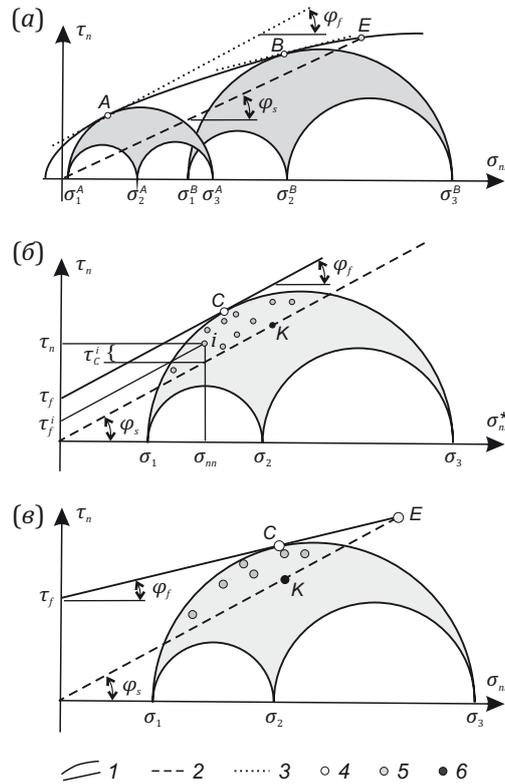


Рис. 3. Диаграмма Мора для напряженных состояний, большие круги Мора которых касаются предельной линии прочности: (а) – в виде криволинейно огибающей, отвечающей реальным экспериментальным данным; (б) – в виде прямой предельной линии, параллельной линии минимального сухого трения; (в) – в виде прямолинейно предельной линии, не параллельной линии минимального сухого трения.

По вертикали – касательные напряжения, по горизонтали – эффективные нормальные напряжения (направо откладываются отрицательные значения нормальных напряжений). σ_i ($i=1, 2, 3$) – эффективные главные напряжения (на рисунке звездочка вверху для эффективных нормальных напряжений не указывалась), τ_f^i и τ_c^i – соответственно локальная прочность и кулоновое напряжение для разрыва (i). 1 – предел хрупкой прочности (криволинейная или прямая линия); 2 – минимальное сопротивление «сухого» статического трения (стационарная стадия на разломе); 3 – касательные к предельной огибающей; 4 – предельное состояние на разломе, отвечающее максимальной прочности; 5 – напряженные состояния на участках разрыва меньше предельного; 6 – напряженное состояние минимального сопротивления хрупкого разрушения (точка К для (б, в)). А, В, С – предельные состояния хрупкого разрушения, Е – состояние, разделяющее область хрупкого (слева) и псевдопластического (справа) деформирования породы. Звездочки над нормальными напряжениями, обозначающие учет влияния флюида, здесь не ставились.

Fig. 3. Mohr diagram for stressed states, with large Mohr circles touched by the tensile limit line: (а) – as a curvilinear envelope consistent with real experimental data; (б) – as a straight limit line parallel to the line of minimum dry friction; (в) – as a straight limit line not parallel to the line of minimum dry friction.

Vertical – shear stresses, horizontal – effective normal stresses (negative normal stress values are plotted to the right). σ_i ($i=1, 2, 3$) – effective principal stresses (no asterisk symbol stands for effective normal stresses in the upper part of the figure), τ_f^i and τ_c^i – local strength and Coulomb stress for fault (i), respectively. 1 – brittle strength limit (curved or straight line); 2 – minimum dry static friction resistance (stationary stage on the fault); 3 – tangents to the envelope limit; 4 – limit state on the fault consistent with the maximum strength; 5 – states of stress on the fault segments less than the limit stress; 6 – stressed state of the minimum brittle failure resistance (point K for (б, в)). А, В, С – limit states of brittle failure, Е – state separating the brittle (left) and pseudoplastic (right) deformation zones in rocks. The asterisks above the normal stresses, indicating that the influence of fluid was taken into account, were not placed here.

сечение области хрупкого разрушения, заключенное между двумя предельными линиями, приблизительно постоянно в области малых напряжений и снижается до нуля в области больших напряжений [Rebetsky et al., 2024]. Это означает, что уровень КН, который представляет собой разницу между прочностью и сопротивлением сухого трения при одинаковых σ_{nn}^* , наибольший при низком и среднем уровне напряжений и наименьший при высоком уровне напряжений. Таким образом, новая версия программы STRESSseism не только более корректно определяет ориентацию осей главных напряжений, но более правильно определяет величины напряжений.

Оба внесенных в последние годы изменения в алгоритм катакластического метода направлены на более точный расчет КН, что позволило выполнить работу по тектонофизическому районированию активных разломов Байкальской рифтовой области [Rebetsky et al., 2024], в которой впервые нами были выделены три зоны с системами разломов, находящимися в состоянии высокого уровня КН. По протяженности этих зон была определена возможность возникновения здесь землетрясений с M около 7.0. В настоящее время для всех этих трех участков начаты работы по уточнению прогноза сейсмической опасности с использованием как тектонофизических, так и сейсмологических методов.

6. ЗАДАЧИ НАМЕЧЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ТЯНЬ-ШАНЕ

Решение задачи прогноза расположения зон подготовки сильных землетрясений предусматривает три последовательные стадии. На первой необходимо выявить участки разломов, которые согласно тектонофизическим данным являются наиболее опасными в настоящее время. Здесь фактически речь идет о долгосрочном прогнозе мест будущих сильных региональных землетрясений (СРЗ). В рамках этой стадии с привлечением методов сейсмотектоники необходимо выполнить следующие мероприятия:

- 1) создание единого регионального каталога землетрясений (время, место и магнитуда) и каталога механизмов очагов землетрясений (МОЗ) Тянь-Шаня;
- 2) тектонофизическую реконструкцию коровых напряжений Тянь-Шаня в разных масштабах усреднения;
- 3) уточнение региональной базы данных ранее произошедших СРЗ на основе данных палеосейсмологии, историко-архивных исследований и инструментальных наблюдений;
- 4) создание электронной базы активных региональных разломов с данными о направлениях и углах их погружения с использованием МОЗ и данных геофизических профилей (если таковые имеются);
- 5) тектонофизическое районирование опасных участков активных разломов по уровню КН с выделением опасных участков разломов – прогнозируемые СРЗ;
- 6) уточнение в полевых тектонофизических наблюдениях данных о направлениях и углах погружения (для глубины до 5 км) разломов для зон будущих СРЗ

и участков больших градиентов вертикальных и горизонтальных движений с использованием георадарных технологий;

7) проведение полевых сейсмотектонических исследований в зонах разломов, выделенных как потенциально опасные для возникновения БСРЗ тектонофизическим методом.

Сформулированные подзадачи первой стадии прогноза СРЗ базируются прежде всего на результатах тектонофизической реконструкции региональных напряжений, которая будет выполняться в нескольких масштабах усреднения. Опыт тектонофизических реконструкций показывает, что оптимальным диапазоном магнитуд очагов землетрясений является 2.5–3.0 единицы. Поскольку на Тянь-Шане имеется несколько национальных сейсмических сетей со средними дистанциями между сейсмическими станциями 10–50 км, создаваемый объединенный каталог МОЗ для Тянь-Шаня (п. 1) может включать землетрясения в диапазоне магнитуд от 1.5 до 7.0. В этом случае имеется возможность выполнить тектонофизическую реконструкцию напряжений (п. 2) в масштабе усреднения 30–50 км ($M=3.0-6.0$) и 5–15 км ($M=1.5-4.0$). Полученные данные о напряжениях будут являться основой для оценки эффективных нормальных и касательных напряжений на региональных разломах, по которым далее и будет проводиться расчет КН (п. 6). Эти расчеты должны предваряться оценкой углов погружения региональных разломов из структурно-геологических полевых данных, из данных о МОЗ, расположенных вблизи разломов (п. 5) [Rebetsky, 2023].

Необходимо отметить, что независимо от результатов районирования региональных разломов по уровню КН те участки разломов, на которых ранее произошли СРЗ (п. 3) или имеют место большие градиенты вертикальных и горизонтальных движений поверхности (п. 4), должны быть включены в зоны специальных полевых тектонофизических (п. 7) и сейсмотектонических обследований (п. 8). Полученные в результате этих обследований уточненные данные об углах погружения разломов в верхней части коры будут служить основой для пересчета КН для разных глубинных уровней с разными углами погружения разломов (например, глубина – 0.0, 5.0, 10.0, 15.0 км).

После выполнения всех пунктов первой стадии работ будет получена карта районирования региональных разломов с выделенными участками, где по данным о КН будет прогнозироваться возможность возникновения СРЗ с магнитудой 7.0 и более. Примером такой карты могут служить результаты тектонофизического районирования опасных разломов Байкальской рифтовой системы, представленной в работе [Rebetsky et al., 2024]. Следует отметить, что места ранее произошедших СРЗ следует также включить в зоны разломов, за которыми в дальнейших исследованиях должно вести наблюдение.

Вторая стадия работ должна включать мониторинг напряженно-деформированного состояния участков

разломов, выделенных как опасные для возникновения новых СРЗ с привлечением сейсмических и геофизических методов. Эта стадия предусматривает выполнение таких подзадач, как:

1) развертывание временных локальных сетей сейсмических станций в районах выделенных опасных участков разломов с определением МОЗ меньшего магнитудного уровня и тектонофизический мониторинг напряженного состояния;

2) оценка скоростей движений по данным спутниковой InSAR интерферометрии за максимально длительный интервал наблюдений (при возможности с применением технологий дополнительных реперных отражателей). Обследование методами спутниковой геодезии с размещением временных пунктов ГНСС наблюдений и на основе лазерной дальнометрии;

3) уточнение места и силы землетрясения для опасных участков разломов прогнозируемых СРЗ на основе сейсмологических методов: RTL (А.Д. Завьялов, В.Б. Смирнов), М7.5+ (В.Г. Кособоков), сейсмических шумов (А.А. Любушин) и др.;

4) геомеханические численные расчеты различных вариантов развития сейсмического процесса для каждого из выделенных прогнозных участков СРЗ.

