



STUDY, FORECAST AND CONTROLLED SEISMIC HAZARD REDUCTION IN THE IDENTIFIED SEGMENTS OF THE MAIN FAULTS BY CYCLIC INJECTION OF FLUID THROUGH DEEP MULTI-BRANCH DIRECTIONALLY INCLINED WELLS

V.V. Ruzhich¹✉, A.G. Vakhromeev^{1,2,3}, S.A. Sverkunov^{1,2,3,4}, V.M. Ivanishin^{2,3}, R.H. Akchurin^{2,3}, E.A. Levina¹

¹ Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

² Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St, Irkutsk 664074, Russia

³ Irkutsk Branch RN-Drilling LLC, 257/909 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

⁴ Irkutsk Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 134 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

ABSTRACT. The methods developed by the world community to date to withstand strong natural and induced destructive earthquakes do not effectively reduce material losses and the number of victims. The authors propose for discussion an integrated approach to solving the problem of ensuring seismic safety, based on the use of new important information about the geological conditions for earthquake generation. This involved the use of results of numerical and physical modeling, as well as physical full-scale experiments in the natural fault areas. The paper analyzes the petrophysical conditions of deep-seated frictional processes in coseismic faults, revealed through detailed studies of the fragments of paleo-earthquake centers that became accessible after their exhumation from seismic-focal depths of the Earth's crust. The collected information allowed the authors to clarify with a high degree of certainty the origin and occurrence of seismic motions. This paper presents briefly the results of the medium-term forecast of earthquakes with $M \geq 5.0$ as applied to the seismodynamic regime of the Baikal rift zone. The forecast emphasizes the detection of places for 1–11-year earthquake generation cycles.

A comprehensive analysis of the collected information made it possible to substantiate the conclusion about an opportunity to prevent earthquake damage by using hydrodynamic damping of seismically hazardous fault segments. In the last section, consideration is being given to one of the most promising methods of such man-made impacts, which uses modern technological advances in drilling deep multi-branch and directionally inclined wells with horizontal deviation. The paper discusses the techniques that make it possible to prevent episodes of unexpected reactivation of fault segments in the form of excitation of earthquakes with $M \geq 6.0$. Attention is drawn to conducting tests at selected sites in order to improve the technology as part of the approach to earthquake damping.

KEYWORDS: seismic safety; full-scale experiments on faults; physical modeling; medium-term forecast; deep multi-branch horizontal wells; wave injection of solutions; earthquake damping.

FUNDING: The work was carried out as part of grant 075-15-2021-682. The work involved using the equipment of the Shared Research Facilities "Geodynamics and Geochronology" of the Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch RAS. The paper has been prepared in accordance with the assignment of Basic Science Project 0346-2019-0007 of IEC SB RAS "Tectonophysics of Recent Geodynamic Processes in the Lithosphere of Central Asia as a Basis for Predicting Natural Disasters" and as part of the state assignment of ISPMS SB RAS, project III.23.1.4.

RESEARCH ARTICLE

Received: April 20, 2021

Revised: April 6, 2022

Accepted: April 13, 2022

Correspondence: Valeryi V. Ruzhich, ruzhich@crust.ru

FOR CITATION: Ruzhich V.V., Vakhromeev A.G., Sverkunov S.A., Ivanishin V.M., Akchurin R.H., Levina E.A., 2022. Study, Forecast and Controlled Seismic Hazard Reduction in the Identified Segments of the Main Faults by Cyclic Injection of Fluid through Deep Multi-Branch Directionally Inclined Wells. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (3), 0644. doi:10.5800/GT-2022-13-3-0644

ИЗУЧЕНИЕ, ПРОГНОЗ И УПРАВЛЯЕМОЕ СНИЖЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ В ВЫЯВЛЕННЫХ СЕКМЕНТАХ МАГИСТРАЛЬНЫХ РАЗЛОМОВ ЦИКЛИЧЕСКИМИ ЗАКАЧКАМИ В НИХ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ГЛУБОКИЕ МНОГОЗАБОЙНЫЕ НАКЛОННО НАПРАВЛЕННЫЕ СКВАЖИНЫ

В.В. Ружич¹, А.Г. Вахромеев^{1,2,3}, С.А. Сверкунов^{1,2,3,4}, В.М. Иванишин^{2,3}, Р.Х. Акчурун^{2,3}, Е.А. Левина¹

¹ Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

³ Иркутский филиал ООО «РН-Бурение», 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 257/909, Россия

⁴ Иркутский научный центр СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия

АННОТАЦИЯ. Разработанные мировым сообществом к настоящему времени способы противостояния сильным природным и наведенным разрушительным землетрясениям не позволяют эффективно снижать материальные потери и количество жертв. Авторами предложен для обсуждения комплексный подход к решению проблемы обеспечения сейсмической безопасности, основанный на использовании новых важных сведений о геологических условиях возникновения очагов землетрясений. Для этого привлекались полученные данные с использованием результатов численного и физического моделирования, а также физических натуральных экспериментов на участках реальных разломов. В работе анализировались петрофизические условия глубинных фрикционных процессов в косейсмических разрывных нарушениях, выявленные при детальном изучении фрагментов палеоочагов землетрясений, ставших доступными после их эксгумации с сейсмофокальных глубин земной коры. Собранные сведения позволили авторам с возросшей определенностью выяснять сеймотектонические условия подготовки и возникновения источников генерации сейсмических колебаний. В кратком виде представлены результаты исследований по разработанному методу среднесрочного прогноза опасных землетрясений с $M \geq 5.0$ применительно к сейсμοдинамическому режиму Байкальской рифтовой зоны. В прогнозе акцент сделан на обнаружение мест подготовки очагов землетрясений с периодом подготовки 1–11 лет.

Комплексный анализ собранных сведений позволил обосновать вывод о возможности демпфирования разрушительных последствий готовящихся землетрясений путем применения техногенных гидродинамических воздействий на выявленные сейсмоопасные сегменты разломов. В последнем разделе рассмотрен один из наиболее перспективных способов подобных техногенных воздействий, в котором используются современные достижения в технологии бурения глубоких многозабойных и наклонно направленных скважин с горизонтальными ответвлениями. Обсуждаются технические приемы, позволяющие исключать эпизоды непреднамеренной реактивации участков разломов в виде возбуждения высокоопасных землетрясений с $M \geq 6.0$. Обращается внимание на проведение тестовых испытаний на выбранных полигонах с целью совершенствования технологии в рамках подхода к демпфированию разрушительных последствий землетрясений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сейсмическая безопасность; натурные эксперименты на разломах; физическое моделирование; среднесрочный прогноз; глубокие многозабойные скважины с горизонтальными стволами; волновые закачки растворов; демпфирование землетрясений

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2021-682. В работе задействовались оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН. Статья подготовлена в соответствии с заданием базового научного проекта № 0346-2019-0007 ИЗК СО РАН «Тектонофизика современных геодинамических процессов в литосфере Центральной Азии как основа прогноза чрезвычайных ситуаций природного характера» и в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект III.23.1.4.

1. ВВЕДЕНИЕ

Материальные, экологические и человеческие потери от сильных и катастрофических землетрясений в настоящее время продолжают возрастать в связи с увеличением концентрации населения в мегаполисах, созданием экологически опасных технических производств и подземных хранилищ углеводородов, длительным и глубоким проникновением горных выработок [Panza et al., 2014]. Усугубляется проблема более эффективной минимизации негативных последствий

землетрясений, актуальная для всех сейсмоопасных стран мира, включая Российскую Федерацию.

Одна из главных причин возникшей ситуации – отсутствие необходимой технической базы для сбора и обработки новых сведений о труднодоступных трибофизических и геомеханических параметрах подготовки очагов разрушительных землетрясений. Это также препятствует разработке новых моделей подготовки очагов землетрясений, более адекватных природным аналогам. Например, в пределах Байкальской рифтовой

зоны (БРЗ) очаги зарождаются в интервале глубин земной коры порядка 5–30 км, где при температуре $T=300\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$, давлении $P=2\text{--}4\text{ Кб}$ распространены разнообразные по составу массивы горных пород, а глубинные сегменты активных разломов различаются строением, шероховатостью и степенью активности, насыщены высокоактивными флюидами разного состава. Подобную информацию невозможно получить только с привлечением лабораторных экспериментов или самых изощренных способов математической обработки ограниченных по объему и точности сейсмологических данных [Ruzhich, 1992, 2016; Kocharyan, 2016, 2021; Ruzhich, Kocharyan, 2017]. Для этого исследователям необходимо в большей мере использовать геолого-геофизические методы для распознавания устройства очагов готовящихся землетрясений и геологических условий их подготовки, а также осуществлять проведение крупномасштабных экспериментов на реальных сегментах активных разломов. Отчасти дефицит подобной информации в последние десятилетия уже восполняется средствами детального геолого-геофизического изучения эксгумированных сегментов разломов, выведенных после многокилометровой денудации на земную поверхность и ставших доступными для прямого визуального осмотра, в частности на территории Прибайкалья и Монголии.

В России при решении проблем обеспечения сейсмической безопасности акцент сделан главным образом на выявлении зон вероятных опасных землетрясений (ВОЗ) в рамках общего сейсмического районирования (ОСР) [Shebalin, 1968; Gorshkov, Soloviev, 2021], распознавании сейсмоопасных территорий в Алтае-Саяно-Байкальском регионе на основе морфоструктурного районирования [Kossobokov, Soloviev, 2018]. Однако отсутствие необходимой информации о длительности периодов ожидания и достаточно обоснованных оценок энергетического потенциала приводит к неопределенностям в построении надежных карт ОСР [Shoigu et al., 1992]. В итоге обеспечение сейсдобезопасности пока ограничивается мерами, направленными на ликвидацию разрушительных последствий землетрясений. В основном выявление зон ВОЗ осуществляется средствами использования картографических материалов для выделения многограновых разломных пересечений. За пределами внимания остаются многие актуальные вопросы изучения глубинных сейсмогеологических процессов при формировании очагов землетрясений в зонах ВОЗ, а также вопросы, касающиеся оценок длительности периодов их ожидания, которые могут составлять многие сотни и даже тысячи лет в соответствии с законом повторяемости.

В мировой практике большую озабоченность вызывает масштабная разработка нефтяных и газоконденсатных месторождений, часто сопровождающаяся наведенными землетрясениями из-за используемого режима быстрого нагнетания больших объемов растворов в глубокие скважины, сочетаемого с применением метода гидравлического разрыва пласта (ГРП)

[Mazzoldi et al., 2012; Rinaldi, Rutqvist, 2019]. Установлено, что при ГРП инициируется косейсмическое смещение, которое становится причиной возникновения источников опасной наведенной сейсмичности даже в тектонически спокойных регионах Китая [Lei et al., 2013], центральных и восточных районах США [Ellsworth, Malin, 2011]. По этой теме в мировом научном сообществе в течение многих лет ведутся оживленные дискуссии, касающиеся оценок сейсмического риска при разработках сланцевых газонефтяных месторождений и сооружении объемных подземных хранилищ углеводородов. Остается открытым вопрос о том, насколько неизбежны такие риски [Mighani et al., 2018; Rinaldi, Rutqvist, 2019]. Ответы на него ведут к необходимости сбора и привлечения новых сведений об эволюции геолого-геофизических процессов на разных глубинах, способствующих спонтанному возникновению косейсмического скольжения в разрывных нарушениях различного строения, размеров и ориентации в поле тектонических напряжений.

В последующих разделах авторами анализируются новые сведения, касающиеся выяснения геомеханических условий подготовки землетрясений, полученные при междисциплинарном подходе к проведению натуральных экспериментов, физическому и численному моделированию, совершенствованию методов среднесрочного прогноза. В заключительном разделе в кратком виде дается обоснование технологии геомеханических воздействий на выявленные потенциально подготовленные сегменты разломов, акцентированных на применении бурения наклонно направленных стволов глубоких скважин в сочетании с волновыми периодическими закачками растворов. Также в кратком виде обсуждается технология демпфирования разрушительных последствий путем выбора оптимального режима волновых закачек растворов в сейсмоопасные сегменты разломов, выявленные средствами средне- и долгосрочного прогноза очагов землетрясений.

2. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

2.1. Натурные эксперименты на разломах

В течение двух десятилетий в районе истока р. Ангара на полигоне в пос. Листвянка планомерно проводились натурные эксперименты с техногенными воздействиями на фрагмент Ангарского разлома в виде серии ударов тяжелым копром, закачек растворов через пробуренные скважины колонкового ряда в сочетании со слабыми взрывами (рис. 1). Целью исследований являлось изучение откликов разлома на различные виды техногенных воздействий и оценка возможностей управления режимами смещений. В исследованиях на данном полигоне принимали участие научные коллективы Института земной коры СО РАН (г. Иркутск), Института физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск), Института динамики геосфер РАН (г. Москва) и Берлинского технического

университета. Совместными усилиями было подготовлено техническое обеспечение в виде создания оригинальной высокоточной аппаратуры, а также разработаны новые методические подходы для более успешного решения задач, связанных с обеспечением сейсмической безопасности.

