

ESTIMATED GEODYNAMIC IMPACT FROM ZONES OF COLLISION AND SUBDUCTION ON THE SEISMOTECTONIC REGIME IN THE BAIKAL RIFT

V. V. Ruzhich¹, G. G. Kocharyan², E. A. Levina¹

¹*Institute of the Earth's crust, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia*

²*Institute of Geosphere Dynamics of RAS, Moscow, Russia*

Abstract: The paper briefly overviews the evolution of ideas concerning causes and mechanisms related to the origin of the Baikal rift zone (BRZ) in the centre of the Eurasian plate, discusses parameters of the recent seismogeodynamic impact on the seismotectonic regime in BRZ due to the Western Pacific subduction and the Indo-Eurasian collision, and attempts at estimating their contributions to the modern geodynamics of rifting processes in Pribaikalie. Seismic migration processes and specific density patterns of the released seismic energy are analyzed for two selected profiles between BRZ and the regions of collision and subduction. A statistical method is proposed to calculate seismic migration from space-time diagrams, and equations are developed to show a decrease in specific density of seismic energy released in the lithosphere at a distance from the interplate boundaries towards the Baikal rift. The modern geodynamic impact on the seismotectonic regime in BRZ due to the Indo-Eurasian collision is reflected in moderate horizontal compression of the lithosphere, mainly in the southwestern BRZ and partly in the central BRZ. In the transition area in this profile, the specific density of released seismic energy is about 1.72×10^{10} J/km². The geodynamic impact on the seismotectonic regime in BRZ from the subduction zone (from the Nankai trough) is shown by a significantly lower specific density of released seismic energy, 1.02×10^{10} J/km². In the lithosphere of the northeastern BRZ, a weaker geodynamic influence is mainly manifested by responses to strong seismic events and earthquake focal mechanisms with a clear strike-slip component in the Chara and Tokka basins located in the Aldan shield of the Siberian platform.

We discuss a possible mechanism that drives the propagation of the geodynamic impact on BRZ from the interplate contact areas. In our opinion, the geodynamic influence propagates intermittently in the lithospheric plates due to motions of slow-deformation-wave fronts, which are reflected in the diagrams as seismic activity clusters. The long-range propagation of slow waves is realized through triggering of active faults in the lithosphere. Such faults interacting with slow wave deformations may be manifested as excited sources of dissipation of seismic oscillations resulting from a spontaneous release of the energy accumulated in the Earth interior. This mechanism of endogenous energy supply may explain the observed propagation of recordable slow elastoplastic deformations for many thousands of kilometres.

Today, when the new materials are available to show more ancient ages of the early elements of BRZ, and it is established that the tectonic energy is reduced with distance from the interplate boundaries, there is no support for the hypothesis based on the role of the Indo-Eurasian collision in the formation of BRZ. A recordable seismotectonic impact on the seismic regime in BRZ can occasionally occur after a major seismic activity in the regions of collision and subduction. This phenomenon may be used as a criterion for developing medium-term earthquake predictions, taking into account a delay in response.

Short-term cycles observed in the seismic regime of BRZ and its adjacent areas, as well as in the seismic migration processes are considered as a basis for making a conclusion that seismotectonic processes associated with interactions between the plates, as well as the seismic migration processes may be impacted by a potential modulating influence of cosmogenic factors. Such extraterrestrial factors include short-term variations in the Earth's rotation and orbiting modes, as well as in gravitational interactions between the Earth, Sun and Moon. It is unlikely that the short-term cycles may result from the slow endogenous processes of thermal convection in the Earth.

Key words: models of the Baikal rift; geodynamic impact/influence; migration of seismic activity; space-time diagrams; contact interaction between plates; cycles in seismic regime; collision; subduction; cosmogenic factor

Recommended by V.A. San'kov

For citation: Ruzhich V.V., Kocharyan G.G., Levina E.A. 2016. Estimated geodynamic impact from zones of collision and subduction on the seismotectonic regime in the Baikal rift. *Geodynamics & Tectonophysics* 7 (3), 383–406. doi:10.5800/GT-2016-7-3-0214.

Для цитирования: Ружич В.В., Кочарян Г.Г., Левина Е.А. Оценка геодинамического влияния зон коллизии и субдукции на сеймотектонический режим Байкальского рифта // *Геодинамика и тектонофизика*. 2016. Т. 7. № 3. С. 383–406. doi:10.5800/GT-2016-7-3-0214.

ОЦЕНКА ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ЗОН КОЛЛИЗИИ И СУБДУКЦИИ НА СЕЙМОТЕКТОНИЧЕСКИЙ РЕЖИМ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА

В. В. Ружич¹, Г. Г. Кочарян², Е. А. Левина¹

¹ Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

² Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия

Аннотация: В кратком обзоре рассмотрена эволюция представлений специалистов, занимавшихся изучением причин и механизмов возникновения Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) в центральной части Евразийской плиты, с 70-х годов прошлого столетия. С позиций эволюции этих представлений обсуждаются параметры современного сейсмогеодинамического воздействия на сеймотектонический режим в пределах Байкальского рифта со стороны зон Западно-Тихоокеанской субдукции и Индо-Евразийской коллизии с целью оценить их вклад в современную геодинамику рифтогенных процессов в Прибайкалье. Проведены расчеты, основанные на анализе сейсмомиграционных процессов и распределения удельной плотности выделившейся сейсмической энергии в пределах двух выбранных профилей между БРЗ и областями коллизии и субдукции. С применением разработанного статистического метода пространственно-временных диаграмм охарактеризованы скорости сейсмомиграции и представлены уравнения спада удельной плотности сейсмической энергии, выделившейся в литосфере при удалении от межплитных границ к Байкальскому рифту. Показано, что современное геодинамическое влияние на сеймотектонический режим БРЗ со стороны Индо-Евразийской зоны коллизии в виде умеренного горизонтального сжатия литосферы распространяется преимущественно на юго-западный и отчасти на центральный район БРЗ. Удельная плотность сейсмической энергии на промежуточной территории по этому профилю составляет порядка 1.72×10^{10} Дж/км². Геодинамическое влияние на сейсмичность БРЗ со стороны зоны субдукции от Нанкайского желоба имеет существенно меньшее значение плотности высвобожденной сейсмической энергии – 1.02×10^{10} Дж/км². В литосфере северо-восточного фланга БРЗ ослабленное геодинамическое влияние ощутимо проявляется преимущественно в откликах на сильные сейсмические события и в виде механизмов очагов землетрясений с выраженной сдвиговой компонентой в районах Чарской и Токкинской впадин, возникших в пределах Алданского щита Сибирской платформы.

Обсуждается возможный механизм распространения геодинамического влияния на БРЗ со стороны областей межплитного контактного взаимодействия. Высказано мнение о том, что механизм прерывистого распространения геодинамического влияния в литосферных плитах обусловлен движением фронтов замедленных волновых деформаций, фиксируемых на диаграммах в виде миграций кластеров сейсмической активности. Дальнодействие распространения медленных волн реализуется через триггерные инициации существующих в литосфере активных разрывных нарушений. Последние при взаимодействии с медленными волновыми деформациями могут проявляться как возбужденные источники диссипации сейсмических колебаний вследствие спонтанного высвобождения накопленной энергии недр. Проявлением данного механизма эндогенной энергетической подпитки может быть объяснен наблюдаемый эффект распространения ощутимых замедленных упруго-пластических деформаций на расстояния во многие тысячи километров.

При появлении новых материалов о более древнем возрасте зарождения ранних элементов БРЗ, а также с учетом уменьшения тектонической энергии при удалении от межплитных границ высказанная ранее гипотеза о родоначальной роли Индо-Евразийской коллизии в формировании БРЗ не находит подтверждения. Ощутимое сеймотектоническое влияние на сейсмический режим БРЗ может эпизодически проявляться после масштабной сейсмической активизации в областях коллизии и субдукции. Данное явление возможно использовать в качестве одного из критериев в среднесрочном прогнозе землетрясений с учетом запаздывания отклика.

Исходя из короткопериодной цикличности, наблюдаемой в сейсмическом режиме БРЗ и за ее пределами, а также и в сейсмомиграционных процессах, формулируется вывод о вероятном модулирующем влиянии космогенных факторов на сеймотектонические процессы межплитного взаимодействия и сейсмомиграционные явления. К числу внеземных факторов относятся короткопериодные вариации в режимах ротационного и орбитального вращения Земли, а также ее гравитационного взаимодействия с Солнцем и Луной. Подобные короткопериодные циклы не могут быть порождены медленными эндогенными процессами тепловой конвекции Земли.

Ключевые слова: модели Байкальского рифта; геодинамическое влияние; миграция сейсмической активности; пространственно-временные диаграммы; контактное взаимодействие плит; периодичность в сейсмическом режиме; коллизия; субдукция; космогенный фактор

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что сейсмические процессы генетически связаны с процессами динамического разрушения массивов горных пород литосферы в упруго-пластическом режиме. При этом энергия излучения волновых колебаний сейсмического диапазона составляет преимущественно 1–5 % от энергии, затраченной на разрушение при тектонических процессах. По отмеченному соотношению открываются возможности в первом приближении судить о параметрах пространственно-временного миграционного перераспределения тектонической энергии в различных геодинамических обстановках в литосферной оболочке нашей планеты. При разработке и совершенствовании методов средне- и долгосрочного прогноза землетрясений в пределах Байкальской рифтовой зоны у авторов возникли вопросы, касающиеся механизмов и оценок влияния на ее сейсмический режим со стороны Индо-Евразийской зоны коллизии и Западно-Тихоокеанской зоны субдукции. Для ответов на вопросы о пространственно-временном распределении сейсмическо-тектонической энергии авторами был разработан метод пространственно-временных диаграмм с применением ГИС [Levina, Ruzhich, 2010, 2015a, 2015b]. Предварительно были проанализированы существующие представления о причинах заложения и длительного развития рифтовой зоны в пределах Центрально-Азиатского пояса Евразии. В кратком изложении далее рассматриваются наиболее приемлемые механизмы распространения деформаций и тектонических напряжений на далекие расстояния в сторону БРЗ от южной и восточной окраин Евразийской плиты. При интерпретации полученных новых сведений о проявлении периодичности в процессах пространственно-временной сейсмомиграции проводился анализ возможных связей с планетарно-космическими явлениями, такими как неравномерное вращение Земли, ее гравитационное взаимодействие с объектами Солнечной системы, о которых уже многие десятилетия публикуются материалы научных исследований [Simpson, 1967; Avsyuk, 1996, 2001; Ruzhich, 1997; Dobretsov, Chumakov, 2001; Glukhovskii, 2005; Levina, Ruzhich, 2010; Dobretsov, 2015; и мн. др.]. Рассматриваются проблемы, касающиеся разработки новой, более корректной, модели возникновения БРЗ с при-

влечением сведений о взаимодействии эндогенных геологических явлений с планетарными и космогенными факторами, роль которых, по мнению авторов, в настоящее время еще недостаточно изучена и оценена.

2. КРАТКИЙ ОБЗОР ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИСТОРИИ И УСЛОВИЯХ ФОРМИРОВАНИЯ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

В соответствии с тематической направленностью данной статьи авторы сочли необходимым рассмотреть наиболее распространенные представления о природе тектонических сил, под влиянием которых происходило формирование БРЗ в Центрально-Азиатском поясе Евразийской плиты. По высказываниям многочисленной группы ученых в 70-х годах прошлого века и в более позднее время, возникновение БРЗ связывалось с коллизионными процессами в контактной области Индийской и Евразийской тектонических плит. Предполагалось, что в результате межплитной коллизии геодинамическое влияние распространилось далеко на северо-восток в виде весьма эффективного тангенциального давления в литосфере, что привело к ее локальной деструкции с образованием «микроплит» и их разворотом. Например, объяснялось, что раскрытие земной коры в виде щелевого рифта в районе южной части Байкальской впадины произошло из-за субмеридионального сжатия литосферы вследствие Индо-Евразийской коллизии, приведшей к возникновению небольших микроплит и развороту Амурской плиты с раскрытием щелевого рифта на месте Южно-Байкальской рифтовой впадины [Molnar, Tapponier, 1975; Zonenshain et al., 1978; Ma Xi Yuan, 1990; и мн. др.]. Сторонниками указанного подхода не учитывалась должным образом роль мантийных течений среди процессов, приведших к возникновению и развитию Байкальского рифта. Представители другой, более многочисленной, группы ученых связывали возникновение БРЗ с активизацией подкорковых мантийноплюмовых процессов. Такие процессы происходили под воздействием тепловой конвекции в виде поднимающегося к основанию земной коры крупномасштабного плюма из активизированной разогретой мантии. Его воздействие на большей части

территории БРЗ проявлялось в виде сводовых поднятий, квазипластического растяжения земной коры, утонения в виде шейки и растрескивания. В отдельных сегментах, например на юго-западном фланге БРЗ, в миоцен-плиоцене (3–11 млн лет) этот процесс рифтогенеза сопровождался наиболее масштабными излияниями базальтов и эксплозивными явлениями. Было показано, что наиболее активно происходило дистальное разрастание рифтовой зоны в плиоцен-плейстоцене с формированием цепи рифтовых впадин, их горного обрамления [Florensov, 1968; Logachev, 1968; Zorin, 1971; Zamarayev, Ruzhich, 1978; Puzyrev, 1981; Logachev et al., 1987; Artyushkov et al., 1990; Levi, 1991; Logatchev, 1993; и др.]. В ранний период изучения рифтогенных процессов в БРЗ, согласно мнению представителей двух вышеупомянутых сообществ ученых, длительность геологической истории формирования рифтовых структур Прибайкалья укладывалась во временной интервал порядка 30–35 млн лет, что примерно синхронизировалось с началом коллизионного столкновения тектонических плит в районе Гималаев. Также было обращено внимание на приуроченность первоначального ядра Байкальской впадины к механически ослабленному сегменту литосферы в зоне юго-восточного участка краевого шва Сибирской платформы и к другим крупным разрывам и складчатым комплексам земной коры [Florensov, 1964; Logachev, 1968; Ruzhich, 1972, 1975; Zamarayev et al., 1977; Logatchev, 1992, 1993; и мн. др.]. Проведенное в БРЗ достаточно детальное изучение геоструктурного соотношения рифтогенных структур с более древним геоструктурным планом показало, что процессы образования рифтовых впадин в условиях рифтогенного растяжения литосферы развивались на юго-западном фланге и в центральной части БРЗ унаследованно, то есть они приспособлялись к более древним разломам и к зоне краевого шва Сибирского кратона [Zamarayev, Ruzhich, 1978]. Однако была выявлена иная картина, которая возникла при разрастании БРЗ в пределах северо-восточного фланга. Там Муйская рифтовая впадина субширотного простирания вплотную примкнула к меридиональному сегменту зоны краевого шва Сибирской платформы. Следующая Чарская и зарождающаяся Токкинская рифтовая впадины возникли по другую сторону краевого шва в пределах древнего Алданского щита Сибирской платформы. Таким образом выясняется, что они формировались дискордантно по отношению к краевому шву меридионального простирания и древним глубинным разломам северо-западного направления в отличие от Байкальской впадины. Отмеченные рифтовые впадины северо-восточного фланга, развиваясь тоже на фоне рифтогенного растяжения в направлении

СЗ-ЮВ, приспособлялись к менее масштабным разломам северо-восточного и широтного простирания, приобретая очень сложные очертания [Ruzhich, 1975, 1997; Zamarayev, Ruzhich, 1978]. Важно отметить, что разрастание БРЗ к северо-востоку в миоцен-плиоценовый период однозначно свидетельствует о приоритете местного энергетического источника, вероятнее всего генетически связанного с мантийными процессами, приведшими к растяжению земной коры в указанном направлении. Взламывание мощной консолидированной континентальной коры при рифтогенезе свидетельствует о проявлении высокого уровня энергии тектонических сил. Таким образом, северо-восточный фланг БРЗ формировался на максимальном удалении от окраины Индостанской плиты, порядка 7 тыс. км, и этот факт свидетельствует не в пользу признания родоначальной роли Индо-Евразийской коллизии в формировании БРЗ, а в пользу направляющего воздействия мантийных течений как причины разрыва литосферы. К сожалению, северо-восточный сегмент БРЗ практически не изучался глубинными геофизическими методами, в том числе методами сейсмической томографии. Этот информационный вакуум еще предстоит ликвидировать, чтобы понять причину проявления мантийных процессов, которые, судя по мощным базальтовым излияниям в хр. Удокан, играли важную роль при рифтогенезе. Без привлечения материалов по становлению рифтовых впадин в пределах Сибирской платформы создание непротиворечивой модели БРЗ невозможно.