Эту стадию можно отнести к этапу, на котором идет формирование среднесрочного прогноза. В этот период работ будет происходить уточнение размеров зон прогнозируемых СРЗ и выяснение возможных вариантов развития геологического процесса: стандартное землетрясение, низкочастотное землетрясение, медленное землетрясение или крип. Важным элементом исследований этой стадии должен стать численный расчет, который может показать, какая последовательность сейсмической активизации разломов может привести к наихудшим последствиям [Rebetsky, 2023].

Последняя стадия работ производится для того участка разлома с прогнозируемым СРЗ, где мониторинг напряженно-деформированного состояния показал ускорение развития процесса подготовки землетрясения. Это прежде всего должно выражаться в постепенном ускорении медленных движений на некоторых участках опасной зоны разлома. Для таких участков разломов с привлечением геофизических методов контроля физического состояния геосреды будут выполняться следующие дополнительные исследования:

1) развертывание систем мониторинга скважин, химического состава подземных вод и состава приповерхностного слоя атмосферы (радон, водород и др.);

2) анализ состояния опасных участков разломов на основе комплексирования методов спутникового дистанционного зондирования и наземных наблюдательных систем;

3) проведение в мониторинговом режиме геофизических глубинных исследований (электромагнитные методы, методы анализа микросейсм) и с использованием георадарных технологий;

4) создание наблюдательных скважин с установкой геофонов для локального наблюдения за макросей-

смическим режимом с получением данных в виде механизмов очагов макроземлетрясений (отрицательные магнитуды) и тектонофизический мониторинг напряженного состояния.

Эту стадию работ можно отнести к краткосрочному прогнозу землетрясения, когда можно будет оценить длительность финальной стадии подготовки землетрясения.

7. ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ПРОГНОЗА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ТЯНЬ-ШАНЯ

Представленный перечень решаемых подзадач в рамках детерминированного прогноза прежде всего опирается на 1) сейсмологические базы данных, созданные в независимых республиках Средней Азии, территория которых включает Тянь-Шань; 2) метод катаклического анализа сейсмологических индикаторов разрывных деформаций; 3) базу данных активных разломов Евразии, размещенную на сервере ГИН РАН [Trifonov et al., 2002; Bachmanov et al., 2017; Zelenin et al., 2022]. Следует особо отметить, что без многолетних работ ученых и инженеров сейсмических центров Казахстана, Кыргызстана, Узбекистана проведение намеченных исследований было бы невозможно. В настоящее время на территории этих республик существует несколько региональных (территория республики) и локальных сейсмических сетей: Сейсмологическая опытно-методическая экспедиция Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (СОМЭ МОН РК); Локальная сейсмическая сеть Института геофизических исследований Национального ядерного центра РК (ИГИ НЯЦ РК); Опытно-методическая сейсмологическая экспедиция Национальной академии наук Кыргызской Республики (ОМСЭ НАН КР); Сеть сейсмического мониторинга Института сейсмологии НАН КР (KRNET); Локальная сейсмическая сеть KNET, созданная на базе Бишкекского прогностического полигона; Сеть Республиканского центра сейсмопрогностического мониторинга Республики Узбекистан (РЦСМ), относящаяся в данное время к МЧС РУз.

Сейсмические наблюдения на территории Кыргызстана. Местоположение 18 стационарных сейсмических станций (табл. 1) и десяти пунктов наблюдений сети KNET (табл. 2) на территории Кыргызстана показано на рис. 4. По существу, все аналоговые старые приборы, работавшие на опорных сейсмических станциях, заменены современными цифровыми датчиками. Сбор сейсмической информации производится в реальном масштабе времени. Из рис. 4 видно, что сейсмические станции распределены по территории неравномерно, количество станций на севере Кыргызстана больше, по сравнению с югом республики.

Опыт практической работы показывает необходимость создания единого регионального каталога механизмов очагов землетрясений Тянь-Шаня. Необходимо возобновить международный обмен сейсмологическими данными, включая знаки первых вступлений

Таблица 1. Основные сведения о стационарных сейсмических станциях Кыргызстана**Table 1.** Main data on stationary seismic stations of Kyrgyzstan

| № | Название сейсмической станции | Код | Координаты станции | | | Тип прибора | | Дата начала работы цифровых приборов, дд.мм.гггг |
|----|-------------------------------|------|--------------------|----------|------|------------------------------|------------|--|
| | | | φ, °с.ш. | λ, °в.д. | h, м | Сейсмометр | Дигитайзер | |
| 1 | Ананьево | ANVS | 42.78444 | 77.66722 | 1864 | CMG-3ESPC | DM24 | 21.11.2007 |
| 2 | Арал | ARLS | 41.85444 | 74.32889 | 1526 | CMG-3ESPC | DM24 | 18.07.2008 |
| 3 | Аркит | ARK | 41.80000 | 71.96667 | 1420 | CMG-3ESPC | DM24 | 25.03.2008 |
| 4 | Арсланбоб | ARSB | 41.32333 | 72.98111 | 1378 | CMG-3T Trillium, Titan | CD24 | 28.11.2009 |
| | | ARSB | 41.32739 | 72.97280 | 1307 | | Centaur | 06.07.2022 |
| 5 | Баткен | BTK | 40.05750 | 70.81805 | 980 | CMG-3ESPC Titan-SMA | DM24 | 25.07.2009 |
| 6 | Боом | BOOM | 42.49222 | 75.94222 | 1737 | CMG-3ESPC | DM24 | 05.06.2010 |
| 7 | Пржевальск | PRZ | 42.50000 | 78.40000 | 1835 | CMG-3ESPC | DM24 | 01.11.2010 |
| 8 | Нарын | NRN | 41.42222 | 75.97000 | 2120 | CMG-3ESPC | DM24 | 15.06.2008 |
| 9 | Токтогул | TOKL | 41.98333 | 72.86806 | 1097 | Titan-SMA | | 27.11.2009 |
| 10 | Фрунзе | FRU1 | 42.83333 | 74.61667 | 929 | CMG-3ESPC | DM24 | 30.06.2010 |
| 11 | Каджи-Сай | KDJ | 42.12722 | 77.19444 | 1830 | CMG-3ESPC Titan-SMA | DM24 | 15.04.2011 |
| 12 | Дараут-Курган | DRK | 39.48333 | 71.80500 | 2627 | CMG-3ESPC Trillium, Titan | DM24 | 13.03.2011 |
| | | DRK | 39.47760 | 71.79951 | 2224 | | Centaur | 26.06.2022 |
| 13 | Манас | MNAS | 42.48944 | 72.50667 | 1465 | CMG-3ESPC | DM24 | 25.03.2010 |
| 14 | Суфи-Курган | SFK | 40.01667 | 73.50250 | 2110 | CMG-3T Trillium, Titan | DM24 | 29.03.2010 |
| | | SFK | 40.01715 | 73.50629 | 2089 | | Centaur | 28.04.2022 |
| 15 | Ош | OHN | 40.52444 | 72.78500 | 800 | CMG-3ESPC Titan SMA | CD24 | 23.03.2008 |
| 16 | Терек-Сай | TRKS | 41.46250 | 71.17333 | 1518 | CMG-3ESPC | DM24 | 22.04.2014 |
| 17 | Салом-Алик | SALK | 40.88334 | 73.82083 | 1672 | CMG-3 Trillium, Titan | DM24 | 29.07.2012 |
| | | SALK | 40.88631 | 73.81133 | 1470 | | Centaur | 30.06.2022 |
| 18 | Жаны-Куч | JNKS | 41.05279 | 75.62576 | 2290 | Trillium | Centaur | 11.04.2019 |

Таблица 2. Локальная сеть KNET – Киргизская сеть сейсмических станций**Table 2.** Local network KNET – Kyrgyz network of seismic stations

| № | Название сейсмической станции | Код | Координаты станции | | | Код сети | Сенсор | Дигитайзер |
|----|-------------------------------|------|--------------------|----------|------|----------|--------|---------------|
| | | | φ, °с.ш. | λ, °в.д. | h, м | | | |
| 1 | Ала-Арча | AAK | 42.6375 | 74.4942 | 1680 | KNET | STS2 | Reftek 72-006 |
| 2 | Чумыш | CHM | 42.9985 | 74.7511 | 655 | KNET | STS2 | Reftek 72-006 |
| 3 | Алмалы-Ашуу | AML | 42.1310 | 73.6940 | 3400 | KNET | STS2 | Reftek 72-006 |
| 4 | Эркин-Сай | EKS2 | 42.6615 | 73.7772 | 1360 | KNET | STS2 | Reftek 72-006 |
| 5 | Карагай-Булак | KBK | 42.6563 | 74.9477 | 1760 | KNET | STS2 | Reftek 72-006 |
| 6 | Кызарт | KZA | 42.0777 | 75.2495 | 3520 | KNET | STS2 | Reftek 72-006 |
| 7 | Токмок | TKM2 | 42.9207 | 75.5965 | 2020 | KNET | STS2 | Reftek 72-006 |
| 8 | Учтор | UCH | 42.2275 | 74.5133 | 3850 | KNET | STS2 | Reftek 72-006 |
| 9 | Улахол | ULHL | 42.2455 | 76.2417 | 2040 | KNET | STS2 | Reftek 72-006 |
| 10 | Успенровка | USP | 43.2668 | 74.4997 | 740 | KNET | STS2 | Reftek 72-006 |