Следует отметить, что при штормовом воздействии на участок разлома в сочетании с дождевым насыщением зоны разлома фиксировались возросшие скорости скольжения (~10 мкм/с), что на порядок больше

зарегистрированных здесь же значений среднегодовой скорости тектонического крива. Таким образом, массивный телескоп, установленный в зоне разлома, при эпизодических динамических воздействиях выполнял функцию вибратора с частотой 1–4 Гц, инициируя умеренное возрастание микросейсмической активности. Важно отметить, что в данном природном явлении реализуется совместное действие двух факторов: обводнения разлома и низкочастотного вибрационного воздействия. Они способствовали ускорению

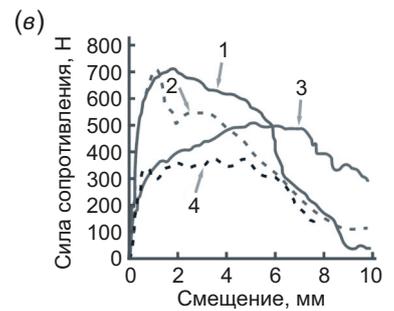
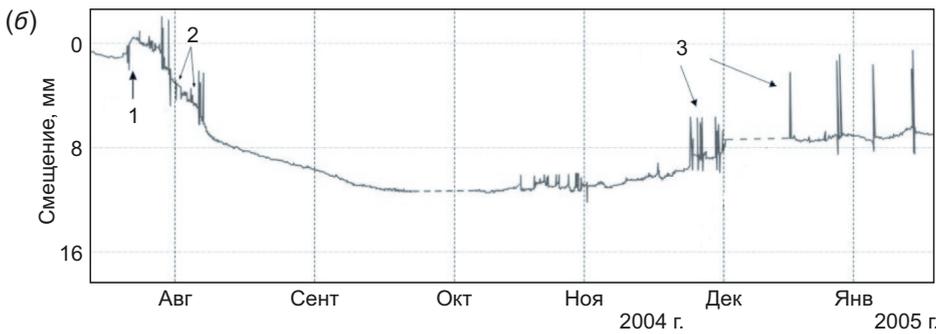


Рис. 1. Полигон для испытаний и размещения регистрирующей аппаратуры в пос. Листвянка.

(а) – устройство полигона для испытаний и размещения регистрирующей аппаратуры; (б) – величина инициированных смещений по разлому после комплексных воздействий: 1 – вибрации при бурении и закачке бурового раствора в разлом, 2 – трех взрывов в обводненной скважине с весовыми зарядами взрывчатого вещества (ВВ) 0.1–0.3 кг, 3 – ускоренных возвратных деформаций в режиме ползучести; (в) – результаты численного моделирования изменения силы сопротивления в процессе смещений в разломе: 1 – в сухом разломе, 2 – в сухом разломе с вибрациями, 3 – в обводненном разломе, 4 – в обводненном разломе и с вибрациями.

Fig. 1. Recording-equipment test site in Listvyanka Settlement.

(а) – structure of recording-equipment test site; (б) – amount of fault displacements induced by the integrated effects: 1 – vibrations from drilling and fluid injection into the fault, 2 – three explosions with 0.1 to 0.3 kg explosive charges detonated in a flooded well, 3 – high-rate reciprocal creep displacements; (в) – numerical modeling results of the variation in resisting force due to fault displacements: 1 – in a dry fault, 2 – in a dry fault with vibrations, 3 – in a flooded fault, 4 – in a flooded fault with vibrations.

релаксационных процессов в сейсмобезопасном режиме ускоренной ползучести, которая проявилась при возвратных смещениях крыльев разлома через три месяца в сочетании с всплесками быстрых микросмещений [Psakhie et al., 2005]. Эти результаты легли в основу методологии осуществления последующих испытаний с применением обводнения зоны разлома через специально пробуренные скважины глубиной 11–25 м (рис. 2) и дополнительным проведением низкоамплитудных воздействий (серии ударов копром) для идентификации различий в уровне сдвиговых напряжений до, во время и после испытаний. Также применялось проведение взрывных воздействий на кристаллический породный массив в виде взрывов с небольшими зарядами (0.1–0.3 кг ВВ) на дне обводненных или сухих скважин.

Проведенные испытания показали, что введение жидкости в «сухой» разлом с высоким уровнем внутренних напряжений позволяет инициировать тангенциальное смещение в участке разлома в режиме ускоренного крипа. Было установлено, что величина и характерная скорость смещений обуславливаются уровнем внутренних напряжений, степенью обводнения и спецификой внутреннего строения самого разлома, в частности шероховатостью его плоскости скольжения [Psakhie et al., 2014]. Также показано, что естественный криповый режим смещений на стометровом участке Ангарского разлома за несколько актов виброимпульсных воздействий, в сочетании с закачками

воды, может быть переведен в фазу ускоренного крипа и, соответственно, в режим ускоренной релаксации локальных сдвиговых напряжений [Astafurov et al., 2008]. В последующие 14 лет наблюдений на данном участке разлома по-прежнему сохранялся режим сниженной активности, что свидетельствовало о достигнутом эффекте плавной релаксации деформаций в породном массиве на участке активного разлома. Рассмотренным способом удалось показать, что проведение закачек в разлом водных растворов через неглубокие вертикальные скважины и применение слабых кумулятивных взрывов или вибровоздействий позволяют плавно уменьшить сдвиговое сопротивление в участках сейсмоактивных разломов и в режиме инициированной ускоренной ползучести снизить на многие последующие годы сейсмическую активность [Psakhie et al., 2006]. В 2006 г. на разработанный способ сейсмобезопасной релаксационной «разрядки» исследуемого участка разлома был впервые получен патент Российской Федерации [Psakhie et al., 2006]. Позднее в России другие научные группы запатентовали иные способы управляемых техногенных воздействий, которые были также ориентированы на возможную контролируемую разгрузку породных массивов и зон разломов (например [Mirzoev et al., 2009; и др.]).

Наряду с физическими экспериментами и средствами численного моделирования было разработано и теоретическое обоснование способа эффективного снижения энергии и последствий сильных землетрясений

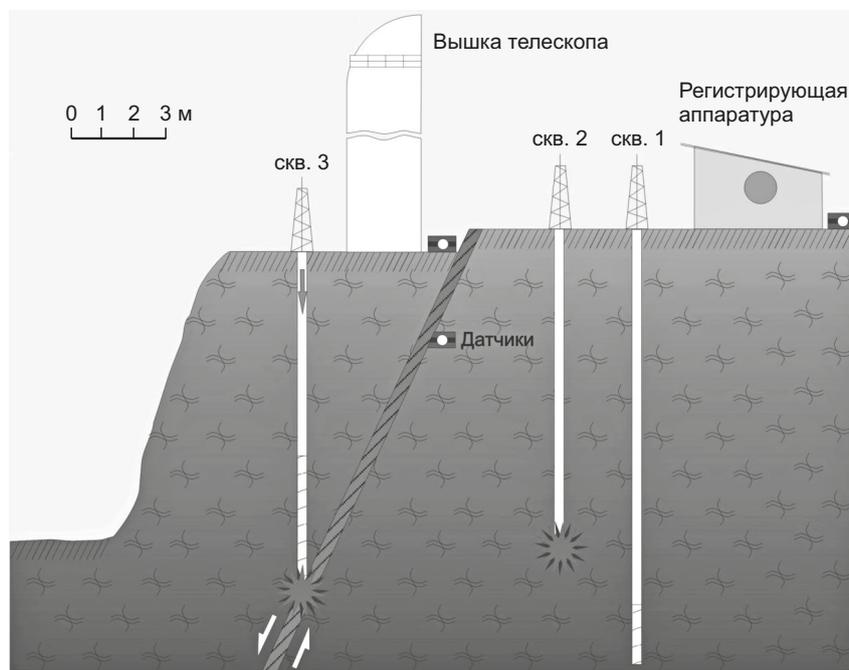


Рис. 2. Вертикальный разрез участка разлома с тремя скважинами для закачки водных растворов и размещения зарядов взрывчатого вещества, датчики измерения деформаций и сейсмических сигналов, а также уменьшенная башня телескопа, оказывающая вибрационные воздействия на разлом при штормовых ветрах.

Fig. 2. A vertical cross-section of the fault segment with three wells for injecting water and placing explosive charge therein, devices for measuring deformations and seismic signals, and a small-scale version of the telescope tower exerting an effect of vibration on the fault during high winds.

путем техногенной стимуляции серии многочисленных, но небольших по энергии сейсмических событий посредством переключения режима высокоскоростного косейсмического скольжения в режим ускоренной, но безопасной ползучести [Filippov et al., 2006]. Предложенная авторами указанной работы модель описывает основные характерные особенности поведения геосреды, в частности статистику землетрясений (законы Гутенберга-Рихтера и Омори). Модель показывает, что локальные воздействия с относительно низкой энергией позволяют переключать динамику системы геологических блоков из режима прерывистого скольжения в режим ползучести. Следовательно, таким способом возможно изменять режим выделения сейсмической энергии путем применения серии локальных периодических и относительно малоэнергетических воздействий, т.е. осуществлять «подавление» сильных землетрясений. Этими авторами также выведена и изучена модифицированная версия модели Берриджа – Кнопфа, включающая простую модель трения, которая описывает возникающие моменты локального снижения скорости трения между движущимися блоками и увеличения статического трения во время периодов залипания. Именно сходные трибологические явления наблюдаются в режимах сегментируемых участков разломов, о чем будет сказано ниже.

2.2. Результаты изучения глубинных условий формирования очагов землетрясений

Для выяснения геологических условий подготовки очагов землетрясений, происходящих на сейсмофокальных глубинах земной коры, участниками исследований

проводились полевые геоструктурные и петрофизические работы, ориентированные на установление реальных тектонофизических процессов, происходивших ранее в эксгумированных участках зон активных долгоживущих разломов в Прибайкалье и Монголии. Часть полученных результатов исследований детально рассмотрена в ряде работ, например в [Ruzhich, Kocharyan, 2017; Ruzhich et al., 2019c]. В качестве одного из наглядных примеров, иллюстрирующих сеймотектонические процессы в глубинных участках разломов, на рис. 3, а, б, представлен аншлиф образца вулканической породы (андезита) со стекловатой пленкой на поверхности зеркала скольжения, возникшей при фрикционном разогреве и плавлении породы. Образец был отобран В.В. Ружичем в некогда выведенном на поверхность глубинном сегменте очага древнего землетрясения, произошедшего многие десятки миллионов лет назад на юге Монголии. Именно в данном сегменте Долиноозерского разлома 4.12.1957 г. возник очаг разрушительного Гоби-Алтайского землетрясения ($M=8.1$), а на земной поверхности проявилась современная сейсмодислокация протяженностью 275 км [Florensov, Solonenko, 1963; Solonenko, 1960].

При детальном петрофизическом изучении минерализации на поверхности образца зеркала была выявлена тончайшая пленка стекла, что свидетельствует о проявлении признаков косейсмического скольжения, при котором фрикционный разогрев достигал температуры плавления андезитовой породы. Подобные признаки выявлялись и детально изучались на многих других образцах зеркал скольжения из разных участков эксгумированных разломов, что позволило

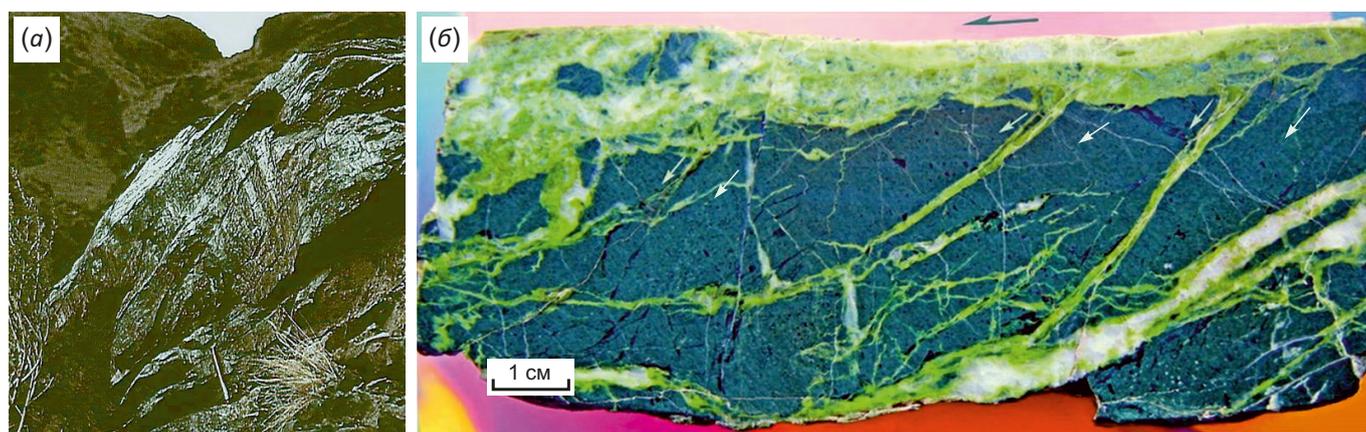


Рис. 3. Зеркало скольжения (а) и его аншлиф на цветной подложке (б), взятые в сегменте Долиноозерского разлома, рассматриваемые как небольшой фрагмент палеоочага древнего землетрясения.

На аншлифе андезитовой вулканической породы в многократно уменьшенном виде видны элементы строения косейсмического разрыва и следы минерализации, оставшиеся в разрыве после инъекции флюидов в возникшие полости. Также видны наклонные оперяющие разрывы и обломки неровностей горной породы, разрушенные при быстрых смещениях. Стрелками указано направление скольжения по зеркалу (вверху) и в оперяющих трещинах.

Fig. 3. A slickenside (a) and its color-based polished thin section (b) from the Dolinozersk fault segment considered as a small fragment of a paleoearthquake source.

The polished thin section of andesite exhibits a small-scale version of structural elements of coseismic fault and evidence of mineralization left by fluid injection in the cavities emerged therein. There is also evidence of feathering faults with inclination and fragments of rocks decomposed during rapid displacements. The arrows show the movement on slickenside (on the top) and in feathering faults.

существенным образом приблизиться к восстановлению тектонофизических условий возникновения косейсмических смещений в глубинных участках разломов. В рассматриваемом контексте данного сообщения стоит обратить внимание на проявления признаков глубинной высоконапорной гидравлической инъекции флюидов в древнем очаге землетрясения на глубинах около 8–10 км, где проявляются термодинамические условия, соответствующие зеленосланцевой фации метаморфизма [Ruzhich et al., 2018]. Они сохранились вследствие осаждения из горячего флюида продуктов кварц-эпидотовой минерализации в образующиеся при скольжении полости косейсмического разрыва. Также видны включения обломков андезитовой вулканической породы, образовавшиеся при быстром скольжении в результате динамического разрушения неровностей. Согласно известным представлениям, при возникновении в ненарушенной горной породе новых оперяющих разрывов происходит генерация пакетов сейсмических импульсов. На основании имеющихся сведений о явлениях самоподобия в строении и механизмах подготовки очагов землетрясений в геологическом понимании [Ruzhich, 1997; Sobolev et al., 2015] данный образец рассматривается нами как упрощенная модель строения микроочагов слабых землетрясений.

