



<https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0383>

ON THE STRUCTURE AND FORMATION OF EARTHQUAKE SOURCES IN THE FAULTS LOCATED IN THE SUBSURFACE AND DEEP LEVELS OF THE CRUST. PART II. DEEP LEVEL

V. V. Ruzhich¹, G. G. Kocharyan², V. B. Savelieva¹, A. V. Travin^{3,4,5,6}

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

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

³*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia*

⁴*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

⁵*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

⁶*Tomsk State University, Tomsk, Russia*

Abstract: In the part 2 of the study [Ruzhich, Kocharyan, 2017], we aimed at identifying the elements of paleo-earthquake sources in the crust, which formed at the hypocentral depths in the exhumed Primorsky segment of the ancient collisional suture. The study area covered the southeastern margin of the Siberian craton (Pribaikalie, East Siberia). Slickensides, pseudo-tachyllite (basaltic glass) and other petrological evidence of intensive tectonic movements were sampled. The structure of the deep segments of the collisional suture were reconstructed from on the data on coseismic ruptures and faults, and the PT parameters were estimated. In the past decades, similar research problems were actively investigated (e.g. [Sibson, 1973; Byerlee, 1978; Morrow et al., 1992; Hodges, 2004; Kirkpatrick et al., 2012]). In Russia, the interest in studying geological and geophysical features of the deeply denuded areas in ancient faults is still limited [Sherman, 1977; Ruzhich, 1989, 1992, 1997; Savel'eva et al., 2003; Ruzhich et al., 2015; Kocharyan, 2016]. The deeply denuded Primorsky segment of the collisional suture of the Siberian Craton underwent the geological evolution of a billion years. In the analysis, we used additional geological data from the petrology studies of the Main Sayan fault zone and other exhumed fault segments, including the seismogenerating faults in the Mongolia-Baikal region [Zamaraev, Ruzhich, 1978; Zamaraev et al., 1979; Ruzhich et al., 2009]. From the PT conditions for the occurrence of the slickensides, pseudo-tachylyte, and the Primorsky segment structure, the ⁴⁰Ar/³⁹Ar method estimated the age of the slickensides containing tourmaline at 673±4.8 Ma, which may correspond to the Neoproterozoic stage of the breakdown of the megacontinent Rodinia. Another dating, 415.4±4.1 Ma, obtained for the muscovite sample from a decompressional rupture, refers to the Early Paleozoic stage in the development of the collisional suture, when accretion of the Siberian Craton and the Olkhon terrain took place [Donskaya et al., 2003; Fedorovsky et al., 2010]. Based on these ages and other available petrological data, the depths of the heterochronous systems of coseismic ruptures were estimated: 18 km in the Neoproterozoic, and 12 km in the Middle Paleozoic stage of the seismotectonic evolution of the crust in Pribaikalie. The deep paleoseismological settings need to be further investigated in

RESEARCH ARTICLE

Handling Editor: K.Zh. Seminsky

Received: March 19, 2018

Revised: April 20, 2018

Accepted: May 23, 2018

For citation: Ruzhich V.V., Kocharyan G.G., Savelieva V.B., Travin A.V., 2018. On the structure and formation of earthquake sources in the faults located in the subsurface and deep levels of the crust. Part II. Deep level. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (3), 1039–1061. doi: 10.5800/GT-2018-9-3-0383.

Для цитирования: Ружич В.В., Кочарян Г.Г., Савельева В.Б., Травин А.В. О формировании очагов землетрясений в разломах на приповерхностном и глубинном уровне земной коры. Часть II. Глубинный уровень // *Геодинамика и тектонофизика*. 2018. Т. 9. № 3. С. 1039–1061. doi:10.5800/GT-2018-9-3-0383.

order to more thoroughly clarify the physical and chemical conditions that contributed to the occurrence of the ancient and recent sources of strong earthquakes in the deep segments of faults in the crust. Such information is a prerequisite for further progress towards resolving the problems of securing seismic safety in various regions.

Key words: collisional suture; pseudo-tachyllite; slickenside; exhumation of faults; coseismic fault; isotopic dating of faults; friction in faults; model of earthquake preparation; seismic safety

О СТРОЕНИИ И ФОРМИРОВАНИИ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РАЗЛОМАХ НА ПРИПОВЕРХНОСТНОМ И ГЛУБИННОМ УРОВНЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ. ЧАСТЬ II. ГЛУБИННЫЙ УРОВЕНЬ

В. В. Ружич¹, Г. Г. Кочарян², В. Б. Савельева¹, А. В. Травин^{3, 4, 5, 6}

¹ Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

² Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия

³ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

⁴ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

⁵ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

⁶ Томский государственный университет, Томск, Россия

Аннотация: В продолжение опубликованной ранее первой части исследования [Ruzhich, Kocharyan, 2017] в данной статье сделан акцент на выявлении признаков распознавания элементов палеочагов землетрясений, формирующихся на гипоцентральных глубинах земной коры в эксгумированном Приморском сегменте древнего коллизионного шва на юго-восточной окраине Сибирского кратона (Прибайкалье, Восточная Сибирь). Для этого проводился отбор образцов зеркал скольжения, псевдотахилитов и других петрологических свидетельств интенсивных тектонических подвижек. Собранные сведения о косейсмических разрывных нарушениях использовались для реконструкции строения глубинных сегментов коллизионного шва и восстановления некоторых параметров РТ-условий. Попытки решения подобных задач в других сейсмоопасных регионах предпринимаются зарубежными исследователями в течение нескольких последних десятилетий, например, в работах [Sibson, 1973; Byerlee, 1978; Morrow et al., 1992; Hodges, 2004; Kirkpatrick et al., 2012]. В России к геолого-геофизическому изучению глубоко денудированных участков древних разломов проявляется пока еще ограниченный интерес [Sherman, 1977; Ruzhich, 1989, 1992, 1997; Savel'eva et al., 2003; Ruzhich et al., 2015; Kocharyan, 2016]. В рамках данной работы основное внимание было уделено зоне глубоко денудированного Приморского сегмента коллизионного шва Сибирского кратона, претерпевшего геологическую эволюцию длительностью порядка миллиарда лет. Также привлекались дополнительные геологические сведения, полученные авторами и другими исследователями при петрологическом изучении зоны Главного Саянского разлома и иных эксгумированных участков разломов, в том числе сейсмогенерирующих разломов Монголо-Байкальского региона [Zamarayev, Ruzhich, 1978; Zamarayev et al., 1979; Ruzhich et al., 2009]. На основании собранных сведений о РТ-условиях возникновения зеркал скольжения, псевдотахилитов и строения Приморского участка коллизионного шва получена оценка возраста зеркала скольжения с турмалином по $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методу, которая составляет 673 ± 4.8 млн лет и предположительно может соответствовать неопротерозойской эпохе распада мегаматерика Родиния. По мусковиту в другой декомпрессионной трещине получена еще одна датировка – 415.4 ± 4.1 млн лет, которую возможно отнести к раннепалеозойскому этапу формирования коллизионного шва, при котором происходила аккреция Сибирского кратона и Ольхонского террейна [Donskaya et al., 2003; Fedorovsky et al., 2010]. С учетом полученных датировок и других петрологических сведений определены глубины, на которых происходило развитие разновозрастных систем косейсмических разрывов: 18 км – в неопротерозойский, 12 км – в среднепалеозойский этап сеймотектонической эволюции земной коры в Прибайкалье. В заключение обосновывается актуальность дальнейшего совершенствования глубинных палеосейсмологических исследований с целью более предметного выяснения физико-химических условий, оптимальных для возникновения древних и современных очагов сильных землетрясений в глубинных сегментах разломов, пронизывающих земную кору. Дальнейшее продвижение в направлении решения проблем обеспечения сейсмобезопасности в различных регионах без подобных сведений может оказаться недостаточно результативным.

Ключевые слова: коллизионный шов; псевдотахилит; зеркало скольжения; эксгумация разломов; косейсмический разрыв; изотопное датирование разрывов; трение в разломах; модели подготовки землетрясений; сейсмическая безопасность

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на фоне очевидного огромного ущерба от современных сейсмических катастроф в число важнейших проблем в науках о Земле входит проблема, связанная с прогнозом местоположения очагов землетрясений [Panza *et al.*, 2014], а также выяснением глубинных геологических условий подготовки и внезапного проявления очагов разрушительных и сильных землетрясений [Kocharyan, 2016; Ruzhich, Kocharyan, 2017; Rodkin, Rundquist, 2017; и др.]. Накопленный исследователями опыт выявил объективные причины ограничения в совершенствовании и реализации краткосрочного прогноза землетрясений в ближайшие десятилетия. Вместе с этим также пришло осознание того, что даже идеальный прогноз сильных землетрясений не позволяет кардинально снизить ущерб от сейсмических катастроф из-за невозможности избежать разрушений и жертв. По мнению авторов, сложившаяся ситуация обусловлена недоступностью проведения результативных наблюдений за процессами подготовки потенциально опасных очагов землетрясений в финальной стадии, поскольку они скрыты в пределах земной коры на глубинах от 5–10 до 25–30 км. Существующие упрощенные модели очагов землетрясений, созданные в середине прошлого столетия преимущественно на основании интерпретации лабораторных экспериментов, не адаптированы к современным требованиям, обязательным при совершенствовании различных видов прогноза землетрясений, и не способствуют разработке более эффективных способов борьбы с последствиями природных и техногенных сейсмических катастроф.

На основании результативных исследований в последние десятилетия приходит понимание необходимости детального изучения РТ-условий в глубинных сегментах зон сейсмогенерирующих разломов, что важно для создания новых моделей подготовки очагов землетрясений и поступательного совершенствования методов обеспечения сейсмобезопасности. Понятно, что вопросы масштабирования при сравнении лабораторных испытаний с реальными очагами по размерам и длительности временных интервалов их подготовки еще далеки от приемлемых решений. Возникает необходимость детально изучать длительные трибохимические явления в разломах в условиях повышенных температур, давлений и участия флюидов. Поскольку сильные землетрясения являются следствием высвобождения упругой энергии недр при тектонических процессах в твердой оболочке нашей планеты, при их изучении необходимо существенным образом дополнить сведения, полученные средствами лабораторных экспериментов и

численными методами, новой информацией, основанной на исследованиях глубинных деструктивных процессов в разломах. Следуя этому направлению, авторы уделили внимание рассмотрению явлений физико-минералогического преобразования горных пород и его влияния на природные механизмы перехода из неустойчивого состояния порока к быстрому скольжению (срыву) в глубинных сегментах разломов на финальной стадии подготовки очагов опасных землетрясений.

Ниже рассматриваются результаты изучения строения сегментов зон разломов на разных глубинных уровнях залегания в земной коре и последующего анализа выявленных признаков стресс-метаморфического изменения горных пород для распознавания признаков косейсмических смещений в очагах землетрясений далекого геологического прошлого. Обсуждается важная роль новой информации о хронологии этапов сеймотектонической активизации Приморского сегмента краевого шва для углубления представлений о геодинамике предшествующих эпох, что позволит с большей надежностью расшифровывать собранные сведения о современных внутрикоровых сеймотектонических процессах.

В заключительной части статьи представлено обоснование вывода о необходимости применения мультидисциплинарного подхода для выяснения геологических условий формирования очагов сильных землетрясений на разных глубинных горизонтах земной коры Центральной Азии. Показано, что именно в гипоцентральной обстановке в земной коре Центральной Азии на фоне постоянно действующих глобальных геодинамических факторов в разломах возникают оптимальные физико-химические условия, способствующие зарождению и созреванию самых мощных источников сейсмического излучения. На основании анализа полученных результатов также рассмотрены возможности разработки практических приложений в сфере обеспечения сейсмобезопасности населения.

2. ИЗУЧЕНИЕ ЭКСГУМИРОВАННОГО СЕГМЕНТА ЗОНЫ КРАЕВОГО ШВА СИБИРСКОГО КРАТОНА

2.1. ПАЛЕОГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В методическом подходе к изучению объектов исследования использовались традиционные способы наблюдения и анализа из сфер как классической геологии и геофизики, так и экспериментальной физики, механики, физического и численного моделирования. Далее в статье Приморский сегмент коллизионного шва для удобства целесообразнее называть длительно живущим Приморским

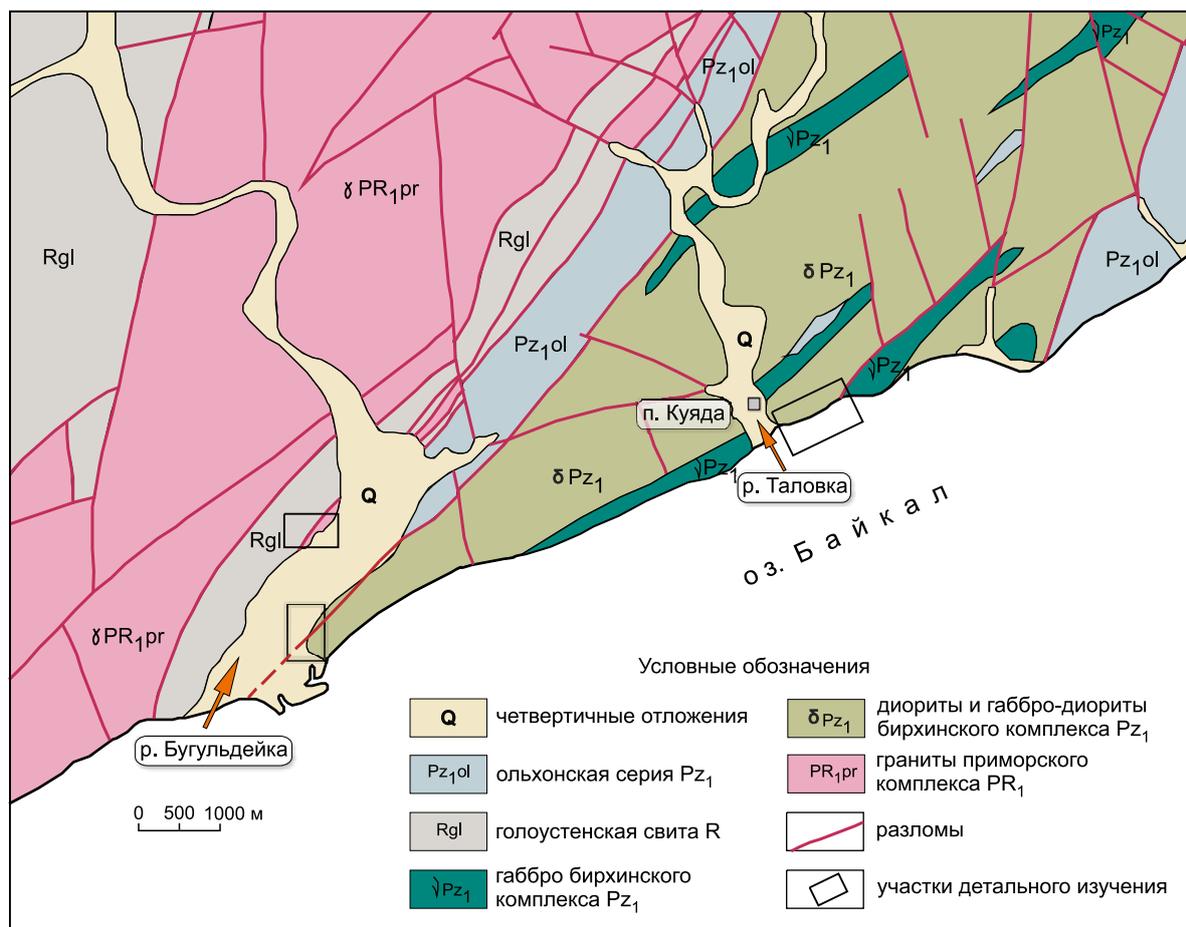


Рис. 1. Геологическая карта с указанием магматических и метаморфических комплексов в зоне Приморского разлома и смежных территориях.