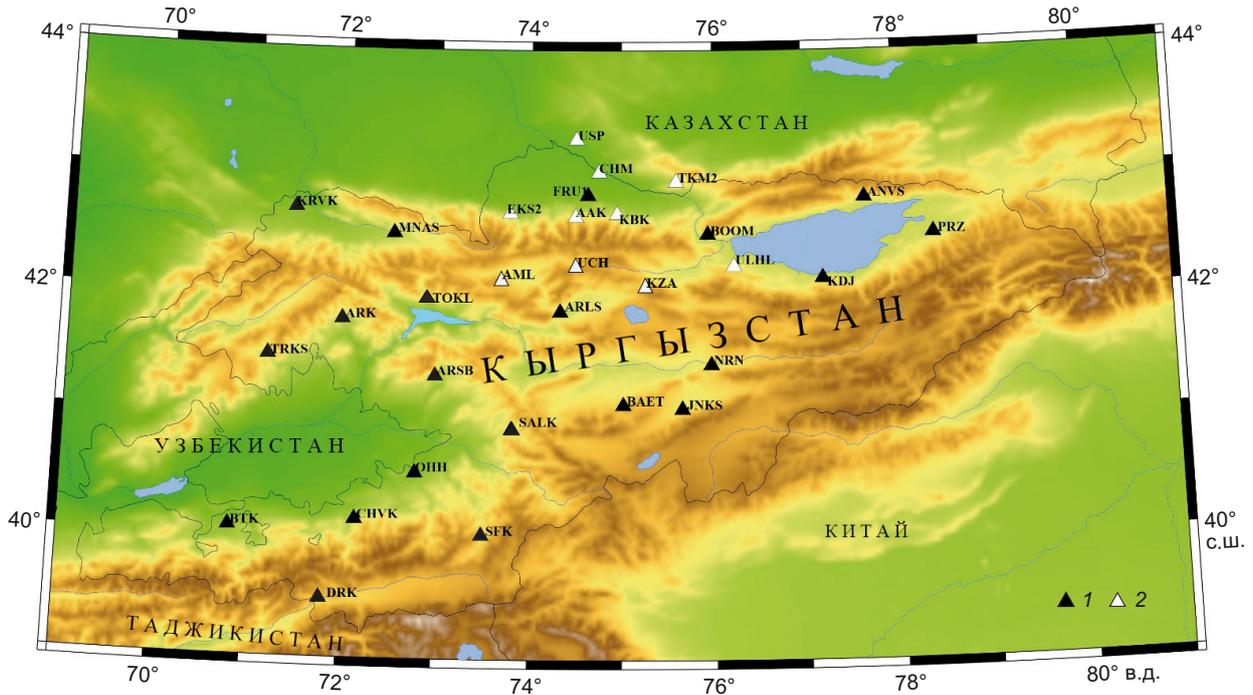


Рис. 4. Размещение стационарных и локальных сейсмических станций на территории Кыргызстана. 1 – стационарная сейсмическая станция; 2 – пункт наблюдения KNET.

Fig. 4. Layout of stationary and local seismic stations in Kyrgyzstan. 1 – stationary seismic station; 2 – KNET observation point.

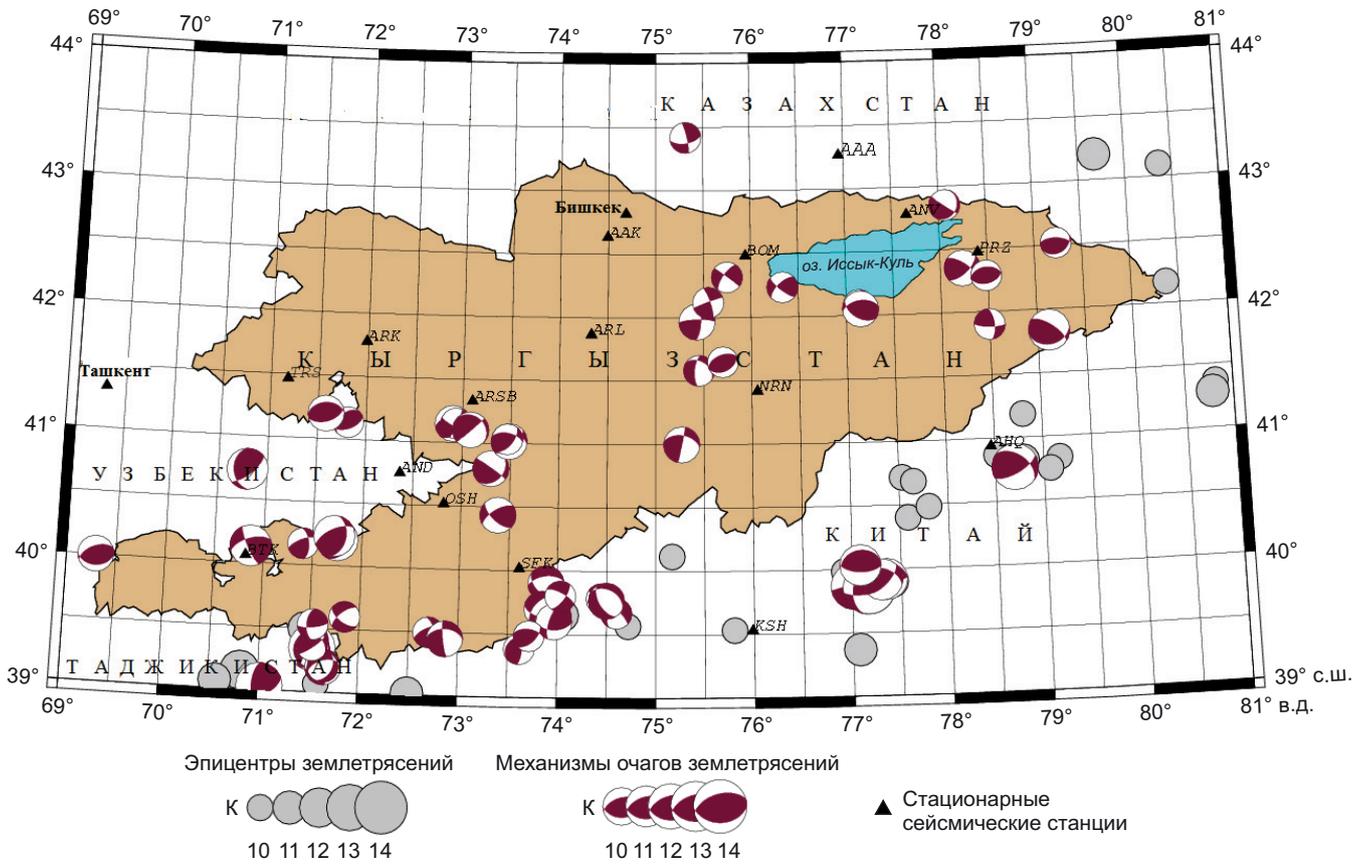


Рис. 5. Распределение эпицентров и механизмов очагов землетрясений с $K \geq 10$ ($M_w \geq 3.3$), произошедших на территории Кыргызстана и сопредельных областей за 2020 г.

Fig. 5. Distribution of epicenters and focal mechanisms of the $K \geq 10$ ($M_w \geq 3.3$) earthquakes occurred in Kyrgyzstan and adjacent areas in 2020.

P-волн от каждой сейсмической станции региона. Более подробные данные по республиканской сети сейсмических станций можно найти в работе [Muraliev et al., 2023].

На рис. 5 показано распределение эпицентров и механизмов очагов землетрясений Кыргызстана за 2020 г. Выборка произведена из регионального каталога землетрясений. Видно, что механизмы очагов приграничных районов между Кыргызстаном и Китаем, Кыргызстаном и Таджикистаном для многих землетрясений не определены, потому что отсутствует обмен сейсмологическими данными (знаки первых вступлений P-волн). Решение этого вопроса требует возобновления международного обмена первичными сейсмологическими данными.

Наиболее обширный и детальный каталог МОЗ создан для алматинского полигона по данным СОМЭ МОН РК. Он насчитывает более 17000 событий с $M > 1.7$ ($K > 5.5$) с 1969 по 2018 г. Для сопоставления отметим, что каталог МОЗ Узбекистана насчитывает немногим более 1000 событий с $M > 4.5$, зарегистрированных с 1955 по 2017 г. Каталог МОЗ локальной сейсмической сети KNET насчитывает более 1600 событий с $M > 2.5$ за период с 1994 по 2020 г.

Уже более 15 лет лаборатория тектонофизики ИФЗ РАН сотрудничает с Научной станцией РАН в г. Бишкеке. Именно для северной части Центрального Тянь-Шаня по данным сети KNET совместно с ведущими учеными ИФЗ РАН к. ф.-м. н. Н.А. Сычевой и С.И. Кузиковым были выполнены первые тектонофизические работы

по районированию активных разломов по уровню кулоновых напряжений [Rebetsky et al., 2016; Rebetsky, Kuzikov, 2016]. Здесь из данных о напряженном состоянии коры вдоль северного склона Кыргызского хребта между Аламединым ущельем и долиной Ала-Арча был выделен безымянный разлом (дано название «Верховой»), который был определен как опасный с возможной магнитудой землетрясения $M \sim 7.0$ [Rebetsky et al., 2020b, 2020c]. Для обследования этого разлома было организовано несколько полевых тектонофизических экспедиций, в результате которых была выявлена его активность, проявляющаяся в формировании новых каменных осыпей. Эти работы не могли быть выполнены без помощи директора ИФЗ РАН д. ф.-м. н. А.К. Рыбина.

В начале 2024 г. была достигнута договоренность о совместных работах по изучению напряженного состояния сейсмоактивных районов на всей территории Кыргызстана с лабораторией сейсмологических методов прогноза Института сейсмологии НАН Кыргызской Республики. Этой лабораторией руководит д. ф.-м. н. А.М. Муралиев, который много лет работал над пополнением каталога землетрясений, произошедших на территории КР, а также создавал каталог МОЗ этого региона Тянь-Шаня. Каталог МОЗ насчитывает более 6000 землетрясений с магнитудой $M > 3.5$.