В Прибайкалье также фиксировались подобные примеры инъекции флюидов в местах изучения эксгумированных сегментов краевого шва Сибирского кратона. Такие примеры характеризуют существовавшие в далекие прошлые эпохи условия сочетания деструктивного и флюидного режима в глубинных сейсмогенных участках косейсмических разрывов, влияющие на режимы фрикционного скольжения и генерацию землетрясений [Ruzhich, Kocharyan, 2017]. Подобные условия с учетом высоких температур и давлений невозможно детально воспроизвести в лабораториях. Отсюда следует вывод о необходимости проведения полевых исследований для уточнения параметров глубинных петрофизических условий подготовки очагов землетрясений, которые следует учитывать при численном моделировании и при создании новых моделей очагов [Kocharyan, 2016; Kocharyan, Kishkina, 2020; Kocharyan et al., 2021]. Также неопределимую роль играют и экспериментальные данные, которые получены в процессе первичного вскрытия бурением отдельных сегментов напряженной разломной зоны на достижимых глубинах в 3–7 тыс. м.

2.3. О сейсмотектонической сегментации разломов

В настоящее время общепризнано, что в протяженных разломных зонах наблюдается сегментация в виде чередующихся по простиранию активных, пассивных и переходных участков [Ulomov, 1998; Turcotte, 1992]. Природа возникновения наблюдаемой сегментации в разломах объясняется в большей части случаев контактным взаимодействием крыльев разломов, имеющих неровности разных масштабов и геометрии в

плоскостях скольжения. На отдельных участках разломов при взаимодействии крупных неровностей скольжение может замедлиться или остановиться и в сейсмическом режиме, соответственно, возникнет эффект затишья, а в структуре сейсмического поля появится сейсмическая брешь. Подобные эффекты сегментирования изучались нами в натуральных экспериментах при скольжении блока по участку плоскости Ангарского разлома [Ostapchuk et al., 2019]. При описании разломов подобные сегменты принято идентифицировать как «запертые». Они характеризуются как потенциально сейсмоопасные, поскольку в смежных с разломами породных массивах начинается накопление упругой энергии. В смежных участках зон разломов фиксируются два других типа сегментов: сейсмически активные в настоящее время и сегменты с переходным режимом. С позиций трибологии наиболее интенсивное контактное механическое взаимодействие в зонах сейсмоактивных разломов осуществляется именно на крупных неровностях, где эпизодически возникают явления фрикционного «залипания», которые можно рассматривать как возможный признак подготовки очагов очередных опасных землетрясений. В связи с этим сегменты с переходным режимом, в которых наблюдается сейсмическая брешь, а на ее границе за последние месяцы – первые годы появляются признаки возрастания сейсмической и деформационной активности, представляют наибольший интерес для средне- и долгосрочного прогноза при выявлении мест подготовки очагов сильных землетрясений. В таком случае, с учетом анализа режимов предшоковой активизации и наличия фазы затишья в виде наблюдаемой сейсмической бреши в сегменте разлома, появляется возможность не только выявлять районы подготовки будущих опасных очагов землетрясений, но и оценивать в значениях магнитуды их сейсмический потенциал, исходя из выявленных статистически обоснованных соотношений параметров M/L , где M – возможная магнитуда, L – длина разрыва [Leonard, 2010].

2.4. Методический подход к распознаванию сейсмоопасных сегментов разломов при среднесрочном прогнозе землетрясений

Изучение сейсмического режима в Байкальской рифтовой зоне и оценка трех необходимых базовых параметров прогноза землетрясений («М» – место, «Т» – время, «Е» – энергия) осуществлялись путем анализа каталога землетрясений, представляемого Байкальским филиалом Единой геофизической службы РАН (БФ ФИЦ ЕГС РАН) за период 1950–2021 гг. Используемые ниже значения магнитуд при необходимости были получены пересчетом из энергетических классов по формулам, указанным на сайте БФ ФИЦ ЕГС РАН (<http://www.seis-bykl.ru>). При анализе условий подготовки сильных землетрясений использовался каталог исторических землетрясений в пределах БРЗ, представленный в работе [New Catalog..., 1977]. Для анализа сейсмического режима при подготовке опасных землетрясений была

разработана специализированная ГИС «Prediction» [Ruzhich, 1997; Levina, 2011, 2016; Ruzhich et al., 2011]. С целью контроля результатов прогноза и совершенствования практической значимости оценок возникающей сейсмической опасности начиная с 2001 г. в отдел мониторинга МЧС Иркутской области от Института земной коры регулярно передаются оперативные сводки с указанием местоположения потенциальных очагов опасных землетрясений с $K \geq 13$ в пределах БРЗ на полугодовые, годовые и полуторагодовые интервалы ожидания. В рамках мониторинга ведется постоянное слежение за изменениями сейсмической обстановки как в пределах всей территории БРЗ, так и более детально на территории трех ее основных геоструктурных сегментов: на юго-западном и северо-восточном флангах и в центральной области, в которую включаются районы Байкальской и Баргузинской рифтовых впадин и их горного обрамления [Ruzhich, 1997]. Многолетний мониторинг сейсмического режима привел к весьма значимому выводу о том, что в пределах БРЗ эпицентры произошедших ощутимых и сильных землетрясений в большинстве случаев возникали в районах сейсмических брешей или на небольшом удалении от их границ, на расстоянии 15–25 км. Этот ранее полученный результат согласуется с вышерассмотренными представлениями о явлениях сегментации разломов. Полученные в предшествующие годы оценки исполнения средне- и долгосрочного прогноза землетрясений по параметру «М» составили 71.4 % [Ponomareva et al., 2014]. Позднее, при проведении физического моделирования, на участках разломов изучался механизм формирования источников излучения пакетов сейсмических импульсов [Ostapchuk et al., 2019]. В итоге, с использованием этих сведений возникло понимание того, что сейсмический режим в зонах разломов и в масштабах всей БРЗ, формирующийся за несколько лет или десятилетий до моментов сильных и очень сильных землетрясений, содержит важную информацию об их подготовке. Таким образом, для выявления в районах готовящихся очагов опасных землетрясений с $M \geq 6.0$ предвестниками могут служить наблюдаемые в отдельных сегментах разломов БРЗ сейсмические брешы, на окраинах которых появляются признаки нарастающей предшоковой сейсмической активизации. С позиций геомеханики подобная ситуация может интерпретироваться как приближение момента косейсмического вспарывания прочностного барьера в одном из сегментов магистрального разлома, например такого, как Главный Саянский. Два данных предвестника: энергия толчков предшоковой активизации и длительность стадии сейсмического затишья после нее – могут быть представлены в виде двухстадийной феноменологической модели подготовки землетрясений, возникающих в результате очередного акта динамического разрушения крупных неровностей в плоскостях скольжения разломов. Применение двухстадийной модели к специфическим условиям рифтогенной деструкции земной

коры в БРЗ позволяет внести важный вклад в среднесрочный прогноз местных опасных землетрясений с $K \geq 13$ ($M \geq 5.0$).

В первом приближении этот подход дает возможность оценивать два важных параметра: время реализации T , т.е. возможную длительность периода ожидания опасного сейсмического события, а также его энергию в энергетических классах K_3 . Ниже представлены полученные при ретроспективном анализе сейсмического режима в БРЗ средствами ГИС два уравнения для оценок K_3 – энергии и « T » – времени ожидания:

$$K_3 = 0.12K_\phi^2 - 2.5K_\phi + 26.1, R = 0.68 (0.11), \quad (1)$$

где K_3 – энергия ожидаемого главного события, K_ϕ – энергия максимального форшока, R – коэффициент корреляции и его ошибка;

$$T = 8^{-10} \text{Lg}(E)^{8.4}, R = 0.64 (0.12), \quad (2)$$

где E – энергия ожидаемого землетрясения, T – длительность ожидания в сутках, R – коэффициент корреляции и его ошибка.

Как пример реализации среднесрочного прогноза на рис. 4 показана карта расположения предполагаемых мест готовящихся очагов землетрясений с энергетическим классом $K \geq 13$ ($M \geq 5.0$), которая официально была отправлена 18 сентября 2019 г. в сводке для МЧС Иркутской области. Расчеты проводились с учетом вероятной энергии прогнозируемого события, определяемой при комплексном анализе данных, полученных средствами разработанной ГИС. В этих сведениях содержится информация о наблюдаемых проявлениях сейсмических затиший и предшоковой активизации, вариациях значений графиков повторяемости [Ruzhich, 1997; Ponomareva et al., 2014; Ruzhich et al., 2019a, 2019b, 2019c].

На карту вынесены эпицентры землетрясений с $K \geq 13$, возникших за период 18.09.2019 г. – 20.06.2022 г. в соответствии с присвоенными названиями. Согласно представленной карте, за прошедший временной интервал в пределы изосейст со значениями $I \geq 5.0$ попало 85 % эпицентров произошедших землетрясений с классом $K \geq 13$ ($M \geq 5.0$), в том числе очень сильные 6–7-балльные афтершоки Хубсугульского землетрясения, вызывавшие панику среди местных жителей.

Рассмотренные в данном разделе в кратком виде сведения в основном касаются возможностей выявления местоположения очагов готовящихся землетрясений, приуроченных к сейсмоопасным сегментам разломов на современном временном интервале параметра «М». Результаты прогноза по параметрам «Е» и «Т» еще рассматриваются как менее обоснованные на данном этапе исследований. В частности, это выражается в том, что в указанной области прогнозируемое землетрясение происходит, но несколько позднее выбранного периода ожидания. И именно в этом направлении необходимо совершенствовать используемую методику средне- и долгосрочного прогноза землетрясений.

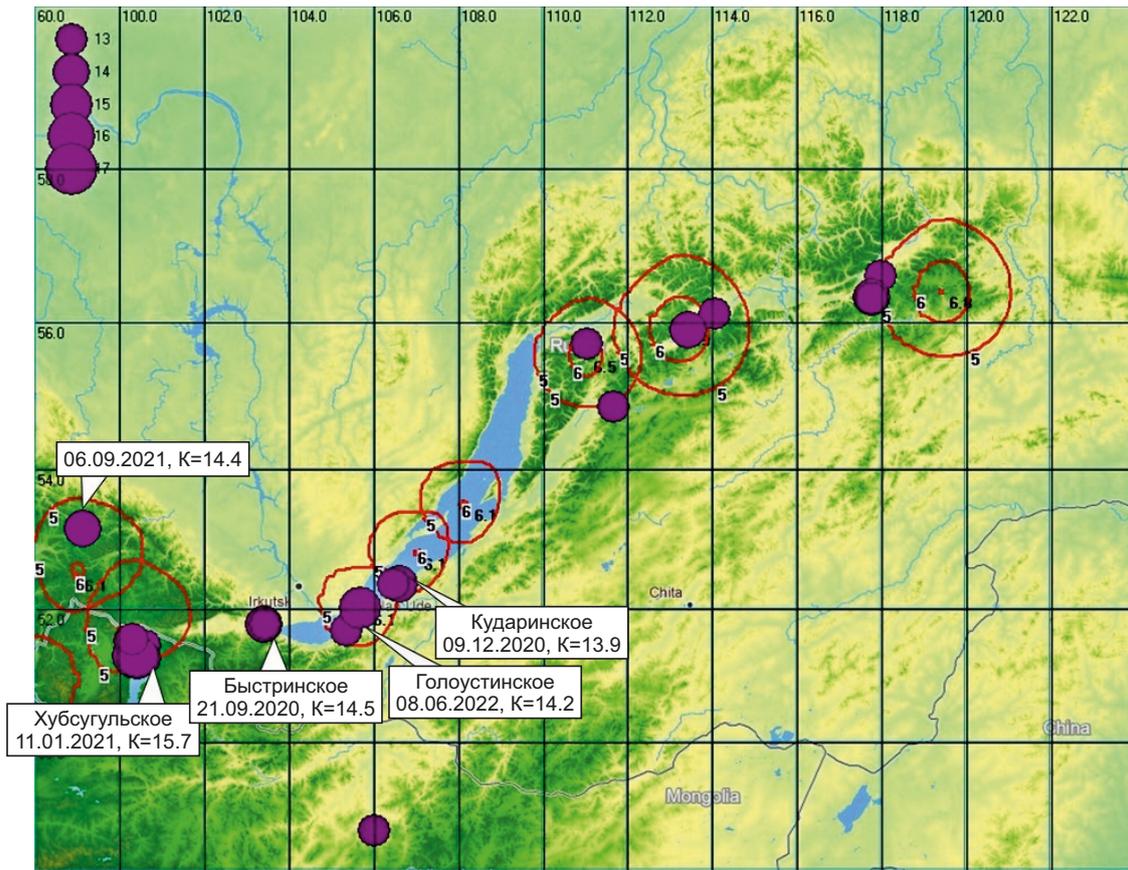


Рис. 4. Карта результатов среднесрочного прогноза землетрясений в БРЗ за период ожидания 18.09.2019 г. – 20.06.2022 г. Красными линиями указаны ранее прогнозируемые расчетные изосейсты в местах подготовки очагов опасных землетрясений с $K \geq 13$ ($M \geq 5.0$) в указанный период ожидания. Залитые круги шкалы – эпицентры землетрясений, произошедших после отправки в МЧС карты прогноза. Другие пояснения приведены в тексте.

Fig. 4. Mapped results of the medium-term prediction of earthquakes in the BRZ over the expected period 18.09.2019 – 20.06.2022. Red lines show the isoseists predicted previously in the places of generation of earthquakes with $K \geq 13$ ($M \geq 5.0$) in the expected period mentioned. Filled circles on the scale are the epicenters of earthquakes which occurred after the prediction map submission to the Ministry of Emergency Situations (MES). For more details, see the text.

3. ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РАЗЛОМЫ ДЛЯ РЕЛАКСАЦИИ

Как было показано выше, мнение о возможности успешного управления режимом смещений в сегментах разломов путем применения техногенных виброимпульсных и гидравлических воздействий уже высказывалось ранее [Ruzhich, 1997; Mirzoev et al., 2006]. Позднее оно было подтверждено серией натурных геофизических испытаний на Ангарском разломе (полигон Листвянка), а затем и в других зонах разломов [Ruzhich et al., 2017; Psakhie et al., 2006].

3.1. Анализ существующих представлений об эффектах гидравлических воздействий

К настоящему времени установлено, что гидравлические длиннопериодные колебания давления жидкости в скважине через проницаемые трещины призабойной зоны оказывают более эффективное влияние на флюидапорную систему, которая распределена в пустотном пространстве проницаемого трещинного

коллектора [Ganiev et al., 2008]. Охват, радиус влияния волнового воздействия здесь крайне важен, так как по предлагаемой технологии напряжение горного массива поэтапно, от сегмента к сегменту необходимо плавно снизить на очень протяженной области напряженного магистрального сместителя, достигающего в длину десятки километров. Воздействие плавными длинноволновыми колебаниями давления жидкости через скважину как гидравлический канал в зоне сместителя передается в участке открытого, необсаженного ствола на все взаимосвязанные элементы системы, и главное – на каркас коллектора – стенки трещин [Borevsky, 1986; Kashnikov et al., 2011; Vakhromeev et al., 2015]. Жидкость передает низкочастотные волновые изменения давления флюидной системы от скважины через трещины на расстояния, много большие по сравнению с вибрационным воздействием [Ganiev et al., 2008]. Это позволяет существенно увеличить радиус гидродинамического влияния. При этом медленные колебания давления жидкости на стенки замкнутых трещинных систем – секторов магистрального разлома – происходят

равномерно во всех направлениях. Предложенная авторами технология обеспечивает эффективную поэтапную разгрузку напряжений в большем объеме массива горных пород. Данный эффект достигается за счет последовательного воздействия на напряженную зону (многозабойная скважина) в нескольких сегментах и низкочастотных волновых изменений давления жидкости в каждой точке. Подобный подход реализуется в горизонтальных стволах многозабойных нефтяных скважин [Butler, 2010; Vakhromeev et al., 2019b; Ruzhich, Shilko, 2021]. К таким выводам приходят и ряд зарубежных исследователей, только их выводы делались под другую задачу – утилизацию пластовой воды [Vorobieva et al., 2020] без увеличения сейсмической активности в зоне проведения закачек. Плавная разгрузка массива при волновой закачке доказана экспериментом [Ji et al., 2021; Ji, Wu, 2020]. Скорости закачки имеют весьма значительное влияние на сейсмическую активизацию закачками жидкости [Ji, Wu, 2020; Wang et al., 2020; Alghanam, Juanes, 2020]. В частности, ранее было показано, что низкая скорость закачки также может снижать связанные с закачкой сейсмические риски за счет более равномерного распределения давления жидкости в трещине [Ji, Wu, 2020]. Не случайно гидравлические воздействия в природных условиях уже широко освоены в практических разработках мирового сообщества (гидроразрыв пласта) применительно к нефтенасыщенным осадочным породам с целью создания искусственного фильтрационного поля для добычи углеводородов (УВ) [Hubbert, Rubey, 1959; Migursky, Staroseltsev, 2000; Rylance, Mahadev, 2016; Vickery, Bayne, 2002; Ivanishin et al., 2019]. Подобные мероприятия энергетически наиболее легко реализуемы и эффективны. Важно также отметить, что эти воздействия можно контролировать с поверхности земли. Вторая важная особенность гидравлических воздействий – техническая возможность плавного доведения давления жидкости до необходимого уровня именно в заданном участке массива горных пород [Malyshev, 2009; Vakhromeev et al., 2015, 2017]. Реализуется воздействие через технические устройства, отсекающие ствол скважины и перекрывающие только этот локальный участок открытого ствола, вскрывшего обводненную зону конкретного сегмента сейсмоопасной разломной зоны. Для детализации рабочего участка сместителя разлома после бурения либо в процессе бурения применяется комплекс геофизических исследований скважин (акустический каротаж, резистивиметрия и др.). В конечном счете выбор «рабочего» сегмента сместителя основывается на проведении измерений, выполняемых через скважину [Vakhromeev et al., 2019a, 2019b; Sverkunov, Vakhromeev, 2020]. Таким образом, решение задач по обеспечению сейсмобезопасности более продуктивно связывать с осуществлением техногенных гидравлических воздействий, глубоко проникающих в земную кору, управляемых и on-line контролируемых по сейсмоакустическому и гидравлическому каналам связи. Сами воздействия с целью обводнения области напряженного сместителя

и его плавного раздвигания способствуют снижению сдвигового сопротивления из-за уменьшения числа взаимодействующих контактов крупных неровностей [Popov, 2010, 2013]. Очевидно, что закачки жидкостей, направленные на плавное снижение сдвигового сопротивления и замедление скорости скольжения, могут способствовать переходу от прерывистого скольжения к устойчивому более плавному и менее скоростному режиму. Следовательно, в подобных случаях есть возможность снизить риск возникновения высокоопасных землетрясений с $M \geq 5.5-6.0$.

Проведенные полевые испытания в течение прошедших 10–15 лет по новым технологиям добычи УВ с помощью искусственного формирования систем активной трещиноватости показали, что ГРП как технология управляемого повышения давления жидкости через глубокие скважины способна оказывать воздействие на различные по внутреннему строению глубинные сегменты зон сейсмоактивных разломов, в которых формируются очаги землетрясений [Mighani et al., 2018; Frohlich, 2012; Rutqvist et al., 2015; Zang et al., 2014; Lei et al., 2013; Kanamori, Brodsky, 2001].

Значение технически достижимого давления жидкости на насосе при гидравлическом воздействии через скважину может достигать 100 МПа и более на локальный участок достижимой для бурения глубины до 10000 м по вертикали. Применение для целей создания максимальных значений забойного давления тяжелых жидкостей с плотностью 1600–2050 кг/м³ и более позволяет на практике удвоить реальное значение забойного давления в скважине, и оно может превысить 200 МПа (с устья). Эта величина (+200 МПа) означает максимально достижимую полуволну (положительную амплитуду) колебаний забойного давления в скважине (на практике глубина в диапазоне 3–7 км). И эти плавные волнообразные колебания начинаются с величины пластового (обычно близкого к гидростатическому) давления ($P_{\text{гидр}}$) флюидных систем, вскрытых забоем скважины.

Подчеркнем, что распространенная сегодня технология ГРП для увеличения коэффициента продуктивности скважин по нефти предполагает выполнение операций по высокоскоростным закачкам жидкостей в скважины. Конечная цель таких воздействий – создание искусственной трещины, которую сразу обязательно закрепляют пропантом, чтобы исключить сжатие, «схлопывание» стенок такой трещины. В таких условиях высоконапряженные породные массивы не успевают релаксировать, и это нередко приводит к спонтанным выделениям избыточной упругой энергии недр в виде индуцированных землетрясений, в редких случаях достигающих значений $M=4.5-5.5$, что вызывает негативную реакцию органов технического контроля и местных жителей [Keranen et al., 2014; Rubinstein, Mahani, 2015; Vorobieva et al., 2020].

Процесс трещинообразования описывается единой кривой роста напряжений, стабилизации и падения (рис. 5), при котором формируется магистральный

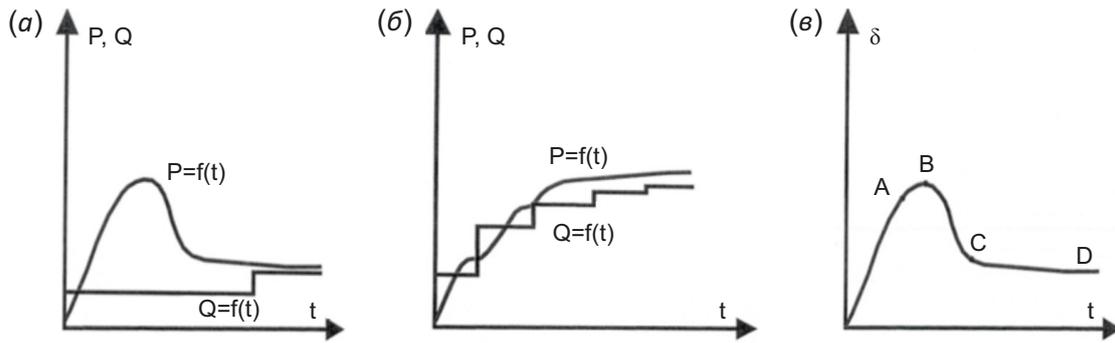


Рис. 5. Сопоставление механического и гидравлического воздействия на массив горных пород, в результате которого на протяжении времени t формируется протяженная трещина.

(а) – график изменения расхода и давления при гидравлическом разрыве пласта с образованием искусственных сейсмоопасных трещин; (б) – график изменения расхода и давления при гидравлическом разрыве пласта с раскрытием природных тектонических разрывов; (в) – дизъюнктивные стадии развития сбросовой зоны, где по оси ординат δ – силовая нагрузка в процессе разломообразования в породном массиве, которая распространяется на глубинные сейсмоопасные сегменты зон разломов.

Fig. 5. Comparison between mechanical and hydraulic effects on rock massif, giving rise to the extensive fracture formation over time t . (а) – a curve showing the variation of discharge with respect to pressure at hydraulic fracturing and hydraulic-induced earthquake fractures; (б) – a curve showing the variation of discharge with respect to pressure at hydraulic fracturing and opening of natural tectonic fractures; (в) – disjunctive stages of normal-faulting when faulting load – δ plotted on the y-axis – reaches the deep-seated seismically hazardous segments of fault zones.

разрыв. Механический или гидравлический механизм воздействий [Rylance, Mahadev, 2016; Vickery, Bayne, 2002; Usachev, 1986; Ivanishin et al., 2019] позволяет успешно достигать управляемой плавной разгрузки напряженного массива горных пород через последовательное волновое гидродинамическое воздействие, при котором поле напряжений изменяется под воздействием давления флюида на сегменты разломов.

На рис. 5 проиллюстрирован принцип контроля изменения давления закачки жидкости – от величины пластового давления водонапорной системы обводненного разлома до величины давления утечки (начало открытия естественных трещин перемычки, разъединяющей сегменты).

Показано, что практически более безопасен гидравлический механизм с медленными волновыми воздействиями на отдельные сегменты зоны разлома посредством применения триботехнических наполнителей, закачка которых реализуется через гидравлический канал (скважина) в обводненную зону трещиноватости выбранного сегмента сейсмоопасной разломной зоны.

В ряде известных публикаций рассматривается природная модель стадийности формирования магистрального разлома путем последовательного объединения мелких, средних и достаточно протяженных разрывных нарушений в геологической среде [Ruzhich, 1997; Seminsky, 2003; Psakhie et al., 2014]. Согласно выявленной ранее стадийности формирования магистральных разломов при последовательном слиянии мелких разрывов в разрывы все более высокого ранга закономерно возникают самоподобные неровности, обеспечивая соответствующую шероховатость [Ruzhich, 1997; Kocharyan et al., 2021]. При дальнейших

смещениях крыльев разломов в сформировавшихся магистральных участках разломов на умеренных глубинах верхней части земной коры при контактных взаимодействиях неровностей может возникать эффект дилатансии, т.е. разуплотнения породных массивов и их быстрое заполнение флюидами. Образуется сеть взаимосвязанных обводненных разрывных нарушений. Постепенно становится возможным проникновение в них растворов, закачиваемых под давлением, не превышающим уровень значения давления ГРП. При закачках жидкостей через глубокие скважины, проникающие в уже имеющуюся сеть насыщенных флюидами разломов, гидравлическое воздействие может распространяться дистально на километровые расстояния, проникая и вглубь на 5–7 км, как, например, в рамках известного проекта SAFOD (San Andreas Fault Observatory at Depth) [Zoback et al., 2010; Kocharyan, 2016]. Рассмотренная технология способна замедлять скорость скольжения в разломах, способствуя плавному расходованию повышенного объема накопленной в недрах упругой энергии посредством перевода ее в тепло при трении и на затраты процесса механического разрушения породных массивов [Ruzhich et al., 2018].

3.2. Описание способа гидравлических воздействий на сегменты разломов

Согласно представлениям авторов, в пределах потенциально опасных сегментов разломов при указанных мероприятиях есть возможность учитывать геомеханические закономерности деформирования, повреждения и разрушения земной коры. В ее трещинно-поровом пространстве изначально распределена разветвленная флюидная система [Zalivin, Vakhromeev, 2016], которая влияет на режимы смещений в зонах разломов

[Sibiryakov E.B., Sibiryakov B.P., 2010, 2017]. Зачастую значительные перепады геомеханических свойств насыщенной флюидами геологической среды, хотя бы по одному параметру, приводят к различным режимам геодинамического поведения массивов горных пород и режимам подготовки землетрясений. Знание напряженного состояния и ключевых параметров структуры трещинно-порового пространства открывает возможности для управляемой инициации параметров сдвигового сопротивления, скорости скольжения берегов разломов и генерации волновых упругих колебаний сейсмического диапазона. Это позволяет добиться не спонтанного, а именно замедленного, т.е. низкоскоростного, скольжения и плавного снижения избыточной упругой энергии.

Результаты рассмотренных исследований о способах воздействий можно представить в виде последовательности мероприятий по применению превентивных воздействий через скважины на высоконапряженный

участок сместителя разлома. В эту последовательность включается строительство наклонно направленных скважин с горизонтальным окончанием с боковыми стволами [Butler, 2010; Kiselev et al., 2011, 2012; Sverkunov, Vakhromeev, 2020; Sverkunov et al., 2013] в предварительно выявленные сегменты магистрального разлома. После экспериментального исследования природных параметров – пластового давления водонапорной системы в разломной зоне и давления «утечки» – применяется плавное волновое воздействие давлением жидкости через обсаженную скважину на область сегмента сместителя. Данный способ предполагает постоянный on-line контроль за сейсмической активностью разломной зоны.