Другим результатом исследований прошлых лет, примечательным и еще не до конца осмысленным, можно назвать выявление в пределах БРЗ признаков тангенциального сжатия литосферы, ось нормальных напряжений которого ориентирована в направлении ССВ-ЮЮЗ. Представление об этом появилось в начале 70-х годов, когда в пределах юго-западного фланга БРЗ впервые геологическими методами в горном обрамлении Тункинской впадины было зафиксировано распространение разломов взбросо-надвигового типа смещений средне-верхнепалеозойского возраста заложения. Примечательно то, что эти разломы были активизированы и в миоцен-плиоценовое время, то есть в период проявления рифтогенеза [Ruzhich, 1972, 1975]. По этим зонам разломов субширотного и северо-западного простирания были зафиксированы многочисленные взбросо-надвиговые деформации и смещения миоцен-плиоценовых базальтовых образований в виде даек и вулканических аппаратов (рис. 1, а, б). Абсолютный возраст последних, установленный с применением калий-аргонового метода датирования, соответствует интервалу от 3.3 до 11.4 млн лет [Ruzhich et al., 1972]. Позднее

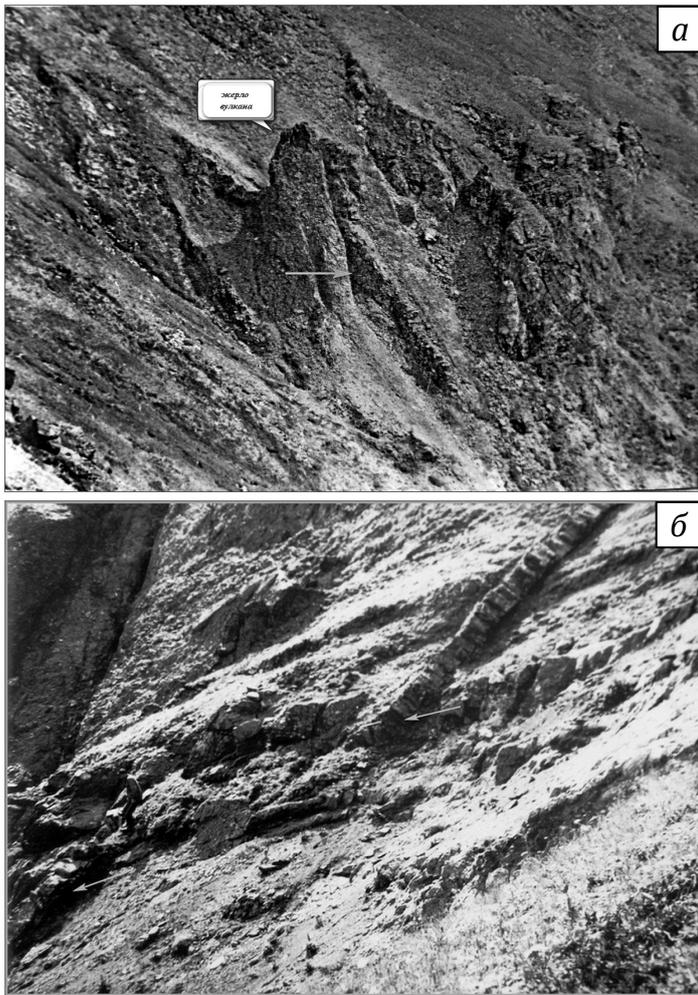


Рис. 1. Проявление неотектонических деформаций в одном из сегментов зоны надвига северо-западного простирания: *а* – базальтовый некк, разорванный разломом взбросо-сдвигового типа. Стрелкой указан разлом. Этот вулканический аппарат обнаружен в северном горном обрамлении Тункинской впадины; *б* – базальтовая дайка со смещением на 4 м в зоне надвига. Снимки В.В. Ружича (1971 г.).

Fig. 1. Neotectonic deformation in a segment of the NW-striking thrust fault: *a* – basalt nekk ruptured by the reverse strike-slip fault. The arrow shows the fault. This volcanic unit was discovered in the northern mountain frame of the Tunka basin; *b* – basalt dike offset by 4 m in the thrust zone. Photos by V.V. Ruzhich (1971).

также выяснилось, что признаки регионального сжатия в зонах разломов были отмечены и в других районах юго-западного фланга БРЗ, в частности на восточном побережье Хубсугульской рифтовой впадины в пределах юго-западной окраины рифтовой зоны [Ruzhich, Khil'ko, 1987], где надвигами были деформированы миоцен-плиоценовые базальтовые потоки. На северо-восточном фланге БРЗ, в частности в пределах четвертичных осадочных отложений на юге Верхнесульбанской впадины,

в базальтовых полях хр. Удокан также проявлялись взбросо-сдвиговые смещения деформации в зонах разломов [Ruzhich et al., 1989; Ruzhich, 1997]. При интерпретации собранных сведений о надвигах, активных в период рифтогенеза, было высказано предположение о том, что проявление сжатия литосферы в направлении СВ-ЮЗ и ее растяжения в направлении СЗ-ЮВ связано с планетарным, более обширным, полем тектонических напряжений. Подобное проявление субмеридионального сжатия литосферы не препятствовало развитию БРЗ [Ruzhich, 1972, 1997; Parfeevets, San'kov, 2006]. В итоге приведенные геологические данные наводят на размышления о более сложном механизме формирования БРЗ, пока еще не понятом до конца. Ниже будет предложено объяснение причин проявления подобного субмеридионального сжатия в литосфере как в пределах БРЗ, так и вне ее.

Позднее, по мере уточнения и накопления новых данных, стали появляться работы, представляющие более компромиссную позицию, согласно которой возникновение БРЗ объяснялось сочетанием тектонических сил горизонтального сжатия со стороны зоны коллизии и растяжения земной коры, порожденного воздействием мантийных плюмов [Logachev et al., 1987; Milanovsky, 1987; Khain, 1987; Bott, 1990; Ruzhich, 1997; и др.]. Однако у некоторых специалистов не исчезали сомнения о родоначальной роли коллизии в возникновении БРЗ, например в работах [Neugebauer, 1983; Ruzhich et al., 1989]. С расширением возможностей датирования осадочных толщ в пределах рифтовых впадин, и прежде всего в области Байкальской впадины, становились более аргументированными и представления о более древнем возрасте заложения первоначальных сегментов рифта щелевого типа в районе Южного Байкала. По данным в работах [Mats et al., 2001; Mats, 2015; и др.], возраст заложения ядра БРЗ может быть отнесен к позднему мелу – раннему олигоцену и составляет по общей длительности порядка 70–60 млн лет. Исходя из этих данных, становится все более сомнительной определяющая роль Индостанской коллизии в заложении структур БРЗ, поскольку сочленение плит началось позднее заложения структурных элементов в Южно-Байкальской впадине. Судя по многочисленным новым датировкам абсолютного возраста базальтов и осадочного заполнения рифтовых впадин, наиболее активный второй этап рифтогенеза в Прибайкалье проявился 18–12 млн лет назад [Raskazov, Chuvashova, 2013]. По мнению В.Д. Маца [Mats, 2015], самый поздний, третий, этап рифтогенеза в Прибайкалье начинается с позднего плиоцена, т.е. в последние 5 млн лет, когда рифтогенез в Прибайкалье развивался при активном участии подкорových магматических процессов.

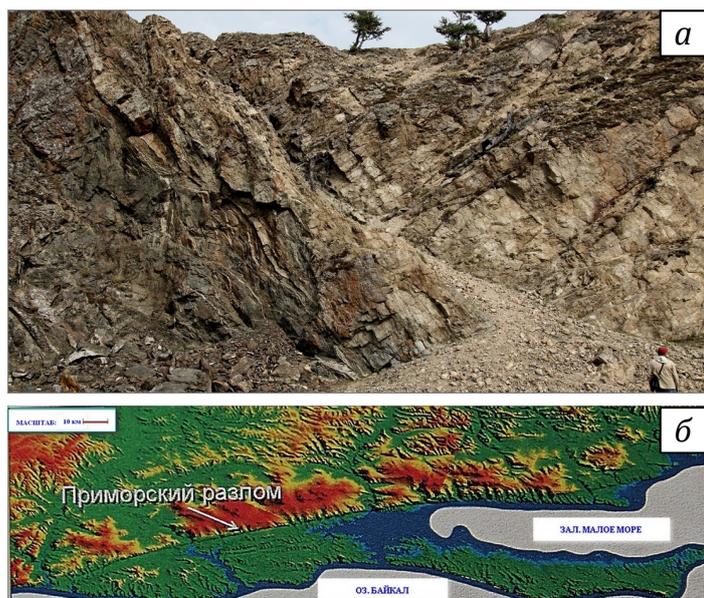


Рис. 2. Коллизионный шов: *а* – строение одного из глубинных фрагментов коллизионного шва между Сибирским кратоном и Ольхонским террейном, сформировавшегося в неопротерозое – раннем палеозое, по данным [Gladkochub et al., 2014] (район устья р. Бугульдейка); *б* – положение зоны Приморского рифтогенного сброса, возникшего в зоне коллизионного шва при формировании Южно-Байкальской рифтовой впадины (космоснимок из вышеупомянутой работы).

Fig. 2. Collision suture: *a* – structure of a deep fragment of the collision suture between the Siberian craton and Olkhon terrain formed in the Neoproterozoic – Early Paleozoic, according to [Gladkochub et al., 2014] (near the Buguldeika river outlet); *b* – position of the Primorsky riftogenic normal fault zone that occurred in the collision suture zone when the South Baikal rift basin was formed (the space image from [Gladkochub et al., 2014]).

По современным данным, на основании проведенных палеогеодинамических реконструкций, появились аргументированные сведения о том, что заложение протяженного молодого Приморского разлома сбросового типа, ограничивающего западный берег Байкальской рифтовой впадины, приурочено к зоне древнего коллизионного шва, возникшего примерно 550 млн лет назад. По этому шву к древнейшему консолидированному Сибирскому кратону в режиме неопротерозойской коллизии причленился Ольхонский террейн. Об этом свидетельствуют зафиксированные в высокометаморфизованных породах древние взбросо-сдвиговые деформации и выявленные разломы вдоль северо-западного побережья оз. Байкал [Gladkochub et al., 2014]. Следовательно, появляются дополнительные сведения о возникновении геомеханических условий в виде механически ослабленной зоны в

литосфере, способствующих в более позднее время проявлению унаследованности в виде заложения Южно-Байкальской впадины и зоны Приморского разлома (рис. 2, *а*, *б*).

Общеизвестно, что для океанических рифтовых зон признанным механизмом возникновения горизонтального растяжения и разрыва литосферы принято считать тепловую конвекцию в виде течения поднимающейся разогретой мантии под океаническими хребтами. Нет оснований не учитывать возможность проявления данного механизма, но в меньших масштабах и для континентальных рифтовых зон, включая БРЗ. Однако наличие очень крупного мантийного плюма в Прибайкалье, его растекание и возникающие силы растяжения коры в настоящее время не находят основательного подтверждения поздними геофизическими исследованиями. Это показано, например, в работе В.В. Мордвиновой и ее коллег [Mordvinova et al., 2016], выполненной с использованием материалов международных телесеизмических наблюдений PASSCAL_1992 и MOBAL_2003. Ими отмечалось, что в зоне краевого шва на юго-восточном ограничении Сибирского кратона на глубинах в интервале 100–200 км выявляется клин, уходящий к юго-востоку под складчатую область. Он образует ловушку в форме козырька для поднимающегося разогретого мантийного вещества. Выявленная аномалия может рассматриваться как одна из возможных причин возникновения мантийных течений, имеющих отношение к растяжению земной коры. Возможность подобного механизма рассмотрена в работах ряда исследователей, в частности в [Trubitsyn, 2000]. В работе показана возможность экранирования континентальной плитой поднимающегося разогретого мантийного материала и его скопления под подошвой кратона на глубинах порядка 200 км и меньше. По мере скопления флюидизированной аномальной мантии возникает ее растекание и проникновение в верхние горизонты земной коры. Интерпретируя эти данные, можно высказать предположение о том, что именно подобный механизм возникновения мантийных течений мог приводить к проявлению тектонических усилий горизонтального растяжения земной коры в районе юго-восточной окраины древнейшего Сибирского кратона, начавшегося в позднем мезозое. Таким способом возможна реализация механизма преобразования тепловой энергии земных недр в деформации горизонтального растяжения литосферы и заложения в механически ослабленной зоне краевого шва платформы первоначально элемента БРЗ в виде структуры щелевого типа. Однако такое предположение требует подтверждения дальнейшими исследованиями в соседних сегментах зоны контакта Сибирского кратона со

складчатой областью, особенно востребованными для изучения на северо-восточном фланге БРЗ. Вопрос о длительности существования подобного источника в прошлом остается невыясненным.

Еще один вариант объяснения природы растяжения литосферы в БРЗ рассмотрен в работе [San'kov et al., 2011], авторами которой привлечены сведения о выявленной геофизическими исследованиями сейсмической анизотропии в литосферной мантии Сибирской платформы и в астеносфере под БРЗ на глубинах 150–60 км [Vinnik, 1977]. Данная информация представляет особый интерес, поскольку направленность анизотропии может быть обусловлена мантийными течениями и являться причиной растяжения литосферы в направлении СЗ-ЮВ в районе Байкальской впадины. Накопленные за последние два десятилетия сведения о GPS-измерениях – важное подтверждение возможности проявления под Байкальской впадиной мантийных течений юго-восточного направления, способных инициировать первоначальное растяжение земной коры и запустить механизм растяжения литосферы на юго-восточной окраине Сибирского кратона. Стоит обратить внимание на то, что вектор современных движений по данным GPS может рассматриваться скорее как проявление взаимодействия Евразийской плиты с зоной субдукции, но не с зоной коллизии. Современные сейсмологические данные о механизмах землетрясений за последние десятилетия в различных сегментах БРЗ не противоречат высказанному предположению [Melnikova, 2001; San'kov et al., 2011; San'kov, Dobrynina, 2015]. В связи с изложенными сведениями становится очевидной необходимость дальнейшего детального изучения строения литосферы и астеносферы методами глубинной геофизики для последующего выяснения причин возникновения БРЗ, связанных с процессами в земной коре и в верхней мантии.