Сейсмические наблюдения на территории Казахстана. На территории Джунгаро-Северо-Тянь-Шаньского региона создана система комплексного сейсмологического мониторинга, состоящая из сети сейсмических

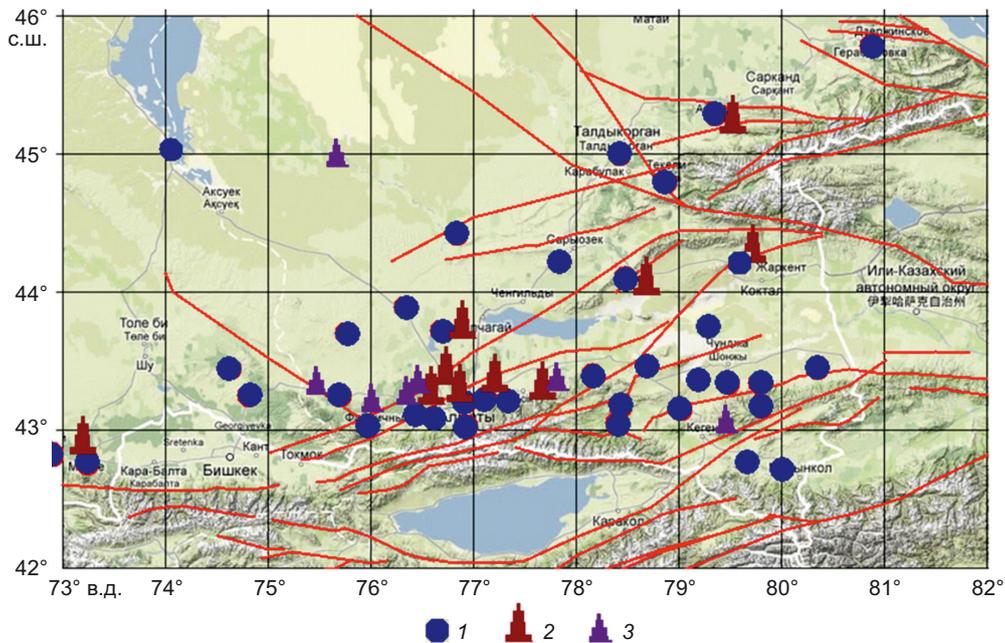


Рис. 6. Схема сети сейсмических, ГГД- и ГГХ-наблюдений на территории Джунгаро-Северо-Тянь-Шаньского региона. 1 – сейсмические станции; 2 – комплексные ГГД-ГГХ-станции Национального научного центра сейсмологических наблюдений и исследований (ННЦСНИ); 3 – ГГД-станции ТОО «Алматыгидрогеология».

Fig. 6. Scheme of seismic, HGD- and HGC-observation in the Junggar-North Tien Shan region. 1 – seismic stations; 2 – complex HGD-HGC stations of the National Scientific Center for Seismological Observations and Research (NSCSOR); 3 – HGD-stations of Almatygidrogeologiya LLP.

станций (рис. 6). Сейсмические наблюдения СОМЭ проводятся на 45 станциях, оснащенных цифровой сейсмической аппаратурой различных периодов регистрации от 360 с до 0.02 с, что позволяет регистрировать как слабые землетрясения ближней зоны, так и сильные землетрясения на расстоянии нескольких тысяч километров.

Сеть сейсмических станций Института сейсмологии РК постоянно расширяется и модернизируется: если до 2000 г. регистрация производилась осциллографическим способом на фотобумагу, то к настоящему времени сейсмические станции оснащены аппаратурой цифровой регистрации с возможностью передачи данных в реальном времени. В настоящее время сейсмические наблюдения проводятся с использованием регистраторов цифровых приборов DAS 6102, Quanterra Q730, Centaur-6, MAPC-3 с радиомодемом DS1710C (Airgrid m5), широкополосных сейсмометров высокой чувствительности TrilliumHorizon 120 с трехкомпонентным цифровым сейсмическим регистратором CentaurDigital Recorder CTR4-3S, а также широкополосных сейсмометров Trillium Slim Posthole и сейсмометров CM3кв. Систематические определения параметров МОЗ проводятся с 1969 г. Всего до 2023 г. количество обработанных землетрясений составило 25766, увеличиваясь год от года по мере развития сети сейсмических станций (рис. 7).

Механизмы очагов землетрясений в СОМЭ ННЦСНИ МЧС РК определяются на основе моделирования очага в рамках теории дислокаций по стандартной методике А.В. Введенской [Vvedenskaya, 1969], число их определений постоянно растет (рис. 7). Достоверность определения параметров очагов землетрясений (рис. 8) в используемой методике зависит от плотности расположения сейсмических станций.

Для территории Джунгаро-Северо-Тянь-Шаньского региона по данным сети постоянно действующих станций СОМЭ ННЦСНИ МЧС РК, с привлечением данных ИГИ НЯЦ РК, получены решения механизмов очагов для землетрясений с энергетическим классом $K \geq 5.5$ (17000 событий за 1969–2018 гг.).

В последнее время для изучения и моделирования напряженно-деформированного состояния земной ко-

ры активно применяется программа STRESSseism и данные спутникового GPS мониторинга в обработке пакетом программ GAMIT/GLOBK [Herring et al., 2018; Vilayev et al., 2017]. По результатам моделирования режимы деформирования земной коры территории Джунгаро-Северо-Тянь-Шаньского региона представлены субширотным растяжением вдоль основных рельефообразующих структур с преобладанием сбросов и сжатием вкост их простирания с доминированием взбросов.

На территории Джунгаро-Северо-Тянь-Шаньского региона также создана система пунктов режимных геофизических (геомагнитных = модульных и компонентных, электромагнитных и геоэлектрических, деформационных) наблюдений и измерений гидрогеодинамических и гидрогеохимических параметров подземных вод ННЦСНИ МЧС РК, а также сеть пунктов измерений уровня подземных вод ТОО «Алматыгидрогеология» (рис. 9).

С 2018 г. развивается сотрудничество лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН с Институтом сейсмологии АН РК и СОМЭ ННЦСНИ МЧС РК, создавшими наиболее представительный каталог МОЗ для Алматинского прогностического полигона. С сотрудниками Института сейсмологии ННЦСНИ МЧС РК к. ф.-м. н. О.М. Белослудцевым, д. ф.-м. н. Г.Я. Хачикян, А.Т. Данабаевой, А.Ж. Жунусовой и Института ионосферы А.В. Виляевым выполнены первые реконструкции напряженного состояния для Алматинского полигона в разных магнитудных диапазонах МОЗ. В настоящее время производится анализ полученных результатов, их обсуждение на научных семинарах и конференциях. Полученные в этих исследованиях данные дают возможность хорошего старта изучения напряжений для Северного и Западного Тянь-Шаня.

Сейсмические наблюдения на территории Узбекистана. В настоящее время в Узбекистане действует 48 цифровых сейсмических станций РЦСМ, обеспечивающих представительную регистрацию землетрясений с магнитудой $M_b = 1.5$ по всей сейсмоактивной части территории республики (рис. 10). С 2021 г. возобновилось определение механизмов очагов для землетрясений с магнитудой $M_b \geq 3.5$ (рис. 11).

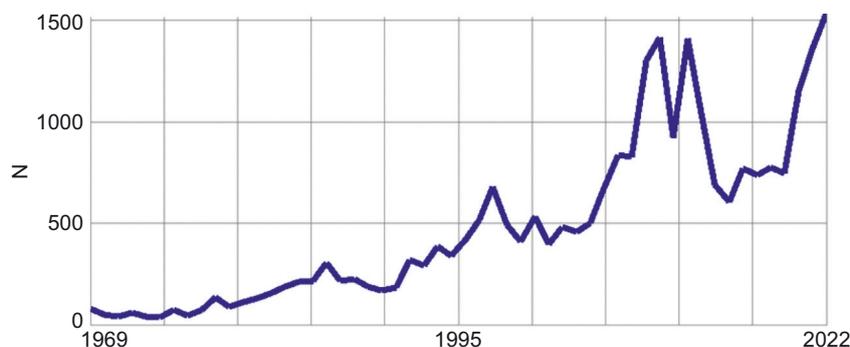


Рис. 7. Количество определений механизмов землетрясений в год.

Fig. 7. The number of earthquake mechanism determinations per year.

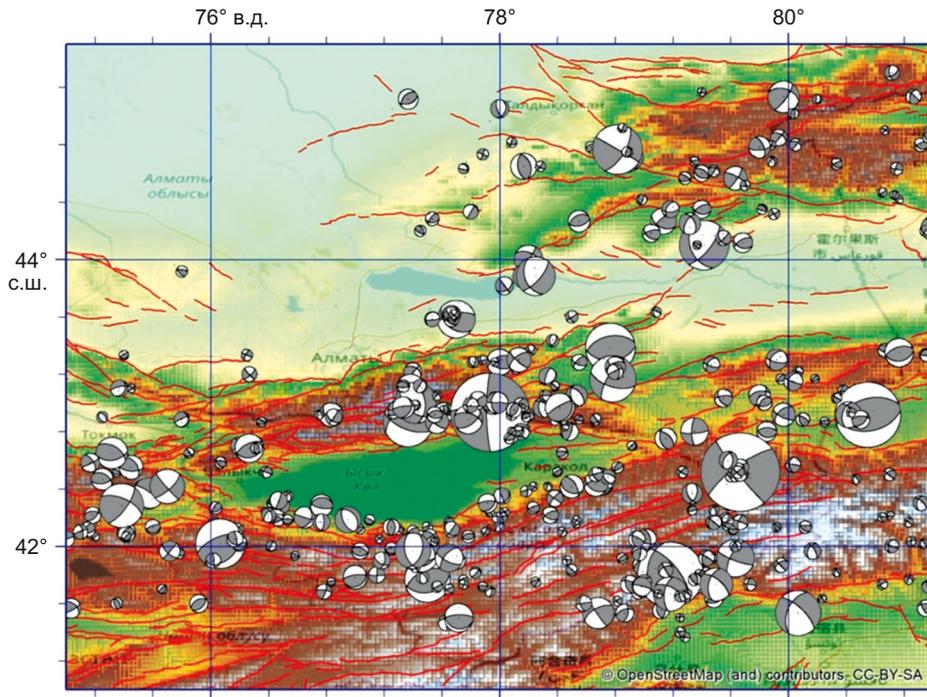


Рис. 8. Фокальные механизмы очагов землетрясений $M \geq 3.6$ для Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий по данным СОМЭ ННЦНИ МЧС РК.