Предлагаемая авторами технология реализуется по механизму поэтапного (последовательного – от сегмента к сегменту) плавного управляемого (гидравлического же) приоткрывания естественных фильтрующих трещин давлением нагнетаемой через скважину

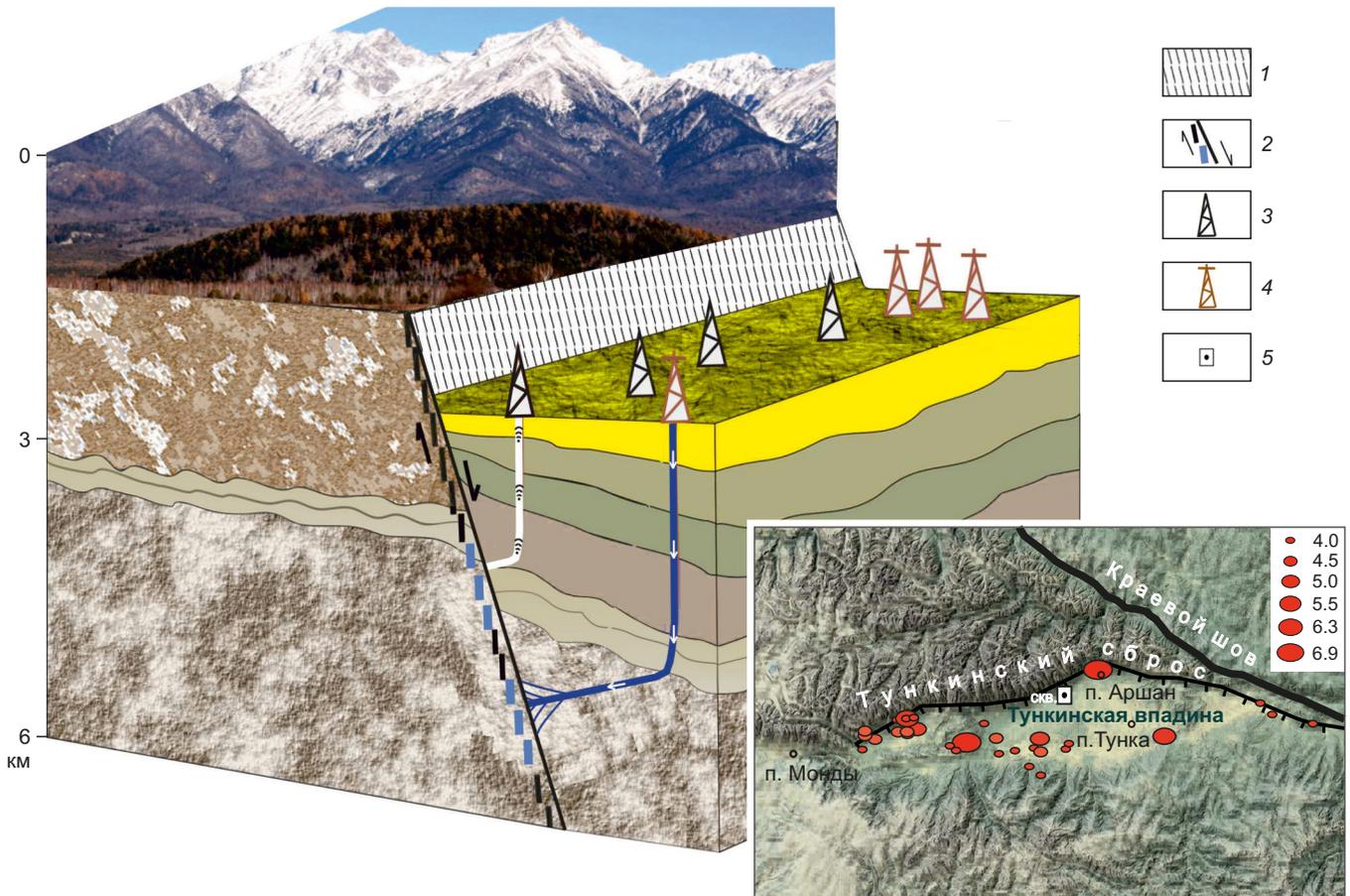


Рис. 6. Блок-диаграмма полигона для проведения планируемых испытаний в сегменте зоны Тункинского сброса. 1 – условный фрагмент временно пассивного сегмента Тункинского сброса; 2 – упрощенное сечение сегмента сброса с указанием направления смещений; 3–4 – наблюдательные и нагнетательные глубокие наклонные скважины для проведения воздействий на участок разлома; 5 – на врезке внизу прямоугольником с точкой отмечено местоположение ранее пробуренной (1957 г.) геологоразведочной скважины, которую предполагается использовать для проведения испытаний.

Fig. 6. A block-diagram of the test site in the segment of the Tunka fault zone. 1 – a conditional fragment of the temporarily passive segment of the Tunka fault; 2 – a simplified section of the fault segment indicating displacement directions; 3–4 – deep inclined observation and injection wells to exert an effect on the fault segment; 5 – a rectangle dot at the insert bottom shows the site location of a 1957-year-old drilled exploration well which is supposed to be used for testing.

жидкости. Наиболее оптимальным может быть режим последующего плавного воздействия циклическими колебаниями давления флюидной системы низкой частоты (длительность полуволны 3–12 ч) на величину до 70 МПа (допустимое технически достижимое давление устьевых насосов АН-700) через обводненную разломную зону на вмещающий массив горных пород. Воздействие происходит в уже существующей фильтрационной среде водопроводящих трещин и обводненных разломов. На рис. 6 представлена блок-диаграмма как пример реализации будущего проекта проведения управляемых гидравлических воздействий на Тагархайский сегмент Тункинского сброса, расположенный в 15 км западнее пос. Аршан, с использованием пробуренной в 1957 г. разведочной скважины на глубину, превышающую 2 км.

Сходный механизм управляемого техногенного воздействия может быть использован при реализации волнового гидравлического способа плавной управляемой инициации смещений на участке сейсмоопасного разлома через глубокую наклонно направленную многозабойную скважину или группу скважин. Учтена необходимость on-line контроля скорости и амплитуды индуцированной подвижки в каждом отдельном сегменте магистрального разлома. Важно контролировать гидравлическое воздействие в определенном диапазоне давлений, чтобы исключить возможность увеличения скорости иницируемого смещения в разломе до косейсмических значений, при которых может возникнуть повышенная вероятность сейсмических колебаний с разрушительными для большинства инженерных сооружений частотами.

Известно, что в геологической среде подготовка очагов очень сильных землетрясений происходит спонтанно и в нескольких участках сегментов зоны сейсмогенерирующего разлома, которые в момент возникновения косейсмических разрывов объединяются в единую зону сейсмодислокаций более высокого иерархического

ранга протяженностью в десятки – сотни километров [Ruzhich, 1997; Seminsky et al., 2005], поэтому во избежание подобного сейсмогенного «вспарывания» разлома следует осуществлять инициацию локального сегмента последовательными, единичными актами в виде энергетически умеренных и замедленных по скоростному режиму плавных гидравлических колебаний, т.е. необходимо воздействовать переменным давлением жидкости на отдельные сегменты, при сочетании с предварительно осуществленным обводнением локального сегмента под давлением. При этом используется эффект предварительного приоткрывания и закрепления естественных трещин, близкий к стандартной технологии гидроразрыва пластов в газонефтяных месторождениях [Belonin et al., 2005; Mighani et al., 2018; Usachev, 1986; Ivanishin et al., 2019; Vakhromeev et al., 2019a]. Важно, что интервал плавных волновых воздействий (диапазон колебаний давления жидкости) выбирают в зависимости от существующего в геосреде (обводненная зона дробления) природного гидростатического давления флюидной системы [Sverkunov, Vakhromeev, 2020] до величины, несколько меньшей давления утечки (приоткрывания трещин), исключая возникновение гидроразрыва. При этом в качестве проппанта используются антифрикционные добавки, которые применяются в нефтяном бурении.

Для реализации безопасного снижения упругой энергии в глубинных разломах выделяют местоположения напряженных участков, уточняя локализацию высоконапряженного сместителя сейсмоопасной зоны по сейсмогеологическим данным. В его пределах выявляют отдельные сегменты магистрального сместителя. На основании этих данных проектируют и бурят наклонно направленные глубокие скважины на достижимые глубины по вертикали до 6.0–6.5 км, сначала – пилотный ствол, в котором определяют параметры разломной зоны и устанавливают сейсмодатчики. Далее ведут бурение скважины по многозабойной конструкции с

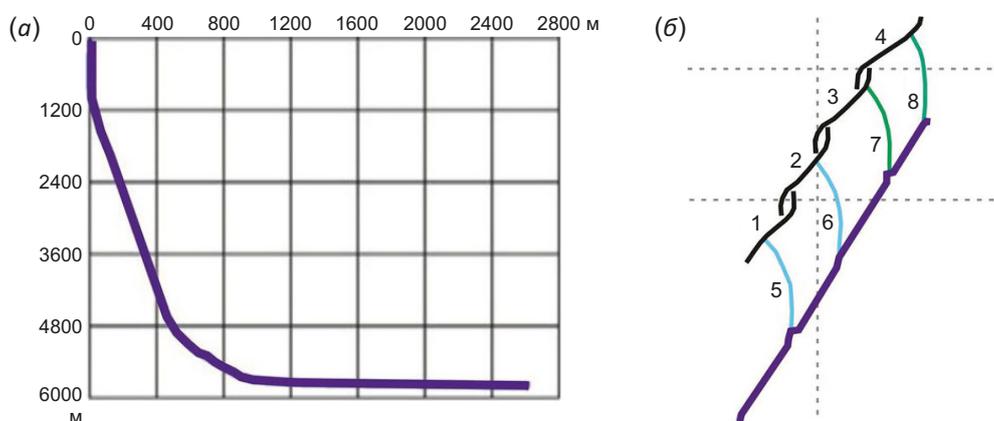


Рис. 7. Проектная одиночная скважина с горизонтальным окончанием (а) и многозабойном исполнении (б), где каждый боковой наклонно направленный ствол пробурен в отдельный сегмент разломной зоны. 1–4 – отдельные сегменты разломной зоны; 5–8 – боковые наклонно направленные стволы.

Fig. 7. A planned single horizontal tailing-in (a) and multi-branch (b) well, with each directionally inclined side hole drilled into an individual segment of the fault zone. 1–4 – individual segments of the fault zone; 5–8 – directionally inclined side holes.

горизонтальным окончанием каждого бокового ствола, пересекающего самостоятельный сегмент магистрального тектонического сместителя вкрест простирающихся главных систем трещиноватости.

Дальнейший цикл плавных волновых гидравлических воздействий на водонапорную систему обводненной зоны дробления выполняют, отсекая гидромеханическими пакерами в основном горизонтальном стволе рабочий интервал воздействий, причем плавное воздействие переменным давлением жидкости на сегменты сейсмоопасного разлома осуществляется через боковые горизонтальные стволы скважины (рис. 7). Воздействие ведут последовательно в каждом боковом стволе (от сегмента к сегменту) волновым методом переменных давлений в низкочастотном режиме. Допустимо плавное увеличение давления закачки до оптимального уровня порядка 70 МПа по отношению к величине начального, природного пластового давления водонапорной системы, но не более величины давления утечки, инициируя плавные смещения крыльев разлома в режиме сдвиговой ползучести. При этом низкочастотный режим предполагает увеличение давления на уровне бокового горизонтального ствола за 3–12 ч, остановку и фиксацию давления от 3 ч до 3 сут и более с подкачкой давления до значения, не более чем на 10 % превышающего достигнутое в первом цикле (3–12 ч). Диапазон времени указан исходя из необходимости распределения давления в как можно большем пространстве напряженной зоны, а также связан с приливо-отливными циклами, увеличивающими и уменьшающими (хоть и незначительно) величину забойного давления в разных фазах соответственно.

В отличие от других способов приповерхностных воздействий на разломы, в предложенном авторами способе плавного регулирующего воздействия давлением на глубинные сегменты разломов можно осуществлять воздействие в виде целевых закачек растворов через многокилометровые по глубине скважины. Еще одним достоинством технологии является применение не только вертикальных, но наклонно направленных и протяженных горизонтальных скважин. Это позволяет по расчетной траектории боковыми стволами проникать в разломы, целенаправленно вскрывать локальный участок сегмента разломной зоны и далее закачивать под давлением растворы непосредственно в сегменты – участки сместителей разломов, в которых предварительно были выявлены признаки подготовки очагов опасных землетрясений в предфинальной стадии реализации. Важна также и возможность менять состав растворов, их вязкость, что позволяет изменять сдвиговое сопротивление. При нагнетании жидкости могут использоваться антифрикционные добавки, например «Alpine drilling beads». На рис. 7 показана проектная скважина с горизонтальным окончанием в многозабойном исполнении.

Обусловленный давлением водонапорной (флюидонапорной) системы процесс формирования зоны сместителя обводненного разлома по гидравлическому

механизму воздействия значительно облегчает реализацию постепенного, плавного смещения крыльев разлома.

Режим медленных волновых гидравлических воздействий переменным давлением с диапазоном 0–70 МПа (устье), но не более давления утечки (см. рис. 5), распространяется на глубинные сейсмоопасные сегменты зон разломов. Режим воздействий выбирается на основании опробования каждого из вскрытых бурением бокового ствола сегмента магистрального разлома, с учетом оптимизированных на основании сейсмического отклика значений периодов роста либо сброса давления при запаздывании на 3–6–9–12 ч и т.п. Следует также учитывать то, что сейсмический отклик может происходить с задержкой по отношению к воздействию. Результаты волновой закачки зависят от сценария процедуры и ряда проектных параметров, таких как время закачки жидкости на высокой скорости и остановка или закачки на низкой скорости [Hofmann et al., 2018; Zhuang et al., 2020].