В качестве весомого дополнения к представлениям о причинах и механизмах возникновения БРЗ необходимо также упомянуть о новых данных, полученных средствами экспериментального физического и численного моделирования. Эти исследования проводились для моделирования геодинамических условий возникновения БРЗ при различных сочетаниях силовых воздействий: от мантийных процессов, а также от динамического влияния со стороны зон коллизии и субдукции [Djadkov et al., 1999, 2006a, 2006b; Djadkov, 2002; San'kov et al., 2011; Bornyakov et al., 2003; Seminsky et al., 2013]. Согласно полученным результатам моделирования, были сделаны выводы о том, что современное строение БРЗ и ее развитие могут быть воспроизведены только при сочетании местных мантийных процессов, способствующих растяжению литосферы в направлении СЗ-ЮВ, с проявлениями воздей-

ствия со стороны зон коллизии и субдукции на окраинах Евразийской плиты.

На основании приведенного обзора эволюции взглядов исследователей на причины и механизм возникновения БРЗ примерно за полувековой период можно сделать следующее заключение. Из ранее рассмотренных гипотез о причинах и механизмах возникновения БРЗ часть гипотетических представлений подверглась сомнениям и даже оказалась отброшенной. Вместе с этим нашли частичное подтверждение содержащиеся в них следующие важные сведения о существовании местного мантийного энергетического источника, а также представления о проявлениях умеренного геодинамического влияния на БРЗ со стороны зоны Западно-Тихоокеанской субдукции. Однако эти представления еще не в достаточной мере аргументированы и нуждаются в подкреплении новыми данными и расчетами. Возникают все большие сомнения в возможном дальнедействии тектонических усилий со стороны зоны Индо-Евразийской коллизии, если иметь в виду их способность оказывать масштабное разрушительное воздействие на удаленные сегменты литосферы Евразии с возникновением мелких геоблоков и их вращениями, порождающими растяжение коры. Остаются недостаточно разработанными вопросы, например, о физической природе и механизме распространения замедленных волновых деформаций в литосфере, способных оказывать модулирующее воздействие на сеймотектонические процессы. Непонятной остается природа субмеридионального сжатия в литосфере Центрально-Азиатского складчатого пояса за пределами БРЗ, которая наиболее отчетливо проявляется в приэкваториальных сегментах земного шара. Ниже будет предпринята попытка рассмотреть эти вопросы, поскольку ответы на них имеют прямое отношение к выяснению причин и последствий геодинамического влияния на современный сейсмический режим в БРЗ со стороны межплитных контактных взаимодействий.

3. АНАЛИЗ РЕЖИМОВ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В БРЗ И НА МЕЖПЛИТНЫХ ГРАНИЦАХ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЕВРАЗИЙСКОЙ ПЛИТЫ

Обратимся к некоторым сведениям, полученным при обработке всемирного каталога землетрясений [Northern California..., 2016] с использованием разработанного авторами программного обеспечения. Последнее, при наличии каталогов землетрясений и топографической основы, позволяет изучать и анализировать параметры сейсмичности в широком пространственно-временном масштабном диапазоне: от отдельных очагов слабых земле-

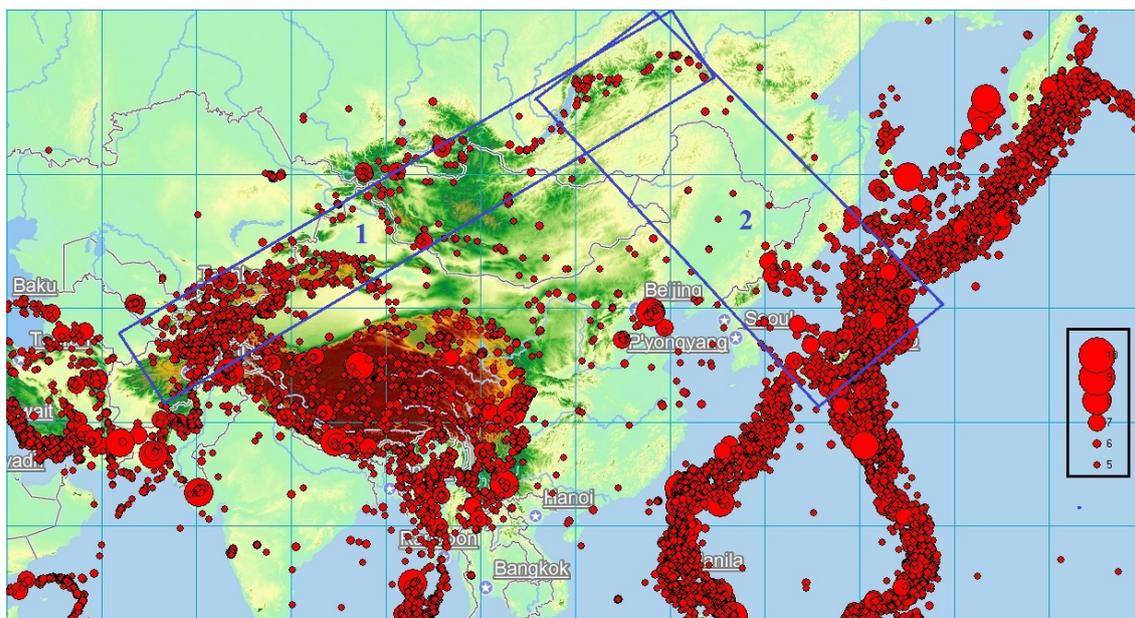


Рис. 3. Эпицентральное поле землетрясений, произошедших в период 1963–2015 гг., с $M \geq 5.0$ на пространствах литосферы между БРЗ и геодинамически активными границами юго-восточных краев Евразийской плиты. Синие прямоугольники – профили, в пределах которых учитывалась миграция максимумов сейсмической активности: 1 – Тянь-Шань – БРЗ; 2 – Япония – БРЗ.

Fig. 3. Epicentral field of earthquakes ($M \geq 5.0$) that occurred in the period from 1963 to 2015 in the lithosphere between the Baikal rift zone and geodynamically active boundaries of the southeastern margins of the Eurasian plate. Blue boxes mark profiles, within which the migration of seismic activity maximums was taken into account: 1 – Tien Shan – BRZ; 2 – Japan – BRZ.

трясений до общепланетарного масштаба [Ruzhich, 1997; Levina, 2011]. На рис. 3 можно видеть конфигурацию эпицентральных полей ощутимых и сильных землетрясений в районах БРЗ, зоне Западно-Тихоокеанской субдукции и Индо-Евразийской коллизии за последние 53 года. Прямоугольниками отмечены профили, по которым осуществлялись расчеты для оценок плотности выделившейся сейсмической энергии в литосфере между показанными на рис. 3 геоструктурными объектами. Выбор профилей произведен с учетом выраженных геоструктурных особенностей и плотности эпицентров землетрясений. Закономерно то, что с удалением от конвергентных границ в сторону БРЗ сейсмическая активность постепенно снижается; это можно наблюдать при анализе изменений эпицентрального поля любого сейсмического источника, такого как взрыв или землетрясение. Со стороны коллизионной зоны фронт распространения эпицентрального поля явным образом достигает юго-западного фланга БРЗ, прослеживаясь от Тянь-Шаньского горного сооружения через Среднюю Азию, Китай, Монголию и Алтай. Однако вопрос об эффективности действия сейсмотектонических усилий на развитие деструктивного процесса в литосфере остается нерешенным.

На рис. 4 представлена дополнительная информация, касающаяся распределения значений высвобожденной сейсмической энергии в тех же пределах литосферы, включая БРЗ и приграничные районы Евразии. Для упрощения схема составлена за более краткий временной интервал – 2011–2015 гг. с целью показать в виде изолиний распространение сейсмической энергии в значениях энергетических классов землетрясений, принятых в Российской Федерации. В цветовой гамме энергетических классов можно видеть распространение изолиний сейсмической энергии от эпицентральных районов сильнейших землетрясений в Японском сегменте, а также от мощных землетрясений в районе Непала и Охотского моря. На упомянутом рисунке также можно отметить, что изолинии энергии землетрясений с $K=10.5-12.4$ достигают центрального и фланговых сегментов БРЗ как со стороны зоны субдукции, так и от коллизионной области. Понятно, что данные схемы можно рассматривать лишь как кратковременные эпизоды сейсмотектонического взаимодействия внутриплитной области рифтогенеза с межплитными сейсмоактивными зонами восточной части Евразийской плиты. С помощью постоянного сейсмического мониторинга установлено, что в наиболее явном

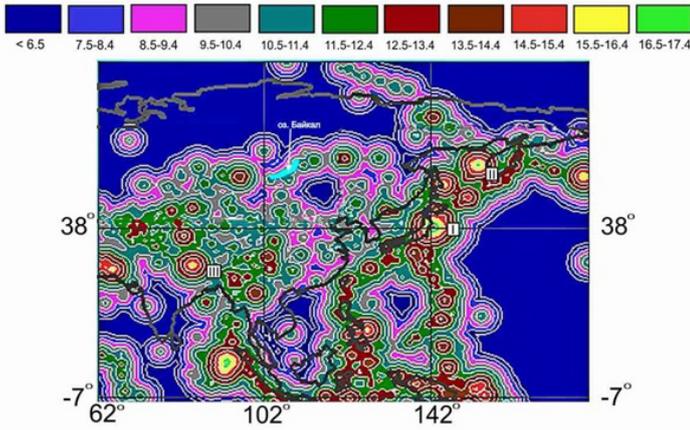


Рис. 4. Схема пространственного распределения значений энергии землетрясений (в изолиниях энергетических классов) на юго-восточной окраине Евразии, полученная в результате обработки каталога сейсмических событий за период 2011–2015 гг. Римскими цифрами обозначены катастрофические недавние землетрясения: I – Тохоку, 11.03.2011 г., $M=9.0$; II – Охотоморское, глубокофокусное, глубина 629 км, 20.05.2013 г., $M=8.3$; III – Непальское, 24.05. 2015 г., $M=7.8$.

Fig. 4. Scheme showing the spatial pattern of earthquake energy values (in isolines of energy classes) in the south-eastern margin of the Eurasian plate. It is developed by processing the data from the catalog of seismic events for the period from 2011 to 2015. Recent catastrophic earthquakes: I – 11 March 2011 earthquake in Tohoku ($M=9.0$); II – 20 May 2013 earthquake in the Sea of Okhotsk (focus at 629 km depth, $M=8.3$); III – 24 May 2015 earthquake in Nepal ($M=7.8$).

виде цепочки эпицентральных полей фиксируются в периоды сильнейших сейсмических событий, происходивших в упомянутых сегментах межплитных границ.

4. АНАЛИЗ РЕЖИМОВ МИГРАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ МЕЖДУ БРЗ И МЕЖПЛИТНЫМИ ГРАНИЦАМИ

Прежде чем перейти к явлениям миграции сейсмической активности, целесообразно провести сопоставление уровней сейсмической энергии трех рассматриваемых районов: зоны коллизии, зоны субдукции, Байкальской рифтовой зоны. Для расчетов использовался каталог мировых сейсмических событий Northern California Earthquake Data Center [Northern California..., 2016] в диапазоне магнитуд 3.5–9.0 за 1963–2015 гг. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Из приведенных в таблице 1 полученных результатов отметим следующее. Уровни общего

числа землетрясений указанного энергетического диапазона и их суммарной энергии в БРЗ различаются на два и три порядка. Из таблицы 1 видно, что самым мощным источником генерации землетрясений является выбранный сегмент зоны Западно-Тихоокеанской субдукции. Он несколько меньше площади зоны Индо-Евразийской коллизии, но на порядок превосходит ее по плотности выделяющейся сейсмической энергии, что, видимо, связано с различиями в строении сейсмофокальных областей на межплитном контакте.

Важно также упомянуть о выявленной периодичности в сейсмическом режиме БРЗ с учетом каталога исторических землетрясений с 1725 г. и современных инструментальных данных. В ряде работ по этой теме были выявлены следующие периоды в годовом исчислении: 0.5; 1.0; 5–6; 10–11; 40–44 [Ruzhich, 1997; Lyubushin et al., 1998].

Постановка задачи по изучению миграции сейсмической активности касается выяснения режимов распространения сеймотектонической энергии в литосфере в виде миграции максимумов сейсмической активности при удалении от зон коллизии и субдукции в сторону БРЗ. В первом приближении статистическое изучение этого сейсмомиграционного процесса между БРЗ и зонами Индо-Евразийской коллизии и Западно-Тихоокеанской субдукции было проведено авторами ранее и рассмотрено в [Levina, Ruzhich, 2010, 2015a]. Тогда было установлено отчетливо выраженное и последовательное распространение активности сейсмических процессов в направлении к БРЗ от зон межплитного взаимодействия. Однако численное сравнение сейсмомиграционных показателей для выяснения режимов геодинамического взаимодействия не проводилось. Эта задача была поставлена в данной работе с применением разработанного метода.

Описание метода. Для изучения явления миграции сейсмической активности анализировался мировой каталог землетрясений с $M \geq 3.5$ [Northern California..., 2016] с 1963 по 2015 г. Так как каталог содержит сведения о координатах эпицентра события, времени его возникновения и энергетическом уровне, фактически мы имеем дело с функцией трех переменных: $E=f(\varphi, \lambda, t)$, где E – сейсмическая энергия, φ – широта, λ – долгота, а t – время. Для упрощения вычислений был применен метод редукции размерности (рис. 5). В районе исследования была выбрана полоса, задаваемая координатами ее начальной и конечной точек и шириной. Затем эта полоса разбивалась на прямоугольные участки со сторонами, перпендикулярными центральной линии и имеющими вдоль нее заданную протяженность – пространственное окно (рис. 5, а). В этих участках подсчитывалась выделившаяся

Т а б л и ц а 1. Величины сейсмической энергии рассматриваемых районов

Table 1. Seismic energy values for the studied regions

Регион	Координаты (град)	N	ΣE (Дж)	S (км ²)	PE (Дж/км ²)
Зона коллизии	φ : 25–45 λ : 63–100	16835	$1.62 \cdot 10^{17}$	$7.5 \cdot 10^6$	$2.2 \cdot 10^{10}$
Зона субдукции	φ : 32–56 λ : 130–160	24393	$8.84 \cdot 10^{17}$	$3.5 \cdot 10^6$	$2.5 \cdot 10^{11}$
БРЗ	φ : 50–58 λ : 98–122	598	$9.87 \cdot 10^{14}$	$1.1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^9$

П р и м е ч а н и е. Здесь φ – диапазон широт, λ – диапазон долгот рассматриваемого района; N – количество землетрясений; ΣE – суммарная энергия; S – площадь района; PE – плотность энергии.

N o t e. φ – regional range of latitudes; λ – regional range of longitudes; N – number of earthquakes; ΣE – cumulative energy; S – region square area; PE – energy density.