Fig. 8. Focal mechanisms of $M \geq 3.6$ earthquakes for the North Tien Shan and adjacent areas from the data of the Seismological experimental and methodological expedition NSCSOR MES RK.

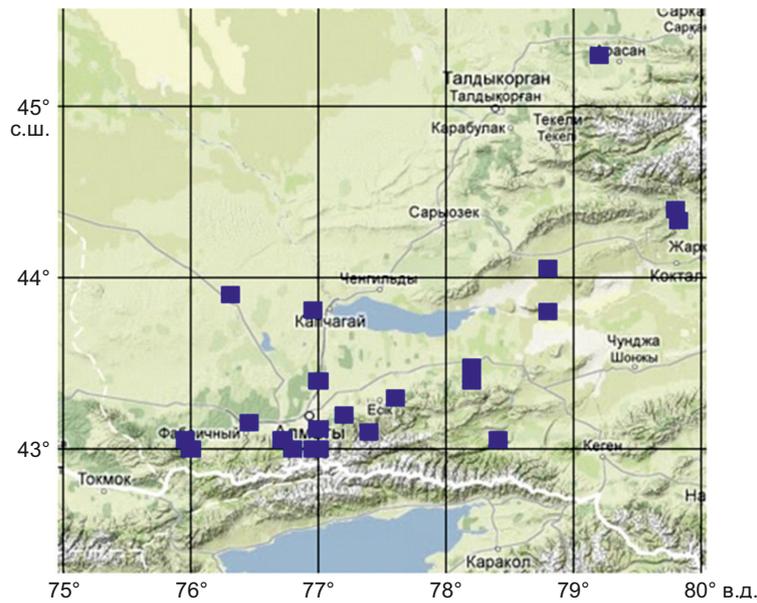


Рис. 9. Схема расположения пунктов режимных геофизических наблюдений.

Fig. 9. Layout of the geophysical monitoring sites.

Сотрудниками лаборатории сейсмической опасности и сейсмического районирования Института сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН Республики Узбекистан совместно с Ю.Л. Ребецким (ИФЗ РАН) были выполнены исследования напряженного состояния земной коры узбекской части Тянь-Шаня [Rebetsky et al., 2020a; Ibragimova et al., 2021; Artikov et al., 2022]. Совместное

использование результатов реконструкции природных напряжений с мониторингом изменений прогностических параметров сейсмического режима сейсмоактивных зон уже на этом этапе исследований позволяет достаточно успешно выявлять области ожидаемой сейсмической активизации на ближайшие годы [Ibragimov et al., 2023].

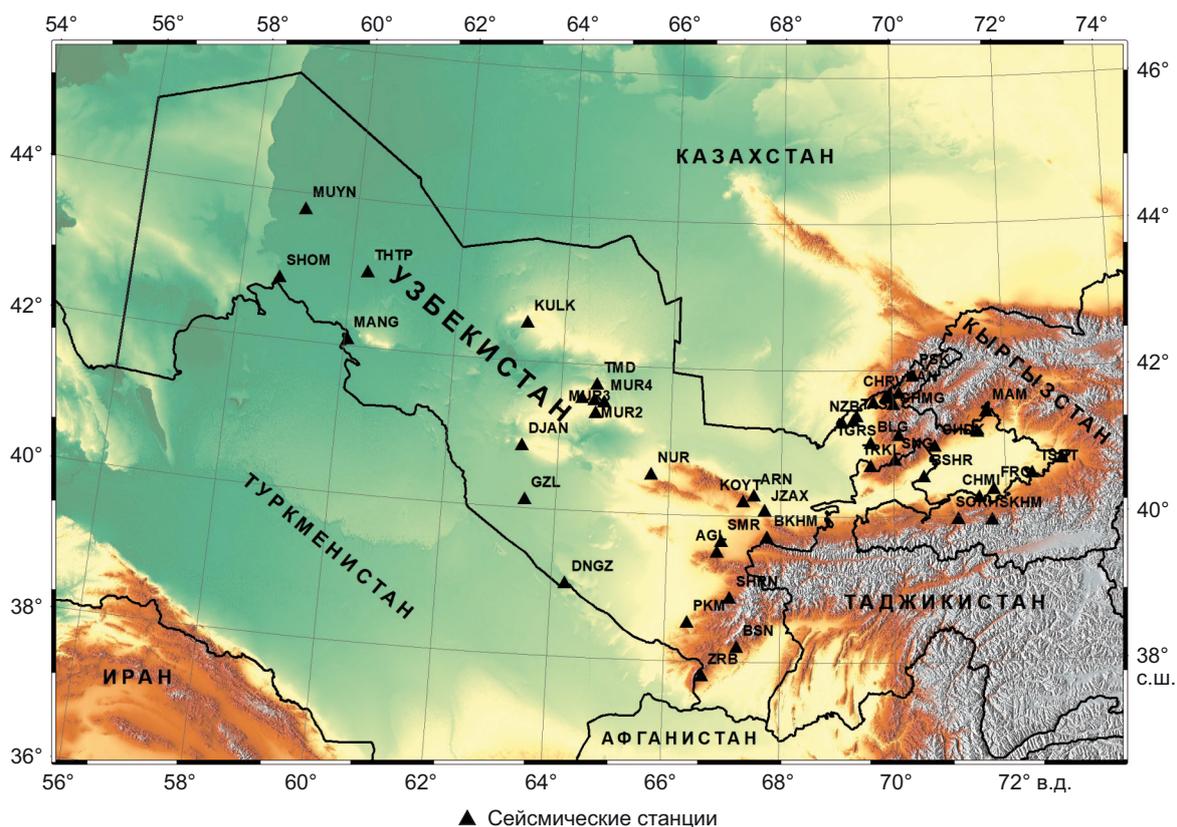


Рис. 10. Схема расположения сейсмических станций РЦСМ Узбекистана.
 Fig. 10. Layout of the RISM stations of Uzbekistan.

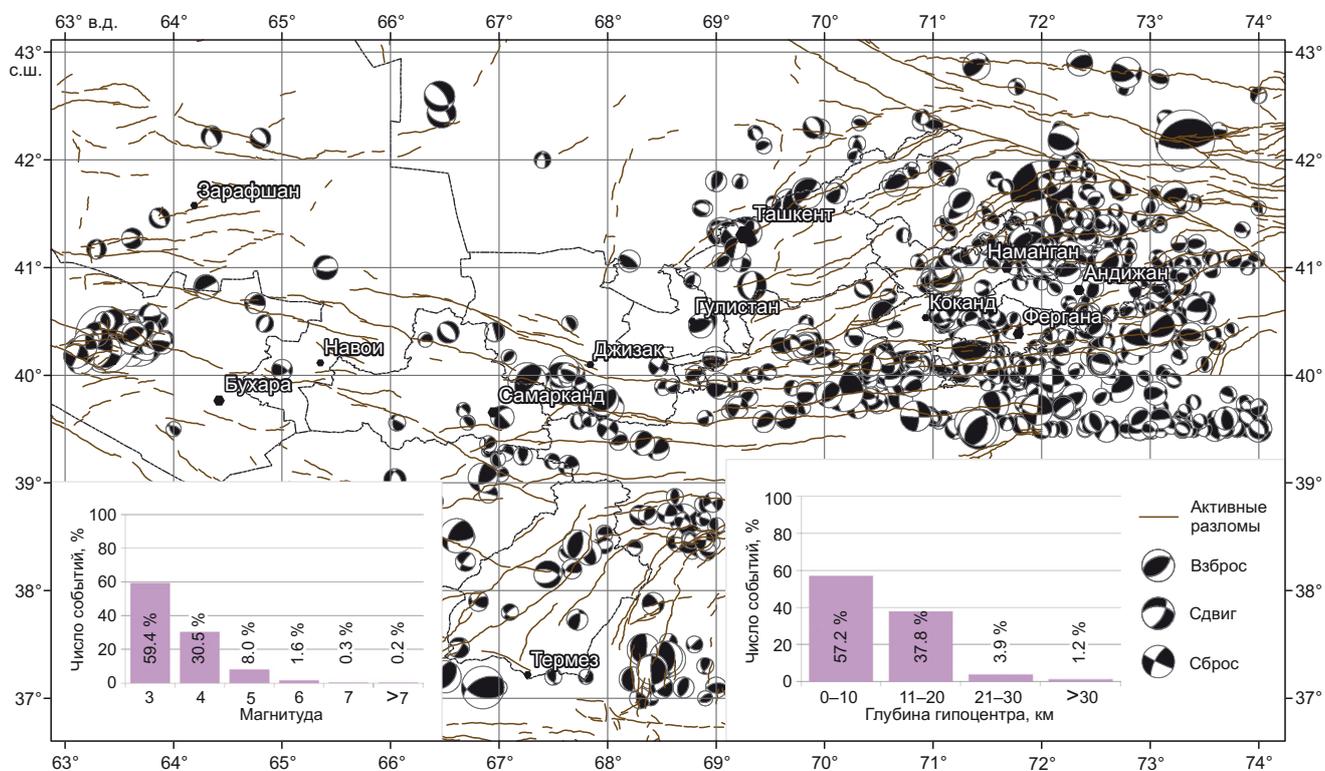


Рис. 11. Карта механизмов очагов землетрясений, вошедших в сводный каталог для территории Узбекистана, и гистограммы распределения событий каталога по магнитуде и глубине [Ibragimova et al., 2021].
 Fig. 11. Map of earthquake focal mechanisms included in the joint catalog for the territory of Uzbekistan and histograms showing the catalogued events distribution by magnitude and depth [Ibragimova et al., 2021].