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При рассмотрении проблемы обеспечения сейсмической безопасности нередко возникает необходимость решения вопроса о том, можно ли техногенными воздействиями инициировать масштабные разрушительные землетрясения с $M \geq 6.0$. К настоящему времени подобные случаи не зарегистрированы. В работе [Vorobieva et al., 2020] на примере ситуации в штате Оклахома показано, что увеличение количества инициированных слабых землетрясений и снижение числа относительно сильных землетрясений возникают при увеличении объемов и скорости закачек жидкости в скважины. В штате Техас зафиксированы случаи техногенной инициации достаточно серьезных землетрясений, например возникших в период разработки месторождений УВ с M в пределах 4.2–5.8. При этом упоминаются два наиболее сильных землетрясения этого уровня. Их связь с закачками вызывает сомнение из-за значительной удаленности, порядка 20 км, от мест проведения техногенных воздействий. Тем не менее нельзя полностью исключать возможности непреднамеренного триггирования землетрясений с $M \geq 6.0$ применением режимов с высокой скоростью закачек больших объемов жидкостей в высоконапряженные сегменты разломов, где достигнут предел сцепления. Следовательно, для исключения спонтанного непреднамеренного иницирования опасных землетрясений выбор режимов закачек по скорости и объемам должен быть оптимальным. Уместно заметить, что подобный сейсмический риск с выбором сценариев техногенных воздействий в каждом конкретном случае может оцениваться на начальном этапе при надлежащем контроле сейсмодинамических параметров отклика. Такой опыт распознавания был получен нами при проведении вышеописанных испытаний на полигоне в Листвянке [Astafurov et al., 2008]. Очевидно, что подобные сценарии и принятие решений по смягчению последствий

при воздействиях необходимо отрабатывать на экспериментальных полигонах.

Нередко некоторыми исследователями высказываются сомнения о трудностях распространения воздействий на значительные глубины при закачках растворов в разломы через скважины. Чтобы их развеять, следует напомнить о том, что в земной коре и мантии распространена сложная флюидная система [Kissin, 2015; Rodkin, Rundkvist, 2017]. Ее следы запечатлены в виде минерализованных продуктов гидротермального и метасоматического «залечивания» в пределах зон косейсмических разрывов палеоземлетрясений, которые обнаруживаются при изучении косейсмических разрывов в местах распространения выходов на земную поверхность эксгумированных разломов [Ruzhich et al., 2018].

Имеются примеры катастрофических событий, возникших после многолетних и огромных по объемам закачек жидкостей в недра земной коры и выкачивания газонефтяной смеси из глубин земной коры в районах Газли и Нефтегорска, а также при быстром заполнении огромных водохранилищ в районах, где имеются зоны сейсмоактивных разломов. Известен опыт, полученный на газовых месторождениях в Китае, где закачки растворов в разломы или поблизости от них продолжались более 20 лет. С июля 1988 г. большие объемы жидких отходов периодически закачивались в скважины на глубину порядка 3 км, что вызвало ощутимые землетрясения с $M_L \geq 4.2$, а также сотни более слабых событий с $M_L \leq 3.0$ до конца 2006 г. Одним из наиболее опасных было инициированное закачками разрушительное землетрясение с $M_L = 5.2$, в результате которого экономический ущерб для несейсмостойких инженерных коммуникаций составил около 63 млн юаней. Отмечалось, что в этом районе наибольшее число событий было приурочено к зоне активного разлома на участке протяженностью около 6 км, в котором располагалась нагнетательная скважина [Lei et al., 2013]. Примечательно то, что остановка интенсивных закачек в августе 2010 г. закономерно привела к прекращению сейсмической активности в виде значительных землетрясений [Lei et al., 2013].

Активные усилия исследователей в последние десятилетия направлены на выяснение причин различных типов реакций разломов на разные режимы закачек растворов в скважины в районах с различным уровнем сейсотектонической активности. В частности, в настоящее время в ряде публикаций [Vorobieva et al., 2020; Shapiro et al., 2013] обсуждаются модели оценки сейсмических рисков при закачке жидкостей в глубокие скважины с попытками прогноза последствий, возникающих при различных скоростях и объемах таких закачек в участки разломов, имеющих различные уровни напряженно-деформированного состояния. Здесь уместно упомянуть о том, что при проведении натуральных испытаний в Листвянке с воздействиями на сегмент Ангарского разлома были выявлены возможности оценивать отклики воздействий и влиять на них.

Выяснилось, что применение мониторинга режимов смещений и сейсмической активности при изучении реакции разломов на воздействия позволяет контролировать возрастание сейсмического риска и при необходимости превентивно демпфировать возможности проявления актов непреднамеренной сейсмоопасной реактивации высоконапряженного сегмента разлома [Astafurov et al., 2008]. Данные примеры указывают на то, что опасную триггерную сейсмическую активизацию можно исключать путем соблюдения надлежащих превентивных мероприятий, например замедления скорости закачек, изменения их длительности или своевременных интервальных приостановок для релаксации возникающих избыточных напряжений. Наблюдаемая негативная реакция сегментов сейсмоактивных разломов на гидравлические воздействия закономерно проявляется по отношению к тем режимам воздействий, которые были произведены без учета геологических процессов и взвешенных технических решений. Следовательно, необходимо изучить местные сейсмогеологические условия, существующие на уровне сейсмофокальных горизонтов земной коры с $T=350-550^\circ$, $P=2-4$ Кб, нередко содержащих резервуары газоводных флюидов, инъекции которых в разломы как триггеры нередко способствуют возникновению режимов сейсмоопасных косейсмических смещений. Без учета подобных геологических закономерностей, а также законов трения в пределах шероховатых плоскостей скольжения на участках зон разломов трудно рассчитывать на успешное решение возникающих вопросов, ограничиваясь использованием методов численного моделирования [Ruzhich et al., 2020; Ruzhich, Shilko, 2021]. Сходное мнение, обоснованное с позиций геомеханики, изложено в работах Г.Г. Кочаряна с соавторами [Kocharyan, Kishkina, 2020; Kocharyan et al., 2021]. Также целесообразно для выработки мероприятий по обеспечению сейсмической безопасности, в виде снижения инженерно-сейсмического риска, осуществлять, например, проведение крупномасштабных натуральных тестовых воздействий при непрерывном контроле параметров отклика на воздействия.

Есть также примеры инициации очень сильных землетрясений соседними землетрясениями. Подобная наглядная ситуация отмечена в Северной Монголии, где в 2005 г. произошли два последовательных события – Цэцэрлэгское ($M=7.9$) и Болнайское с $M=8.3$ [Ruzhich, Kocharyan, 2017]. Подобные случаи возникновения двоярных и близко расположенных очагов сильных землетрясений нередко фиксируются в других районах [Kocharyan, 2016]. Опровержение опасений геологического сообщества, связанных с предполагаемыми угрозами непреднамеренной инициации землетрясений с $M \geq 6.0$ имеющимися техническими средствами отчасти может быть представлено при проведении масштабных натуральных испытаний на безопасных полигонах. В недавнем сообщении уже рассматривался проект, направленный на осуществление преднамеренной инициации значительного землетрясения в

одном из разломов морского дна с помощью закачек воды через скважины [Savage et al., 2017]. Из-за отсутствия свидетельств об успешном осуществлении подобного проекта возникает сомнение в реальной возможности их реализации.

Таким образом, рассмотренные в кратком изложении результаты исследований указывают на то, что подготовку высокоопасных тектонических землетрясений можно предотвращать своевременными интервальными закачками в сочетании с остановками для превентивной релаксации имеющихся в породных массивах деформаций [Ruzhich et al., 2021]. Но для успешного выбора режимов воздействий необходимо предварительно проводить детальное изучение сейсмогеологических условий в тех сегментах разломов, где методами средне- и долгосрочного прогноза по сейсмологическим или геофизическим данным выявлены признаки подготовки очагов опасных землетрясений с $M \geq 6.0$, возникновение которых с повышенной вероятностью возможно в ближайшие годы или десятилетия.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ниже представлены следующие наиболее значимые выводы, касающиеся разработки мер по эффективно обеспечению сейсмической безопасности.

1. Более успешное продвижение в области противостояния научного сообщества тектоническим и навешенным высокоопасным землетрясениям целесообразно основывать на выяснении геомеханических условий формирования очагов, создании более адаптированных к геологической природе новых моделей очагов, а также на разработке и совершенствовании методов средне- и долгосрочного прогноза опасных землетрясений. Важна целенаправленная разработка и улучшение технологии управляющих техногенных воздействий на выявленные сейсмоопасные участки разломов с целью своевременного принятия мер, направленных на демпфирование разрушительных последствий подземной стихии.

2. Для разработки и совершенствования рассмотренных возможных способов техногенных воздействий на сейсмогенерирующие разломы необходимо в пределах выбранных геодинамических полигонов осуществлять предварительные тестовые испытания с бурением групп наклонных скважин с горизонтальными ответвлениями и контролем режима закачек жидкостей.

3. Ожидаемые трудности и большие финансовые затраты мирового сообщества на обеспечение сейсмической безопасности будут многократно компенсированы за счет демпфирования или предотвращения последствий от предстоящих очередных катастрофических инфраструктурных разрушений, потерь среди населения сейсмоопасных регионов, а также исключения негативных экологических последствий.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю признательность рецензентам за высказанные замечания и пожелания,

которые, несомненно, способствовали улучшению данной работы.

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

8. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Alghanam M., Juanes R., 2020. Understanding Rate Effects in Injection-Induced Earthquakes. *Nature Communications* 11, 3053. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16860-y>.

Astafurov S.V., Shilko E.V., Psakhie S.G., Ruzhich V.V., 2008. Effect of Local Stress on the Interface Response to Dynamic Loading in Faulted Crust. *Russian Geology and Geophysics* 49 (1), 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.12.007>.

Belonin M.D., Slavin V.I., Chilingar D.V., 2005. Abnormally High Reservoir Pressures. Origin, Forecast, Problems of Development of Hydrocarbon Deposits. Nedra, Saint Petersburg, 324 p. (in Russian) [Белонин М.Д., Славин В.И., Чилингар Д.В. Аномально высокие пластовые давления. Происхождение, прогноз, проблемы освоения залежей углеводородов. СПб.: Недра, 2005. 324 с.].

Borevsky L.V., 1986. Analysis of the Effect of Physical Deformations of Reservoirs on Valuation of Operational Groundwater Reserves in Deep Aquifers. In: S.S. Bondarenko, G.S. Vartanyan (Eds), *Methods of Studying and Estimating the Resources of Deep Underground Waters*. Nedra, Moscow, p. 374–394 (in Russian) [Боревский Л.В. Анализ влияния физических деформаций коллекторов на оценку эксплуатационных запасов подземных вод в глубоких водоносных горизонтах // Методы изучения и оценка ресурсов глубоких подземных вод / Ред. С.С. Бондаренко, Г.С. Вартамян. М.: Недра, 1986. С. 374–394].

Butler R.M., 2010. *Horizontal Wells for Oil, Gas and Bitumen Production*. RCD Publishing Center, Izhevsk Institute of Computer Research, Moscow – Izhevsk, 536 p. [Батлер Р.М. Горизонтальные скважины для добычи нефти, газа и битумов. М.–Ижевск: НИЦ «РДХ», Ижевский институт компьютерных исследований, 2010. 536 с.].

Ellsworth W.L., Malin P.E., 2011. Deep Rock Damage in the San Andreas Fault Revealed by P- and S-Type Fault-Zone-Guided Waves. In: A. Fagereng, V.G. Toy, J.V. Rowland (Eds), *Geology of the Earthquake Source: A Volume in Honour of Rick Sibson*. Geological Society, London, Special Publications 359, 39–53. <https://doi.org/10.1144/SP359.3>.

Filippov A.E., Popov V.L., Psakhie S.G., Ruzhich V.V., Shilko E.V., 2006. Converting Displacement Dynamics into Creep in Block Media. *Technical Physics Letters* 32, 545–549. <https://doi.org/10.1134/S1063785006060290>.

Florensov N.A., Solonenko V.P. (Eds), 1963. Gobi-Altai Earthquake. Publishing House of the USSR Academy of Science, Moscow, 391 p. (in Russian) [Гоби-Алтайское землетрясение / Ред. Н.А. Флоренсов, В.П. Солоненко. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 391 с.].

Frohlich C., 2012. Two-Year Survey Comparing Earthquake Activity and Injection-Well Locations in Barnett Shale, Texas. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109 (35), 13934–13938. <https://doi.org/10.1073/pnas.1207728109>.

Ganiev R.F., Ukrainian L.E., Andreev V.E., Kotenev Yu.A., 2008. Problems and Prospects of Wave Technology of Multiphase Systems in the Oil and Gas Industry. Nedra, Saint Petersburg, 214 p. (in Russian) [Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е., Андреев В.Е., Котенев Ю.А. Проблемы и перспективы волновой технологии многофазных систем в нефтяной и газовой промышленности. СПб.: Недра, 2008. 214 с.].

Gorshkov A.I., Soloviev A.A., 2021. Recognition of Seismically Hazardous Territories in the Altai-Sayan-Baikal Region Based on Morphostructural Zoning. *Russian Journal of Earth Sciences* 21, ES1005. <https://doi.org/10.2205/2020ES000751>.

Hofmann H., Zimmermann G., Zang A., Min K.-B., 2018. Cyclic Soft Stimulation (CSS): A New Liquid Injection Protocol and Traffic Light System to Mitigate Seismic Risks of Hydraulic Stimulation Treatments. *Geothermal Energy* 6, 27. <https://doi.org/10.1186/s40517-018-0114-3>.

Hubbert M.K., Rubey W.W., 1959. Role of Fluid Pressure in Mechanics of Overthrust Faulting. *Mechanics of Fluid-Filled Porous Solids and Its Application to Overthrust Faulting. Geological Society of America Bulletin* 70 (2), 115–166. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1959\)70\[115:ROFPIM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1959)70[115:ROFPIM]2.0.CO;2).