Fig. 1. Geological map showing magmatic and metamorphic complexes in the Primorsky fault zone and adjacent territories.

разломом, в пределах которого проявлялись стадии активизации в кайнозойский период формирования Байкальской рифтовой зоны, а также в раннем палеозое и неопротерозое. При проведении исследований с целью выявления признаков глубинных древних косейсмических разрывов (палеосейсмодислокаций) основной акцент был сделан на изучении их характерных сопутствующих признаков, таких как псевдотахилиты и зеркала скольжения. Изучение деталей внутреннего строения псевдотахилитов, а также химического состава минералов и стекла проводилось в Геологическом институте СО РАН (г. Улан-Удэ) на сканирующем электронном микроскопе «LEO-1430VP» (Carl Zeiss) с использованием программы INCAEnergy 350 (Oxford Instruments Ltd) (аналитики Е.В. Хромова и С.В. Канакин).

Территория к северо-западу от БРЗ сложена гранитами приморского комплекса PR₁ (возраст 1.86–1.91 млн лет [Bibikova et al., 1981; Donskaya et al., 2003]) и осадочными отложениями байкальской серии верхнего рифея (рис. 1).

Породные массивы в пределах юго-восточного крыла зоны Приморского разлома представлены образованиями нижнепалеозойского ольхонского метаморфического комплекса – преимущественно диоритами, габбро-диоритами, габброидами бирхинского комплекса с возрастом ≈500 млн лет [Fedorovsky et al., 2010]. В меньшей мере картируются в крыльях разлома метаморфические породы амфиболитовой фации: биотит-амфиболовые и амфиболовые гнейсы, кристаллосланцы, мраморы, а также небольшие тела гранитов. Возраст формирования милонитизированных пород среди гранитов приморского комплекса определен U-Pb методом по цирконам и составляет порядка 445±10 млн лет [Bibikova et al., 1981]. Зоны динамометаморфизма на всем протяжении сопровождаются интенсивной мусковитизацией и окварцеванием [Savel'eva et al., 2003].

Участок зоны Приморского разлома изучался на северо-западном побережье Байкальской рифтовой впадины, где проводится граница между докембрийским эксгумированным выступом фундамента

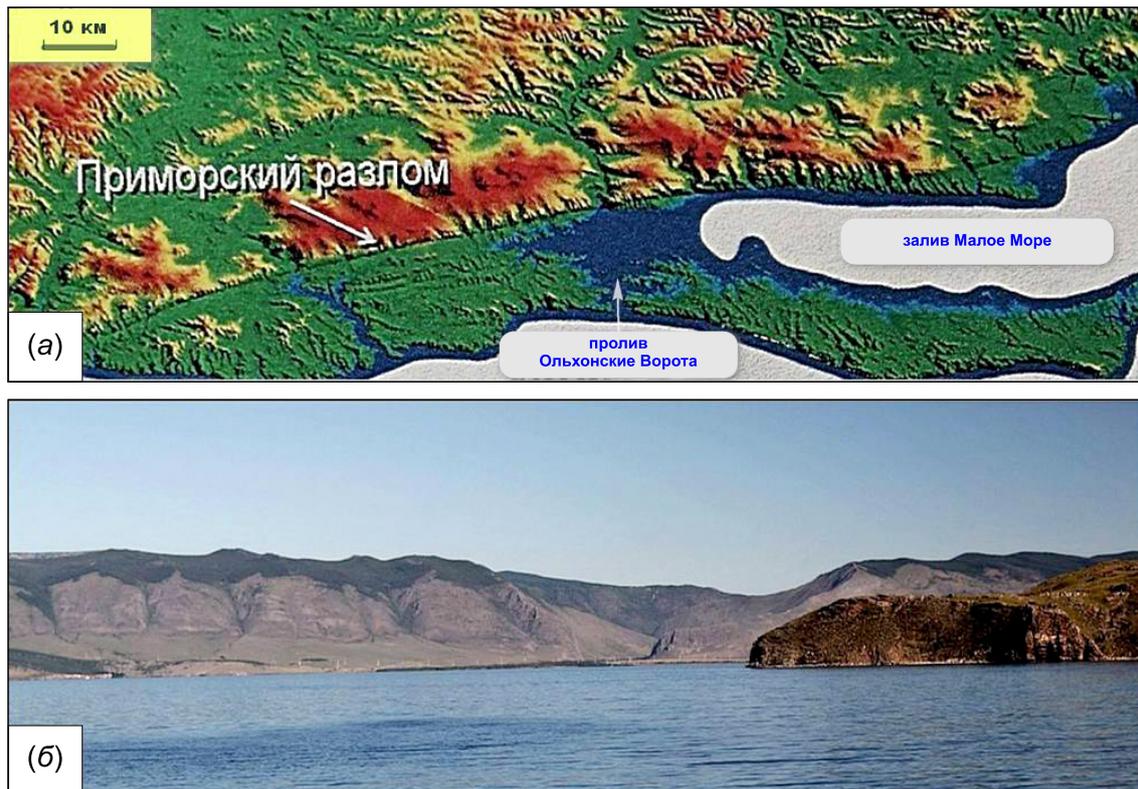


Рис. 2. Геоморфологическое выражение Приморского рифтогенного сброса: (а) – модель по космоснимку из работы [Fedorovsky et al., 2010]; (б) – выраженный в рельефе сбросовый уступ разлома в районе Ольхонских ворот.

Fig. 2. Geomorphology of the Primorsky riftogenic normal fault: (a) – model based on the satellite image from [Fedorovsky et al., 2010]; (б) – normal-fault edge observed in the relief of the Olkhon Gate area.

южной части Сибирского кратона и каледонским Центрально-Азиатским складчатым поясом, представленным метаморфическим комплексом Приольхонья. Разлом отчетливо прослеживается более чем на 250 км по западному берегу оз. Байкал (рис. 2).

Коллизионный шов имеет сложное строение и представляет собой специфический меланж, в составе которого выделяются матрикс и обломки (включения). Матрикс на всем протяжении шва представлен милонитами и бластомилонитами по породам докембрия и палеозоя, а включения образованы линзовидными телами только палеозойских высокотемпературных метаморфитов [Sukhorukov, 2007; Sukhorukov et al., 2005].

В работе [Travin et al., 2013] обосновывается вывод о синхронном проявлении в пределах Приморского разлома раннепалеозойских сдвиговых деформаций с возрастом 445–434 млн лет при $T=640\text{--}670\text{ }^{\circ}\text{C}$, отвечающих метаморфизму гранулитовой и амфиболитовой фации. Полученные данные свидетельствуют о проявлении в пределах изученных сдвиговых зон низкотемпературных деструктивных образований (при $T=300\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$), связанных с

масштабными сдвиговыми деформациями во временном интервале 395–415 млн лет назад.

В неоген-четвертичный этап рифтогенной активизации в пределах коллизионного шва произошло очередное обновление в виде Приморского сброса, который считается одним из сейсмоопасных геоструктурных элементов в пределах Байкальской рифтовой зоны, о чем свидетельствуют выявленные палеосейсмодислокации и современные опасные землетрясения с $M=5.5\text{--}7.5$ [Zamaraev et al., 1979; Delvaux et al., 1997; Ruzhich, 1997; и др.]. К настоящему времени вследствие длительной денудации земной коры в скальных геологических обнажениях в зоне коллизионного шва в ряде мест, например в Шарыжалгайском выступе Сибирского кратона, доступны для визуального геологического изучения горизонты земной коры, располагавшиеся ранее на глубинах порядка 15–20 км [Melnikov, 2011]. На примере Западного Прибайкалья использование геологических методов позволяет детально познакомиться со строением эксгумированных сегментов коллизионного шва, активных в неопротерозое, раннем – среднем палеозое и в мезокайнозойские этапы сеймотектонической эволюции.

2.2. ИЗУЧЕНИЕ ГЛУБИННЫХ КОСЕЙСМИЧЕСКИХ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ

При полевом изучении строения эксгумированных геолого-структурных объектов зеркала скольжения и псевдотахилиты принимались как основные признаки древних косейсмических разрывных нарушений [Ruzhich, 1997; Sobolev et al., 2015, 2016; Kocharyan, 2016]. Дополнительными критериями выявления глубинных сейсмогенных разрывов служили ультракатакластический характер переработки пород в разломах, состав новообразованного минерального заполнения трещин и минеральных образований на плоскостях зеркал скольжения, термохимические последствия фрикционного разогрева вещества горных пород в виде пленочного стекловидного покрытия зеркал скольжения. Также принималось во внимание характерное изменение соотношения амплитуды смещений и ширины трещин, достигающего максимальных значений порядка 7:1, возрастающего с увеличением глубины возникновения разрывов [Ruzhich, 1977]. Учитывались возрастные показатели вмещающих породных массивов, состав и термохимическая история сохранившихся породных включений в псевдотахилитах [Reiners et al., 2005; Kirkpatrick et al., 2012], петрологические сведения о пространственных и хронологических проявлениях тектономагматических, метасоматических и гидротермальных процессов [Ridolfi et al., 2010].

В качестве примеров ниже представлены результаты изучения скальных выходов горных пород на берегах р. Бугульдейка, в ее приустьевой части, прослеженных на расстоянии более 2 км, а также в береговых обнажениях Байкала в районе устья р. Таловка у п. Куяда. На рис. 3 можно видеть строение двух зон разломов с зеркалами скольжения и проявлениями смещений взбросо-сдвигового типа, по которым с амфиболовыми плагиогнейсами приморского комплекса контактирует гранитный массив раннепалеозойского возраста, подвергнувшийся динамоморфическим преобразованиям. В автохтонном крыле разлома вблизи его северо-западного крыла выявлены два разновозрастных разлома. Эпидот-хлоритовые образования на зеркалах скольжения в зонах разломов рассматривались как свидетельства формирования разрывов при температуре от 250 до 300 °С на глубинах 3–5 км, в условиях пренит-пумпелиитовой фации метаморфизма.

Породы, отобранные из зон разрывных нарушений, были исследованы в шлифах. При изучении тектонитов, взятых в зоне разрывного нарушения, возникшего в более поздний период формирования, фиксировались признаки разгнейсования и катаклаза (рис. 4). Во внутренних сегментах разры-

вов с зеркалами скольжения фиксировались явления тончайшего истирания минералов до состояния муки, а в шлифах видны мелкозернистые агрегаты зерен кварца и полевых шпатов при подчиненном количестве серицита, хлорита и примесей рудных железистых минералов. В процессе стресс-метаморфического преобразования гранитного массива возникли новообразованные минералы – серицит и хлорит, слагающие тонкие слойки, что придает породе гнейсовидный облик, явственно видимый вблизи главного разрывного нарушения. На расстоянии от зоны тектонического контакта ~30 м в сторону береговой линии в гранитном массиве зафиксированы признаки исчезновения гнейсовидности и снижения интенсивности катаклаза как проявлений уменьшения степени динамического влияния.

Анализ шлифов позволяет выделить не менее трех этапов деструкции нижнепалеозойского гранитного массива. На первом этапе происходил интенсивный катаклаз гранитов и их преобразование в тонкозернистую породу с порфирокластами микроклина и реликтами крупных обособлений кварца. Также проявлялось синхронное с деформацией раскисление плагиоклаза с образованием альбита и многочисленных мелких зерен эпидота, развитие по плагиоклазу серицита, преобразование крупных зерен биотита в мелкозернистый агрегат зерен биотита, их хлоритизация. Со вторым этапом деформаций на фоне ретроградного метаморфизма связано образование трещин, выполненных кальцитом и гидроокислами железа, которые пересекают мелкозернистую основную массу породы. На третьем этапе происходило образование трещин, пересекающих кальцитовые прожилки. Вдоль этих разрывов осуществлялось еще более интенсивное истирание породы с возникновением стильпно-мелана и гидроокислов железа при участии флюидов. Видны признаки скольжения вдоль биотит-эпидотовых слойков в виде микросдвигов, при котором происходило образование по биотиту стильпно-мелана и оксидов и гидроокислов железа.

На левобережном разрезе у р. Бугульдейка в обнажении многократно зафиксированы места, где нижне- и среднепалеозойские косейсмические разрывы смещают более древние глубинные сейсмогенные трещины с турмалиновыми зеркалами скольжения (рис. 5).