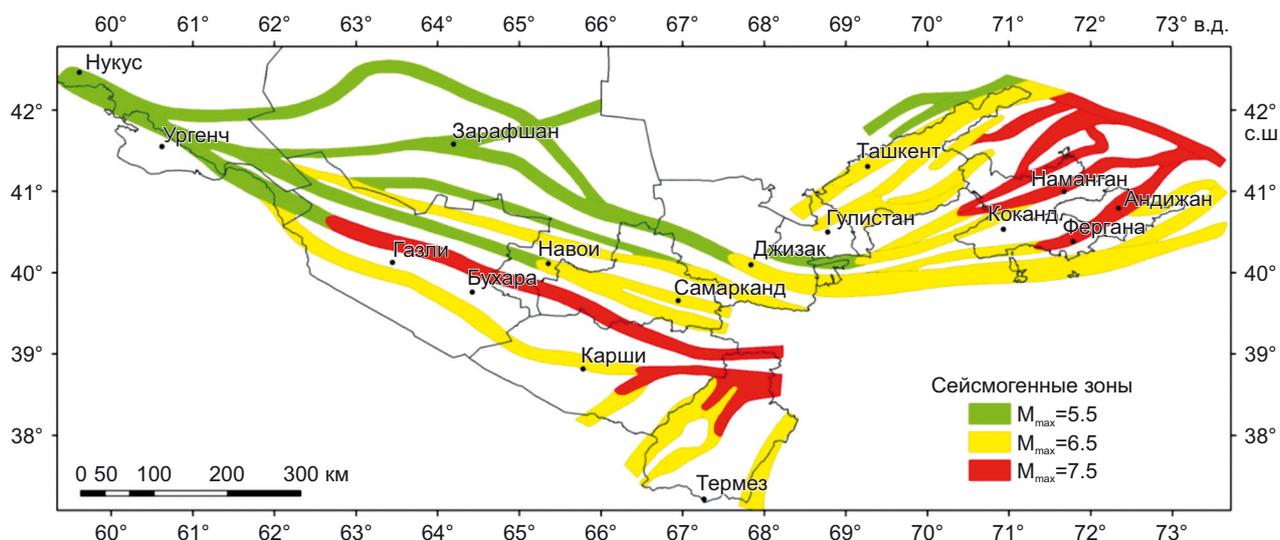


Рис. 12. Схема расположения сейсмогенных зон территории Узбекистана (по [Ibragimov et al., 2002]).

Fig. 12. Scheme of the location of seismogenic zones in the territory of Uzbekistan (after [Ibragimov et al., 2002]).

Лабораторией долгие годы руководил д. ф.-м. н. Т.У. Артиков, внесший большой вклад в изучение напряженного состояния территории узбекского Тянь-Шаня [Artikov et al., 2018]. С ведущими сейсмологами д. ф.-м. н. Р.С. Ибрагимовым, д. ф.-м. н. Т.Л. Ибрагимовой и новым руководителем этой лаборатории к. ф.-м. н. М.А. Мирзаевым намечены работы по районированию активных разломов узбекского Тянь-Шаня по интенсивности КН (рис. 12).

В настоящее время идет пополнение каталога МОЗ с целью реконструкции напряжений на основе последней версии программы STRESSseism. После анализа и обсуждения полученных результатов, их сравнения с результатами предыдущей реконструкции напряжений и опубликования можно будет планировать следующий этап работ – районирование активных разломов Западного Тянь-Шаня.

Важным является тот факт, что в Узбекистане во второй половине прошлого века сложилась тектонофизическая школа, сотрудничавшая с М.В. Гзовским, а после его смерти с сотрудниками лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН. Ярким представителем этой школы является д. г.-м. н. Р.А. Умурзаков, который в настоящее время занимается обновлением банка данных активных разломов узбекской части Тянь-Шаня.

Крайне важным является выполнение аналогичных исследований и для территории Южного и Восточного Тянь-Шаня, которое станет возможным при подключении к намеченным исследованиям сейсмологов и геофизиков Таджикистана и Китайской Народной Республики. В конце июня 2024 г. в Пекине в Геологическом институте Китайской администрации по землетрясениям состоялась Международная школа «Central-North Asia Regional Training Course on Seismotectonics, Fault Deformation, Earthquake Prevention and Disaster Reduction Techniques». В рамках школы с профессором доктором Джанг Гухонгом (Zhang Guohong) были про-

ведены обсуждения по возможности проведения совместных исследований напряженного состояния и деформаций поверхности для территории и Южного и Восточного Тянь-Шаня.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Около 70 лет назад Г.А. Гамбургцев [Gamburtsev, 1955, с. 9, 11] в статье, посвященной проблеме сейсмического прогноза, написал: «Данные сейсмологии должны контролироваться и дополняться тектоническим анализом, а также глубинной геофизической разведкой (анализ гравитационных и магнитных аномалий, глубинное сейсмическое зондирование земной коры). Тектонические исследования, наряду с сейсмологическими, имеют основное значение при сейсмическом районировании крупных территорий. <...> Превалирование сейсмостатистики при современном состоянии сейсмологии является вынужденным. В дальнейшем, по мере накопления наших знаний о природе землетрясений и об условиях их возникновения, роль сейсмостатистики должна уменьшаться и, соответственно, главное значение должны получить твердо обоснованные физические и геологические критерии сейсмичности».

Мы полностью согласны с концепцией Г.А. Гамбургцева и М.В. Гзовского и считаем, что в настоящее время есть возможность реализовать их идеи в развитии комплекса научных исследований по детерминированному прогнозу сильных землетрясений. Ключевую фразу вышеприведенной цитаты Г.А. Гамбургцева на современном уровне состояния проблемы сейсмических опасностей можно записать так: тектонофизические исследования, наряду с сейсмологическими и сеймотектоническими, должны иметь определяющее значение при сейсмическом районировании крупных территорий. Они являются связующим звеном между данными сейсмологических наблюдений и

геомеханическим анализом состояния сейсмогенных разломов земной коры.

Общую координацию намеченных совместных работ осуществляют директор Института сейсмологии НАН КР, президент НАН КР академик К.Е. Абдрахматов и директор Института сейсмологии АН РУз д. г.-м. н. В.А. Исмаилов. Запланировано в начале 2025 г. выполнить анализ каталогов МОЗ сейсмических сетей KNET и KRNET Кыргызстана, а также алматинского полигона (СОМЭ ННЦСНИ МЧС РК). После этого планируется приступить к реконструкции напряженного состояния для Северного Тянь-Шаня и затем для Центрального Тянь-Шаня. К концу года будут получены первые тектонофизические данные по опасным участкам активных разломов этих регионов Тянь-Шаня.

9. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

10. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

11. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Angelier J., Mechler P., 1977. Sur Une Methode Graphique de Recherche Des Contraintes Principales Egalement Utilisable en Tectonique ET en Seismologie: La Methode Des Diedres Droits. Bulletin de la Société Géologique de France S7-XIX (6), 1309–1318. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.S7-XIX.6.1309>.

Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., 2018. Identification of Expected Seismic Activity Areas by Forecasting Complex Seismic-Mode Parameters in Uzbekistan. Geodesy and Geodynamics 9 (2), 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.11.005>.

Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., Rebetsky Yu.L., 2022. Stress State of the Earth's Crust, Seismicity, and Prospects for Long-Term Forecast of Strong Earthquakes in Uzbekistan. Russian Geology and Geophysics 63 (12), 1442–1458. <https://doi.org/10.2113/RGG20214408>.

Bachmanov D.M., Kozhurin A.I., Trifonov V.G., 2017. The Active Faults of Eurasia Database. Geodynamics & Tectonophysics 8 (4), 711–736 (in Russian) [Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифионов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 711–736]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0314>.

Bott M.H.P., 1959. The Mechanics of Oblique Slip Faulting. Geological Magazine 96 (2), 109–117. <https://doi.org/10.1017/S0016756800059987>.

Chen J., Zilio L.D., Zhang H., Yang G., Shi Y., Liu Ch., 2023. Decoding Stress Patterns of the 2023 Turkey-Syria Earthquake Doublet. Preprint (v. 1). Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2922091/v1>.

Delvaux D., Sperner B., 2003. New Aspects of Tectonic Stress Inversion with Reference to the TENSOR Program. In: D. Nieuwland (Ed.), New Insights Into Structural Interpretation and Modelling. Vol. 212. Geological Society of London Special Publications 212, p. 75–100. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.212.01.06>.

Ferrill D., Morris A.P., 2003. Dilational Normal Faults. Journal of Structural Geology 25 (2), 183–196. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(02\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00029-9).

Gamburtsev G.A., 1955. Status and Prospects of Works in the Field of Earthquake Prediction. Bulletin of the Council on Seismology of the USSR Academy of Science 1, 7–16 (in Russian) [Гамбурцев Г.А. Состояние и перспективы работ в области прогноза землетрясений // Бюллетень Совета по сейсмологии АН СССР. 1955. № 1. С. 7–16].

Ganas A., Sokos E., Agalos A., Leontakianakos G., Pavlides S., 2006. Coulomb Stress Triggering of Earthquakes Along the Atalanti Fault, Central Greece: Two April 1894 M6+ Events and Stress Change Patterns. Tectonophysics 420 (3–4), 357–369. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.03.028>.

Gushchenko O.I., Kuznetsov V.A., 1979. Determination of Principal Stress Orientations and Their Ratio Values on the Basis of the Directions of Strike-Slip Tectonic Movements. In: Stress Fields in the Lithosphere. Nauka, Moscow, p. 60–66 (in Russian) [Гущенко О.И., Кузнецов В.А. Определение ориентаций и соотношения величин главных напряжений по совокупности направлений сдвиговых тектонических смещений // Поля напряжений в литосфере. М.: Наука, 1979. С. 60–66].

Gzovsky M.V., 1956. Formation Mechanism of Large Tectonic Faults. Prospect and Protection of Mineral Resources 7, 1–14 (in Russian) [Гзовский М.В. Механизм формирования крупных тектонических разрывов // Разведка и охрана недр. 1956. № 7. С. 1–14].