Ivanishin V.M., Vakhromeev A.G., Sverkunov S.A., Martynov N.N., 2019. Artificial Advance Consolidation of Natural Fractures in the Completion Cycle of Long Horizontal Boreholes. In: O.V. Savenok (Ed.), *Readings of A.I. Bulatov. Materials of the III International Scientific and Practical Conference (March 31, 2019). Vol. 2: Development of Oil and Gas Fields. Publishing House – South, Krasnodar*, p. 88–92 [Иванишин В.М., Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Мартынов Н.Н. Искусственное опережающее закрепление естественных трещин в цикле заканчивания горизонтальных стволов большой протяженности // Булатовские чтения: Материалы III Международной научно-практической конференции (31 марта 2019 г.). Том 2: Разработка нефтяных и газовых месторождений / Ред. О.В. Савенок. Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2019. С. 88–92].

Ji Y., Wu W., 2020. Injection-Driven Fracture Instability in Granite: Mechanism and Implications. *Tectonophysics* 791, 228572. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228572>.

Ji Y., Zhuang L., Wu W., Hofmann H., Zang A., Zimmermann G., 2021. Cyclic Water Injection Potentially Mitigates

Seismic Risks by Promoting Slow and Stable Slip of a Natural Fracture in Granite. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 54, 5389–5405. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02438-7>.

Kanamori H., Brodsky E.E., 2001. The Physics of Earthquakes. *Physics Today* 54 (6), 34. <https://doi.org/10.1063/1.1387590>.

Kashnikov Yu.A., Gladyshev S.V., Razyapov R.K., Kontorovich A.A., Krasilnikova N.B., 2011. Hydrodynamical Modeling of First-Priority Area in Development of Yurubcheno-Tokhomskoye Oilfield, with a Glance of Geomechanical Effect of Closing the Fracture 4, 104–107 (in Russian) [Кашников Ю.А., Гладышев С.В., Разяпов Р.К., Конторович А.А., Красильникова Н.Б. Гидродинамическое моделирование первоочередного участка разработки Юрубченко-Тохомского месторождения с учетом геомеханического эффекта смыкания трещин // Нефтяное хозяйство. 2011. № 4. С. 104–107].

Keranen K.M., Weingarten M., Abers G.A., Bekins A., Ge S., 2014. Sharp Increase in Central Oklahoma Seismicity since 2008 Induced by Massive Wastewater Injection. *Science* 345 (6195), 448–451. <https://doi.org/10.1126/science.1255802>.

Kiselev V.M., Chashkov A.V., Kinsfaktor A.R., Antonenko A.A., 2012. Determination of a Wellbore Optimal Direction in Fractured Carbonate Reservoirs. *Scientific and Technical Bulletin of OJSC «NK Rosneft»* 4 (29), 16–20 (in Russian) [Киселев В.М., Чашков А.В., Кинсфатор А.Р., Антоненко А.А. Определение оптимального направления ствола добывающей скважины в трещиноватых карбонатных коллекторах // Научно-технический вестник ОАО «НК Роснефть». 2012. № 4 (29). С. 16–20].

Kiselev V.M., Kinsfaktor A.R., Chashkov A.V., 2011. Anisotropy of Permeability of Fractured Carbonate Reservoirs. *Scientific and Technical Bulletin of OJSC «NK Rosneft»* 4 (25), 10–14 (in Russian) [Киселев В.М., Кинсфатор А.Р., Чашков А.В. Анизотропия проницаемости трещиноватых карбонатных коллекторов // Научно-технический вестник ОАО «НК Роснефть». 2011. № 4 (25) С. 10–14].

Kissin I.G., 2015. *Fluids in the Earth's Crust: Geophysical and Tectonical Aspects. Nauka, Moscow*, 327 p. (in Russian) [Киссин И.Г. Флюиды в земной коре. Геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука, 2015. 327 с.].

Kocharyan G.G., 2016. *Fault Geomechanics. GEOS, Moscow*, 442 p. (in Russian) [Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М.: ГЕОС, 2016. 424 с.].

Kocharyan G.G., 2021. Origin and Development of Sliding Processes in the Continental Fault Zones under the Action of Natural and Man-Made Factors: A State-Of-The-Art Review. *Physics of the Earth* 4, 3–41 (in Russian) [Кочарян Г.Г. Возникновение и развитие процессов скольжения в зонах континентальных разломов под действием природных и техногенных факторов. Обзор современного состояния вопроса // Физика Земли. 2021. № 4. С. 3–41]. <https://doi.org/10.31857/S0002333721040062>.

Kocharyan G.G., Kishkina S.B., 2020. The Physical Mesomechanics of the Earthquake Source. *Physical Mesomechanics* 23 (6), 9–24 (in Russian) [Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б.

Физическая мезомеханика очага землетрясения // Физическая мезомеханика. 2020. Т. 23. № 6. С. 9–24]. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2020-16001>.

Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., 2021. Fault Sliding Modes – Governing, Evolution and Transformation. In: G.P. Ostermeyer, V.L. Popov, E.V. Shilko, O.S. Vasiljeva (Eds), Multiscale Biomechanics and Tribology of Inorganic and Organic Systems. Springer Tracts in Mechanical Engineering. Springer, Cham, p. 323–358. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60124-9_15.

Kossobokov V.G., Soloviev A.A., 2018. Pattern Recognition in Problems of Seismic Hazard Assessment. *Chebyshevskii Sbornik* 19 (4), 55–90 (in Russian) [Косообоков В.Г., Соловьев А.А. Распознавание образов в задачах оценки сейсмической опасности // Чебышевский сборник. 2018. Т. 19. № 4. С. 55–90]. <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2018-19-4-55-90>.

Lei X., Ma S., Chen W., Pang C., Zeng J., Jiang B., 2013. A Detailed View of the Injection-Induced Seismicity in a Natural Gas Reservoir in Zigong, Southwestern Sichuan Basin, China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 118 (8), 4296–4311. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50310>.

Leonard M., 2010. Earthquake Fault Scaling: Self-Consistent Relating to Rupture Length, Width, Average Displacement, and Moment Release. *Bulletin of the Seismological Society of America* 100 (5A), 1971–1988. <https://doi.org/10.1785/0120090189>.

Levina E.A., 2011. Geoinformation System for Forecasting Earthquakes and Rock Bursts: Development and Examples of Application in the Baikal Rift Zone and the Norilsk Field. Brief PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Irkutsk, 19 p. (in Russian) [Левина Е.А. Геоинформационная система для прогноза землетрясений и горных ударов: разработка и примеры применения в Байкальской рифтовой зоне и Норильском месторождении: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 2011. 19 с.].

Levina E.A., 2016. The Operational Assessment of the Degree of Seismic Hazard Distribution by GIS. *Geoinformatics* 1, 3–8 (in Russian) [Левина Е.А. Оперативная оценка распределения степени сейсмической опасности средствами ГИС // Геоинформатика. 2016. № 1. С. 3–8].

Malyshev S.V., 2009. Development of Hydraulic Fracturing Technology in Gas Wells. Brief PhD Thesis (Candidate of Technical Sciences). Moscow, 19 p. (in Russian) [Малышев С.В. Разработка технологии гидроразрыва пласта в газовых скважинах: Автореф. дис. ... канд. тех. наук. М., 2009. 19 с.].

Mazzoldi A., Rinaldi A.P., Borgia A., Rutqvist J., 2012. Induced Seismicity within Geologic Carbon Sequestration Projects: Maximum Earthquake Magnitude and Leakage Potential. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 10, 434–442. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.07.012>.

Mighani S., Lockner D.A., Kilgore B.D., Sheibani F., Evans B., 2018. Interaction between Hydraulic Fracture and a Preexisting Fracture under Triaxial Stress Conditions. In: *Proceedings of SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition (January 23–25, 2018, Woodlands, USA)*. SPE, SPE-189901-MS. <https://doi.org/10.2118/189901-MS>.

Migursky A.V., Staroseltsev V.S., 2000. Fault Zones – Natural Pumps of Natural Fluids. *National Geology* 1, 56–59 (in Russian) [Мигурский А.В., Старосельцев В.С. Зоны разломов – естественные насосы природных флюидов // Отечественная геология. 2000. № 1. С. 56–59].

Mirzoev K.M., Nikolaev A.V., Lukk A.A., Yunga S.L., 2006. Method for Removing Resilient Energy in Strained Substances for Preventing Earthquakes. A Patent on Invention RU 2289151 C1 of December 10, 2006. ROSPATENT (in Russian) [Мирзоев К.М., Николаев А.В., Лукк А.А., Юнга С.Л. Способ снятия упругой энергии в напряженных средах для предотвращения землетрясений: Патент на изобретение RU 2289151 C1 от 10.12.2006. РОСПАТЕНТ, 2006].

Mirzoev K.M., Nikolaev A.V., Lukk A.A., Yunga S.L., 2009. Induced Seismicity and the Possibilities of Controlled Relaxation of Tectonic Stresses in the Earth's Crust. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 45, 885. <https://doi.org/10.1134/S1069351309100061>.

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

Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., Ruzhich V.V., Gubanov A.E., 2019. Seismic-Acoustics of a Block Sliding along a Fault. *Pure and Applied Geophysics* 177, 2641–2651. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02375-1>.

Panza G.F., Kossobokov V., Peresan A., Nekrasova K., 2014. Chapter 12 – Why are the Standard Probabilistic Methods of Estimating Seismic Hazard and Risks Too Often Wrong. In: J.F. Shroder, M. Wyss (Eds), *Earthquake Hazard, Risk and Disasters*. Academic Press, p. 309–357. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394848-9.00012-2>.

Ponomareva E.I., Ruzhich V.V., Levina E.A., 2014. Operational Mid-Term Forecast of Earthquakes in the Baikal Region and Its Capabilities. *The Bulletin of Irkutsk State University, Series Earth Sciences* 8, 67–79 (in Russian) [Пономарёва Е.И., Ружич В.В., Левина Е.А. Оперативный среднесрочный прогноз землетрясений в Прибайкалье и его возможности // Известия ИГУ. Серия Науки о Земле. 2014. Т. 8. С. 67–79].

Popov V.L., 2010. Contact Mechanics and Friction. *Physical Principles and Applications*. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 362. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-10803-7>.

Popov V.L., 2013. Mechanics of Contact Interaction and Friction Physics. From Nanotribology to Earthquake Dynamics. *Fizmatlit, Moscow*, 352 p. (in Russian) [Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: Физматлит, 2013. 352 с.].

Psakhie S.G., Popov L.V., Shilko E.V., Astafurov S.V., Ruzhich V.V., Smekalin O.P., Bornyakov S.A., 2006. Method for Controlling Shifts Mode in Fragments of Seismic-Active Tectonic Fractures. A Patent on Invention RU 2273035 C2 of March 27, 2006. ROSPATENT (in Russian) [Псахье С.Г., Попов Л.В., Шилько Е.В., Астафуров С.В., Ружич В.В., Смекалин О.П., Борняков С.А. Способ управления режимом смещений во фрагментах сейсмоактивных тектонических

разломов: Патент на изобретение RU 2273035 C2 от 27.03.2006. РОСПАТЕНТ, 2006].

Psakhie S.G., Ruzhich V.V., Shilko E.V., Popov V.L., Dimaki A.V., Astafurov S.V., Lopatin V.V., 2005. Influence of the State of Interfaces on the Character of Local Displacements in Fault-Block and Interfacial Media. *Technical Physics Letters* 31, 712–715. <https://doi.org/10.1134/1.2035374>.

Psakhie S.G., Shilko E.V., Grigoriev A.S., Astafurov S.V., Dimaki A.V., Smolin A.Yu., 2014. A Mathematical Model of Particle-Particle Interaction for Discrete Element Based Modeling of Deformation and Fracture of Heterogeneous Elastic-plastic Materials. *Engineering Fracture Mechanics* 130, 96–115. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.04.034>.

Rinaldi A.P., Rutqvist J., 2019. Joint Opening or Hydro-shearing? Analyzing a Fracture Zone Stimulation at Fenton Hill. *Geothermics* 77, 83–98. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.08.006>.

Rodkin M.V., Rundkvist D.V., 2017. *Geofluid Geodynamics. Application to Seismology, Tectonics, Ore and Oil Genesis Processes*. Intellect, Dolgoprudny, 288 p. (in Russian) [Родкин М.В., Рундквист Д.В. Геофлюидогеодинамика. Приложение к сейсмологии, тектонике, процессам рудо- и нефтегенеза. Долгопрудный: Интеллект, 2017. 288 с.].

Rubinstein J.L., Mahani A.B., 2015. Myths and Facts on Wastewater Injection, Hydraulic Fracturing, Enhanced Oil Recovery, and Induced Seismicity. *Seismological Research Letters* 86 (4), 1060–1067. <https://doi.org/10.1785/0220150067>.

Rutqvist J., Rinaldi A.P., Cappa F., Moridis G.J., 2015. Modeling of Fault Activation and Seismicity by Injection Directly into a Fault Zone Associated with Hydraulic Fracturing of Shale-Gas Reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 127, 377–386. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.01.019>.

Ruzhich V.V., 1992. On Geological Study of Large Paleoearthquake Source Areas in the Places of Deep Denudation Sheets. In: *Physics and Seismology Fundamentals in Predicting Rock Mass Decay*. 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. М.: Наука, 1992. С. 10–14].

Ruzhich V.V., 1997. *Seismotectonic Destruction in the Crust of the Baikal Rift Zone*. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 144 p. (in Russian) [Ружич В.В. Сеймотектоническая деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 144 с.].

Ruzhich V.V., 2016. Deep Paleoseismodislocations: Their Recognition and Study. In: *Actual Problems of Modern Seismology. Collection of Reports of the International Conference Dedicated to the 50th Anniversary of the Mavlyanov Institute of Seismology, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan* (October 12–14, 2016). Tashkent, p. 456–462 (in Russian) [Ружич В.В. Глубинные палеосейсмодислокации: их распознавание и изучение // Актуальные проблемы современной сейсмологии: Сборник докладов Международной конференции, посвященной 50-летию

Института сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз (12–14 октября 2016 г.). Ташкент, 2016. С. 456–462].

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]. <http://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0330>.