2.3. ИЗУЧЕНИЕ ПСЕВДОТАХИЛИТОВ

Один из участков распространения более глубинных разрывных нарушений с зеркалами скольжения и псевдотахилитами располагается в скальных обнажениях в устье р. Большая Бугульдейка. Псевдотахилиты как продукты фрикционного

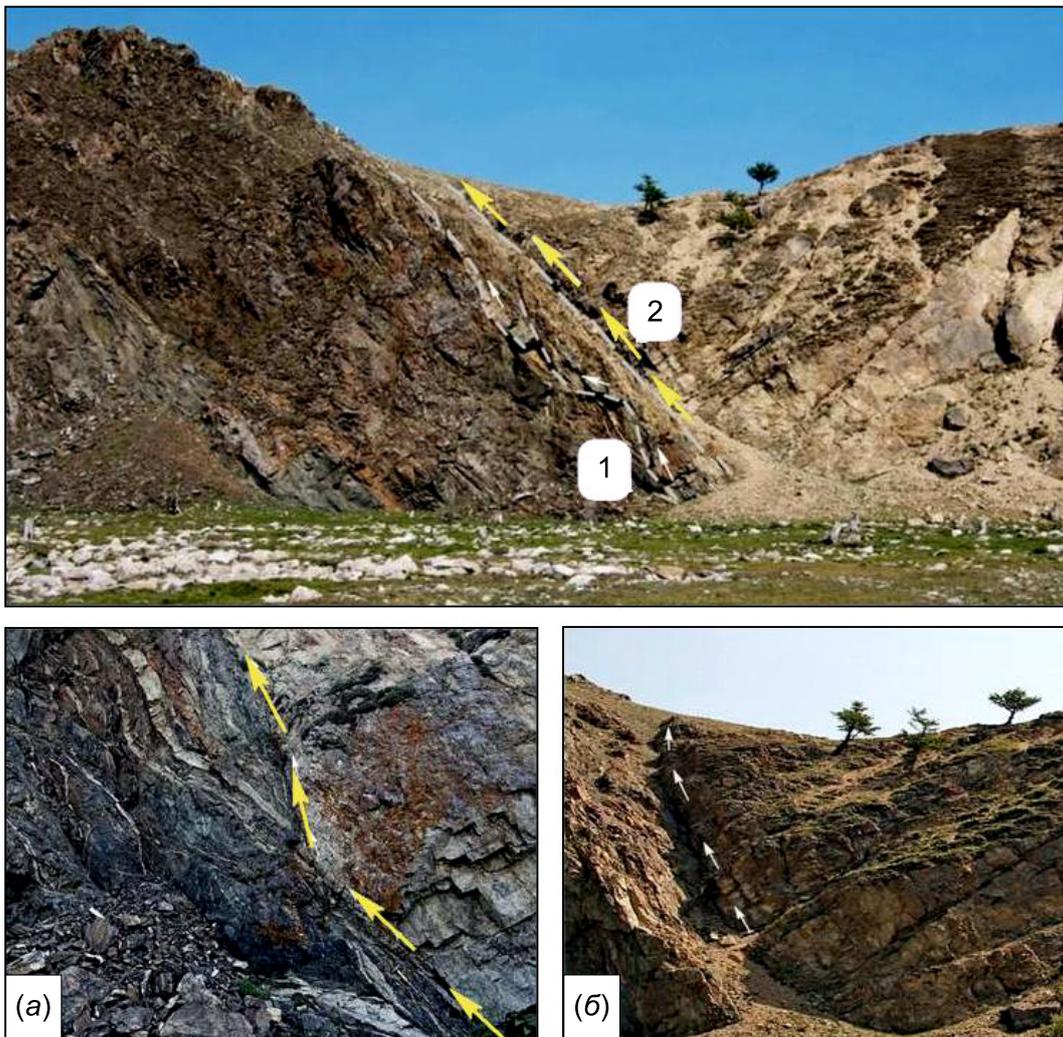


Рис. 3. Строение сегментов коллизионного шва в районе левобережья р. Бугульдейка, в котором выявлены косейсмические разрывные нарушения разных возрастов и иерархических уровней. На верхнем снимке выделяются две зоны разломов: 1 – мелкими стрелками обозначен фрагмент неопротерозойского сместителя разлома с турмалиновой минерализацией и зеркалами скольжения; 2 – крупными стрелками пунктиром отмечена плоскость скольжения в разломе ниже- и среднепалеозойского возраста со взбросо-сдвиговым типом смещений. На двух нижних снимках показаны детали строения: (а) – зона взбросо-сдвига неопротерозойского возраста заложения с проявлениями ультрамилонитизации и будинирования как свидетельств вязкопластического поведения амфиболитовых гнейсов; (б) – взбросо-сдвиговая зона, представленная катаклазитами и эпидот-хлоритовыми зеркалами скольжения.

Fig. 3. Segments of the collisional suture at the left bank of the Buguldeika river. The revealed coseismic ruptures vary in ages and hierarchic levels. Two fault zones in the top figure: 1 – small arrows mark the fragment of the Neoproterozoic fault with tourmaline mineralization and slickensides; 2 – large arrows (dotted) mark the shear plane in the Lower-Middle Paleozoic fault (strike-slip with a reverse component). The two lower figures show the details of the structure: (a) – the Lower-Middle Paleozoic fault zone (strike-slip with a reverse component) and the features of ultra-mylonitization and boudinage, which give evidence of the viscous-plastic behavior of amphibolite gneiss; (b) – zone of the strike-slip fault with a reverse component, represented by cataclasites and epidote-chlorite slickensides.

нагрева были выявлены в древних интенсивно милонитизированных гранитах и гранодиоритах. Судя по шлифам, в них практически нацело изменено исходное состояние в условиях сильнейшего катаклаза и милонитизации, проявленных в виде тонкозернистой массы, состоящей из кварца, альбита, микроклина. В названном районе псевдотахилиты

чаще всего слагают прослой шириной 1–2 мм в милонитизированной массе. В свою очередь, прослой псевдотахилитов, как и вмещающие милониты, повсеместно пересекаются трещинками более позднего этапа – они выполнены стильпномеланом и гидроокислами железа. Нередко отмечается смещение отдельных участков псевдотахилитового

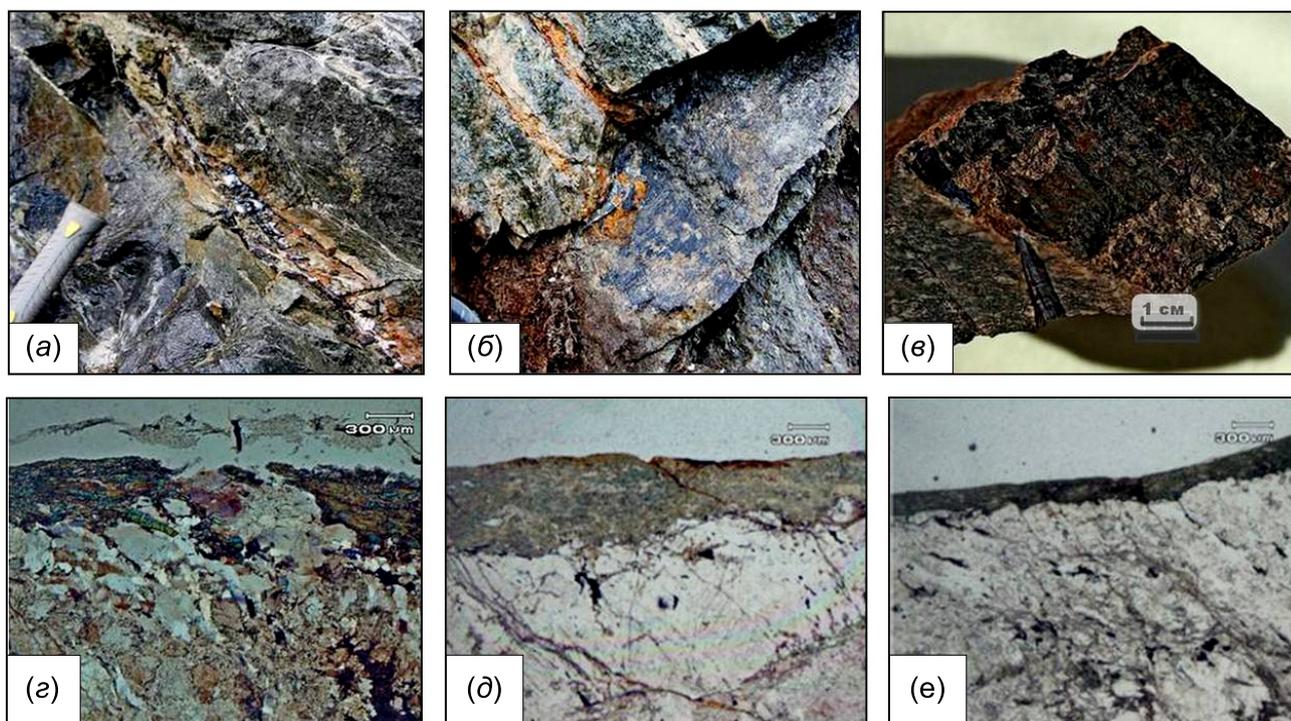


Рис. 4. Кварц-турмалиновая минерализация в глубинных разрывных нарушениях эксгумированного сегмента зоны Приморского разлома: (а) – кварц-турмалиновая жила в косейсмическом разрыве с зеркалами скольжения; (б) – зеркало скольжения по турмалину; (в) – аншлиф зеркала скольжения с турмалиновым покрытием; (г) – шлиф (в скрещенных николях), сделанный с зеркала скольжения: можно видеть деформированный и разорванный турмалиновый слой, а также несколько плоскостей скольжения, соответствующих разным этапам активизации; (д) – шлиф турмалинового зеркала из другой косейсмической трещины; видны признаки пластических деформаций турмалинового слоя; (е) – шлиф зеркала скольжения, на котором видны трещины, смещающие нижнюю часть турмалинового слоя.

Fig. 4. Quartz-tourmaline mineralization in the deep fractures and ruptures in the exhumed segment of the Primorsky fault zone: (a) – quartz-tourmaline vein in the coseismic rupture with slickensides; (b) – slickenside on tourmaline; (c) – polished section of the slickenside with tourmaline coating; (g) – section (in crossed nicols) made from the slickenside: a deformed and ruptured tourmaline layer is visible, as well as several slickenside planes corresponding to different stages of activation; (d) – section of the tourmaline slickenside from another coseismic fracture; the signs of plastic deformation are visible in the tourmaline layer; (e) – section of the slickenside with visible fractures displacing the lower part of the tourmaline layer.

прослая вдоль таких трещин, что указывает на проявление более поздних этапов активизации подвижек в разломе (рис. 6).

Еще одно место распространения псевдотахилитов в зоне Приморского разлома выявлено в береговом обнажении в районе устья р. Таловка, впадающей в Байкал (п. Куяда) (см. рис. 1). На данном участке зоны Приморского разлома псевдотахилиты распространены в катаклазированных диоритах, где они чаще всего слагают тонкие ветвящиеся прожилки мощностью от 1 мм до 5 см. Продукты интенсивнейшего фрикционного разогрева имеют тонкозернистый (афанитовый) облик, коричневую до черной окраску и содержат мелкие реликтовые включения лейкократовых минералов из вмещающих пород. Границы прожилков с вмещающим диоритом резкие, отчетливые, контакты извилистые. По известным минералам «геотермометрам»

и «геобарометрам» были рассчитаны температура и давление, при которых происходила кристаллизация амфибола. Эти же расчеты были выполнены для амфибола из диоритовых породных массивов, вмещающих трещины с псевдотахилитами. Поскольку данные «геотермометр» и «геобарометр» разработаны для кальциевых амфиболов, при оценках параметров температуры и давлений в моменты формирования псевдотахилитов использовались только составы магнизиальной роговой обманки. В образцах диорита с правобережья р. Бугульдейка кристаллизация кальциевых чермакита и роговой обманки происходила при температуре ≈ 880 °С и давлении около 3 кбар. В моменты возникновения псевдотахилита в косейсмических разрывах температура кристаллизации роговой обманки составляла порядка 850–950 °С. Давление, при котором кристаллизовалась магнизиальная

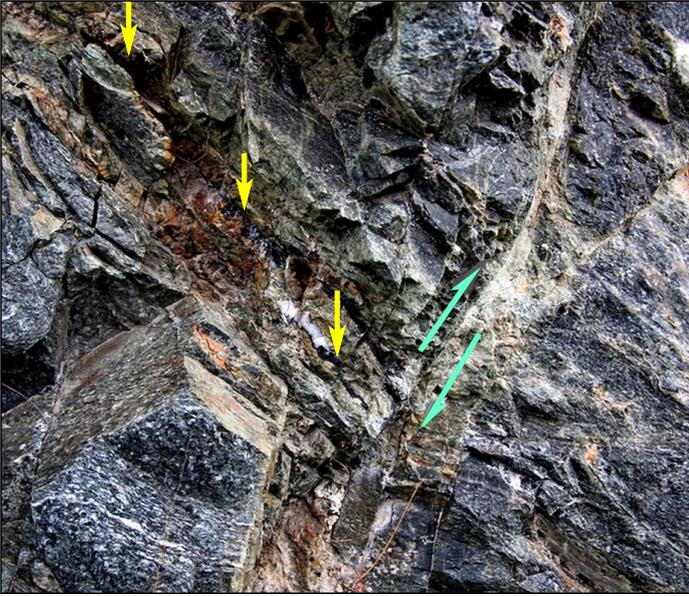


Рис. 5. Косейсмическое разрывное нарушение с зеркалами скольжения и неопротерозойской кварц-турмалиновой минерализацией (обозначено желтыми стрелками), смещенное более поздним палеозойским разрывным нарушением с эпидот-хлоритовой минерализацией (показано длинными зелеными стрелками).

Fig. 5. Coseismic rupture with slickensides and the Neoproterozoic quartz-tourmaline mineralization (shown by yellow arrows), which is displaced by the subsequent Paleozoic rupture with epidote-chlorite mineralization (long green arrows).

роговая обманка в псевдотахилите, составляло около 5.0–5.5 кбар.