Gzovsky M.V., 1957a. Tectonophysical Substantiation for Geological Criteria of Seismicity. Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Geophysical Series 2, 141–160 (in Russian) [Гзовский М.В. Тектонофизическое обоснование геологических критериев сейсмичности // Известия АН СССР. Серия геофизическая. 1957. № 2. С. 141–160].

Gzovsky M.V., 1957b. Tectonophysical Substantiation for Geological Criteria of Seismicity. Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Geophysical Series 3, 273–283 (in Russian) [Гзовский М.В. Тектонофизическое обоснование геологических критериев сейсмичности // Известия АН СССР. Серия геофизическая. 1957. № 3. С. 273–283].

Gzovsky M.V., 1963. Using Data on Neo- and Recent Tectonic Movements in New-Type Detailed Seismic Zoning. In: Recent Crustal Movements. Vol. 1. Publishing House of the USSR Academy of Science, Moscow, p. 149–178 (in Russian) [Гзовский М.В. Использование новейших и современных тектонических движений при детальном сейсмическом районировании нового типа // Современные

движения земной коры. М.: Изд-во АН СССР, 1963. № 1. С. 149–178].

Harris R.A., Simpson R.W., Reasenber P.A., 1995. Influence of Static Stress Changes on Earthquake Locations in Southern California. *Nature* 375, 221–224. <https://doi.org/10.1038/375221a0>.

Herring T.A., Floyd M.A., King R.W., McClusky S.C., 2018. Global Kalman Filter VLBI and GPS Analysis Program. GLOBK Reference Manual, Release 10.6. MIT, Cambridge, 54 p.

Ibragimov R.N., Nurmatov U.O., Ibragimov O.R., 2002. Seismotectonic Method for Assessing Seismic Hazard and Issues of Seismic Zoning. In: *Seismic Zoning and Earthquake Forecasting in Uzbekistan*. Hydroingeo, Tashkent, p. 59–74 (in Russian) [Ибрагимов Р.Н., Нурматов У.О., Ибрагимов О.Р. Сейсмотектонический метод оценки сейсмической опасности и вопросы сейсмического районирования // Сейсмическое районирование и прогноз землетрясений в Узбекистане. Ташкент: Гидроингео, 2002. С. 59–74].

Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., Rebet-sky Yu.L., 2023. The Probability of a Strong ($M \geq 6.0$) Earthquake in the South Fergana Seismic Activity Zone in the Coming Years. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (1), 0688 (in Russian) [Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А., Ребецкий Ю.Л. О возможности возникновения сильного (магнитуда $M \geq 6.0$) землетрясения в Южно-Ферганской сейсмоактивной зоне в ближайшие годы // Геодинамика и тектонофизика. 2023. Т. 14 № 1. 0688]. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-1-0688>.

Ibragimova T.L., Ibragimov R.S., Mirzaev M.A., Rebet-sky Yu.L., 2021. The Current Stress of Earth's Crust in the Territory of Uzbekistan According to Focal Earthquake Mechanisms. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (3), 435–454 (in Russian) [Ибрагимова Т.Л., Ибрагимов Р.С., Мирзаев М.А., Ребецкий Ю.Л. Современное напряженное состояние земной коры территории Узбекистана по данным сборного каталога механизмов очагов землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 3. С. 435–454]. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-3-0532>.

Kal'meteva Z.A., Mikolaichuk A.V., Moldobekov B.D., Mel-leshko A.V., Zhantaev M.M., Zubovich A.V., 2009. Earthquakes Atlas of Kyrgyzstan. Central-Asian Institute for Applied Geosciences, Bishkek, 73 p. (in Russian) [Кальметьева З.А., Миколайчук А.В., Молдобеков Б.Д., Мелешко А.В., Жантаев М.М., Zubovich A.V. Атлас землетрясений Кыргызстана. Бишкек: ЦАИИЗ, 2009. 73 с.].

King G.C., Stein R.S., Lin J., 1994. Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America* 84 (3), 935–953.

Kivinen A., Varis K., 2009. Jännitystilamittaukset Hydraulisen Murtuman Menetelmällä Pyhäjoella 2009. Raportti 223/2934 III/09/AK, KV. Suomen Malmi Oy, Espoo, 8 p.

Kozhurin A.I., Ponomareva V.V., Pinegina T.K., 2008. Active Faulting in the South of Central Kamchatka. *Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center"*. *Earth Sciences* 12 (2), 10–27 (in Russian) [Ко-

журин А.И., Пономарева В.В., Пинегина Т.К. Активная разломная тектоника юга Центральной Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2008. Вып. 12. № 2. С. 10–27].

Krüger F., Kulikova G., Landgraf A., 2018. Magnitudes for the Historical 1885 (Belovodskoe), the 1887 (Verny) and the 1889 (Chilik) Earthquakes in Central Asia Determined from Magnetogram Recordings. *Geophysical Journal International* 215 (3), 1824–1840. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy377>.

Kuzmin Yu.O., 1999. Modern Geodynamics and Geodynamic Risk Assessment in Subsoil Use. Agency of Economic News, Moscow, 220 p. (in Russian) [Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. М.: Агентство экономических новостей, 1999. 220 с.].

Kuzmin Yu.O., 2004. Recent Geodynamics of Fault Zones. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 40 (10), 868–882.

Kuzmin Yu.O., 2005. Hazardous Faults and Emergency Prediction. In: *Emergency Prediction Problems. Reports and Presentations of the IV Research and Practice Conference (October 19–20, 2004)*. MTP INVEST, Moscow, p. 153–163 (in Russian) [Кузьмин Ю.О. Опасные разломы и прогнозирование чрезвычайных ситуаций // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций: Доклады и выступления IV научно-практической конференции (19–20 октября 2004 г.). М.: МТП-инвест, 2005. С. 153–163].

Kuzmin Yu.O., Zhukov V.S., 2004. Recent Geodynamics and Physical Properties Variations of Rocks. *Mining Book*, Moscow, 262 p. (in Russian) [Кузьмин Ю.О., Жуков В.С. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. М.: Горная книга, 2004. 262 с.].

Landgraf A., Dzhumabaeva A., Abdrakhmatov K.E., Strecker M.R., Macaulay E.A., Arrowsmith J.R., Sudhaus H., Preusser F., Rugel G., Merchel S., 2016. Repeated Large-Magnitude Earthquakes in a Tectonically Active, Low-Strain Continental Interior: The Northern Tien Shan, Kyrgyzstan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 121 (5), 3888–3910. <https://doi.org/10.1002/2015JB012714>.

Mallman E.P., Zoback M.D., 2007. Assessing Elastic Coulomb Stress Transfer Models Using Seismicity Rates in Southern California and Southwestern Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 112 (B3). <https://doi.org/10.1029/2005JB004076>.

Melnikov G.F., Strakhov V.N., Ulomov V.I. (Eds), 2000. Seismic Zoning in the Territory of the Russian Federation – GSZ-97, 2000. Scale of 1:8000000. "Tekart-M" R&D Company, Moscow, 4 sheets (in Russian) [Сейсмическое районирование территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8000000 / Ред. Г.Ф. Мельников, В.Н. Страхов, В.И. Уломов. М.: НПП «Текарт-М», 2000. 4 л.].

Morris A.P., Ferrill D.A., Henderson D.B., 1996. Slip Tendency Analysis and Fault Reactivation. *Geology* 24 (3), 275–278. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024<0275:STAAFR>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<0275:STAAFR>2.3.CO;2).

Muraliev A.M., Abdylbaeva F.S., Seitaliev M.M., Berezina A.V., Sabirova G.A., 2023. Development of Seismic Monitoring in Kyrgyzstan. *Russian Journal of Seismology* 5 (3), 59–66 (in

Russian) [Муралиев А.М., Абдылдаева Ф.С., Сейталиев М.М., Березина А.В., Сабирова Г.А. Развитие сейсмических наблюдений на территории Кыргызстана // Российский сейсмологический журнал. 2023. Т. 5. № 3. С. 59–66]. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.3.04>.

New Catalog of Strong Earthquakes in the USSR from Ancient Times to 1975, 1977. Nauka, Moscow, 536 p. (in Russian) [Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 года. М.: Наука, 1977. 536 с.].

Nikolaevsky V.N., 2010a. Geomechanics. Vol. 1. Destruction and Dilatancy. Oil and Gas. ICR, Moscow–Izhevsk, 640 p. (in Russian) [Николаевский В.Н. Геомеханика. Т. 1: Разрушение и дилатансия. Нефть и газ. М.–Ижевск: ИКИ, 2010. 640 с.].

Nikolaevsky V.N., 2010b. Geomechanics. Vol. 2. Earth's Crust. Nonlinear Seismics. Whirlwinds and Hurricanes. ICR, Moscow–Izhevsk, 560 p. (in Russian) [Николаевский В.Н. Геомеханика. Т. 2: Земная кора. Нелинейная сейсмика. Вихри и ураганы. М.–Ижевск: ИКИ, 2010. 560 с.].

Nikolaevsky V.N., 2012. Geomechanics. Vol. 3: Earthquakes and Crustal Evolution. Boreholes and Reservoir Deformations. Gas Condensate. ICR, Moscow–Izhevsk, 644 p. (in Russian) [Николаевский В.Н. Геомеханика. Т. 3: Землетрясения и эволюция коры. Скважины и деформации пласта. Газоконденсат. М.–Ижевск: ИКИ, 2012. 644 с.].

Nikonov A.A., 1995. Active Faults: Definition and Identification Problems. *Geocology* 4, 16–27 (in Russian) [Никонов А.А. Активные разломы: определение и проблемы выделения // Геоэкология. 1995. № 4. С. 16–27].

Okada Y., 1992. Internal Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space. *Bulletin of the Seismological Society of America* 82 (2), 1018–1040. <https://doi.org/10.1785/BSSA0820021018>.

Pang Y., 2022. Stress Evolution on Major Faults in Tien Shan and Implications for Seismic Hazard. *Journal of Geodynamics* 153–154, 101939. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2022.101939>.