Ruzhich V.V., Kocharyan G.G., Travin A.V., Savelyeva V.B., Ostapchuk A.A., Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Yudin D.S., 2018. Determination of the PT Conditions that Accompanied a Seismogenic Slip along a Deep Segment of the Marginal Suture of the Siberian Craton. *Doklady Earth Sciences* 481, 1017–1020. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18080081>.

Ruzhich V.V., Levina E.A., Ponomareva E.I., 2011. Experience of Seismic Forecasting Studies in the Baikal Rift Zone in 1994–2010. In: *Geodynamics, Geomechanics and Geophysics. Proceedings of the XI All-Russian Seminar* (July 25–31, 2011, Novy Enkhaluk, Republic of Buryatia). Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, p. 28 (in Russian) [Ружич В.В., Левина Е.А., Пономарева Е.И. Опыт сейсмопрогностических исследований в Байкальской рифтовой зоне в 1994–2010 гг. // Геодинамика, геомеханика и геофизика: Материалы XI Всероссийского семинара (25–31 июля 2011 г., п. Новый Энхалук, Республика Бурятия). Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2011. С. 28].

Ruzhich V.V., Levina E.A., Ponomaryova E.A., 2019a. On Probability and Results of the Medium-Term Seismic Hazard Prediction in Pribaikalye and Its Role in Seismic Risk Mitigation. In: *Rifting, Orogenesis and Accompanied Processes. Proceedings of the IV All-Russian Symposium with Participation of Foreign Scientists, Dedicated to the 90th Anniversary of Academician Nikolay Logatchev* (October 14–15, 2019). IEC SB RAS, Irkutsk, p. 167–169 (in Russian) [Ружич В.В., Левина Е.А., Пономарева Е.А. О возможности и результатах среднесрочного прогноза опасных землетрясений в Прибайкалье и его роли в снижении сейсмического риска // Рифтогенез, орогенез и сопутствующие процессы: Материалы IV Всероссийского симпозиума с участием иностранных ученых, посвященного 90-летию со дня рождения академика Н.А. Логачева (14–15 октября 2019 г.). Иркутск: ИЭК СО РАН, 2019. С. 167–169].

Ruzhich V., Ostapchuk A., Pavlov D., 2019b. On the Results of Studying Deep Paleo Seismic Dislocations (at the Example of the Marginal Suture of the Siberian Craton). In: G. Kocharyan, A. Lyakhov (Eds), *Trigger Effects in Geosystems*. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham, p. 163–168. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31970-0_18.

Ruzhich V.V., Psakhie S.G., Levina E.A., Shilko E.V., 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., Psakhie S.G., Shilko E.V., Levina E.A., 2019c. Physical Mesomechanics Based Interdisciplinary Approach to the Development of New Methods for Managing Deformation Process in Fault Zones. AIP Conference Proceedings 2167, 020300. <https://doi.org/10.1063/1.5132167>.

Ruzhich V.V., Shilko E.V., 2021. A New Method for Seismically Safe Managing of Seismotectonic Deformations in Fault Zones. In: G.-P. Ostermeyer, V.L. Popov, E.V. Shilko, O.S. Vasiljeva (Eds), Multiscale Biomechanics and Tribology of Inorganic and Organic Systems. In memory of Professor Sergey Psakhie. Springer Tracts in Mechanical Engineering. Springer, Cham, p. 45–63. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60124-9_3.

Ruzhich V.V., Vakhromeev A.G., Levina E.A., Sverkunov S.A., Shilko E.V., 2020. Seismic Activity Control in Tectonic Fault Zones Using Vibrations and Deep Well Fluid Injection. Physical Mesomechanics 3, 54–69 (in Russian) [Ружич В.В., Вахромеев А.Г., Левина Е.А., Сверкунов С.А., Шилько Е.В., Об управлении режимами сейсмической активности в сегментах тектонических разломов с применением вибрационных воздействий и закачки растворов через скважины // Физическая мезомеханика. 2020. № 3. С. 54–69]. <http://doi.org/10.24411/1683-805X-2020-13006>.

Ruzhich V.V., Vakhromeev A.G., Sverkunov S.A., Shilko E.V., Ivanishin V.Ya., Akchurin R.Kh., 2021. Method for Reducing Elastic Excess Energy in Seismically Dangerous Fault Segments. A Patent on Invention RU 2740630 C1 of January 18, 2021. ROSPATENT (in Russian) [Ружич В.В., Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Шилько Е.В., Иванишин В.Я., Акчурин Р.Х. Способ снижения упругой избыточной энергии в сеismoопасных сегментах разломов: Патент на изобретение RU 2740630 C1 от 18.01.2021. РОСПАТЕНТ, 2021].

Rylance M., Mahadev K., 2016. Stress Cage and Frac Pack: Drilling the Conventionally Undrillable without Creating the Unfracturable. In: Proceedings of the Offshore Technology Conference (May 2–5, 2016, Houston, Texas, USA). OTC, OTC-26900-MS. <https://doi.org/10.4043/26900-MS>.

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>.

Seminsky K.Zh., 2003. Internal Structure of Continental Fault Zones. Tectonophysical Aspect. GEO, Novosibirsk, 244 p. (in Russian) [Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Гео, 2003. 244 с.].

Seminsky K.Zh., Gladkov A.S., Lunina O.V., Tugarina M.A., 2005. Internal Structure of Continental Fault Zones. Applied Aspect. GEO, Novosibirsk, 293 p. (in Russian) [Семинский К.Ж., Гладков А.С., Лунина О.В., Тугарина М.А. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Прикладной аспект. Новосибирск: Гео, 2005. 293 с.].

Shapiro S.A., Krüger O.S., Dinske C., 2013. Probability of Inducing Given-Magnitude Earthquakes by Perturbing Finite Volumes of Rocks. Journal of Geophysical Research:

Solid Earth 118 (7), 3557–3575. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50264>.

Shebalin N.V., 1968. Methods to Use Engineering and Seismological Data for Seismic Zoning. In: Seismic Zoning of the USSR. Nauka, Moscow, p. 95–111 (in Russian) [Шебалин Н.В. Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 95–111].

Shoigu S.K., Koff G.L., Shakhramanyan M.A., 1992. Seismic Risk Analysis, Rescue and Life Support of the Population during Catastrophic Earthquakes (Seismic, Methodological and Methodical Aspects). Moscow, 470 p. (in Russian) [Шойгу С.К., Кофф Г.Л., Шахраманиян М.А. Анализ сейсмического риска. Спасение и жизнеобеспечение населения при катастрофических землетрясениях (сейсмические, методологические и методические аспекты). М., 1992. 470 с.].

Sibiryakov E.B., Sibiryakov B.P., 2010. Pore Space Structure and Disjoining Pressure in a Granular Medium. Physical Mesomechanics 13 (S1), 40–43 (in Russian) [Сибиряков Е.Б., Сибиряков Б.П. Структура порового пространства и расклинивающее давление в зернистой среде // Физическая мезомеханика. 2010. Т. 13. № S1. С. 40–43].

Sibiryakov E.B., Sibiryakov B.P., 2017. Destruction of Granular Media under the Action of Pore Pressure. Fundamental and Applied Problems of Mining Sciences 4 (3), 92–96 (in Russian) [Сибиряков Е.Б., Сибиряков Б.П. Разрушение зернистых сред под действием порового давления // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2017. Т. 4. № 3. С. 92–96].

Sobolev G.A., Vettegren' V.I., 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>.

Solonenko V.P., 1960. Gobi-Altai Earthquake. Geology and Geophysics 2, 3–27 (in Russian) [Солоненко В.П. Гоби-Алтайское землетрясение // Геология и геофизика. 1960. № 2. С. 3–27].

Sverkunov S.A., Vakhromeev A.G., 2020. Drilling Horizontal Wellbores in Complex Carbonate Collectors with Low Hydrocarbon Reservoir Pressure Gradients. Textbook. Infra-Inzheneriya, Moscow–Vologda, 240 p. (in Russian) [Сверкунов С.А., Вахромеев А.Г. Бурение горизонтальных стволов скважин в сложных карбонатных коллекторах с низкими градиентами пластового давления углеводородных систем: Учебное пособие. М.–Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 240 с.].

Sverkunov S.A., Siraev R.U., Vakhromeev A.G., 2013. Mining-Geological Conditions of a Reservoir Drilling with Horizontal Trunks in the Priority Early Development Site of Yurubcheno-Tokhomsky Deposit. Bulletin of the Irkutsk State Technical University 10 (81), 110–116 (in Russian) [Сверкунов С.А., Сираев Р.У., Вахромеев А.Г. Горно-геологические условия первичного вскрытия продуктивного пласта горизонтальными стволами на первоочередном участке разработки Юрубчено-Тохомского

месторождения // Вестник ИрГТУ. 2013. № 10 (81). С. 110–116].

Turcotte D.L., 1992. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge University Press, 221 p.

Ulomov V.I., 1998. Modeling the Zones of Occurrence of Earthquake Sources Based on Lattice Regularization. *Physics of the Earth* 9, 20–38 (in Russian) [Уломов В.И. Моделирование зон возникновения очагов землетрясений на основе решеточной регуляризации // Физика Земли. 1998. № 9. С. 20–38].

Usachev P.M., 1986. *Hydraulic Fracturing of Reservoir. Nedra, Moscow*, 165 p. (in Russian) [Усачев П.М. Гидравлический разрыв пласта. М.: Недра, 1986. 165 с.].

Vakhromeev A.G., Danilova E.M., Razyapov R.K., 2017. Geodynamic Aspects in the Study of Complex Mining and Geological Conditions for Drilling into Oil-And-Gas Reservoirs in the Riphean Carbonate Rocks: An Overview of the Problem as Exemplified by the Deposits in the Baikit Petroliferous District. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (4), 903–921 (in Russian) [Вахромеев А.Г., Данилова Е.М., Разяпов Р.К. Геодинамические аспекты исследования сложных горно-геологических условий бурения древнейших карбонатных резервуаров нефти и газа рифея: обзор проблемы на примере месторождений Байкитской нефтегазоносной области // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 903–921]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0323>.

Vakhromeev A.G., Ivanishin V.M., Sverkunov S.A., Polyakov V.N., Razyapov R.K., 2019a. Deep Well as a Stand for Hydraulic «On-Line» Studies of the Stress State of a Rock Mass in Fluid-Saturated Fractured Reservoirs. *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (3), 761–778 (in Russian) [Вахромеев А.Г., Иванишин В.М., Сверкунов С.А., Поляков В.Н., Разяпов Р.К. Глубокая скважина как стенд гидравлических «on-line» исследований напряженного состояния горного массива флюидонасыщенных трещинных коллекторов // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 3. С. 761–778]. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0440>.

Vakhromeev A.G., Sverkunov S.A., Ivanishin V.M., Ilyin A.I., 2019b. *Drilling Wells for Oil and Gas in Difficult Mining and Geological Conditions: Fractured Natural Reservoirs, AHP and ANPD of Reservoir Fluid Systems*. Publishing House of Irkutsk State Technical University, Irkutsk, 420 p. (in Russian) [Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Иванишин В.М., Ильин А.И. Бурение скважин на нефть и газ в сложных горно-геологических условиях: трещинные природные резервуары, АНПД и АВПД пластовых флюидных систем. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. 420 с.].

Vakhromeev A.G., Sverkunov S.A., Siraev R.U., Razyapov R.K., Sotnikov A.K., Chernokalov K.A., 2015. Method of Drilling in with Horizontal Trunk in a Fractured Type of Oil-Gas-Saturated Carbonate Reservoir under Abnormally Low Reservoir Pressures. A Patent on Invention RU 2602437 C1 of September 11, 2015. ROSPATENT (in Russian) [Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Сираев Р.У., Разяпов Р.К., Сотников А.К., Чернокалов К.А. Способ первичного вскрытия бурением горизонтального ствола в трещинном типе нефтегазонасыщенного карбонатного коллектора в условиях аномально низких пластовых давлений: Патент на изобретение RU 2602437 C1 от 11.09.2015. РОСПАТЕНТ, 2015].

Vickery E.H., Bayne C.F., 2002. New One-Trip Multi-Zone Frac-Pack System with Positive Positioning. In: *Proceedings of European Petroleum Conference* (October 29–31, 2002, Aberdeen, UK). EAGE, SPE-78316-MS. <https://doi.org/10.2118/78316-MS>.

Vorobieva I., Shebalin P., Narto C., 2020. The Occurrence of Strong Man-Made Earthquakes in the Oil Production Zone in Oklahoma. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 56, 911–919. <https://doi.org/10.1134/S1069351320060130>.

Wang L., Kwiatak G., Rybacki E., Bonnelye A., Bohnhoff M., Dresen G., 2020. Laboratory Study on Fluid-Induced Fault Slip Behavior: The Role of Fluid Pressurization Rate. *Geophysical Research Letters* 47 (6), e2019GL086627. <https://doi.org/10.1029/2019GL086627>.

Zalivin V.G., Vakhromeev A.G., 2016. *Emergency Situations in Drilling*. Textbook. Publishing House of Irkutsk State Technical University, Irkutsk, 484 p. (in Russian) [Заливин В.Г., Вахромеев А.Г. Аварийные ситуации в бурении: Учебное пособие. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. 484 с.].

Zang A., Oye V., Jousset P., Deichmann N., Gritto R., McGarr A., Majer E., Bruhn D., 2014. Analysis of Induced Seismicity in Geothermal Reservoirs – An Overview. *Geothermics* 52, 6–21. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.06.005>.

Zhuang L., Kim K.Y., Jung S.G., Diaz M., Hofmann H., Min K.B., Zang A., Zimmermann G., Stephansson O., Yoon J.S., 2020. Laboratory True Triaxial Hydraulic Fracturing of Granite under Six Fluid Injection Schemes and Grain-Scale Fracture Observations. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 53, 4329–4344 <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02170-8>.

Zoback M., Hickman S., Ellsworth W., 2010. Scientific Drilling into the San Andreas Fault Zone. *Eos* 91 (22), 197–199. <https://doi.org/10.1029/2010EO220001>.