Полученные петрохимические сведения можно интерпретировать как свидетельство проявления высокоскоростного смещения, которое могло происходить в некоторых трещинах с зеркалами скольжения в зоне плотного контактного взаимодействия, например на крупных неровностях, визуально наблюдаемых в обнажениях. Взаимоотношения с вмещающими породами и особенности строения и петрографического состава псевдотахилитов свидетельствуют об условиях их образования при фрикционном плавлении на глубинных уровнях преимущественно зеленосланцевой, реже – эпидот-амфиболовой фации метаморфизма. В районе п. Куяда на плоскости сейсмического скольжения достигалась температура около 900 °С, отвечающая началу плавления магнезиального (Mg# 0.62–0.68) биотита. Важно отметить выявленное обилие кристаллитов амфибола и интерстициального гидробиотита, а также более поздние прожилки актинолита в матриксе псевдотахилитов. Эти признаки служат показателями повышенного

содержания воды во фрикционном расплаве и стекле и присутствия свободного водного флюида в зоне сейсмического скольжения. Псевдотахилиты в общем унаследуют химический состав вмещающих пород, но обеднены по сравнению с ними SiO₂ и содержат больше общего железа, MgO, CaO и потерь при прокаливании. Это свидетельствует о ведущем вкладе в образование фрикционного расплава водосодержащих фемических минералов и полевых шпатов при устойчивости кварца. Расчеты, выполненные по составу амфибола из матрикса псевдотахилитов, показывают, что фрикционные расплавы находились под давлением до 7–8 кбар, которое при остановке скольжения быстро снижалось до ≤1.5–2.0 кбар, что характерно для литостатического давления на глубинах 8–12 км в отличие от рассмотренных сейсмогенных разрывов, содержащих зеркала с турмалином. Вероятно, именно на контактных участках взаимодействия неровностей в шероховатых плоскостях скольжения возникали anomalously высокие температуры и давления в кратковременные моменты сейсмогенного проскальзывания и фрикционного разогрева горных пород до уровня частичного или полного плавления с образованием псевдотахилитов. Установлено, что в псевдотахилитах матрикс практически полностью раскристаллизован. Для матрикса псевдотахилитов также характерны микролитовая и сферолитовая структуры, а в реликтах наблюдаются оплавленные зерна плагиоклаза. На отдельных участках биотита реликты нерасплавившегося плагиоклаза нередко служат центрами последующей кристаллизации.

2.4. ИЗУЧЕНИЕ ЗЕРКАЛ СКОЛЬЖЕНИЯ

Традиционно под зеркалами скольжения понимают гладкие поверхности на образцах горных пород, возникшие при скольжении по тектоническим разрывным нарушениям в породных массивах. Первоначальный интерес к зеркалам скольжения объяснялся возможностью по уступам неровностей и по штрихам определять направление смещений берегов разрывов с целью реконструкции осей тектонических напряжений и кинематики движения крыльев разрывов [Ruzhich, Ryazanov, 1977; Ruzhich, 1989]. Позднее было сформировано устойчивое представление о том, что присутствие зеркал скольжения в зонах современных тектонических нарушений и палеосейсмических событий дает основание связывать их генезис с режимами ускоренного скольжения, которое чаще всего проявляется при косейсмических разрывных нарушениях [Morrow et al., 1992; Sobolev et al., 2015, 2016]. По некоторым особенностям структуры, составу минералов и тесно связанных с ними глинок трения, катаклазитов,

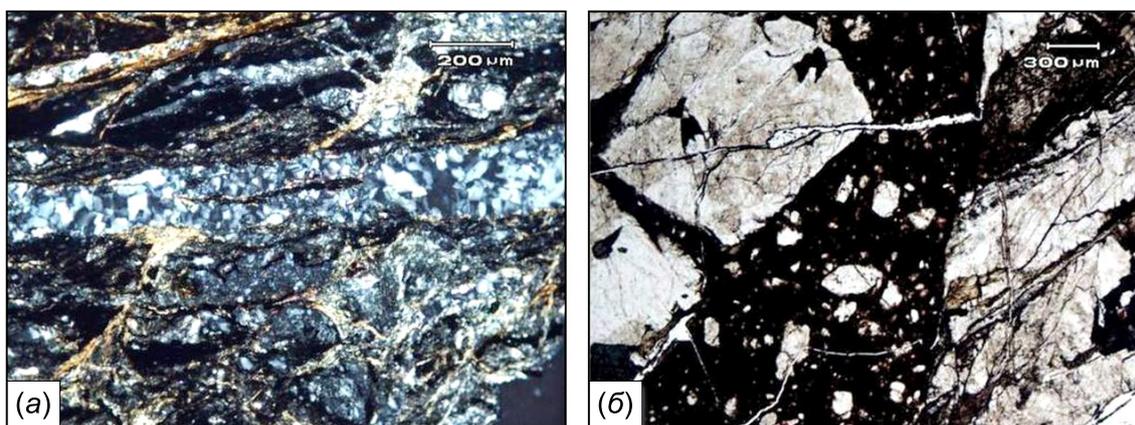


Рис. 6. Шлифы образцов горных пород, претерпевших стресс-метаморфические преобразования: (а) – новообразованные минералы адуляра в трещинах; (б) – общий вид псевдотачилита в разгнейсованном роговообманково-биотитовом диорите. В темной стекловатой массе видны трещины и более тугоплавкие светлые обломки полевых шпатов и кварца.

Fig. 6. Sections of the sampled rocks that underwent stress-metamorphic transformations: (a) – newly formed adular minerals in fractures; (b) – general view of the pseudo-tachyllite in the gneissic hornblende-biotite diorite. Fractures and more refractory light-colour fragments of feldspars and quartz are visible in the dark glass mass.

милонитов и псевдотачилитов есть возможность изучать сценарии развития событий в сейсмогенных зонах, оценивать скоростные режимы смещений и возможные механизмы реализации сейсмического процесса. Обсуждаются отличительные черты, запечатленные в породах и присущие сейсмическому скольжению, крипповому режиму, переменному прерывистому скольжению по разлому. Таким образом, тектонические зеркала скольжения, выявленные в местах эксгумации разломов, так же как и псевдотачилиты, позволяют распознавать косейсмические разрывные нарушения и несут важную информацию о кинематике и трибофизических процессах в глубинных сегментах разломов при проявлениях сейсмического процесса в прошлые тектонические эпохи. Следует заметить, что в приповерхностных условиях даже в зонах современных сейсмодислокаций из-за небольших значений литостатического давления возникновение зеркал скольжения отмечается преимущественно лишь в пластических осадочных отложениях, что было отчетливо проявлено, например, в зоне Гоби-Алтайского землетрясения 1957 г. [Florensov, Solonenko, 1963].

3. ОЦЕНКА ВОЗРАСТА КОСЕЙСМИЧЕСКИХ РАЗРЫВОВ И ГЛУБИНЫ ЭКСГУМАЦИИ ПРИМОРСКОГО СЕГМЕНТА КОЛЛИЗИОННОГО ШВА

Для оценки абсолютного возраста возникновения древних косейсмических разрывов была реализована возможность использования в качестве

редкого «геохронометра» турмалина, отобранный с поверхности зеркала скольжения. Важное качество этого тугоплавкого минерала – высокая устойчивость к наложенным термическим воздействиям в последующие периоды, что позволяет успешно использовать его для датирования методом $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ [Hodges, 2004; Korsakov et al., 2009]. При подготовке проб турмалина и мусковита для $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования выполнялось определение микроэлементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на основе методик, приведенных в работе [Reiners et al., 2005]. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ изотопные исследования методом ступенчатого прогрева выполнялись в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований Института геологии и минералогии СО РАН. Навески образцов, совместно с мусковитом МСА-11 (возраст – 311.0 ± 1.5 млн лет), используемым в качестве монитора, заворачивались в алюминиевую фольгу, помещались в кварцевую ампулу и после откачки из нее воздуха запаивались. Турмалин в настоящее время является экзотическим минералом для $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования, и зависимость выделения аргона от температуры для него исследована слабо. В связи с этим было подготовлено две навески турмалина, чтобы при повторном прогреве область возрастного плато была охарактеризована по возможности с наибольшей аналитической точностью с помощью многоколлекторного масс-спектрометра. Пробы облучались в кадмированном канале научного реактора ВВР-К Физико-технического института при Томском политехническом университете. Градиент нейтронного

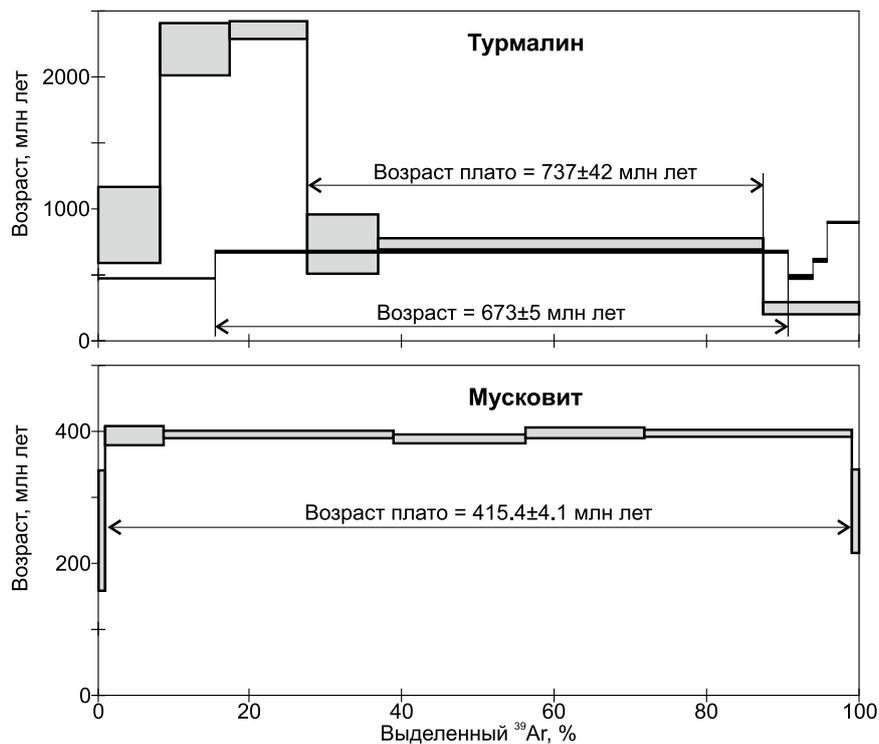


Рис. 7. Возрастные $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ спектры для турмалина и мусковита из косейсмических разрывных нарушений в районе Приморского сегмента коллизионного шва. Серым цветом показаны спектры, измеренные на одноколлекторном масс-спектрометре NobleGas 5400, черным – на многоколлекторном масс-спектрометре Argus.

Fig. 7. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ spectra for tourmaline and muscovite from the coseismic ruptures in the Primorsky segment of the ancient collisional suture. The spectra measured by a single-collector mass spectrometer NobleGas 5400 and a multi-collector mass spectrometer Argus are shown in grey and black, respectively.

потока не превышал 0.5 % в размере образца. Эксперименты по ступенчатому прогреву проводились в кварцевых реакторах с печами внешнего прогрева с последующей очисткой с помощью ZrAl-SAES-геттеров и измерением изотопного состава аргона на масс-спектрометре Noble gas 5400 (Микромасс, Англия) и многоколлекторном масс-спектрометре Аргус (GV-Instruments, Германия). Холостой опыт по определению ^{40}Ar (10 мин при 1200 °C) не превышал 5×10^{-10} нсм³. Ошибки измерений соответствуют интервалу $\pm 1 \sigma$. Полученные возрастные $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ спектры для минеральных фракций турмалина и мусковита приведены на рис. 7.

Во время предварительного исследования турмалина наметилась область температур (975–1050 °C), соответствующая максимальной доле выделенного ^{39}Ar (60 %) и возрастному плато, характеризующемуся значением 737 ± 42 млн лет. При повторном исследовании на многоколлекторном масс-спектрометре Argus измерение изотопного состава аргона, соответствующего плато, было проведено в одну ступень с максимальной аналитической точностью. Полученное значение 673 ± 5 млн лет согласуется с возрастом плато, при этом оно является существенно более точным. В спектре

мусковита выделилось плато из пяти ступеней, характеризующееся 98 % выделенного ^{39}Ar и значением возраста – 415.4 ± 4.1 млн лет.

Последовательность полученных оценок (показателей) возраста соответствует существующим представлениям об относительной устойчивости изотопных систем турмалина и мусковита, а также наблюдаемой последовательности формирования минеральных парагенезисов в разновозрастных глубинных разрывных нарушениях. Наличие плато в спектре не является абсолютной гарантией того, что в решетке минерала отсутствует избыточный радиогенный $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. Тем не менее полученная по турмалину датировка не противоречит оценкам возраста протолитов Ольхонского региона, установленного по цирконам из бластомилонитового метаморфического комплекса Орсо (844 и 792 млн лет), а также возрасту базальтового протолита в соседней Чернорудской зоне (624 ± 4.1 млн лет) [Mekhonoshin et al., 2004; Travin et al., 2013; Travin, 2016].

Можно предполагать, что косейсмические разрывы с турмалиновыми зеркалами возникли на значительных глубинах земной коры в соответствии с представленными выше P-T-условиями регионального и динамометаморфизма. Более позд-

ней является упомянутая выше датировка по мусковиту, возникшему, вероятнее всего, в декомпрессионной трещине растяжения типа pull-apart, которые обычно возникают при высокоскоростных сдвиговых сейсмодислокациях при резком сбросе давления, что было показано в экспериментах [Medvedev et al., 2014]. Предполагается, что она согласуется с $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датировками синтетектонических слюд, возникших на этапе проявления сдвиговых деформаций при эволюционном развитии Приморского разлома в зоне коллизионного шва [Travin, 2016]. Также можно предполагать, что полученные оценки возраста глубинных косейсмических разрывов с зеркалами скольжения по трещинам с гидротермально-метасоматической турмалиновой минерализацией (673 ± 5 млн) соответствуют одному из важнейших этапов сеймотектонической активизации в неопротерозойскую эру на заключительной стадии распада суперконтинента Родиния. Данная стадия предшествовала последующему коллизионному периоду приращения Ольхонского террейна к юго-восточной окраине Сибирского кратона. Полученное значение возраста мусковита может соответствовать проявлениям сеймотектонических деструктивных процессов в период раннепалеозойской тектонической активизации при формировании глубинных сегментов краевого шва в пределах раннепалеозойской аккреционной зоны.