Pavlenko O.V., Pavlenko V.A., 2023. Rupture Directivity Effects of Large Seismic Sources, Case of February 6th 2023 Catastrophic Earthquakes in Turkey. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 59, 912–928. <https://doi.org/10.1134/S1069351323060149>.

Pohjatekniikka FH1.C.T036.002.HG.1001.E, 2018. Technical Report for Engineering Geological Investigations to Develop Design Documents of Hanhikivi-1 NPP. Stage 1. Rev 1. March.

Rebetsky Yu.L., 2003. Stress–Strain State and Mechanical Properties of Natural Massifs from Earthquake Focal Mechanisms and Structural–Kinematic Characteristics of Fractures. PhD Thesis (Doctor of Physical and Mathematical Sciences). Moscow, 455 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: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. М., 2003. 455 с.].

Rebetsky Yu.L., 2006. Dilatancy, Pore Fluid Pressure and New Data on the In-Situ Rock Mass Strength. In: Yu.G. Leonov (Ed.), *Fluid and Geodynamics. Proceedings of the All-Russia Symposium "Deep-Seated Fluids and Geodynamics"* (November 19–21, 2003). Nauka, Moscow, p. 120–146 (in Russian) [Ребецкий Ю.Л. Дилатансия, поровое давление флюида и новые данные о прочности горных массивов в естественном залегании // Флюид и геодинамика: Материалы Всероссийского симпозиума «Глубинные флюиды и геодинамика» (19–21 ноября 2003 г.) / Ред. Ю.Г. Леонов. М.: Наука, 2006. С. 120–146].

Rebetsky Yu.L., 2023. Tectonophysical Zoning of Seismogenic Faults in Eastern Anatolia and February 6, 2023 Kahramanmaraş Earthquakes. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 59, 851–877. <https://doi.org/10.1134/S1069351323060174>.

Rebetsky Yu.L., Dobrynina A.A., Sankov V.A., 2024. Tectonophysical Zoning of Active Faults of the Baikal Rift System. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (4), 0775 (in Russian) [Ребецкий Ю.Л., Добрынина А.А., Саньков В.А. Тектонофизическое районирование активных разломов Байкальской рифтовой системы // Геодинамика и тектонофизика. 2024. Т. 15. № 4. 0775]. <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-4-0775>.

Rebetsky Yu.L., Guo Ya., Wang K., Alekseev R.S., Marinin A.V., 2021. Stress State of the Earth's Crust and Seismotectonics of Western Sichuan, China. *Geotectonics* 55, 844–863. <https://doi.org/10.1134/S0016852121060078>.

Rebetsky Yu.L., Ibragimova T.L., Ibragimov R.S., Mirzaev M.A., 2020a. Stress State of Uzbekistan's Seismically Active Areas. *Seismic Instruments* 56, 679–700. <https://doi.org/10.3103/S0747923920060079>.

Rebetsky Yu.L., Kuzikov S.I., 2016. Active Faults of the Northern Tien Shan: Tectonophysical Zoning of Seismic Risk. *Russian Geology and Geophysics* 57 (6), 967–983. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.05.004>.

Rebetsky Yu.L., Marinin A.V., 2024. Integration of Rebetsky's and Rastsvetaev's Methods for Paleostress Reconstructions on the Basis of Fault Structures of Various Genesis. In: *Problems of Tectonics and Geodynamics of the Earth's Crust and Mantle. Proceedings of the LV Tectonic Meeting* (January 29 – February 3, 2024). Vol. 2. GEOS, Moscow, p. 122–127 (in Russian) [Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В. Комплексирование методов Ребецкого и Расцветаева для реконструкции палеонапряжений по совокупностям разрывных структур разного генезиса // Тектоника и геодинамика земной коры и мантии: фундаментальные проблемы – 2024: Материалы LV тектонического совещания (29 января – 3 февраля 2024 г.). М.: ГЕОС, 2024. Т. 2. С. 122–127].

Rebetsky Yu.L., Marinin A.V., Kuzikov S.I., Sycheva N.A., Sychev V.N., 2020b. About Activity of the Fault "Verkhovoy" on Northern Slope of Kyrgyz Range by Results of Tectonophysical Stress Inversion. *Bulletin of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic* 3, 105–113 (in Russian) [Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В., Кузиков С.И., Сычева Н.А., Сычев В.Н. Об активности разлома «Верховой» на северном склоне Киргизского хребта по результатам

тектонифической инверсии напряжений // Известия Национальной академии наук Кыргызской Республики. 2020. № 3. С. 105–113].

Rebetsky Yu.L., Marinin A.V., Kuzikov S.I., Sycheva N.A., Sychev V.N., 2020c. Tectonophysical Study of the Verkhovoi Fault Activity on the Northern Slope of the Kyrgyz Ridge. *Geodynamics & Tectonophysics* 11 (4), 770–784 (in Russian) [Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В., Кузиков С.И., Сычева Н.А., Сычев В.Н. Тектонофизические исследования активности разлома Верхового на северном склоне Киргизского хребта // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11. № 4. С. 770–784]. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-4-0506>.

Rebetsky Yu.L., Polets A.Yu., 2018. The Method of Cataclastic Analysis of Discontinuous Displacements. In: S. D'Amico (Ed.), *Moment Tensor Solutions. A Useful Tool for Seismotectonics*. Springer Natural Hazards. Springer, Cham, p. 111–162. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77359-9_6.

Rebetsky Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V., 2017. From Slickenside to Tectonic Stresses. *Techniques and Algorithms*. GEOS, Moscow, 234 p. (in Russian) [Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. М.: ГЕОС, 2017. 234 с.].

Rebetsky Yu.L., Sycheva N.A., 2024. The Stressed State of the Earth's Crust in the Altai-Sayan Mountain Region: Reconstruction Based on the Modified Algorithms of the Cataclastic Method. *Geosystems of Transition Zones* 8 (4), 261–276 (in Russian) [Ребецкий Ю.Л., Сычева Н.А. Напряженное состояние земной коры Алтае-Саянской горной области: реконструкция на основе модифицированных алгоритмов катакlastического метода // Геосистемы переходных зон. 2024. Т. 8. № 4. С. 261–276]. <https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.4.261-276>.

Rebetsky Yu.L., Sycheva N.A., Sychev V.N., Kuzikov S.I., Marinin A.V., 2016. The Stress State of the Northern Tien Shan Crust Based on the KNET Seismic Network Data. *Russian Geology and Geophysics* 57 (3), 387–408. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.03.003>.

Smirnov V.B., Petrushov A.A., Mikhailov V.O., 2023. The RTL Anomaly of Seismicity Before the February 6, 2023 Earthquake in Turkey. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 59, 929–938. <https://doi.org/10.1134/S1069351323060204>.

Stein R.S., King G.C.P., Lin J., 1992. Change in Failure Stress on the Southern San Andreas Fault System Caused by the 1992 Magnitude = 7.4 Landers Earthquake. *Science* 258 (5086), 1328–1332. <https://doi.org/10.1126/science.258.5086.1328>.

Sunbul F., 2019. Time-Dependent Stress Increase Along the Major Faults in Eastern Turkey. *Journal of Geodynamics* 126, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2019.03.001>.

Tikhotsky S.A., Tatevosyan R.E., Rebetsky Yu.L., Ovsyuchenko A.N., Larkov A.S., 2023. The 2023 Kahramanmaraş

Earthquakes in Turkey: Seismic Movements Along Conjugated Faults. *Doklady Earth Sciences* 511, 703–709. <https://doi.org/10.1134/s1028334x23600974>.

Trifonov V.G., 2001. Active Faults of Earth Crust. *Soros Educational Journal* 7 (7), 66–74 (in Russian) [Трифонов В.Г. Живые разломы земной коры // Соросовский образовательный журнал. Т. 7. № 7. С. 66–74].

Trifonov V.G., Karakhanyan A.S., Kozhurin A.I., 1989. Active Faults and Seismicity. *Priroda* 12, 32–38 (in Russian) [Трифонов В.Г., Караханян А.С., Кожурин А.И. Активные разломы и сейсмичность // Природа. 1989. № 12. С. 32–38].

Trifonov V.G., Soboleva O.V., Trifonov R.V., Vostrikov G.A., 2002. Recent Geodynamics of the Alpine-Himalayan Collision Belt. *GEOS, Moscow*, 225 p. (in Russian) [Трифонов В.Г., Соболева О.В., Трифонов Р.В., Востриков Г.А. Современная геодинамика Альпийско-Гималайского коллизийного пояса. М.: ГЕОС, 2002. 225 с.].

Ulomov V.I., Shuymilina L.S., 1999. A Set of Maps of the Russian Federation General Seismic Zoning – GSZ-97. Scale 1:8000000. Explanatory Note and a List of Cities and Settlements Located in Seismically Hazardous Areas. *United Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow*, 57 p. (in Russian) [Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8000000: Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 57 с.].

Vilayev A.V., Zhantayev Zh.Sh., Bibosinov A.Zh., 2017. Monitoring Crustal Movements in Northern Tianshan Mountain Based on GPS Technology. *Geodesy and Geodynamics* 8 (3), 155–159. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.03.006>.

Vvedenskaya A.V., 1969. Investigation of Stresses and Ruptures in Earthquake Foci by the Theory of Dislocations. *Nauka, Moscow*, 136 p. (in Russian) [Введенская А.В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. 136 с.].

Wallace R.E., 1951. Geometry of Shearing Stress and Relation to Faulting. *The Journal of Geology* 59 (2), 118–130. <https://doi.org/10.1086/625831>.

Wallace R.E., 1968. Notes on Stream Channels Offset by the San Andreas Fault, Southern Coast Ranges, California. In: W.R. Dickinson, A. Grantz (Eds), *Proceedings of Conference on Geologic Problems of San Andreas Fault System*. Vol. 11. Stanford University Publications in Geological Sciences, California, p. 6–20.

Zelenin E., Bachmanov D., Garipova S., Trifonov V., Kozhurin A., 2022. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): The Ontology and Design behind the Continental-Scale Dataset. *Earth System Science Data* 14 (10), 4489–4503. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4489-2022>.