суммарная сейсмическая энергия за определенные промежутки времени – временные окна. В итоге была получена пространственно-временная матрица, а упомянутая функция преобразована к виду: $E=f(r, t)$, где r – расстояние от начала отсчета на центральной линии выбранной полосы. Теперь мы уже имеем функцию двух переменных и ее графическое выражение – трехмерную поверхность (рис.

5, б). Для дальнейшего анализа строим сечение рассматриваемой поверхности плоскостью $K=K_s$ и ее проекцию на плоскость расстояния-времени. Значение K_s выбирается каждый раз в зависимости от особенностей сейсмического режима изучаемого района и целей исследования. При дальнейшей обработке не учитываются различия в энергетических классах отдельных ячеек, но каждая из них

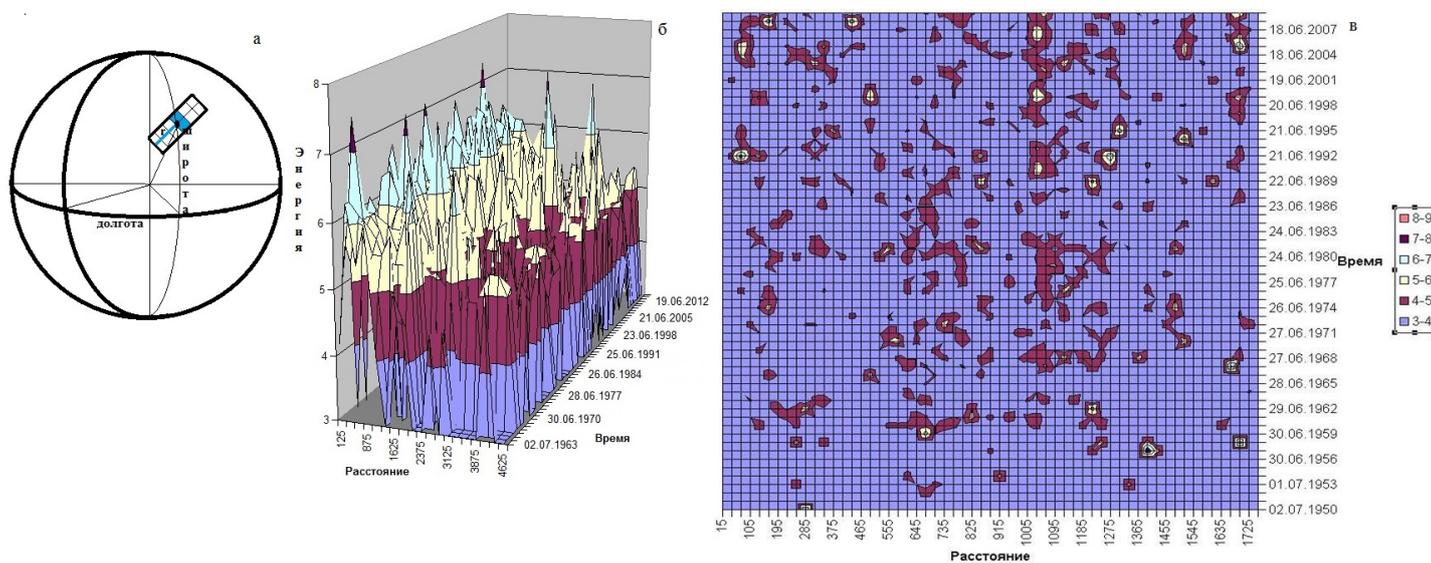


Рис. 5. а – полоса, выбранная для анализа сейсмической активности, показана черным прямоугольником. Данные о землетрясениях собираются путем разделения территории на ряды прямоугольников и подсчета выделившейся суммарной энергии землетрясений. r – расстояние от начальной точки; б – поверхность, представляющая выделившуюся сейсмическую энергию E как функцию времени t и расстояния r ; в – пространственно-временная диаграмма. Общий фон – это секущая плоскость $K=K_s$, темные пятна – максимумы сейсмической энергии, превышающие это значение.

Fig. 5. а – a band selected for analyzing seismic activity is marked by the black rectangle. Earthquake data collection is arranged by splitting the area into rows of rectangles and counting the cumulative amounts of released energy of earthquakes. r – distance from the starting point; б – surface representing released seismic energy E as a function of time t and distance r ; в – space-time diagram. The general background is the cutting plane ($K=K_s$); dark spots show seismic energy maximums in excess of this value.

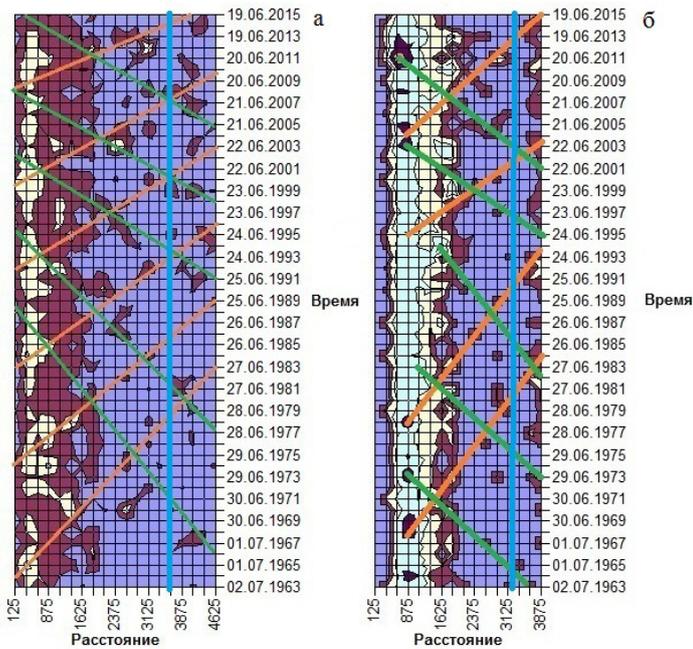


Рис. 6. Диаграммы распространения сейсмической активности от межплитных границ в сторону БРЗ за период 1963–2015 гг., $M \geq 4.5$ (*а* – от коллизионной области; *б* – от Японского сегмента зоны Беньофа). Предполагаемые линии миграции от экватора показаны оранжевыми линиями, к экватору – зелеными линиями. Справа от вертикальных голубых линий располагается область БРЗ.

Fig. 6. Diagrams showing seismic activity propagation from the interplate boundaries towards the Baikal rift zone from 1963 to 2015, $M \geq 4.5$ (*a* – from the collision region; *b* – from the Japanese segment of the Benioff zone). Projected migration lines from/to the equator are shown by amber and green lines, respectively. The Baikal rift zone is located to the right of the vertical blue lines.

рассматривается только как точка на плоскости пространство-время (рис. 5, *в*). В результате наша функция преобразуется к виду: $T=f(r)$, где T – время, а r – расстояние от начала отсчета. Миграциям событий во времени вдоль рассматриваемой линии соответствуют на диаграмме диагонально расположенные цепочки точек. В случае, если события в процессе миграции удаляются от начала отсчета, цепочки имеют правый наклон, а если приближаются к начальной точке, – левый [Levina, Ruzhich, 2015b].

Для дальнейшего исследования диаграмм использовалось сочетание кластерного [Zagoruiko, 1999] и регрессионного анализа. Подробно метод выделения кластеров описан в [Levina, Ruzhich, 2015b]. Для совокупности точек, входящих в соответствующий миграционный кластер, строится линейная регрессия, по коэффициентам которой и вычисляется скорость миграции.

Результаты применения метода. Изучение сейсмомиграционных процессов от области Гималайской коллизии до БРЗ проводилось за период 1963–2015 гг. для событий с $M=4-9$. Анализ динамики распространения сейсмической активности в пределах указанного пространства отражен на диаграмме, представленной на рис. 6, *а*, показывающей миграцию максимумов сейсмической активности во времени и в пространстве. На диаграмме можно видеть проявления квазициклическости в сейсмическом режиме Тянь-Шаньского сегмента и тренды перемещения максимумов сейсмической активности в виде деформационных фронтов с юго-запада на северо-восток и в обратном направлении со скоростью порядка 330 км/год. Видно также, что миграционный процесс имеет прерывисто-поступательный режим, который предположительно обусловлен квазипериодическим продвижением деформационных фронтов в земной коре со стороны Индо-Евразийской коллизионной области.

Следующий рассмотренный район включает в себя территорию от Японских островов до БРЗ. Пространственно-временная диаграмма представлена на рис. 6, *б*. В отличие от предыдущей, полоса, выбранная для изучения миграции сейсмической активности в этом районе, ориентирована с юго-востока на северо-запад. В данной работе «экваториальными» называются направления миграции от экватора и, соответственно, «полярными» – к экватору.

Средние параметры миграции сейсмической активности для всех рассмотренных районов приведены в таблице 2.

Интерпретация данных в таблице 2 может быть следующей. В целом, районы между фрагментом Тихоокеанской зоны субдукции и БРЗ характеризуются меньшей плотностью сейсмической энергии, чем на территории между БРЗ и Индо-Евразийской зоной коллизии, что указывает на меньший уровень напряженного состояния литосферы.

Согласно более ранним результатам исследований, эффект миграции сейсмической активности в настоящее время предположительно связывается с периодическим распространением от различных энергетических источников деформационных волн, энергетический вклад которых может заметным образом инициировать сейсмическую активизацию в литосфере [Levina, Ruzhich, 2010, 2015a]. Предполагалось, что подобные явления возникают при прохождении деформационных фронтов со стороны зон коллизии или субдукции, достигающих БРЗ. Вследствие этого в ее пределах возможны квазипериодические акты сейсмической активизации, приуроченные к высоконапряженным участкам зон разломов. Для проверки этого предположения были построены гистограммы распределе-

Т а б л и ц а 2. Средние параметры миграции сейсмической активности

T a b l e 2. Average parameters of seismic activity migration

Район	Количество событий	Плотность энергии, (10^{10} Дж/км ²)	V ср. экв., (км/год)	P ср. экв., (лет)	V ср. пол., (км/год)	P ср. пол., (лет)
Тянь-Шань – БРЗ	13720	1.72	340	6.75	320	12
Япония – БРЗ	2903	1.02	254	10.3	299	10

П р и м е ч а н и е. V – средняя скорость, P – средний период повторения для экваториальных и полярных кластеров.

N o t e. V – average rate; P – average recurrence period for equatorial and polar clusters.

ния во времени количества землетрясений и выделившейся сейсмической энергии в БРЗ за период с 1963 по 2015 г. с интервалом 1 год (рис. 7 и 8). На этих гистограммах цветными прямоугольниками показаны периоды выделенных кластеров миграции с диаграмм на рис. 6. Возможная связь периодов сейсмической активизации в Индо-Евразийской коллизионной области и БРЗ может быть проиллюстрирована с помощью рис. 7. Экваториальные кластеры (оранжевые прямоугольники) повторяются с периодом ~ 6.75 года, а полярные (зеленые прямоугольники) – с периодом ~ 12 лет. Приблизительно 70 % максимумов как количества землетрясений, так и их энергии совпадают с периодами прохождения деформационных фронтов.

Аналогично предполагаемые периоды прохождения деформационных фронтов по БРЗ со стороны японского сегмента зоны субдукции показаны на рис. 8. В этом случае экваториальные кластеры повторяются с периодом ~ 10.3 года, а полярные – с периодом ~ 9.3 года. Здесь только приблизительно 40 % максимумов попадает в периоды прохождения деформационных фронтов. Из полученных значений можно видеть, что прохождение деформационного фронта со стороны зоны коллизии проявляется более заметным образом в сейсмическом режиме БРЗ, чем со стороны зоны субдукции.

Для выяснения вопроса о том, как изменяется плотность выделившейся сейсмической энергии в литосфере при удалении от межплитных границ по направлению к БРЗ, была посчитана ее величина по пространственным окнам за период 1963–2015 гг. Графики полученных рядов, характеризующие спадание плотности сейсмической энергии, показаны на рис. 9 для зоны коллизии и на рис. 10 для зоны субдукции. Параметры линейной регрессии для этих рядов приведены в таблице 3.

Из уравнений регрессии видно, что спадание плотности энергии в направлении к БРЗ от зоны субдукции происходит быстрее, чем от зоны коллизии. Это говорит о том, что, несмотря на более значимую величину энергетического источника в зоне субдукции, его влияние ослабевает быстрее и оказывает более слабое воздействие на сейсмический

режим в БРЗ. Можно предположить, согласно геолого-геофизическим представлениям, что указанные различия обусловлены более высокой сдвиговой жесткостью в контактной зоне коллизии в сравнении с субдукционной зоной, где имеет место скользящий контакт литосферных плит, насыщенный флюидами и пластичными осадочными породами.

Отметим, что ранее к рассмотрению подобного вопроса обращались П.Г. Дядьков и его соавторы [Djadkov, 2002; Nazarova et al., 2002; Djadkov et al., 1999], которые проводили расчеты иными методами и пришли к сходным выводам.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗУЧЕНИЯ СЕЙСМОМИГРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

В разделе о сейсмомиграции при анализе пространственно-временных диаграмм было выделено два периода повторения кластеров сейсмической активности – 10.8 и 6.75 лет. Ранее в работе [Levina, Ruzhich, 2015b] был выделен период 18 лет. Здесь же уместно напомнить о периодичности в сейсмическом режиме БРЗ [Ruzhich, 1997; Levina, 2011]. Предпринята попытка выяснить, с каким энергетическим источником тектонических процессов, контролирующим или модулирующим подобную периодичность в сейсмичности, а следовательно, и в деструктивном процессе в геологической среде может быть обнаружена связь. По мнению авторов, таким источником могут быть космические факторы.

Как известно, скорость вращения Земли, и угловая, и орбитальная, не является постоянной. С ротационными напряжениями, возникающими в литосфере при вариациях скорости вращения нашей планеты, связывают возникновение регматической сети разломов и трещин, закономерно ориентированной по отношению к оси вращения Земли. Вариативность вращения Земли и твердые приливы от притяжения Луны и Солнца в течение длительного многоциклового воздействия могут опосредованно влиять и на дифференциальные перемеще-

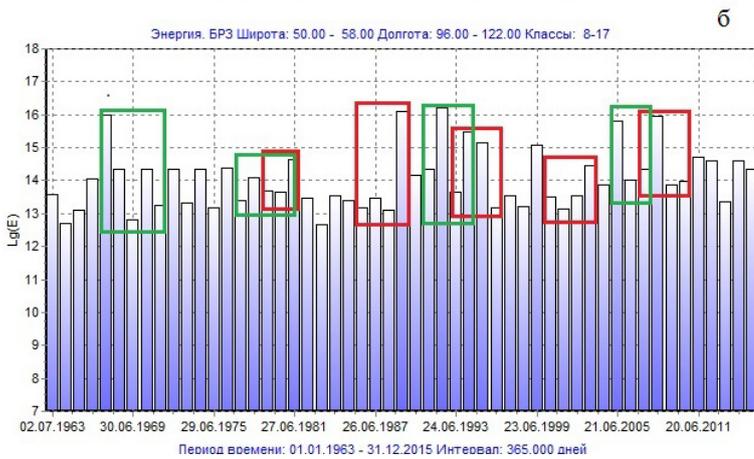
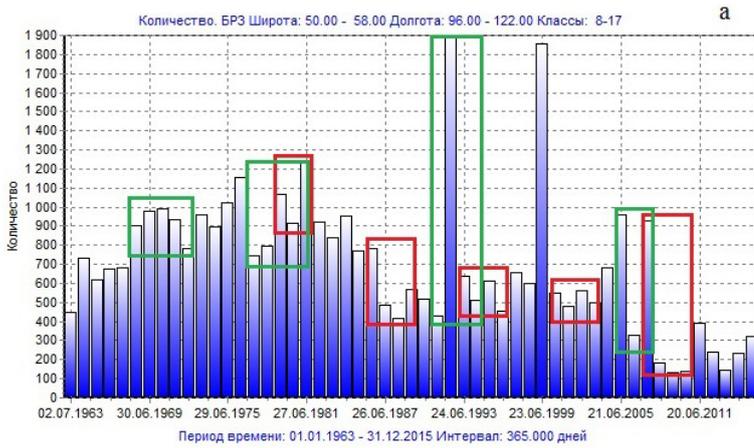


Рис. 7. Гистограммы количества землетрясений (а) и сейсмической энергии (б) в БРЗ за период 1963–2015 гг. Периоды кластеров миграции сейсмической активности в БРЗ со стороны зоны Индо-Евразийской коллизии показаны цветными прямоугольниками: красным цветом – периоды экваториальных кластеров, зеленым – полярных.