С учетом полученных данных по датированию также можно попытаться определить примерный уровень эрозионного среза краевого шва в местах исследований. Турмалин подвергался в более позднее время наложенным деформациям с образованием по нему зеркал скольжения и замещением хлоритом. Также полевыми наблюдениями и изучением шлифов установлено, что кварц-турмалиновые прожилки секутся трещинками, выполненными мусковитом (серицитом), хлоритом и кальцитом.

Парагенезис турмалина с кварцем в трещинках, секущих граниты, позволяет считать, что кристаллизация турмалина происходила в относительно высокотемпературных условиях, близких к температуре закрытия $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ системы турмалина ≈ 580 °C [Korsakov et al., 2009]. Наиболее поздний минеральный парагенезис в трещинках, секущих турмалиновые прожилки, – мусковит+хлорит+кальцит – отвечает условиям низов зеленосланцевой фации. Поскольку температура закрытия $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ системы мусковита составляет ≈ 370 °C [Hodges, 2004; Reiners et al., 2005], датировку, полученную по мусковиту, можно рассматривать как близкую ко времени кристаллизации этого минерала. Это дает возможность реконструировать историю охлаждения и подъема пород блока Бугуль-

дейка – Куяда во временном интервале от неопротерозоя до среднего палеозоя. Проведенная таким способом реконструкция показывает, что в интервале от 737 ± 42 млн лет до 415 ± 4.1 млн лет породы участка Приморского разлома Бугульдейка – Таловка при эксгумации претерпели охлаждение от 580 до 370 °C, то есть на 210 °C. Если принять, что наиболее ожидаемый геотермический градиент в позднем докембрии составлял порядка 30 °C/км, в неопротерозое глубины активизации косейсмических разрывов могли составлять около 18 км, а в палеозое – 12 км (рис. 8).

В конечном счете, имея возможность в настоящее время наблюдать на поверхности сейсмогенные разрывные нарушения палеоочагов землетрясений, можно полагать, что максимальная величина денудационного среза, начиная с неопротерозоя, достигла порядка уровня 18 км (по турмалину), а в палеозое – 12 км (по мусковиту).

Согласно сейсмологическим данным, в Байкальской рифтовой зоне гипоцентры большинства сильных землетрясений располагаются в земной коре на глубинах 10–25 км. Следовательно, несмотря на меньший современный термический градиент, составляющий порядка 17–20 °C/км, можно полагать, что в изучаемом сегменте краевого шва Сибирского кратона, денудированного на 18 км, имеется возможность изучать элементы строения косейсмических разрывов в палеоочагах

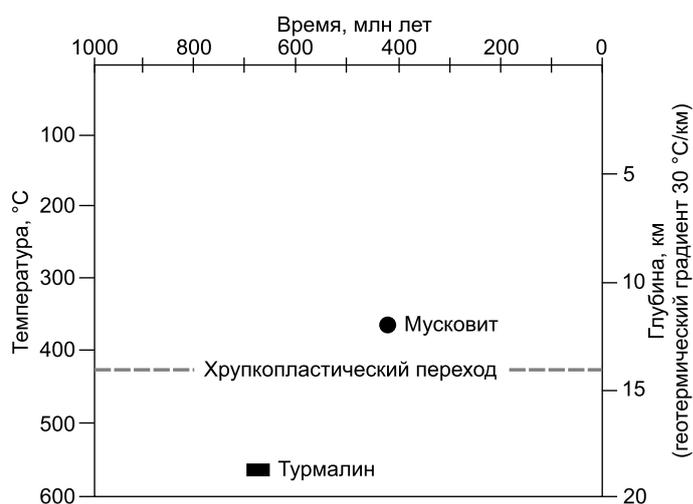


Рис. 8. Реконструкция истории охлаждения сегмента коллизионного шва на участке Бугульдейка – р. Таловка в неопротерозое и в палеозое с соответствующим уровнем глубин эксгумации.

Fig. 8. Reconstructed history of cooling of the collisional suture segment (Buguldeika – Talovka site) in the Neoproterozoic and Paleozoic. The scheme shows the corresponding depths of exhumation.

землетрясений, а также реконструировать термодинамические условия их формирования на уровне залегания хрупкопластического перехода и сейсмофокального горизонта земной коры тектонических эпох далекого прошлого.

4. МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ В ЗОНАХ РАЗЛОМОВ

Ниже изложены существующие в сообществе геомехаников, сейсмологов и физиков-экспериментаторов представления о фрикционных процессах, предположительно происходящих в зонах разломов, с целью их обсуждения и попытки согласования с представлениями геологов и геофизиков, изучавших последствия проявлений современных, исторических и доисторических сильных землетрясений.

При относительном смещении берегов разлома с косейсмическими скоростями 0.1–10.0 м/с неизбежно выделяется значительное количество тепла. В соответствии с работой [Byerlee, 1978], коэффициент трения составляет $\mu \sim 0.60\text{--}0.85$, а напряжения, нормальные к плоскости разлома, соответствуют уровню литостатических, и в таком случае фрикционный разогрев зоны в окрестности разлома должен быть весьма значителен. В глубинных условиях при косейсмическом скольжении в разломах с амплитудой в первые метры температура закономерно возрастает на сотни градусов, что приводит к появлению значительных объемов расплава в контактной поверхности скольжения, тогда как псевдотахилиты наблюдаются весьма локально. В работе [Sibson, 1973] редкое распространение псевдотахилитов объясняется динамическими гидротермальными эффектами. Поскольку коэффициент объемного расширения водного флюида намного больше, чем у кристаллической породы, фрикционный нагрев вызывает возрастание порового давления в зоне сдвига, и таким образом проявляется снижение эффективных напряжений и невозможность осуществления плавления. Этот механизм может работать в тех случаях, когда вмещающая порода на участках разломов малопроницаема и способна эффективно удерживать флюид, находящийся под избыточным давлением. Несложно оценить и увеличение температуры в зоне разлома в процессе длительного скольжения в режиме крипа, а также распределение теплового потока на поверхности. Сопоставление результатов таких оценок с данными натурных наблюдений показывает, что нет оснований предполагать наличие фрикционного разогрева на крипающих участках разломов (известный «парадокс Сан-Андреаса») [Lachenbruch, Sass, 1988].

В предположении гидростатического давления флюида значение фрикционной прочности разлома составляет величину порядка 100 МПа на глубине 10–15 км, тогда как отсутствие фрикционного нагрева на движущихся участках разломов ведет к значениям фрикционной прочности порядка 10 МПа. Это заставляет искать причины радикального снижения трения на разломе. Согласно представлениям, изложенным в работе [Byerlee, 1978], трение практически не зависит от реологии и, при значительных давлениях, от типа горной породы; отсюда возникает необходимость искать более приемлемые специфические причины «ослабления» сдвигового сопротивления в плоскостях скольжения в разломах. Множество существующих физических моделей, учитывающих фрикционные условия скольжения в разломах, можно условно разделить на три следующие группы.

Первая группа учитывает повышенное давление флюида по сравнению с гидростатикой. И.Г. Киссин выделяет три зоны изменения флюидного давления с глубиной: зону гидростатического давления, зону переходных давлений и зону литостатических давлений. Граница между первой и второй зонами в разных геоструктурах расположена на глубинах от 1 до 6 км, а между второй и третьей – установлена лишь в отдельных районах и находится, вероятно, на глубинах 5–10 км [Kissin, 2015]. Если величина давления флюида постепенно возрастает до сублитостатического значения (по всей площади разлома или на некоторых изолированных «пережатых» участках), то, в соответствии с законом Терцаги, среднее сопротивление сдвигу уменьшается начиная с определенной глубины. Следует заметить, что такая схема применима главным образом к надвигам, для которых напряжение, нормальное к плоскости разлома, максимальное, но для того чтобы поровое давление оказалось столь высоким для сбросов или сдвигов, необходимо вводить дополнительные предположения. К тому же многие измерения в глубоких скважинах в континентальных областях дают величину порового давления, близкую к гидростатическому [Sibson, 1973; Kissin, 2015].

Существенное дополнение и развитие представлений о роли флюидов в разрушении и режимах скольжения в разломах на сейсмофокальных глубинах отражено во флюидометаморфической модели, представленной в монографии [Rodkin, Rundquist, 2017]. Ее авторами подчеркивается основополагающее значение флюидов как наиболее быстрого компонента литосферы, способного достаточно активно стимулировать трещинообразование, видоизменять минеральный состав горных пород в разломах. Приводится описание механизма возникновения неустойчивостей в сегментах зон раз-

ломов при температурах 250–600 °С, характерных для глубин залегания сейсмофокального слоя в тех сегментах разломов, где происходило проникновение и миграция флюидов.

Вторая группа моделей рассматривает фрикционные свойства горных пород, слагающих магистральный разрыв. Некоторые из них либо в силу особенностей кристаллической структуры минералов, либо из-за абсорбированных водяных слоев имеют крайне низкие коэффициенты трения по сравнению с законом Байерли. Их присутствие в значительном количестве в материале-заполнителе центральной зоны разлома может существенно снизить его фрикционную прочность. Подходящими минералами с подобными свойствами являются, например, набухающие глины – каолинит и монтмориллонит, а также некоторые разновидности серпентинита. Эти материалы имеют коэффициент трения около 0.2. Судя по данным, приведенным в [Scholz, 2006], для образцов материала-заполнителя, отобранных из приповерхностной зоны разлома Сан-Андреас, типичным является состав с избытком глинистых минералов и некоторое количество кварца при практически полном отсутствии полевого шпата. В то же время образцы, поднятые с глубины 2–5 км, также состоят из мелкодисперсного материала, они сложены главным образом не глинистыми минералами, а тонко перетертым полевым шпатом и кварцем и лишь небольшим количеством ненабухающих глин – иллита и смектита [Chester et al., 2013]. Анализ состава образцов, полученных при бурении скважины SAFOD, позволил обнаружить значительное количество иллита и смектита в узких низкоскоростных зонах скольжения [Jeppson et al., 2010]. Даже если заполнитель центральной части разлома составлен целиком из глинистых минералов, при повышенных температурах набухающие глины, обладающие аномально низким трением, должны переходить в ненабухающие разновидности с коэффициентом трения до 0.4 [Morrow et al., 1992]. Иная горная порода глубинного происхождения, например серпентинит, обладает стабильно низким трением вплоть до довольно высоких температур [Reinen et al., 1991]. Так же, как и флюидометаморфическая модель, данный тип моделей, опирающийся на геологические и экспериментальные сведения, в наибольшей степени согласуется с геологическими условиями.

В третьей группе моделей рассматриваются динамические механизмы ослабления трения в разломах. В этих моделях величина динамического трения снижается в ходе сейсмического скольжения либо из-за термальных эффектов, либо из-за эффектов, связанных с высокой скоростью скольжения. Рассматриваются такие трибохимические

механизмы снижения трения, как локализация нагрева на площади «действительного» контакта [Rice, 2006; Beeler et al., 2008], термальное и механическое разложение и истирание минералов и связанное с этим эффектом увеличение порового давления [Brantut et al., 2008], смазка поверхности разлома силикагелем, образующимся в процессе аморфизации кварца при высоком давлении и значительных деформациях [Goldsby, Tullis, 2002], акустическая флюидизация (снижение эффективного трения под воздействием вибраций) [Melosh, 1979, 1996]. Все упомянутые модели третьей группы имеют серьезный недостаток. Ни одна из них не описывает механизм снижения величины трения покоя. Это означает, что если коэффициент трения покоя соответствует закону Байерли (коэффициент трения $\mu \sim 0.85$), а динамический коэффициент трения падает до низких величин ($\mu \sim 0.2$), то амплитуда сброса напряжений при землетрясении должна составлять величину $\Delta\sigma \sim 100$ МПа, что более чем на порядок превышает обычные значения. Судя по наблюдаемым величинам $\Delta\sigma$, трение покоя на разломе (на залеченных участках разломов или вообще в пределах слабых на сдвиг пород, например филлитовых сланцев) может быть низким. Однако если это так, то не требуется никаких дополнительных механизмов для объяснения «парадокса теплового потока». Авторы работ [Lapusta, Rice, 2003; Noda et al., 2011] попытались решить эту проблему. Они предложили модель, в которой коэффициент трения по разлому соответствует закону Байерли, однако с сильным динамическим разупрочнением, и назвали такой тип разломов «очень прочные, но очень “хрупкие”». Также эти авторы предположили, что существуют слабые, неустойчивые залеченные сегменты разломов, где зарождается динамический срыв, после чего разрыв распространяется динамически через прочные участки, благодаря концентрации напряжений в окрестности его носика. Таким образом, уровень сдвиговых напряжений в ослабленных залеченными минералами участках разлома остается все время ниже величины статического трения, так что величина сброшенного напряжения может оказаться небольшой.

Рассмотрим один из вариантов количественной оценки динамической сдвиговой жесткости сейсмогенерирующей разломной зоны. С точки зрения механики, разрыв, динамически распространяющийся по поверхности плоскости разлома при землетрясении, есть результат возникновения явления фрикционной неустойчивости. Формальное условие возникновения такой неустойчивости хорошо известно и определяется как фрикционными характеристиками контакта, так и свойствами окружающей среды:

$$\zeta = \frac{|\partial\sigma_s/\partial u|}{|\partial\tau/\partial u|} > 1, \quad (1)$$

где u – перемещение по разлому в процессе распространения разрыва, σ_s – сдвиговое напряжение на контакте, которое в процессе скольжения изменяется от величины, соответствующей трению покоя σ_{s0} , до величины, соответствующей трению скольжения σ_{s1} ; τ – напряжения в окружающем массиве, касательные к площадкам, параллельным плоскости разлома. Иными словами, способность к динамической разрядке накопленной энергии деформации определяется скоростью, с которой сопротивление сдвигу изменяется в процессе скольжения, по сравнению со скоростью, с которой напряжение может быть упруго разгружено в массиве, вмещающем разлом. Таким образом, предметом анализа должны быть скорее условия упрочнения и разупрочнения в процессе сдвига, чем прочность контакта.