Fig. 7. Histograms of the number of earthquakes (a) and seismic energy (б) in the Baikal rift zone from 1963 to 2015. Periods of seismic activity cluster migration into BRZ from the Indo-Eurasian collision zone are shown by boxes coloured in red (equatorial clusters) and green (polar clusters).

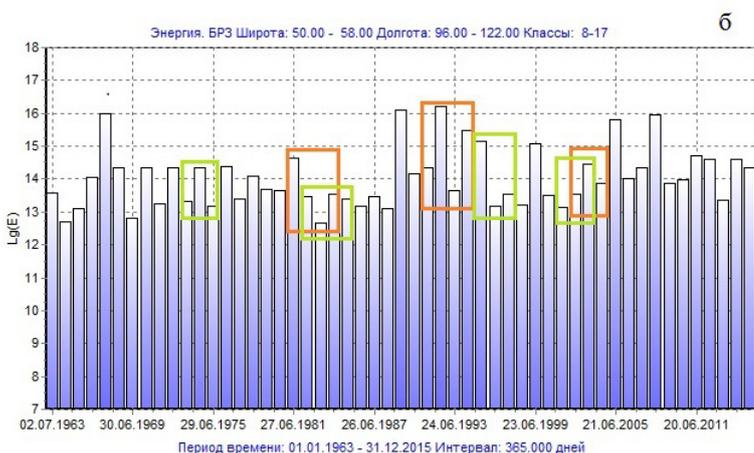
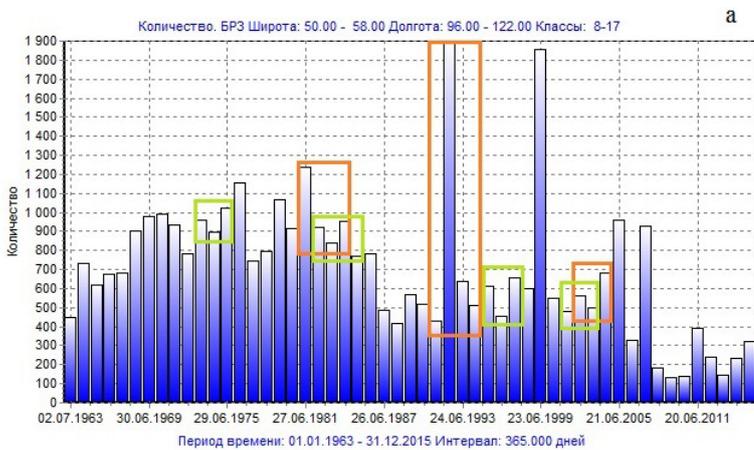


Рис. 8. Гистограммы количества землетрясений (а) и сейсмической энергии (б) в БРЗ за период 1963–2015 гг. Периоды кластеров миграции сейсмической активности в БРЗ со стороны японского сегмента зоны субдукции показаны цветными прямоугольниками: оранжевым цветом – периоды экваториальных кластеров, светло-зеленым – полярных.

Fig. 8. Histograms of the number of earthquakes (a) and seismic energy (б) in the Baikal rift zone from 1963 to 2015. Periods of seismic activity cluster migration into BRZ from the Japanese segment of the subduction zone are shown by boxes coloured in amber (equatorial clusters) and light green (polar clusters).

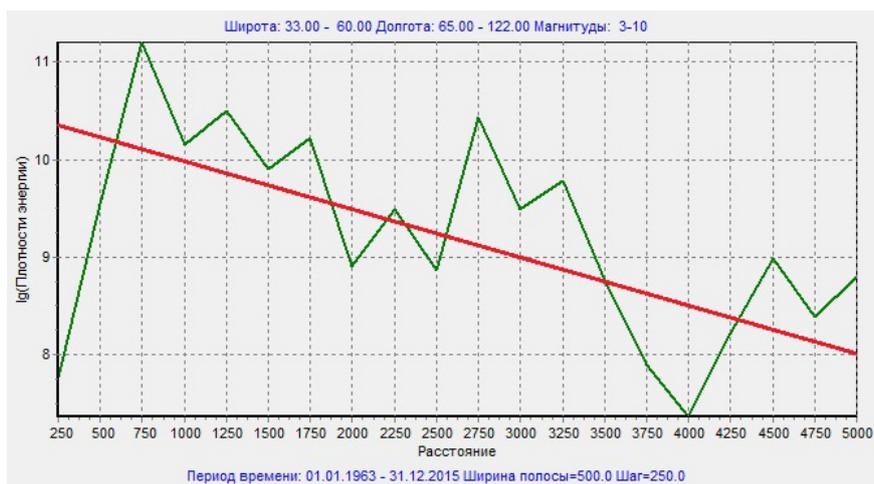


Рис. 9. График зависимости логарифма плотности сейсмической энергии от расстояния от Индо-Евразийской зоны коллизии до БРЗ (зеленая линия). Линейная регрессия – красная линия.

Fig. 9. Logarithm of seismic energy density vs. distance from the India-Eurasian collision zone to the Baikal rift zone (green line). Linear regression is shown by the red line.

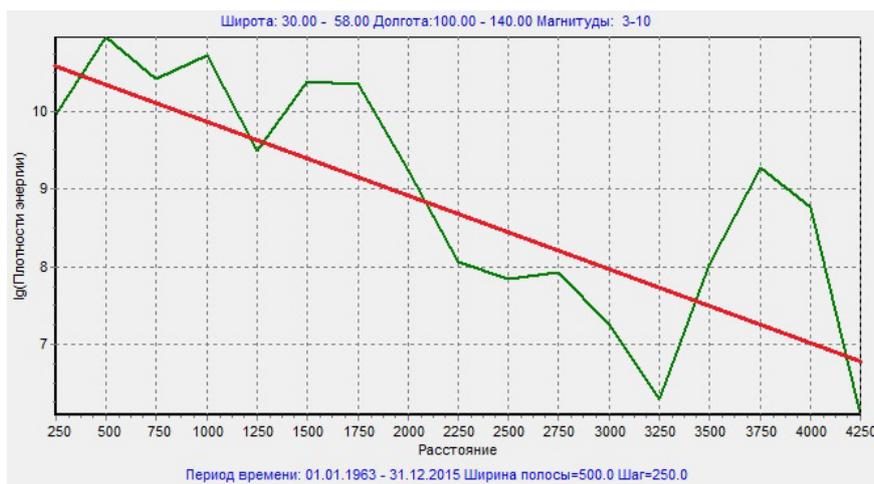


Рис. 10. График зависимости логарифма плотности сейсмической энергии от расстояния от японского сегмента Тихоокеанской зоны субдукции до БРЗ (зеленая линия). Линейная регрессия – красная линия.

Fig. 10. Logarithm of seismic energy density vs. distance from the Japanese segment of the Pacific subduction zone to the Baikal rift zone (green line). Linear regression is shown by the red line.

Т а б л и ц а 3. Параметры линейной регрессии

Table 3. Linear regression parameters

Район	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i>	σ
Зона коллизии – БРЗ	10.72	-0.0005	0.73	0.11
Зона субдукции – БРЗ	10.99	-0.001	0.75	0.11

П р и м е ч а н и е. *a*, *b* – коэффициенты в уравнении регрессии $Y=aX+b$, *r* и σ – коэффициент корреляции и его ошибка.

N o t e. *a*, *b* – coefficients in regression equation $Y=aX+b$; *r*, σ – correlation coefficient and its error.

ния литосферы и мантии. Силы гравитационного притяжения изменяются в зависимости от взаимного положения Земли, Луны и Солнца. Земная ось испытывает, кроме прецессии с периодом 26 тыс. лет, еще ряд мелких периодических колебаний – нутацию, главное из которых имеет период 18.6 года. Известно, что плоскость орбиты Луны наклонена к плоскости эклиптики под углом $\sim 5^\circ$. Линия пересечения этих плоскостей называется линией узлов лунной орбиты, и она совершает полный оборот за 18.6 года. Возможно, влиянием этого периодического процесса можно объяснить выделенный авторами период миграции 18 лет. Корреляция сейсмической активности с изменением склонения Луны с периодом 18.6 лет отмечается также в работе [Tamrazyan, 1965]. Кроме того, наша планета совершает колебания относительно оси вращения, в результате чего мгновенный полюс описывает на поверхности Земли сложную спиралеобразную кривую, которая закручивается и раскручивается с периодом около шести лет. Согласно гипотезе члена-корреспондента РАН Ю.Н. Авсюка [Avsyuk, 1996], этот период связан с перемещением твердого ядра Земли под действием переменной приливной силы. Так как Земля имеет массивный спутник (масса Луны составляет $1/81$ массы Земли), эклиптика является на самом деле линией движения вокруг Солнца барицентра системы Земля-Луна. Земля также вращается вокруг барицентра, который находится внутри тела Земли, но, тем не менее, не совпадает с ее центром. Орбита Земли при этом вращении испытывает все те же возмущающие факторы, что и орбита Луны. В движении Луны известен 6-летний период, складывающийся из периода обращения узлов лунной орбиты (18.6 года) и перемещения ее перигея в обратном направлении (9 лет). Периодические смещения массивного внутреннего ядра Земли должны приводить к периодическим возмущениям движения планеты и вариациям напряжений в твердой оболочке Земли [Levin, 2006]. Повторение кластеров сейсмомиграции от зоны коллизии к БРЗ через приблизительно 6.75 года, возможно, отражает один из периодов этого возмущенного движения Земли вокруг барицентра системы Земля-Луна. Также стоит упомянуть о проявлении более длиннопериодной цикличности, измеряемой в пределах тысяч, десятков и сотен тысяч лет, которая установлена в вулканических процессах в пределах БРЗ и в других тектонически активных зонах Земли [Rasskazov, Chuvashova, 2013; Dobretsov, 2015].

Что касается выделенного периода с длительностью 10.8 года, то его традиционно соотносят с циклом солнечной активности [Lyubushin et al., 1998; Shestopalov, Kharin, 2004; Djadkov, 2002]. В работе [Avsyuk, 1996] показано, что изменение полной

приливной силы, действующей на Солнце (в системе Солнце-Юпитер-Сатурн), соответствует изменению солнечной активности, рассмотренной в период с 1800 по 1980 г. Под полной приливной силой здесь понимается возмущение в движении Солнца, вызванное его вращением вокруг барицентра Солнечной системы.

Указанные причины способны инициировать сходные по длительности короткопериодные вариации сейсмического режима в различных регионах Земли [Saprygin, 2005; и др.]. В таком случае вопросы изучения вариаций в режиме вращения Земли, опосредованно влияющих на режим сейсмического процесса в БРЗ и других регионах нашей планеты, приобретают сейсмопрогностическую ценность.

Из сказанного следует вывод: короткопериодные вариации в сейсмическом режиме рассмотренных областей, так же как и сейсмомиграционных процессов, невозможно увязывать с наблюдаемыми медленными эндогенными процессами в виде мантийных течений и всплывающих плюмов аномальной мантии. Следовательно, рассмотренные периодичности могут быть объяснены с привлечением вышеупомянутых планетарных и космических факторов.

В части, касающейся энергетической значимости данных факторов по отношению к внутриземным термомеханическим условиям, можно привести следующие оценки. В публикациях [Gnatus, Khutorskoy, 2010; Gnatus' et al., 2011] приводятся сведения о том, что общий вынос тепла недр к земной поверхности оценивается в 3×10^{13} Вт, тогда как энергетическая мощность вариаций вращения нашей планеты составляет 10^{13} – 10^{14} Вт. Следовательно, приведенные оценки разных энергетических источников сопоставимы по порядку величин. Можно для сравнения привести еще и оценки суммарной энергии землетрясений Земли – 2×10^{11} Вт и вулканической деятельности – 10^{11} Вт. Из таких сравнений следует, что только кинетическая энергия нашей неравномерно вращающейся планеты может оказывать постоянное и ощутимое вибрационное влияние на режимы высвобождения сейсмической энергии при деформировании и деструкции литосферной оболочки. В работе [Levin, Sasorova, 2010] было обращено внимание на статистически значимое сходство глобальных распределений сейсмических событий для Земли и Луны, у которой нет такого источника энергии в виде горячего ядра, как у Земли. На основании вышесказанного упомянутыми авторами сделан вывод о проявлении влияния общих внешних гравитационных сил, постоянно воздействующих на Землю и Луну и сейсмические процессы в них.

Приведенный краткий обзор распространенных представлений о воздействии планетарных и кос-

мических факторов на тектономагматические процессы в литосфере и на ее деструкцию свидетельствует о их значительной интенсивности, влияющей на длительное деформирование и усталостное разрушение сравнительно тонкой внешней оболочки нашей планеты. По мнению авторов, корректная и непротиворечивая модель развития БРЗ как структуры планетарного масштаба должна быть увязана с разработкой динамической модели Земли, в которой будет учтено совместное взаимодействие внутриземных и космических факторов.

6. О РАСПРОСТРАНЕНИИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ В ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТАХ НА ДАЛЬНИЕ РАССТОЯНИЯ

При обсуждении вопросов, касающихся оценок степени геодинамического влияния на БРЗ со стороны межплитных границ, есть неясность в понимании механизмов распространения тектонических деформаций и напряжений в литосферных плитах. Реология континентальной плиты подразумевает проявление упругопластических свойств в верхнем несущем слое мощностью порядка 20–30 км, а в пределах нижнего – вязкопластических свойств. Отсюда возможность передачи значительных тектонических напряжений от зон межплитных контактов на расстояния во многие тысячи километров в тонком несущем литосферном слое при соотношениях 1:200 даже в упрощенном смысле выглядит весьма сомнительной. Однако так называемые медленные волны с большими периодами имеют способность распространяться на многие тысячи километров. Вопросы по этой тематике уже много лет активно обсуждаются специалистами, например в работах [Nevsky et al., 1991; Bykov, 2000; Makarov et al., 2001; Goldin et al., 2002; Zuev, 2006; Zuev et al., 2008; Sherman, Gorbunova, 2008; Sherman, 2013; Ruzhich et al., 1999; Gorbunova, Sherman, 2012; Peryshkin, Makarov, 2015]. Физическая природа подобных волновых возмущений, распространяющихся в литосфере с замедленными скоростями, не может быть чисто упругой, и потому они фиксируются в основном по косвенным данным из-за отсутствия соответствующей широкополосной измерительной аппаратуры. В работах [Psakhie et al., 2001; Borneyakov et al., 2003; Vostrikov et al., 2009; Sherman, 2013] методами моделирования были рассмотрены примеры регистрации подобных сценариев распространения динамических возмущений при проведении лабораторных и полунатурных экспериментов. Также анализировались данные других ученых, полученные с учетом последствий волнового воздействия в виде откликов на подземные ядерные взрывы и землетрясения [Nikolaev, Vereshchagina, 1991a, 1991b; Tarasov, Tarasova, 1995].

Согласно графику на рис. 11, время задержки отклика на динамические возмущения возрастает при увеличении энергии воздействия на геосреду, как правило, насыщенную многочисленными нарушениями сплошности. В случае наиболее мощных динамических воздействий время запаздывания откликов исчисляется сутками и месяцами. В пространственном отношении области задержки отклика с эффектами затишья, например после сильного землетрясений с магнитудой 7–8, имеют радиусы в десятки-сотни километров. После афтершоковой активности и последующего затишья при сильных землетрясениях в геосреде возникают фронты динамического возмущения, распространяющиеся в виде медленных волновых возмущений на далекие расстояния [Goldin et al., 2002; Kocharyan et al., 2014, 2015]. В качестве показательных примеров распространения удаленного геодинамического влияния следует обратиться к одному из них, выявленному нами. От катастрофического землетрясения в провинции Тохоку 11 марта 2011 г. при $M=9.0$ при удалении от эпицентра на расстояние более 3 тыс. км сейсмической станцией был зафиксирован отклик на байкальском побережье в п. Листвянка с амплитудой 150 мкм. В пределах БРЗ в ближайшие месяцы, кроме умеренного возрастания уровня фоновой сейсмической активности, сильных импульсов отмечено не было. Однако отклик на данное катастрофическое землетрясение на ледяном покрове Байкала в районе п. Листвянка, где проводился мониторинг сейсмических колебаний и смещений в зонах магистральных трещин, разделяющих крупные сегменты ледяных полей, имел более значительные параметры. Амплитуда деформационных волновых колебаний ледяного покрова, зарегистрированная широкополосными сейсмостанциями, достигала 8 см при длительности периода порядка 18 с. Общая длительность отклика в виде деформаций ледяного покрова и колебаний уровня озера составила более 8 ч, она также проявилась и в виде ледовых сейсмических ударов в магистральных ледовых трещинах [Chernykh et al., 2011].

Другим красноречивым примером удаленного геодинамического влияния со стороны межплитных границ на внутриплитные геоструктурные объекты может служить широкофокусное Охотоморское землетрясение 20 мая 2013 г. с $M_w=8.3$, $K=17.0$, очаг которого располагался в Курило-Камчатском сегменте зоны субдукции. Из-за глубокого залегания гипоцентра землетрясения (629 км), приуроченного к периферийной части погруженного слэба Тихоокеанской плиты, его вибросейсмическое воздействие ощущалось людьми с интенсивностью 3–4 балла в США, в Москве – 2–4 балла, а на более близком расстоянии, например в

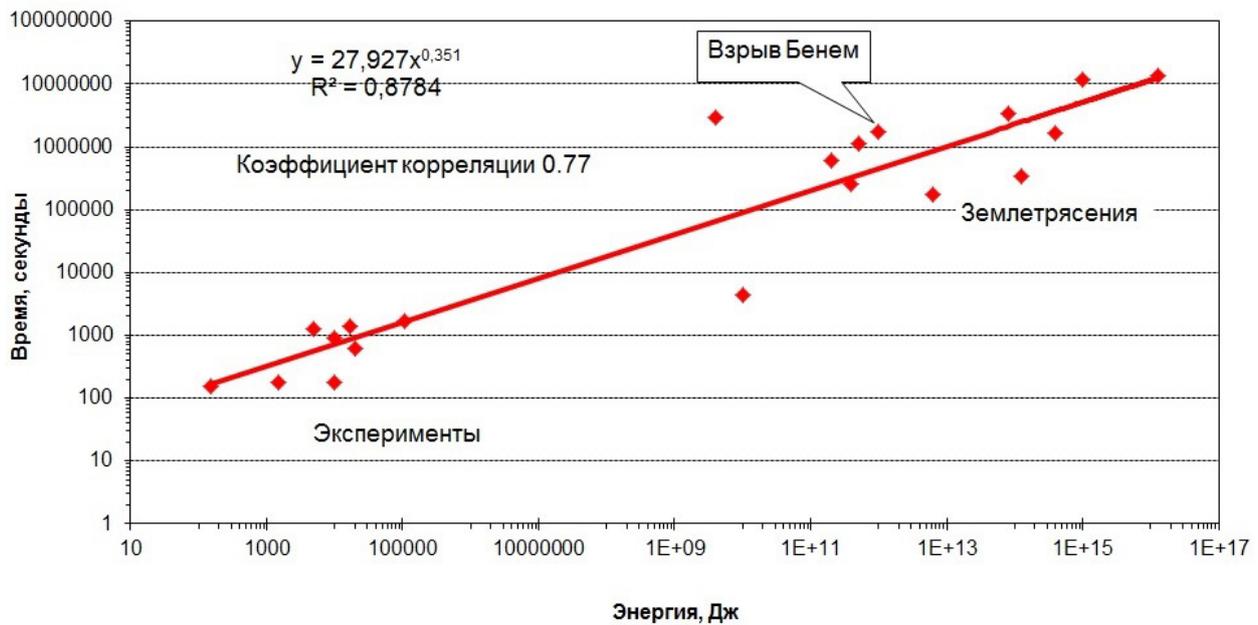


Рис. 11. График зависимости времени запаздывания деформационного отклика в виде смещений по разломам после динамических воздействий разного энергетического уровня: ударов копра, слабых и массовых взрывов, землетрясений, подземного ядерного взрыва на полигоне в Неваде.

Fig. 11. Curve showing time lags of deformation responses in the form of displacements along the faults after the dynamic effects of different energy levels: boring-tower shocks, weak and massive blasts, earthquakes, and an underground nuclear explosion at the Nevada Test Site.

г. Иркутске, – всего лишь на уровне 4–5 баллов [Chebrova et al., 2015]. Судя по макросейсмическим описаниям, на расстояния во многие сотни и тысячи километров распространяются низкочастотные волновые пакеты в виде медленных волн, влияние которых на геоструктурные элементы неоднозначно и зависит от сочетания многих факторов.

Исходя из понимания сути триггерных механизмов, не только очень сильное, но даже слабое волновое воздействие на высоконапряженные сегменты разломов при соответствующем сочетании физико-механических факторов способно приводить к резкому увеличению амплитуд смещений в разрывных нарушениях и скоростей деформаций в местах контактирования неровностей в плоскости разлома [Ruzhich et al., 2007a; Kocharyan et al., 2015]. При этом в ответ на вибрационные воздействия возникает нелинейный отклик с проявлением запаздывания, длительность которого зависит от напряженного состояния среды, энергии и скорости воздействия, спектрального состава воздействующих колебаний, удаления от источника, направленности падения волны [Ruzhich et al., 1999, 2007b]. В коллективном отклике всей совокупности разрывов разного масштаба на внешние динамические воздействия активизируются разрывные нарушения, которые сами становятся излучателями волновых колебаний, в

том числе и сейсмического диапазона. Можно полагать, что рассмотренным способом происходит энергетическая подпитка распространяющихся медленных волновых колебаний за счет эндогенной энергии, запасенной в недрах литосферы, что способствует их распространению на далекие расстояния. С некоторой временной задержкой геодинамическое влияние на режим землетрясений в пределах БРЗ нередко проявляется и после значительных сейсмических событий в области Индо-Евразийской коллизии. Данный эффект триггерного влияния используется авторами как значимый критерий для среднесрочного прогноза землетрясений в Прибайкалье [Levina, Ruzhich, 2015a].

Рассмотренный способ последовательной передачи напряженно-деформированного состояния в литосферных плитах на различных удалениях от энергетического источника характеризует распространение деформационных фронтов в соответствии с законом спадания энергии посредством распространения не только упругих, но также квазиупругих и упругопластических волновых колебаний. Не до конца изученные эффекты распространения медленных волновых полей рассматривались во многих работах, например в [Elsasser, 1969; Zuev et al., 2008, 2014; Zuev, 2006; Kocharyan et al., 2014].

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современное геодинамическое влияние на сейсмостектонический режим БРЗ со стороны Индо-Евразийской зоны коллизии проявляется в виде умеренного горизонтального сжатия литосферы, которое распространяется преимущественно на юго-западный и отчасти на центральный район БРЗ. Удельная плотность сейсмической энергии, выделившейся в литосфере на промежуточной территории по этому профилю, составляет порядка 1.72×10^{10} Дж/км². Возможно, такое влияние дополнительно усиливалось эффектом планетарного плюсового сжатия и способствовало умеренной кайнозойской активизации древних надвигов и взбросо-сдвигов в пределах БРЗ.

Со стороны зоны субдукции от Нанкайского желоба геодинамическое влияние на сейсмичность БРЗ характеризуется меньшим значением плотности высвобожденной сейсмической энергии – 1.02×10^{10} Дж/км². Оно ощутимо в литосфере в пределах северо-восточного фланга БРЗ и проявляется в откликах на сильные сейсмические события в зоне субдукции, а также в виде механизмов очагов землетрясений с выраженной сдвиговой компонентой в районах Чарской и Токкинской впадин.

Коллизионное и субдукционное геодинамическое воздействие на структуры БРЗ через литосферную плиту Евразии проявляется в ослабленном виде через триггерные эффекты. Механизм прерывистого распространения геодинамического влияния в литосферных плитах обусловлен движением фронтов замедленных волновых деформаций, фиксируемых на полученных диаграммах в виде миграций кластеров сейсмической активности. Дальнодействие в распространении медлен-

ных волн реализуется через триггерные инициации существующих в литосфере активных разрывных нарушений. Ощутимое сейсмостектоническое влияние на сейсмический режим БРЗ может эпизодически проявляться после масштабной сейсмической активизации в областях коллизии и субдукции. Данное явление возможно использовать в качестве одного из критериев в среднесрочном прогнозе землетрясений с учетом запаздывания отклика.

Исходя из наблюдаемой короткопериодной цикличности в сейсмическом режиме БРЗ и в области межплитных границ, а также и в сейсмомиграционных процессах, подтверждается вывод о возможности модулирующего влияния космогенных факторов на планетарные сейсмостектонические процессы. Подобные короткопериодные циклы не могут быть порождены медленными процессами мантийной конвекции Земли.

Сбалансированная непротиворечивая модель возникновения и развития БРЗ может быть представлена в будущем при получении новых геолого-геофизических сведений и после разработки общей динамической модели Земли при учете совместного взаимодействия внутриземных и космических факторов.

8. Благодарности

Авторы выражают искреннюю признательность своим коллегам – В.А. Санькову, А.М. Мазукабзову, В.В. Мордвиновой, П.Г. Дядькову за активное и полезное участие в обсуждении многих сложных вопросов и высказанные ценные замечания, способствующие улучшению статьи. Работа выполнена при частичной поддержке РФФ № 14-17-00719.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Artyushkov E.V., Letnikov F.A., Ruzhich V.V., 1990. On the development of a new mechanism for the formation of the Baikal basin. In: N.A. Logachev (Ed.), *Geodynamics of intracontinental mountainous regions*. Nauka, Novosibirsk, p. 367–378 (in Russian) [Артюшков Е.В., Летников Ф.А., Ружич В.В. О разработке нового механизма формирования Байкальской впадины // Геодинамика внутриконтинентальных горных областей / Ред. Н.А. Логачев. Новосибирск: Наука, 1990. С. 367–378].
- Avsyuk Yu.N., 1996. *Tidal Forces and Natural Processes*. UIPE RAS, Moscow, 188 p. (in Russian) [Авсюк Ю.Н. Приливные силы и природные процессы. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 188 с.].
- Avsyuk Yu.N., 2001. Extraterrestrial drivers of tectonics. In: *Main problems of global tectonics*. Nauchny Mir, Moscow, p. 437–441 (in Russian) [Авсюк Ю.Н. Внеземные движущие силы тектоники // Основные проблемы глобальной тектоники. М.: Научный мир, 2001. С. 437–441].
- Bornyakov S.A., Adamovich A.N., Cheremnykh A.V., 2003. Experimental study of the Cenozoic geodynamics of the Sayan-Baikal branch of the Central Asian mobile belt. In: *Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from Ocean to Continent)*. Issue 1. Institute of Geography RAS, Irkutsk, p. 31–33 (in Russian) [Борняков С.А., Адамович А.Н., Черемных А.В. Экспериментальное исследование кайнозойской геодинамики саяно-байкальской ветви Центрально-Азиатского подвижного пояса // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Вып. 1. Иркутск: Институт географии СО РАН, 2003. С. 31–33].