Исследуя условие возникновения неустойчивости скольжения (1), несложно показать, что для возникновения неустойчивости необходимо определенное соотношение между уровнем нормальных напряжений и жесткостью нагружения. Кроме того, неустойчивость может возникнуть лишь в случае, когда область скольжения достигает определенного размера. После достижения участком проскальзывания критического размера стабильное скольжение переходит в динамический срыв.

Значение параметра ζ определяет и сейсмическую эффективность скольжения – долю энергии E_s , которая излучается в виде сейсмических волн. Как известно, приведенная величина $e = \frac{E_s}{M_0}$, где M_0 – скалярный сейсмический момент, изменяется в широких пределах – от $e \sim 10^{-3}$ при $\zeta \gg 1$ до $e < 10^{-8}$ при $\zeta \rightarrow 1$ (медленные землетрясения, события медленного скольжения). Поскольку величина знаменателя в (1) изменяется довольно слабо, «потенциальная опасность разлома» определяется величиной $\partial\sigma_s/\partial u$. Связанная с этим параметром величина динамической сдвиговой жесткости разломной зоны может быть оценена по результатам сейсмических наблюдений [Kostyuchenko et al., 2002], что дает надежду на возможность разработки инструментального метода диагностики сейсмогенных разломов.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим полученные результаты, представленные в обеих частях данной работы, в соотношении с подобными опубликованными в печати све-

дениями. Из первой части данной статьи [Ruzhich, Kocharyan, 2017], где уже рассматривались строение и некоторые современные динамические условия формирования зон сейсмодислокаций катастрофических землетрясений с $M \geq 7.9$ на территории Монголии в приповерхностных условиях земной коры, а также данные бурения в зонах недавних катастрофических землетрясений, можно выделить следующие результаты. Размеры очагов подобных землетрясений по протяженности взбросо-сдвиговых сейсмодислокаций исчисляются в 270–350 км. Полученные при раскопках сейсмодислокаций сведения о возрасте более ранних сейсмогенных смещений в тектонических разломах однозначно указывают на регулярные акты их сейсмогенного обновления примерно в одних и тех же сегментах зон разломов или разломных сочленений. Было показано, что для очень сильных сейсмических событий подобные акты происходят с интервалами во многие сотни – первые тысячи лет.

С позиций палеосейсмогеологического подхода приведенные результаты позволяют получать ответы на вопросы о том, где предположительно следует ожидать возникновения очередного сильного землетрясения. Приемлемое объяснение заключается в том, объекты сеймотектонической деструкции, такие как разломные пересечения, крупномасштабные неровности и прочностные барьеры, динамически разрушаются в течение многократных повторений и в течение длительных временных интервалов. К сожалению, в асейсмические и постсейсмические периоды такие признаки подготовки сильных землетрясений часто остаются нераспознанными и потому становятся неожиданными. Отсюда оценки времени возникновения новых сильных землетрясений возможны лишь на невысоком уровне вероятности порядка $P \sim 0.6-0.7$. Краткосрочный прогноз остается недостижимым из-за отсутствия необходимых признаков о процессах подготовки толчков в глубокозалегающем сейсмофокальном горизонте, которые сложно улавливать на земной поверхности. Таким образом, становится очевидным вывод – возможности прогноза землетрясений, основанные на современном недостаточном уровне знаний, ограничены и требуется поиск других путей решения проблемы сейсмобезопасности.

Если судить по рассмотренному выше строению разлома и наблюдаемой в моменты сотрясений динамике вспарывания, приуроченные к долгоживущим разломам сейсмодислокации формировались при последовательном динамическом слиянии в единую зону крупных сегментов разрывов с длиной 35–50 км. Подобный механизм междуранговых иерархических переходов от мелких раз-

рывов протяженностью в первые километры к более протяженным уже рассматривался ранее, в частности в работах [Ruzhich, 1997; Ruzhich et al, 2015]. Такие представления опираются на кинетическую концепцию прочности при разрушении твердых тел Н.С. Журкова [Zhurkov, 1968]. Как базовая основа она успешно используется и для объяснения динамики сейсмогенного разрушения породных массивов при сейсмогенном вспарывании зон древних разломов [Zhurkov et al., 1977; Sobolev et al., 2016; и др.]. Отсюда возникает объяснение условий возникновения повышенной сейсмической активности в геологической среде, связанной с многоэтапным динамическим разрушением межразломных перемычек или других разнообразных прочностных барьеров [Florensov, Solonenko, 1963; Zamaraev et al., 1979; Ruzhich, 1997]. В литосфере на мегамасштабном иерархическом уровне подобный механизм весьма наглядно воспроизводится в течение многих миллионов лет, например, при развитии Байкальской рифтовой системы в процессе деструкции Евроазиатской плиты. На данном примере наглядно в замедленном режиме можно наблюдать активное сеймотектоническое разрушение перемычек между рифтовыми впадинами, если их рассматривать как мегатрещины растяжения в литосферной плите [Sherman, 1977, 2009; Ruzhich, 1997]. Сделан вывод о том, что в широком масштабном диапазоне – от микротрещин до огромных по размерам деструктивных зон – подобный механизм проявляется в сеймотектонических режимах переходов от низшего иерархического уровня к высшему [Ruzhich et al., 2015].

Заслуживает упоминания рассмотренный выше пример проявления механизма мощного сеймотектонического индуцирования Болнайского землетрясения ($M=8.4$) предшествующим Цэцэрлэгским землетрясением с $M=7.9$. Подобные сведения о сближенных «дуплетных» сильных землетрясениях не однажды отмечались в сейсмической истории Земли (например [Kocharyan, 2016]). Примеры «дуплетного» индуцирования сильными землетрясениями других, близко расположенных, следует учитывать при анализе условий проявления наведенной сейсмичности разноранговыми по энергии сейсмическими событиями. Широко известны настораживающие многочисленные примеры индуцирования слабых землетрясений с $M \leq 4$ закачками под давлением в породные массивы химических растворов, сопровождающимися эффектом гидроразрыва при разработках углеводородных месторождений. Таким образом, возможность инициировать возникновение огромных размеров очагов землетрясений с протяженностью во многие сотни километров техногенными воздействиями в

виде одиночных ядерных взрывов или нагнетанием водных растворов через одиночную скважину в протяженную зону разлома следует признать маловероятной. Успех в попытках инициирования сильных землетрясений с возникновением зон протяженных сейсмодислокаций может быть достигнут путем серии мощных последовательных техногенных воздействий на высоконапряженные участки зон разломов.

Отметим несомненную полезность и важность работ по разбурированию зон сейсмодислокаций недавних очень сильных землетрясений, упоминаемых в работе [Kocharyan, 2016; Ruzhich, Kocharyan, 2017], однако следует признать что их проведение является промежуточным шагом в детальном изучении трибофизических процессов в глубинных участках эксгумированных разломов.

Во второй части проведенного исследования (настоящая статья) основным объектом рассмотрения являлся мультидисциплинарный методический подход к изучению глубинных РТ-условий подготовки очагов сильных землетрясений. Данный подход можно рассматривать как дальнейшее развитие известного палеосейсмогеологического метода [Florensov, Solonenko, 1963]. На представленных в работе примерах рассмотрены полученные сведения о строении, возрасте и возникновении сейсмогенных разрывов в пределах Приморского сегмента коллизионного шва на окраине Сибирского кратона при термодинамических условиях, соответствующих эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фациям регионального метаморфизма на глубинах эксгумации 12–18 км. Собранные данные о времени возникновения древних сейсмогенных подвижек в глубоко денудированном участке шва, порядка 673 млн лет назад (по турмалину) и 415 млн лет (по мусковиту), заметно превышают уже известные датировки ко-сейсмических глубинных разрывов изотопными методами.

Для сопоставления полученных авторами материалов с другими подобными сведениями полезно обратиться к работам зарубежных исследователей. Например, в статье [Kirkpatrick et al., 2012] приводятся интересные результаты исследований на территории Сьерра-Невада (штат Калифорния). На основании восстановления термической истории образцов горных пород из зон разлома была определена глубина денудационного среза с интервалом значений 2.4–6.0 км. Температура вмещающих горных пород во время образования псевдотахилитов составляла 110–160 °С, а средневзвешенная оценка возраста по методу $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ имела значение 76.6 ± 0.3 млн лет. В этой же работе авторами фиксировались сегменты в разломах протяженностью порядка 1–10 м, в пределах которых при па-

леоземлетрясениях происходили сейсмогенные смещения с возникновением псевдотахилитовых жил. Их генезис справедливо рассматривался авторами как следствие контактного трения при быстром скольжении в местах взаимодействия крупных неровностей в зоне разлома. На наш взгляд, данное заключение вполне обоснованно подтверждает мнение многих сторонников подобного механизма возникновения источников сейсмической генерации (в частности [Thompson et al., 2005, 2009; Ruzhich et al., 2014]).

В части, касающейся распространения псевдотахилитов в глубокозалегающих сегментах разломов, заслуживают упоминания малоизвестные геологические сведения, собранные на территории глубоко денудированного Анабарского щита, расположенного на севере Сибирского кратона. В этом районе российские геологи в середине прошлого столетия выявили обширное распространение псевдотахилитов в протяженных системах пластических сдвигов (шеар-зон) протерозойского возраста, эксгумированных с нижних горизонтов земной коры и представленных массивами горных пород амфиболовой и гранулитовой фаций метаморфизма [Lutz, 1962; и др.]. Примечательно то, что в отдельных участках разломов ширина жил псевдотахилитов достигала 1.5–2.0 м [Melnikov, 2011]. Подобные уникальные примеры, несомненно, требуют дополнительного изучения с датированием возраста и глубинных условий происхождения в наименее изученные этапы консолидации древнейшего Сибирского кратона.

В статье [Bullock et al., 2014] изучены возможности применения литологического контроля режимов сейсмического и асейсмического скольжения в активном разломе Gabbio (Италия) на уровне верхнего этажа земной коры – 2.5–5.0 км. Авторы на основании анализа собранных сведений о ходе петрохимических превращений карбонатных толщ смогли выявить различные последствия смещений в зоне разлома при асейсмическом крипе и в моменты высокоскоростных косейсмических подвижек.

Отличительной особенностью проведенных полевых исследований является использование накопленного опыта изучения зеркал скольжения, наличие которых рассматривается как свидетельство высокоскоростных смещений в разломах. Такой опыт позволил, при сотрудничестве с другим российскими учеными и в дополнение к изучению псевдотахилитов, идентифицировать глубинные косейсмические разрывные нарушения [Morrow et al., 1992; Ruzhich et al., 2009; Sobolev et al., 2015, 2016]. С применением современных физических методов детального изучения, например спектроскопии, было установлено, что в поверхностном слое зеркала,

отобранного в сверглубоком карьере алмазонасной трубки взрыва, вскрывшего участок зоны Виллюйского разлома, выявлены плоскости скольжения толщиной ~4 мкм. Они содержали преимущественно альбит и кварц, а также следы кальцита и доломита. Анализ формы спектральных полос показал, что кристаллы кварца и альбита имеют нанометровые размеры. Удалось установить, что размеры нанокристаллов кварца составляли ~19 нм, их кристаллическая решетка сжата на ~0.6 %, что соответствует величине эффективного напряжения ~0.23 ГПа [Sobolev et al., 2016]. При подобном способе изучения было установлено, что поверхностный слой изученного зеркала скольжения представлен смесью нанокристаллов кварца и альбита, окруженных водой, что может способствовать значительному уменьшению сдвигового сопротивления между берегами разрывов и возникновению сейсмогенного проскальзывания.

Можно предполагать, что многие очаги сильнейших землетрясений со временем залечиваются минеральными флюидно-метаморфогенными образованиями и нередко трансформируются в рудные месторождения, при разработке которых происходят горно-тектонические удары как напоминание о многоэтапной сейсмогеологической последовательности активизаций. В таком аспекте рассмотрения открываются возможности реконструировать строение и процессы стресс-метаморфического преобразования горных пород путем использования весьма обширного арсенала петрофизических материалов, накопленных разными специалистами при разведке и горнопроходческой деятельности в пределах многочисленных рудных месторождений. Такой подход рассмотрен, например, в работах [Seminskii Zh.V., Seminskii K.Zh., 2004; Seminsky, 2014, 2015].

Из всего объема рассмотренных выше материалов можно прийти к следующему заключению. На сейсмофокальных глубинах континентальной земной коры при существующих технических возможностях очень сложно контролировать разнообразные изменения режимов и механизмов трения, вариаций на уровне сейсмофокального горизонта, сдвигового сопротивления в зонах разломов. В подобных обстоятельствах надежды на реализацию краткосрочного прогноза из-за недостаточного понимания глубинных трибофизических процессов не могут считаться оправданными. Основная трудность заключается в том, что в глубинных процессах, помимо эндогенных процессов в зонах разломов также возникают многочисленные варианты внешних полей в виде триггерных инициаций, способствующих внезапным переходам от режима крипа в высокоскоростные косейсмические подвижки. В частности, подобные явления

возможны при трудноконтролируемом проникновении флюидных растворов в контактные высоконапряженные участки разломов. Нельзя исключать и триггерное влияние регулярных инициирующих деформационно-волновых воздействий космогенного происхождения, способных вызывать регулярные отклики в сейсмическом режиме разломов [Levina, Ruzhich, 2015]. Общеизвестен негативный опыт техногенного индуцирования сильных землетрясений в городах Газли и Нефтегорске при разработках нефтегазовых месторождений в связи с многолетним применением закачек через многочисленные скважины огромных объемов водных растворов в подземные горизонты или выкачиванием колоссальных объемов запасов углеводородов. Подобные случаи свидетельствуют о существовании реальной угрозы непреднамеренного техногенного индуцирования крупноамплитудных сейсмогенных сдвиговых подвижек в глубинных высоконапряженных сегментах зон разломов, если не учитывать сложные эндогенные внутрикорковые процессы, которые еще предстоит изучить.