- Bott M., 1990. Geodynamic processes in continental rift systems as applied to the Baikal rift. In: N.A. Logachev (Ed.), Geodynamics of intracontinental mountainous regions. Nauka, Novosibirsk, p. 317–323 (in Russian) [Ботт М. Геодинамические процессы в континентальных рифтовых системах в приложении к Байкальскому рифту // Геодинамика внутриконтинентальных горных областей / Ред. Н.А. Логачев. Новосибирск: Наука, 1990. С. 317–323].
- Bykov V.G., 2000. Nonlinear Wave Processes in Geological Media. Dal'nauka, Vladivostok, 190 p. (in Russian) [Быков В.Г. Нелинейные волновые процессы в геологических средах. Владивосток: Дальнаука, 2000. 190 с.].
- Chebrova A.Y., Chebrov V.N., Gusev A.A., Lander A.V., Guseva E.M., Mityushkina S.V., Raevskaya A.A., 2015. The impacts of the M_w 8.3 Sea of Okhotsk earthquake of May 24, 2013 in Kamchatka and worldwide. *Journal of Volcanology and Seismology* 9 (4), 223–241. <http://dx.doi.org/10.1134/S074204631504003X>.
- Chernykh E.N., Klyuchevsky A.V., Ruzhich V.V., 2011. A comparative study of records of the disastrous East Japan earthquake on the rocky ground and the ice cover of Lake Baikal. *Problems of Engineering Seismology* 38 (4), 29–38 (in Russian) [Черных Е.Н., Ключевский А.В., Ружич В.В. Сравнительное исследование записей катастрофического Восточно-Японского землетрясения на скальном грунте и ледовом покрове озера Байкал // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 38. № 4. С. 29–38].
- Djadkov P.G., 2002. Periodicity in changes of seismic regime and crustal stresses in the Baikal rift zone: relationship with the 11-year cycles of solar activity and seasonal changes in the level of Lake Baikal. In: The atlas of temporal variations of natural, anthropogenic and social processes. V. 3. Janus-K Publishing House, Moscow, p. 251–254 (in Russian) [Дядьков П.Г. Периодичности в изменениях сейсмического режима и напряжений в земной коре Байкальской рифтовой зоны: связь с 11-летней цикличностью солнечной активности и сезонными изменениями уровня оз. Байкал // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 3. М.: «Янус-К», 2002. С. 251–254].
- Djadkov P.G., Mel'nikova V.I., Nazarov L.A., Nazarova L.A., San'kov V.A., 1999. Increase of seismotectonic activity in the Baikal region in 1989–95: Results of experimental observations and numerical modeling of changes in the stress-strained state. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 40 (3), 373–386.
- Djadkov P.G., Nazarov L.A., Nazarova L.A., 2006a. 3D-model of the Earth's lithosphere: development methodology and first numerical experiments. *Fizicheskaya mezomekhanika (Physical Mesomechanics)* 9 (1), 73–76 (in Russian) [Дядьков П.Г., Назаров Л.А., Назарова Л.А. Трехмерная модель литосферы Земли: методология построения и первые численные эксперименты // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. № 1. С. 73–76].
- Djadkov P.G., Nazarov L.A., Nazarova L.A., Mikhееva A.V., Kuznetsova Yu.M., 2006b. Possible influence of the 2001 Northern Tibet and 2003 Hokkaido earthquakes on preparation of the 2003 Altai earthquake. *Fizicheskaya mezomekhanika (Physical Mesomechanics)* 9 (1), 67–72 (in Russian) [Дядьков П.Г., Назаров Л.А., Назарова Л.А., Михеева А.В., Кузнецова Ю.М. Возможное влияние землетрясений в Северном Тибете (2001 г.) и близ о. Хоккайдо (2003 г.) на процесс подготовки Алтайского землетрясения 2003 года // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. № 1. С. 67–72].
- Dobretsov N.L., 2015. Periodicity and driving forces of volcanism. *Russian Geology and Geophysics* 56 (12), 1663–1670. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2015.11.001>.
- Dobretsov N.L., Chumakov I.M., 2001. Global periodicity in the evolution of the lithosphere and biosphere. In: Global environmental changes and evolution of geological processes. Publishing House of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, p. 11–26 (in Russian) [Добрецов Н.Л., Чумаков И.М. Глобальные периодичности в эволюции литосферы и биосферы // Глобальные изменения природной среды и эволюция геопроцессов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. С. 11–26].
- Elsasser W., 1969. Convection and stress propagation in the upper mantle. In: S.K. Runcorn (Ed.), The application of modern physics to the Earth and planetary interiors. Wiley, New York, p. 223–246.
- Florensov N.A., 1964. The structure and geological history of the Baikal-type basins. In: Reports of the soviet geologists at the 22nd IGC Session. Nauka, Moscow, p. 252–262 (in Russian) [Флоренсов Н.А. Структура и геологическая история впадин байкальского типа // Доклады советских геологов на XXII сессии МГК. М.: Наука, 1964. С. 252–262].
- Florensov N.A., 1968. The Baikal rift zone and some problems of its study. In: N.A. Florensov (Ed.), Baikal Rift. Nauka, Moscow, p. 40–56 (in Russian) [Флоренсов Н.А. Байкальская рифтовая зона и некоторые задачи ее изучения // Байкальский рифт / Ред. Н.А. Флоренсов. М.: Наука, 1968. С. 40–56].
- Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Fedorovskii V.S., Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Lavrenchuk A.V., Lepekhina E.N., 2014. Fragment of the Early Paleozoic (~500 Ma) island arc in the structure of the Olkhon Terrane, Central Asian fold belt. *Doklady Earth Sciences* 457 (2), 905–909. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X14080042>.
- Glukhovskii M.Z., 2005. The rotation factor and some problems of geotectonics and comparative planetology. *Geotectonics* 39 (6), 423–436.
- Gnatus N.A., Khutorskoy M.D., 2010. Hot dry rocks: An inexhaustible and renewable source of energy. *Lithology and Mineral Resources* 45 (6), 593–600. <http://dx.doi.org/10.1134/S0024490210060064>.
- Gnatus' N.A., Khutorskoy M.D., Khmelevskoi V.K., 2011. Petrothermal energy and geophysics. *Moscow University Geology Bulletin* 66 (3), 151–157. <http://dx.doi.org/10.3103/S0145875211030045>.

- Goldin S.V., Yushin V.I., Ruzhich V.V., Smekalin O.P., 2002. Slow motion – myth or reality? In: Physical bases for prediction of rock failure. Proceedings of the 9th International Workshop (Krasnoyarsk, 2002). Geo, Novosibirsk, p. 213–220 (in Russian) [Гольдин С.В., Юшин В.И., Ружич В.В., Смекалин О.П. Медленные движения – миф или реальность? // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: Материалы IX международной школы-семинара (Красноярск, 2002). Новосибирск: «Гео», 2002. С. 213–220].
- Gorbunova E.A., Sherman S.I., 2012. Slow deformation waves in the lithosphere: registration, parameters, and geodynamic analysis (Central Asia). *Russian Journal of Pacific Geology* 6 (1), 13–20. <http://dx.doi.org/10.1134/S181971401201006X>.
- Khain V.E., 1987. The main features of the geological evolution of the Earth's crust in the USSR. *Geologiya i Razvedka (Geology and Exploration)* 7, 73–20 (in Russian) [Хаин В.Е. Основные черты геологической эволюции земной коры в пределах СССР // Геология и разведка. 1987. № 7. С. 3–20].
- Kocharyan G.G., Kishkina S.B., Novikov V.A., Ostapchuk A.A., 2014. Slow slip events: parameters, conditions of occurrence, and future research prospects. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (4), 863–891 (in Russian) [Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Новиков В.А., Остапчук А.А. Медленные перемещения по разломам: параметры, условия возникновения, перспективы исследований // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 4. С. 863–891]. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-4-0160>.
- Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., Ruzhich V.V., Batukhtin I.V., Vinogradov E.A., Kamai A.M., Markov V.K., 2015. Experimental study of different modes of block sliding along interface. Part 2. Field experiments and phenomenological model of the phenomenon. *Fizicheskaya mezomekhanika (Physical Mesomechanics)* 18 (6), 75–85 (in Russian) [Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Павлов Д.В., Ружич В.В., Батухтин И.В., Виноградов Е.А., Камай А.М., Марков В.К. Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела. Часть 2. Полевые эксперименты и феноменологическая модель явления // Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18. № 6. С. 75–85].
- Levi K.G., 1991. Neotectonic Movements in Seismically Active Zones of the Lithosphere. Nauka, Novosibirsk, 164 p. (in Russian) [Леви К.Г. Неотектонические движения в сейсмоактивных зонах литосферы. Новосибирск: Наука, 1991. 164 с.].
- Levin B.W., 2006. About the nature of some periodic changes in seismic regime of the Earth. *Vestnik DVO RAN* (1), 51–58 (in Russian) [Левин Б.В. О природе некоторых периодических изменений в сейсмическом режиме Земли // Вестник ДВО РАН. 2006. № 1. С. 51–58].
- Levin B.W., Sasorova E.V., 2010. General regularities in the distribution of seismic events on the Earth and on the Moon. *Doklady Earth Sciences* 434 (1), 1249–1252. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X10090230>.
- Levina E.A., 2011. Geoinformation System for Prediction of Earthquakes and Rock Shocks: Development and Application for the Baikal Rift Zone and the Norilsk Deposit. PhD Thesis (Geology and Mineralogy). Irkutsk, 19 p. (in Russian) [Левина Е.А. Геоинформационная система для прогноза землетрясений и горных ударов: разработка и примеры применения в Байкальской рифтовой зоне и Норильском месторождении: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 2011. 19 с.].
- Levina E.A., Ruzhich V.V., 2010. Migration of earthquakes as manifestation of wave deformation of the Earth's solid shell. In: V.V. Adushkin, G.G. Kocharian (Eds.), Trigger effects in geosystems. Proceedings of the All-Russia Workshop. GEOS, Moscow, p. 71–78 (in Russian) [Левина Е.А., Ружич В.В. Миграция землетрясений как проявление волновых деформаций твердой оболочки Земли // Триггерные эффекты в геосистемах: Материалы Всероссийского семинара-совещания / Ред. В.В. Адушкин, Г.Г. Кочарян. М.: ГЕОС, 2010. С. 71–78].
- Levina E.A., Ruzhich V.V., 2015a. Seismogeodynamic interaction of the Baikal rift and zones of collision and subduction. In: Geodynamic processes and natural catastrophes. Experience of Neftegorsk. The All-Russia scientific conference with international participation (Yuzhno-Sakhalinsk, 26–30 May 2015). Two volumes. Dal'nauka, Vladivostok, vol. 2, p. 93–97 (in Russian) [Левина Е.А., Ружич В.В. Сейсмогеодинамическое взаимодействие Байкальского рифта с зонами коллизии и субдукции // Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска: Всероссийская научная конференция с международным участием (г. Южно-Сахалинск, 26–30 мая 2015 г.). В 2-х томах. Владивосток: Дальнаука, 2015. Т. 2. С. 93–97].
- Levina E.A., Ruzhich V.V., 2015b. The seismicity migration study based on space-time diagrams. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (2), 225–240. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2015-6-2-0178>.
- Logachev N.A., 1968. Sedimentary and volcanic formations of the Baikal rift zone. In: N.A. Florensov (Ed.), Baikal Rift. Nauka, Moscow, p. 72–101 (in Russian) [Логачев Н.А. Осадочные и вулканогенные формации Байкальской рифтовой зоны // Байкальский рифт / Ред. Н.А. Флоренсов. М.: Наука, 1968. С. 72–101].
- Logachev N.A., Sherman S.I., Levi K.G., 1987. Geodynamic activity of lithosphere, its integrated estimation and relation to seismicity. In: Yu.M. Pushcharovsky (Ed.), Recent Tectonic Activity of the Earth and Seismicity. Nauka, Moscow, p. 97–108 (in Russian) [Логачев Н.А., Шерман С.И., Леви К.Г. Геодинамическая активность литосферы, ее интегральная оценка и связь с сейсмичностью // Современная тектоническая активность Земли и сейсмичность / Ред. Ю.М. Пушаровский. М.: Наука, 1987. С. 97–108].
- Logatchev N.A., 1992. Baikal rift. *IPPCCE Newsletter* (9), 137–141.
- Logatchev N.A., 1993. History and geodynamics of the Lake Baikal Rift in the context of the Eastern Siberia rift system: a review. *Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf Aquitaine* 17 (2), 353–370.

- Lyubushin A.A., Pisarenko V.F., Ruzhich V.V., Buddo V.Yu., 1998. Identification of periodicity in seismic regime. *Vulkanologiya i Seismologiya* (1), 62–76 (in Russian) [Любушин А.А., Писаренко В.Ф., Ружич В.В., Буддо В.Ю. Выделение периодичностей в сейсмическом режиме // *Вулканология и сейсмология*. 1998. № 1. С. 62–76].
- Ma Xi Yuan, 1990. Tectonic processes shown on the China lithosphere dynamics map. In: N.A. Logachev (Ed.), *Geodynamics of intracontinental mountainous regions*. Nauka, Novosibirsk, p. 341–351 (in Russian) [Ма Си Юань. Тектонические процессы, отраженные на карте динамики литосферы Китая // *Геодинамика внутриконтинентальных горных областей* / Ред. Н.А. Логачев. Новосибирск: Наука, 1990. С. 341–351].
- Makarov P.V., Romanova V.A., Balokhonov R.R., 2001. Numerical modeling of heterogeneous plastic deformation with consideration for generation of localized plastic shears at interfaces and free surfaces. *Fizicheskaya mezomekhanika (Physical Mesomechanics)* 4 (5), 29–38 (in Russian) [Макаров П.В., Романова В.А., Балохонов Р.Р. Моделирование неоднородной пластической деформации с учетом зарождения локализованных пластических сдвигов на границах раздела // *Физическая мезомеханика*. 2001. Т. 4. № 5. С. 29–39].
- Mats V.D., 2015. The Baikal rift: Pliocene (Miocene) – Quaternary episode or product of extended development since the Late Cretaceous under various tectonic factors. A review. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (4), 467–490 (in Russian) [Мац В.Д. Байкальский рифт: плиоцен (миоцен) – четвертичный эпизод или продукт длительного развития с позднего мела под воздействием различных тектонических факторов. Обзор представлений // *Геодинамика и тектонофизика*. 2015. Т. 6. № 4. С. 467–490]. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2015-6-4-0190>.
- Mats V.D., Ufimtsev G.F., Mandel'baum M.M., Alakshin A.M., Pospeev A.V., Shimaraev M.N., Khlystov O.M., 2001. The Baikal Basin in the Cenozoic: Structure and Geologic History. Siberian Branch of RAS Publishing House, Filial "Geo", Novosibirsk, 252 p. (in Russian) [Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М., Алакшин А.М., Поспеев А.В., Шимараев М.Н., Хлыстов О.М. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. 252 с.].
- Melnikova V.I., 2001. Stress-strain State of the Baikal Rift Zone from Earthquake Focal Mechanism Data. PhD Thesis (Geology and Mineralogy). IEC SB RAS, Irkutsk, 16 p. (in Russian) [Мельникова В.И. Напряженно-деформированное состояние Байкальской рифтовой зоны по данным о механизмах очагов землетрясений: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2001. 16 с.].
- Milanovsky E.E., 1987. Rifting in the Earth History: Rifting in Mobile Belts. Nedra, Moscow, 297 p. (in Russian) [Милановский Е.Е. Рифтогенез в истории Земли: рифтогенез в подвижных поясах. М.: Недра, 1987. 297 с.].
- Molnar P., Tapponnier P., 1975. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. *Science* 189 (4201), 419–426. <http://dx.doi.org/10.1126/science.189.4201.419>.
- Mordvinova V.V., Kobelev M.M., Treussov A.V., Khritova M.A., Trynkova D.S., Kobeleva E.A., Lukhneva O.F., 2016. Deep structure of the Siberian platform – Central Asian mobile belt transition zone from teleseismic data. *Geodynamics & Tectonophysics* 7 (1), 85–103 (in Russian) [Мордвинова В.В., Кобелев М.М., Треусов А.В., Хротова М.А., Трынкова Д.С., Кобелева Е.А., Лухнева О.Ф. Глубинное строение переходной зоны Сибирская платформа – Центрально-Азиатский подвижный пояс по телесеismicким данным // *Геодинамика и тектонофизика*. 2016. Т. 7. № 1. С. 85–103]. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2016-7-1-0198>.
- Nazarova L.A., Nazarov L.A., Dyad'kov P.G., 2002. Mathematical modeling of kinematics of Central Asian plates. *Journal of Mining Science* 38 (5), 411–417. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1023923329058>.
- Neugebauer H.J., 1983. Mechanical aspects of continental rifting. *Tectonophysics* 94 (1), 91–108. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(83\)90011-2](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(83)90011-2).
- Nevsky M.V., Artamonov A.M., Riznichenko O. Yu., 1991. Deformations waves and energy of seismicity. *Doklady AN SSSR* 318 (2), 316–320 (in Russian) [Невский М.В., Артамонов А.М., Ризниченко О.Ю. Волны деформаций и энергетика сейсмичности // *Доклады АН СССР*. 1991. Т. 318. № 2. С. 316–320].
- Nikolaev A.V., Vereshchagina G.M., 1991a. On the initiation of earthquakes by earthquakes. *Doklady AN SSSR* 318 (2), 320–324 (in Russian) [Николаев А.В., Верещагина Г.М. Об инициировании землетрясений землетрясениями // *Доклады АН СССР*. 1991. Т. 318. № 2. С. 320–324].
- Nikolaev A.V., Vereshchagina G.M., 1991b. On the initiation of earthquakes by underground nuclear explosions // *Doklady AN SSSR* 319 (4), 333–336 (in Russian) [Николаев А.В., Верещагина Г.М. Об инициировании землетрясений подземными ядерными взрывами // *Доклады АН СССР*. 1991. Т. 319. № 4. С. 333–336].
- Northern California Earthquake Data Center, 2016. Available from: <http://www.ncedc.org> (last accessed June 29, 2016).
- Parfeevets A.V., San'kov V.A., 2006. Stress State of the Earth's Crust and Geodynamics of the Southwestern Part of the Baikal Rift System. Geo Academic Publishing House, Novosibirsk, 151 p. (in Russian) [Парфеевец А.В., Саньков В.А. Напряженное состояние земной коры и геодинамика юго-западной части Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2006. 151 с.].
- Peryshkin A.Yu., Makarov P.V., 2015. Simulation of slow deformation fronts in solid media. Their role in the formation of critical states. In: *Modern Science – 2015. Collection of materials of the international scientific conference (29–30 January 2015, Moscow, Russia)*. ICSRP, Kirov, p. 32–40 (in Russian) [Перышкин А.Ю., Макаров П.В. Моделирование медленных деформационных фронтов в прочных средах. Их роль в формировании критических