В международном аспекте реализации усилий по эффективному противодействию готовящимся опасным землетрясениям в настоящее время наблюдается весьма заметное повышение внимания исследователей разных стран к обсуждению и анализу техногенных воздействий на сейсмоопасные сегменты разломов. В частности, в Нью-Йорке 29–31 марта 2017 г. был проведен международный семинар «SEISMS» с участием авторитетных экспертов в лице геологов-нефтяников, специалистов по физике землетрясений, приборам и наблюдениям за скважинами, а также по изучению опыта непреднамеренного индуцирования землетрясений в связи с закачкой больших объемов химических растворов в подземные горизонты земной коры [Savage et al., 2017; Raleigh et al., 1976; и др.]. На этом форуме обсуждались существующие расхождения между теоретическими представлениями ученых и реальными наблюдениями в области геомеханики разломов, рассматривалась постановка приоритетов в исследованиях по многочисленным нерешенным вопросам физики землетрясений. Отмечалось, что большинство из этих вопросов возникает из-за сложности масштабирования представлений, полученных при проведении лабораторных экспериментов, на реальные трибологические и геомеханические процессы, происходящие в зонах длительно живущих разломов. Собранным сообществом в итоге было принято очень важное решение о разработке международного проекта и проведении масштабного эксперимента. Его реализация предполагается в одном из океанических разломов с бурением скважин и за-

качками растворов для тестового индуцирования умеренного землетрясения с магнитудой порядка $M \leq 6$. В этой связи на основании уже имеющегося опыта российских исследователей в сфере проведения натуральных экспериментов в зонах разломов, ориентированных на безопасную разгрузку высоконапряженных сегментов разломов, можно отметить следующее. Эффективность управляющих техногенных воздействий на разломы может быть скорректирована и увеличена сочетанием закачек водных растворов в разломы с виброимпульсными воздействиями [Psakhie et al., 2006a, 2006b; Ruzhich et al., 2017].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дальнейшее продвижение по пути решения сложной проблемы обеспечения сейсмобезопасности невозможно без детального и всестороннего изучения глубинных геологических процессов формирования очагов землетрясений в зонах разломов, проводимого с привлечением современных разнообразных способов обработки и анализа получаемых данных. Часть таких способов рассматривалась выше. Для успешной реализации подобных исследований необходим мультидисциплинарный подход с привлечением международных коллективов ученых, с применением современных технологий и со значительными финансовыми вложениями.

Полученные сведения о глубинных процессах подготовки сильных коровых землетрясений могут быть использованы для создания новых моделей очагов землетрясений, а также разработки новых более эффективных способов проведения контролируемых техногенных воздействий на глубокозалегающие сейсмоопасные участки разломов с целью их своевременной и безаварийной разгрузки от избыточных сейсмотектонических напряжений до безопасного фонового уровня на многие десятки-сотни лет.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность А.И. Мельникову, С.В. Рассказову и анонимным рецензентам за советы, вдумчивые комментарии и замечания, которые помогли улучшить рукопись. Представленная статья подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-05-00694). Исследования проводились в рамках государственного задания по проектам № 346-2016-0004, № 0330-2016-0013.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Beeler N.M., Tullis T.E., Goldsby D.L., 2008. Constitutive relationships and physical basis of fault strength due to flash-heating. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 113 (B1), B01401. <https://doi.org/10.1029/2007JB004988>.
- Bibikova E.V., Korikovskiy S.P., Sez'ko A.I., Fedorov V.S., 1981. Age of granites of the Primorsky complex (Western Pribaikalie) according to the U-Pb data. *Doklady AN SSSR* 257 (2), 462–466 (in Russian) [Бибикова Е.В., Кориковский С.П., Сезько А.И., Федоровский В.С. Возраст гранитов приморского комплекса (Западное Прибайкалье) по данным U–Pb метода // Доклады АН СССР. 1981. Т. 257. № 2. С. 462–466].
- Brantut N., Schubnel A., Rouzaud J.-N., Brunet F., Shimamoto T., 2008. High-velocity frictional properties of a clay bearing, fault gouge and implications for earthquake mechanics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 113 (B10), B10401. <https://doi.org/10.1029/2007JB005551>.
- Bullock R.J., De Paola N., Holdsworth R.E., Trabuco-Alexandre J., 2014. Lithological controls on the deformation mechanisms operating within carbonate-hosted faults during the seismic cycle. *Journal of Structural Geology* 58, 22–42. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2013.10.008>.
- Byerlee J.D., 1978. Friction of rocks. *Pure and Applied Geophysics* 116 (4–5), 615–626. <https://doi.org/10.1007/BF00876528>.
- Chester F.M., Rowe C., Ujiie K., Kirkpatrick J., Regalla C., Remitti F., Moore J.C., Toy V., Wolfson-Schwehr M., Bose S., Kameda J., Mori J.J., Brodsky E.E., Eguchi N., Toczko S., Expedition 343 and 343T Scientists, 2013. Structure and composition of the plate-boundary slip zone for the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Science* 342 (6163), 1208–1211. <https://doi.org/10.1126/science.1243719>.
- Delvaux D., Moeus R., Stapel G., Petit C., Levi K.G., Miroshnichenko A.I., Ruzhich V.V., San'kov V.A., 1997. Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part 2. Cenozoic rifting. *Tectonophysics* 282 (1–4), 1–38. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(97\)00210-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00210-2).
- Donskaya T.V., Bibikova E.V., Mazukabzov A.M., Kozakov I.K., Gladkochub D.P., Kirnozova T.I., Plotkina Yu.V., Reznitsky L.Z., 2003. The Primorsky granitoid complex of western Cisbaikalia: geochronology and geodynamic typification. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 44 (10), 968–979.
- Fedorovskiy V.S., Sklyarov E.V., Izokh A.E., Kotov A.B., Lavrenchuk A.V., Mazukabzov A.M., 2010. Strike-slip tectonics and subalkaline mafic magmatism in the Early Paleozoic collisional system of the western Baikal region. *Russian Geology and Geophysics* 51 (5), 534–547. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.04.009>.
- Florensov N.A., Solonenko V.P. (Eds.), 1963. The Gobi-Altai Earthquake. Publishing House of Academy of Sciences of USSR, Moscow, 391 p. (in Russian) [Гоби-Алтайское землетрясение / Ред. Н.А. Флоренсов, В.П. Солоненко. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 391 с.].
- Goldsby D.L., Tullis T.E., 2002. Low frictional strength of quartz rocks at sub seismic slip rates. *Geophysical Research Letters* 29 (17), 1844. <https://doi.org/10.1029/2002GL015240>.
- Hodges K.V., 2004. Geochronology and thermochronology in orogenic systems. In: R.L. Rudnick (Ed.), *Treasure on geochemistry*, vol. 3, The crust. Elsevier, Oxford, p. 263–292. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03024-3>.
- Jeppson T.N., Bradbury K.K., Evans J.P., 2010. Geophysical properties within the San Andreas Fault Zone at the San Andreas Fault Observatory at Depth and their relationships to rock properties and fault zone structure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 115 (B12), B12423. <https://doi.org/10.1029/2010JB007563>.
- Kirkpatrick J.D., Dobson K.J., Mark D.F., Shipton Z.K., Brodsky E.E., Stuart F.M., 2012. The depth of pseudotachylite formation from detailed thermochronology and constraints on coseismic stress drop variability. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 117 (B06), B06406. <https://doi.org/10.1029/2011JB008846>.
- Kissin I.G., 2015. Fluids in the Earth's Crust. Geophysical and Tectonic Aspects. Nauka, Moscow, 328 p. (in Russian) [Киссин И.Г. Флюиды в земной коре. Геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука, 2015. 328 с.].
- Kocharyan G.G., 2016. Geomechanics of Faults. GEOS, Moscow, 432 p. (in Russian) [Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М.: ГЕОС, 2016. 432 с.].
- Korsakov A.V., Travin A.V., Yudin D.S., Marschall H.R., 2009. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of tourmaline from metamorphic rocks of the Kokchetav massif, Kazakhstan. *Doklady Earth Sciences* 424 (1), 168–170. <https://doi.org/10.1134/S10283334X0901036X>.
- Kostyuchenko V.N., Kocharyan G.G., Pavlov D.V., 2002. Deformation characteristics of interblock gaps of different scales. *Fizicheskaya Mezomekhanika (Physical Mesomechanics)* 5 (5), 23–42 (in Russian) [Костюченко В.Н., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В. Деформационные характеристики межблоковых промежутков различного масштаба // Физическая мезомеханика. 2002. Т. 5. № 5. С. 23–42].
- Lachenbruch A., Sass J., 1988. The stress heat-flow paradox and thermal results from Cajon Pass. *Geophysical Research Letters* 15 (9), 981–984. <https://doi.org/10.1029/GL015i009p00981>.
- Lapusta N., Rice J.R., 2003. Low-heat and low-stress fault operation in earthquake models of statically strong but dynamically weak faults. *Eos, Transactions, American Geophysical Union* 84 (46), AGU Fall Meeting Abstracts, Abstract S51B-02.

- Levina E.A., Ruzhich V.V., 2015. The seismicity migration study based on space-time diagrams. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (2), 225–240. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-2-0178>.
- Lutz B.G., 1962. Pseudo-tahyllites of the Anabar Shield and issues of their genesis. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* (11), 98–102 (in Russian) [Лутц Б.Г. Псевдотахилиты Анабарского щита и вопросы их генезиса // *Геология и геофизика*. 1962. № 11. С. 98–102].
- Medvedev V.Ya., Ivanova L.A., Lysov B.A., Ruzhich V.V., Marchuk M.V., 2014. Experimental study of decompression, permeability and healing of silicate rocks in fault zones. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (4), 905–917 (in Russian) [Медведев В.Я., Иванова Л.А., Лысов Б.А., Ружич В.В., Марчук М.В., 2014. Экспериментальное изучение декомпрессии, проницаемости и залечивания силикатных пород в зонах разломов // *Геодинамика и тектонофизика*. 2014. Т. 5. № 4. С. 905–917]. <https://10.5800/GT-2014-5-4-0162>.
- Mekhonoshin A.S., Vladimirov A.G., Fedorovsky V.S., Volkova N.I., Travin A.V., Kolotilina T.B., Khromykh S.V., Yudin D.S., 2004. Basite-ultrabasite magmatism of the Olkhon collisional system in the Western Pribaikalie: composition, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age, and structural position. In: *Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from ocean to continent)*. Issue 2. Publishing House of the Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, vol. 2, p. 40–43 (in Russian) [Мехоношин А.С., Владимиров А.Г., Федоровский В.С., Волкова Н.И., Травин А.В., Колотилина Т.Б., Хромых С.В., Юдин Д.С. Базит-ультрабазитовый магматизм Ольхонской коллизионной системы Западного Прибайкалья: состав, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраст, структурная позиция // *Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)*. Вып. 2. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2004. Т. 2. С. 40–43.
- Melnikov A.I., 2011. *Structural Evolution of Metamorphic Complexes of Ancient Shields*. Academic Publishing House “Geo”, Novosibirsk, 288 p. (in Russian) [Мельников А.И. Структурная эволюция метаморфических комплексов древних щитов. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2011. 288 с.].
- Melosh H.J., 1979. Acoustic fluidization: A new geologic process? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 84 (B13), 7513–7520. <https://doi.org/10.1029/JB084iB13p07513>.
- Melosh H.J., 1996. Dynamical weakening of faults by acoustic fluidization. *Nature* 379 (6566), 601–606. <https://doi.org/10.1038/379601a0>.
- Morrow C., Radney B., Byerlee J., 1992. Frictional strength and the effective pressure law of montmorillonite and illite clays. In: B. Evans, T.F. Wong (Eds.), *Fault mechanics and transport properties of rocks*. International Geophysics, vol. 51. Academic Press, p. 69–88. [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(08\)62815-6](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(08)62815-6).
- Noda H., Lapusta N., Rice J.R., 2011. Earthquake sequence calculations with dynamic weakening mechanisms. In: R.I. Borja (Ed.), *Multiscale and multiphysics processes in geomechanics*. Springer, Berlin, p. 149–152. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19630-0_38.
- Panza G., Kossobokov V.G., Peresan A., Nekrasova K., 2014. Why are the standard probabilistic methods of estimating seismic hazard and risks too often wrong. In: M. Wyss, J.F. Shroder (Eds.), *Earthquake hazard, risk and disasters*. Elsevier, Amsterdam, p. 309–357. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394848-9.00012-2>.
- Psakhie S.G., Popov L.V., Shil'ko E.V., Astafurov S.V., Ruzhich V.V., Smekalin O.P., Bornyakov S.A., 2006a. Patent 2273035 RF. The method for controlling the displacement regime in fragments of seismically active tectonic faults. Bulletin No. 9 dated 27.03.2006 (in Russian) [Псахье С.Г., Попов Л.В., Шилько Е.В., Астафуров С.В., Ружич В.В., Сmealin О.П., Борняков С.А. Патент 2273035 РФ. Способ управления режимом смещений во фрагментах сейсмоактивных тектонических разломов. Бюллетень № 9 от 27.03.2006].
- Psakhie S.G., Shil'ko E.V., Astafurov S.V., Dimaki A.V., Ruzhich V.V., Lopatin V.V., 2006b. A new approach to the seismically safe relaxation of local stresses in the crust. In: *Geodynamics and the state of stress of the Earth's interior*. Proceedings of the International Conference. Publishing House of the Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, p. 451–459 (in Russian) [Псахье С.Г., Шилько Е.В., Астафуров С.В., Димаки А.В., Ружич В.В., Лопатин В.В. Новый подход к сейсмически безопасной релаксации локальных напряжений в земной коре // *Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: Труды международной конференции*. Новосибирск: Изд-во Института горного дела СО РАН, 2006. С. 451–459].
- Raleigh C.B., Healy J.H., Bredehoeft J.D., 1976. An experiment in earthquake control at Rangely, Colorado. *Science* 191 (4233), 1230–1237. <https://doi.org/10.1126/science.191.4233.1230>.
- Reinen L.A., Weeks J.D., Tullis T.E., 1991. The frictional behavior of serpentinite: Implications for aseismic creep on shallow crustal faults. *Geophysical Research Letters* 18 (10), 1921–1924. <https://doi.org/10.1029/91GL02367>.
- Reiners P.W., Ehlers T.A., Zeitler P.K., 2005. Past, Present, and Future of Thermochronology. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 58 (1), 1–18. <https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.1>.
- Rice J.R., 2006. Heating and weakening of faults during earthquake slip. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 111 (B5), B05311. <https://doi.org/10.1029/2005JB004006>.
- Ridolfi F., Renzulli A., Puerini M., 2010. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 160 (1), 45–66. <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0465-7>.
- Rodkin M.V., Rundquist D.V., 2017. *Geofluidogeodynamics. Application to Seismology, Tectonics, and Processes of Ore and Oil Genesis*. Publishing House “Intellect”, Dolgoprudny, 288 p. (in Russian) [Родкин М.В., Рундквист Д.В. Гео-

- флюидогеодинамика. Приложение к сейсмологии, тектонике, процессам рудо- и нефтегенеза. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2017. 288 с.].
- Ruzhich V.V., 1977. Relationships between the parameters of ruptures and their practical application. In: M.M. Odintsov (Ed.), Mechanisms of formation of tectonic structures in East Siberia. Nauka, Novosibirsk, p. 41–48 (in Russian) [Ружич В.В. Зависимости между параметрами разрывных нарушений и их практическое применение // Механизмы формирования тектонических структур Восточной Сибири / Ред. М.М. Одинцов. Новосибирск: Наука, 1977. С. 41–48].
- Ruzhich V.V., 1989. Geological approach to the study of paleoearthquake sources. In: M.A. Sadovsky (Ed.), Experimental and digital methods in the physics of earthquake foci. Nauka, Moscow, p. 68–78 (in Russian) [Ружич В.В. Геологический подход к изучению очагов палеоземлетрясений // Экспериментальные и численные методы в физике очага землетрясения / Ред. М.А. Садовский. М.: Наука, 1989. С. 68–78].
- Ruzhich V.V., 1992. On the geological identification of paleofocal zones of strong earthquakes in areas of deep denudation sections. In: V.P. Solonenko (Ed.), Physical and seismogeological foundations for prediction of rock destruction. Nauka, Moscow, p. 10–14 (in Russian) [Ружич В.В. О геологическом выявлении палеоочаговых зон сильных землетрясений в местах глубоких денудационных срезов // Физические и сейсмогеологические основы прогнозирования разрушения горных пород / Ред. В.П. Солоненко. М.: Наука, 1992. С. 10–14].
- 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., Chernykh E.N., Savelieva V.B., Pavlov D.V., Ostapchuk A.A., 2015. Study of contact slip processes in the Primorsky fault zone. In: Dynamic processes in geospheres. IDG RAS, Moscow, p. 78–86 (in Russian) [Ружич В.В., Черных Е.Н., Савельева В.Б., Павлов Д.В., Остапчук А.А. Изучение процессов контактного скольжения в зоне Приморского разлома // Динамические процессы в геосферах. М.: ИДГ РАН, 2015. С. 78–86].
- Ruzhich V.V., Kocharyan G.G., 2017. On the structure and formation of earthquake sources in the faults located in the subsurface and deep levels of the crust. Part I. Subsurface level. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (4), 1021–1034 (in Russian) [Ружич В.В., Кочарян Г.Г. О строении и формировании очагов землетрясений в разломах на приповерхностном и глубинном уровне земной коры. Статья I. Приповерхностный уровень // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 1021–1034]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0330>.
- Ruzhich V.V., Melnikov A.I., Savelieva V.B., Ivanova L.A., Medvedev V.Ya., 2009. Pseudo-tachyllites as material evidence of the dynamics of displacements in deep fragments of fault zones. In: Faulting and seismicity in the lithosphere: Tectonophysical Concepts and Consequences. Proceedings of the All-Russia Conference (18–21 August 2009, Irkutsk). IEC SB RAS, Irkutsk, vol. 1. P. 94–96 (in Russian) [Ружич В.В., Мельников А.И., Савельева В.Б., Иванова Л.А., Медведев В.Я. Псевдотахилиты как вещественное свидетельство динамики смещений в глубинных фрагментах зон разломов // Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия: Материалы всероссийского совещания (18–21 августа 2009 г., г. Иркутск). Иркутск: ИЭК СО РАН, 2009. Т. 1. С. 94–96].
- Ruzhich V.V., Psakhie S.G., Chernykh E.N., Shilko E.V., Levina E.A., Ponomareva E.I., 2014. Physical modeling of seismic source generation in failure of fault asperities. *Physical Mesomechanics* 17 (4), 274–281. <https://doi.org/10.1134/S1029959914040043>.
- Ruzhich V.V., Psakhie S.G., Levina E.A., Dimaki A.V., Astafurov E.V., Shilko E.V., 2015. Similarity in seismogeodynamics on different scales. *AIP Conference Proceedings* 1683, 020197. <https://doi.org/10.1063/1.4932887>.
- Ruzhich V.V., Psakhie S.G., Levina E.A., Shilko E.V., Grigoriev A.S., 2017. Use of controlled dynamic impacts on hierarchically structured seismically hazardous faults for seismically safe relaxation of shear stresses. *AIP Conference Proceedings* 1909, 020184. <https://doi.org/10.1063/1.5013865>.
- Ruzhich V.V., Ryzanov G.V., 1977. About slickensides and the mechanism of their formation. In: M.M. Odintsov (Ed.), Mechanisms of formation of tectonic structures in East Siberia. Nauka, Novosibirsk, p. 105–108 (in Russian) [Ружич В.В., Рязанов Г.В. О зеркалах скольжения и механизме их образования // Механизмы формирования тектонических структур Восточной Сибири / Ред. М.М. Одинцов. Новосибирск: Наука, 1977. С. 105–108].
- Savage H.M., Kirkpatrick J.D., Mori J.J., Brodsky E.E., Ellsworth W.L., Carpenter B.M., Chen X., Cappa F., Kano Y., 2017. Scientific exploration of induced seismicity and stress (SEISMS). *Scientific Drilling* 23, 57–63. <https://doi.org/10.5194/sd-23-57-2017>.
- Savel'eva V.B., Travin A.V., Zyryanov A.S., 2003. The ^{40}Ar – ^{39}Ar dating of metasomatic rocks in deep fault zones of the marginal suture of the Siberian platform. *Doklady Earth Sciences* 391 (6), 862–865.
- Scholz C.H., 2006. The strength of the San Andreas fault: a critical analysis. In: R. Abercrombie, A. McGarr, G. Di Toro, H. Kanamori (Eds.), Earthquakes: radiated energy and the physics of faulting. Geophysical Monograph Series, vol. 170, p. 301–313. <https://doi.org/10.1029/170GM30>.
- Seminskii Zh.V., Seminskii K.Zh., 2004. Tectonophysical analysis of environments for localization of ore fields and deposits in fault zones of the Earth's crust. *Geology of Ore Deposits* 46 (4), 252–262.
- Seminsky K.Zh., 2014. Specialized mapping of crustal fault zones. Part 1: Basic theoretical concepts and principles. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (2), 445–467 (in Russian) [Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон

- земной коры. Статья 1: Теоретические основы и принципы // *Геодинамика и тектонофизика*. 2014. Т. 5. № 2. С. 445–467]. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0136>.
- Seminsky K.Zh., 2015. Specialized mapping of crustal fault zones. Part 2: Main stages and prospects. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (1), 1–43 (in Russian) [Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 2: Основные этапы и перспективы // *Геодинамика и тектонофизика*. 2015. Т. 6. № 1. С. 1–43]. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-1-0170>.
- Sherman S.I., 1977. Physical Regularities of Faulting in the Earth's Crust. Nauka, Novosibirsk, 102 p. (in Russian) [Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск: Наука, 1977. 102 с.].
- Sherman S.I., 2009. A tectonophysical model of a seismic zone: experience of development based on the example of the Baikal rift system. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 45 (11), 938–951. <https://doi.org/10.1134/S1069351309110020>.
- Sibson R.H., 1973. Interactions between temperature and pore fluid pressure during an earthquake faulting and a mechanism for partial or total stress relief. *Nature Physical Science* 243 (126), 66–68. <https://doi.org/10.1038/physci243066a0>.
- Sobolev G.A., Ruzhich V.V., Ivanova L.A., Mamalimov R.I., Shcherbakov I.P., 2015. A study of nanocrystals and the glide-plane mechanism. *Journal of Volcanology and Seismology* 9 (3), 151–161. <https://doi.org/10.1134/S0742046315030057>.
- Sobolev G.A., Vettegren V.I., Kireenkova S.M., Kulik V.B., Mamalimov R.I., Morozov Yu.A., Smulskaya A.I., Shcherbakov I.P., 2016. Nanocrystals in Rocks. GEOS, Moscow, 102 p. (in Russian) [Соболев Г.А., Веттегрень В.И., Кирееenkova С.М., Кулик В.Б., Мамалимов Р.И., Морозов Ю.А., Смольская А.И., Щербаков И.П. Нанокристаллы в горных породах. М.: ГЕОС, 2016. 102 с.].
- Sukhorukov V.P., 2007. Evolution of Rock Metamorphism in Collisional Suture of the 'Terrain – Continent' system in the Olkhon region (Western Pribaikalie). Brief PhD Thesis (Geology and Mineralogy). IGM SB RAS, Novosibirsk, 20 p. (in Russian) [Сухоруков В.П. Эволюция метаморфизма пород коллизионного шва системы «террейн – континент» в Ольхонском регионе (Западное Прибайкалье): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск: ИГМ СО РАН, 2007. 20 с.].
- Sukhorukov V.P., Travin A.V., Fedorovsky V.S., Yudin D.S., 2005. The age of shear deformations in the Ol'khon region, Western Cisbaikalia (from results of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating). *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 46 (5), 567–571.
- Thompson B.D., Young R.P., Lockner D.A., 2005. Observations of premonitory acoustic emission and slip nucleation during a stick slip experiment in smooth faulted Westerly granite. *Geophysical Research Letters* 32 (10), L10304. <https://doi.org/10.1029/2005GL022750>.
- Thompson B.D., Young R.P., Lockner D.A., 2009. Premonitory acoustic emissions and stick-slip in natural and smooth-faulted Westerly granite. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 114 (B2), B02205. <https://doi.org/10.1029/2008JB005753>.
- Travin A.V., 2016. Thermochronology of Subduction-Collision Events in Central Asia. Brief PhD Thesis (Geology and Mineralogy). Novosibirsk, 54 p. (in Russian) [Травин А.В. Термохронология субдукционно-коллизионных событий Центральной Азии: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2016. 54 с.].
- Travin A.V., Vladimirov A.G., Polyansky O.P., 2013. The indicator role of thermochronology in the interpretation of geodynamic conditions for formation of granitoid batholiths. In: *Geodynamics and minerageny of Northeast Asia. Proceedings of the 4th All-Russia Scientific and Practical Conference, dedicated to the 40th anniversary of the Geological Institute of SB RAS (26–31 August 2013, Ulan-Ude)*. Ekos, Ulan-Ude, p. 355–359 (in Russian) [Травин А.В., Владимиров А.Г., Полянский О.П. Индикаторная роль термохронологии при интерпретации геодинамических условий формирования гранитоидных батолитов // *Геодинамика и минерагения Северо-Восточной Азии: Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 40-летию Геологического института СО РАН (26–31 августа 2013 г., г. Улан-Удэ)*. Улан-Удэ: Экос, 2013. С. 355–359].
- Zamarayev S.M., Vasiliev E.P., Mazukabzov A.M., Ryazanov G.V., Ruzhich V.V., 1979. The Ratio of the Ancient and Cenozoic Structures in the Baikal Rift Zone. Nauka, Novosibirsk, 125 p. (in Russian) [Замараев С.М., Васильев Е.П., Мазукабзов А.М., Рязанов Г.В., Ружич В.В. Соотношение древней и кайнозойской структур в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Наука, 1979. 125 с.].
- Zamarayev S.M., Ruzhich V.V., 1978. On relationships between the Baikal rift and ancient structures. *Tectonophysics* 45 (1), 41–47. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(78\)90222-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(78)90222-6).
- Zhurkov S.N., 1968. Kinetic concept of the strength of solids. *Vestnik AN SSSR* (3), P. 46–52 (in Russian) [Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел // *Вестник АН СССР*. 1968. № 3. С. 46–52].
- Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Petrov V.A., 1977. To the problem of forecasting the destruction of rocks. *Fizika Zemli* (6), 11–18 (in Russian) [Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. К вопросу о прогнозировании разрушения горных пород // *Физика Земли*. 1977. № 6. С. 11–18].



Валерий Васильевич Ружич, докт. геол.-мин. наук, г.н.с.
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

✉ e-mail: ruzhich@crust.irk.ru
ORCID ID <https://orcid.org/0000-0001-6170-2397>

Valery V. Ruzhich, Doctor of Geology and Mineralogy, Chief Researcher
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia



Геворг Грантович Кочарян, докт. физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией
Институт динамики геосфер РАН
119334, Москва, Ленинский проспект, 38, корпус 1, Россия

e-mail: gevorgk@idg.chph.ras.ru, gevorgkidg@mail.ru

Gevorg G. Kocharyan, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of Laboratory
Institute of Geosphere Dynamics of RAS
38 Leninsky prospect, Building 1, Moscow 119334, Russia



Валентина Борисовна Савельева, канд. геол.-мин. наук, с.н.с.
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

e-mail: vsavel@crust.irk.ru

Valentina B. Savelieva, Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia



Алексей Валентинович Травин, докт. геол.-мин. наук, зав. лабораторией
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия
Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия
Новосибирский государственный технический университет
630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Россия
Томский государственный университет
634050, Томск, просп. Ленина, 50, Россия

e-mail: travin@igm.nsc.ru
ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-5640-4560>

Aleksei V. Travin, Doctor of Geology and Mineralogy, Head of Laboratory
V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptyug ave., Novosibirsk 630090, Russia
Novosibirsk State University
2 Pirogov street, Novosibirsk 630090, Russia
Novosibirsk State Technical University
20 Karl Marx ave., Novosibirsk 630073, Russia
Tomsk State University
50 Lenin ave., Tomsk 634050, Russia