- состояний // Наука современности – 2015: Сборник материалов международной научной конференции (Россия, г. Москва, 29–30 января 2015 г.). Киров: МЦНИП, 2015. С. 32–40].
- Psakhie S.G., Ruzhich V.V., Smekalin O.P., Shilko E.V., 2001. Response of the geological media to dynamic loading. *Fizicheskaya mezomekhanika (Physical Mesomechanics)* 4 (1), 67–71 (in Russian) [Псахье С.Г., Ружич В.В., Сmealин О.П., Шилько Е.В. Режимы отклика геологических сред при динамических воздействиях // *Физическая мезомеханика*. 2001. Т. 4. № 1. С. 67–71].
- Puzurev N.N. (Ed.), 1981. Interior of Baikal from Seismic Data. Nauka, Novosibirsk, 173 p. (in Russian) [Недра Байкала (по сейсмическим данным) / Ред. Н.Н. Пузырев. Новосибирск: Наука, 1981. 173 с.].
- Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., 2013. The Most Recent Mantle Geodynamics of Central Asia. Publishing House of the Irkutsk State University, Irkutsk, 308 p. (in Russian) [Рассказов С.В., Чувашова И.С. Новейшая мантийная геодинамика Центральной Азии. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. 308 с.].
- Ruzhich V.V., 1972. On the issue of tectonic evolution dynamics of the crust in Pribaikalie in the Cenozoic. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* (4), 122–126 (in Russian) [Ружич В.В. К вопросу о динамике тектонического развития земной коры Прибайкалья в кайнозой // *Геология и геофизика*. 1972. № 4. С. 122–126].
- Ruzhich V.V., 1975. Influence of ancient fractures on development of recent structures of the Baikal rift. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* (1), 130–136 (in Russian) [Ружич В.В. Влияние древних разрывов на развитие новейших структур Байкальского рифта // *Геология и геофизика*. 1975. № 1. С. 130–136].
- Ruzhich V.V., 1997. Seismotectonic Destruction of the Earth's Crust in the Baikal Rift Zone. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 144 p. (in Russian) [Ружич В.В. Сейсмотектоническая деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 144 с.].
- Ruzhich V.V., Khil'ko S.D., 1987. Analysis of earthquake foci models in terms of seismic geology. In: M.A. Sadovsky, G.A. Sobolev (Eds.), Physical bases for prediction of rock failure during earthquakes. Nauka, Moscow, p. 113–122 (in Russian) [Ружич В.В., Хилько С.Д. Анализ моделей очагов землетрясений с сейсмогеологических позиций // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях / Ред. М.А. Садовский, Г.А. Соболев. М.: Наука, 1987. С. 113–122].
- Ruzhich V.V., Mazukabzov A.M., Vasiliev V.P., 1989. On the role of the Indo-Asian collision in the development of the modern Central Asia structure. In: Engineering geodynamics and geological environment. Nauka, Novosibirsk, p. 96–103 (in Russian) [Ружич В.В., Мазукабзов А.М., Васильев В.П. О роли Индо-Азиатской коллизии в становлении современной структуры Центральной Азии // Инженерная геодинамика и геологическая среда. Новосибирск: Наука, 1989. С. 96–103].
- Ruzhich V.V., Psakhie S.G., Chernykh E.N., Federyaev O.V., Dimaki A.V., Tirsikh D.S., 2007a. Effect of vibropulse action on the intensity of displacements in rock cracks. *Fizicheskaya mezomekhanika (Physical Mesomechanics)* 10 (1), 19–24 (in Russian) [Ружич В.В., Псахье С.Г., Черных Е.Н., Федеряев О.В., Димаки А.В., Тирских Д.С. Влияние виброимпульсных воздействий на активность смещений в трещинах горного массива // *Физическая мезомеханика*. 2007. Т. 10. № 1. С. 19–24].
- Ruzhich V.V., Psakhie S.G., Popov V.L., 2007b. Seismic hazard mitigation by technological impact on displacements in segments of active faults. In: D. Ankhsetseg, K.G. Levi, A. Schlupp, M. Ulziibat (Eds.), Proceedings of the conference commemorating the 50th anniversary of the 1957 Gobi-Altay earthquake (25 July – 8 August, 2007, Ulaanbaatar, Mongolia). Ulaanbaatar, p. 204–208.
- Ruzhich V.V., Sherman S.I., Tarasevich S.I., 1972. New data on thrust faults in the southwestern flank of the Baikal rift zone. *Doklady AN SSSR* 205 (4), 1041–1044 (in Russian) [Ружич В.В., Шерман С.И., Тарасевич С.И. Новые данные о надвигах в юго-западном фланге Байкальской рифтовой зоны // *Доклады АН СССР*. 1972. Т. 205. № 4. С. 1041–1044].
- Ruzhich V.V., Truskov V.A., Chernykh E.N., Smekalin O.P., 1999. Recent movements in the fault zones of Prebaikalia and mechanisms of their initiation. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 40 (3), 360–372.
- San'kov V.A., Dobrynina A.A., 2015. Modern fault formation in the Earth's crust of the Baikal rift system according to the data on the mechanisms of earthquake sources. *Doklady Earth Sciences* 465 (1), 1191–1195. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X15110203>.
- San'kov V.A., Parfeevets A.V., Lukhnev A.V., Miroshnichenko A.I., Ashurkov S.V., 2011. Late Cenozoic geodynamics and mechanical coupling of crustal and upper mantle deformations in the Mongolia-Siberia mobile area. *Geotectonics* 45 (5), 378–393. <http://dx.doi.org/10.1134/S0016852111050049>.
- Saprygin S.M., 2005. Plate Tectonics and Seismicity in the Far East. Sakhalin Publishing House, Yuzhno-Sakhalinsk, 83 p. (in Russian) [Сапрыгин С.М. Тектоника плит и сейсмичность в Дальневосточном регионе. Южно-Сахалинск: Сахалинское книжное изд-во, 2005. 83 с.].
- Seminsky K.Z., Kozhevnikov N.O., Cheremnykh A.V., Pospieva E.V., Bobrov A.A., Olenchenko V.V., Tugarina M.A., Potapov V.V., Zaripov R.M., Cheremnykh A.S., 2013. Interblock zones in the crust of the southern regions of East Siberia: tectonophysical interpretation of geological and geophysical data. *Geodynamics & Tectonophysics* 4 (3), 203–278 (in Russian) [Семинский К.Ж., Кожевников Н.О., Черемных А.В., Поспеева Е.В., Бобров А.А., Оленченко В.В., Тугарина М.А., Потопов В.В., Зарипов Р.М., Черемных А.С. Межблоковые зоны в земной коре юга Восточной

- Сибири: тектонофизическая интерпретация геолого-геофизических данных // *Геодинамика и тектонофизика*. 2013. Т. 4. № 3. С. 203–278]. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2013-4-3-0099>.
- Sherman S.I., 2013. Deformation waves as a trigger mechanism of seismic activity in seismic zones of the continental lithosphere. *Geodynamics & Tectonophysics* 4 (2), 83–117 (in Russian) [Шерман С.И. Деформационные волны как триггерный механизм сейсмической активности в сейсмических зонах континентальной литосферы // *Геодинамика и тектонофизика*. 2013. Т. 4. № 2. С. 83–117]. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2013-4-2-0093>.
- Sherman S.I., Gorbunova E.A., 2008. Wave origin of fault activation in the Central Asia on the basis of seismic monitoring. *Fizicheskaya mezomekhanika (Physical Mesomechanics)* 11 (1), 115–122 (in Russian) [Шерман С.И., Горбунова Е.А. Волновая природа активизации разломов Центральной Азии на базе сейсмического мониторинга // *Физическая мезомеханика*. 2008. Т. 11. № 1. С. 115–122].
- Shestopalov I.P., Kharin E.P., 2004. On the relationship between seismicity of the Earth and the solar and geomagnetic activity. In: *The Sun-Earth relations and electromagnetic precursors of earthquakes*. Petropavlovsk-Kamchatsky, p. 64–76 (in Russian) [Шестопалов И.П., Харин Е.П. О связи сейсмичности Земли с солнечной и геомагнитной активностью // *Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений*. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 64–76].
- Simpson J.F., 1967. Solar activity as a triggering mechanism for earthquakes. *Earth and Planetary Science Letters* 3, 417–425. [http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X\(67\)90071-4](http://dx.doi.org/10.1016/0012-821X(67)90071-4).
- Tamrazyan G.P., 1965. Some features of seismic energy release in the Earth's interior due to tidal and other forces. In: *The Fifth Meeting of planetary problems*. Leningrad, p. 43–48 (in Russian) [Тамразян Г.П. Некоторые особенности высвобождения сейсмической энергии недр Земли в связи с изменениями приливообразующих и других сил // *Пятое совещание по проблемам планетологии*. Л., 1965. С. 43–48].
- Tarasov N.T., Tarasova N.V., 1995. The impact of nuclear explosions on seismic regime. *Doklady AN SSSR* 343 (4), 543–546 (in Russian) [Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. Влияние ядерных взрывов на сейсмический режим // *Доклады АН*. 1995. Т. 343. № 4. С. 543–546].
- Trubitsyn V.P., 2000. Principles of the tectonics of floating continents. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 36 (9), 708–741.
- Vinnik L.P., 1977. Detection of waves converted from P to SV in the mantle. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 15 (1), 39–45. [http://dx.doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90008-5](http://dx.doi.org/10.1016/0031-9201(77)90008-5).
- Vostrikov V.I., Ruzhich V.V., Federyaev O.V., 2009. Monitoring rock fall-hazardous sites in open pit walls. *Journal of Mining Science* 45 (6), 620–627. <http://dx.doi.org/10.1007/s10913-009-0076-8>.
- Zagoruiko N.G., 1999. *Applied Methods of Data and Knowledge Analysis*. Publishing House of the Institute of Mathematics SB RAS, Novosibirsk, 270 p. (in Russian) [Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск: Изд-во Института математики СО РАН, 1999. 270 с.].
- Zamarayev S.M., Ruzhich V.V., 1978. On relationships between the Baikal rift and ancient structures. *Tectonophysics* 45 (1), 41–47. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(78\)90222-6](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(78)90222-6).
- Zamaraev S.M., Ruzhich V.V., Mazukabzov A.M. et al., 1977. On the relationship between young continental rifts and ancient tectonic structures. In: *Continental rifting*. Sovetskoe Radio, Moscow, p. 23–30 (in Russian) [Замараев С.М., Ружич В.В., Мазукабзов А.М. и др. О связи молодых континентальных рифтов с древними тектоническими структурами // *Континентальный рифтогенез*. М.: Советское Радио, 1977. С. 23–30].
- Zonenshain L.P., Savostin L.A., Misharina L.A., Solonenko N.V., 1978. Plate tectonics of the Baikal mountain region and the Stanovoy ridge. *Doklady AN SSSR* 240 (3), 669–672 (in Russian) [Зоненшайн Л.П., Савостин Л.А., Мишарина Л.А., Солоненко Н.В. Тектоника плит Байкальской горной области и Станового хребта // *Доклады АН СССР*. 1978. Т. 240. № 3. С. 669–672].
- Zorin Yu.A., 1971. *The Newest Structure and Isostasy of the Baikal Rift Zone and Adjacent Areas*. Nauka, Novosibirsk, 165 p. (in Russian) [Зорин Ю.А. Новейшая структура и изостазия Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий. Новосибирск: Наука, 1971. 165 с.].
- Zuev L.B., 2006. On the wave character of plastic flow. Macroscopic autowaves of deformation localization. *Fizicheskaya mezomekhanika (Physical Mesomechanics)* 9 (3), 47–54 (in Russian) [Зуев Л.Б. О волновом характере пластического течения. Макроскопические автоволны локализации деформации // *Физическая мезомеханика*. 2006. Т. 9. № 3. С. 47–54].
- Zuev L.B., Barannikova S.A., Nadezhkin M.V., 2014. On slow wave processes in rocks. In: *Advanced materials in construction and engineering (PMST 2014)*. Proceedings of the International Conference of Young Scientists (15–17 October 2014, Tomsk). Publishing House of TSACU, Tomsk, p. 582–589 (in Russian) [Зуев Л.Б., Баранникова С.А., Надежкин М.В. О медленных волновых процессах в горных породах // *Перспективные материалы в строительстве и технике (ПМСТ-2014): Материалы международной научной конференции молодых ученых (15–17 октября 2014 г., г. Томск)*. Томск: Изд-во ТГАСУ, 2014. С. 582–589].
- Zuev L.B., Danilov V.I., Barannikova S.A., 2008. *Physics of Plastic Flow Macrolocalization*. Nauka, Novosibirsk, 328 p. (in Russian) [Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. Физика макролокализации пластического течения. Новосибирск: Наука, 2008. 328 с.].



Ружич Валерий Васильевич, докт. геол.-мин. наук, г.н.с.
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
Тел. (3952)422776; ✉ e-mail: ruzhich@crust.irk.ru

Ruzhich, Valery V., Doctor of Geology and Mineralogy, Chief Researcher
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Tel. +7(3952)422776; ✉ e-mail: ruzhich@crust.irk.ru



Кочарян Геворг Грантович, докт. физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией
Институт динамики геосфер РАН
119334, Москва, Ленинский проспект, 38, корпус 1, Россия
Тел.: (495)9397527; e-mail: gevorgk@idg.chph.ras.ru, gevorgkidg@mail.ru

Kocharyan, Gevorg G., Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of Laboratory
Institute of Geosphere Dynamics of RAS
38 Leninsky prospect, Building 1, Moscow 119334, Russia
Tel.: (495)9397527; e-mail: gevorgk@idg.chph.ras.ru, gevorgkidg@mail.ru



Левина Елена Алексеевна, канд. геол.-мин. наук, н.с.
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
e-mail: levina@crust.irk.ru

Levina, Elena A., Candidate of Geology and Mineralogy, Researcher
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
e-mail: levina@crust.irk.ru