

УДК 551.24, 550.34, 531, 534-18

Об управлении режимами сейсмической активности в сегментах тектонических разломов с применением вибрационных воздействий и закачки растворов через скважины

В.В. Ружич¹, А.Г. Вахромеев^{1,2}, Е.А. Левина¹,
С.А. Сверкунов^{1,2}, Е.В. Шилько^{3,4}

¹ Институт земной коры СО РАН, Иркутск, 664033, Россия

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, 664074, Россия

³ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 634055, Россия

⁴ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, 634050, Россия

С позиций физической механики анализируются возможности нового подхода к эффективному решению проблемы обеспечения сейсмической безопасности, основанного на применении контролируемых техногенных воздействий на сейсмоопасные сегменты разломных зон. Подход разработан на основе натуральных экспериментов во фрагментах сейсмоактивных разломов Байкальской рифтовой зоны и коллизионных структур Монголии. В статье приводятся наиболее яркие примеры применения техногенных виброимпульсных воздействий на высоконапряженные участки зон разломов в сочетании с управляемой закачкой жидкостей через глубокие скважины. Обсуждение результатов воздействий на изучаемые фрагменты разломных зон проводится на основе результатов геологического исследования физико-химических процессов в зонах длительно живущих сейсмоактивных разломов и современных достижений в области глубокого бурения при разработке и эксплуатации месторождений углеводородов. Обосновывается концепция управляемой релаксации сдвиговых напряжений в потенциально опасных сегментах разломов, в которых выявляются признаки подготовки опасных очагов землетрясений. Обсуждаются возможности реализации данной концепции в ближайшей перспективе.

Ключевые слова: сейсмобезопасность, эксгумированный разлом, натуральный эксперимент, режимы сейсмической генерации, закачка раствора, виброимпульсное воздействие, индукция землетрясения, релаксация сдвиговых напряжений

DOI 10.24411/1683-805X-2020-13006

Seismic activity control in tectonic fault zones using vibrations and deep well fluid injection

V.V. Ruzhich¹, A.G. Vakhromeev^{1,2}, E.A. Levina¹, S.A. Sverkunov^{1,2}, and E.V. Shilko^{3,4}

¹ Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, 664033, Russia

² Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, 664074, Russia

³ Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, 634055, Russia

⁴ National Research Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia

A new seismic safety approach is analyzed from the standpoint of physical mechanics which is based on the use of controlled man-made impacts on seismically active fault segments. The approach was developed on the basis of field experiments in seismically active fault segments of the Baikal rift zone and collision structures of Mongolia. The paper reports the most striking examples of applying man-made vibrational impacts to high stress fault segments in combination with controlled fluids injection into deep wells. The results of impacts on the studied fault segments are discussed in the light of new geological data on physicochemical processes in the zones of ancient seismically active faults and recent advances in deep drilling for hydrocarbon exploration and production. A justification is provided for the concept of controlled shear stress relaxation in potentially hazardous fault segments showing the signs of earthquake preparation. The possible implementation of the proposed concept in the coming years is discussed.

Keywords: seismic safety, exhumed fault, field experiment, seismic generation modes, fluid injection, vibration pulse impact, earthquake nucleation, shear stress relaxation

1. Введение

Разработанные мировым сообществом методы противостояния природным сейсмическим катастрофам оказываются недостаточными, поскольку они не позволяют эффективно снижать материальные потери и гибель жителей при сильных землетрясениях [1–3]. К настоящему времени пришло понимание того, что трудности в поисках решений данной проблемы возникали во многом из-за отсутствия надежных сведений о глубинных характеристиках процессов подготовки землетрясений в зонах разломов. Сейсмический процесс как геологическое явление проявляется в результате тектонической деструкции литосферной оболочки Земли. Однако геологические сведения зачастую не учитываются при изучении глубинных условий и механизмов подготовки очагов опасных землетрясений, и предпочтение отдается методам лабораторного эксперимента и численного моделирования. В данной работе представлены обобщенные результаты многолетнего геолого-геофизического изучения механизмов инициации смещений в зонах сейсмоактивных разломов на территории Восточной Сибири и Республики Монголия при участии научных коллективов из различных российских и зарубежных научных центров. Основной целью проводимых комплексных исследований являлись физическое обоснование и отработка способов релаксации накопленной упругой энергии в зонах тектонических разломов до безопасного уровня с применением вибрационных воздействий и инъекции растворов в разломную зону [4]. В работе анализируются новые сведения, актуальные для разработки методов безопасной разгрузки формирующихся очагов опасных землетрясений. Обосновывается главный вывод о возможности создания в ближайшей перспективе безопасных способов и эффективных методов управления режимами подготовки землетрясений [5]. Обсуждаются перспективы проведения крупномасштабных натурных испытаний, направленных на контролируруемую релаксацию сдвиговых напряжений на протяженных участках разломов с проведением глубокого бурения для осуществления виброимпульсных и гидроволновых воздействий на глубинные потенциально сейсмоопасные области. Планируемые испытания создадут основу для дальнейшего практического применения развиваемых способов безопасной релаксации высоких сдвиговых напряжений и эффективного снижения сейсмического риска.

Ниже изложены основные результаты изучения режимов смещений в разломных зонах методом непрерывных инструментальных измерений и проведением натурных экспериментов [6], а также компьютерным моделированием методом подвижных клеточных автоматов [7]. Основной акцент в исследованиях сделан на выявлении роли двух факторов: водонасыщения трещиновато-пористой среды в зонах разломов вместе с гидродинамическими параметрами водонапорных систем [8, 9] и виброимпульсного воздействия, значимая роль которого обусловлена высокой виброчувствительностью высоконапряженных участков разломных зон.

2. Методические основы комплексного подхода

Землетрясения являются результатом ускоренных деструктивных процессов в геологической среде [10–12] при влиянии внеземных и эндогенных энергетических источников, связанных с гравитационными и тепловыми полями. Это обуславливает необходимость привлечения таких научных направлений, как общее сейсмическое районирование, прогноз землетрясений, анализ эндогенных физико-химических и тектонофизических процессов, а также геолого-геофизическое и сейсмогеологическое исследование для разработки эффективных способов обеспечения сейсмической безопасности. Возникающие при этом проблемы, связанные в том числе с непониманием особенностей глубинных механизмов преобразования энергии теплового и гравитационного полей в геосферах Земли, привели мировое сообщество ученых к осознанию необходимости мультидисциплинарного подхода к решению задачи обеспечения сейсмобезопасности. Именно с этих позиций авторами проводились исследования, включающие мониторинг естественных смещений в разломах и их активизацию с применением динамических воздействий (взрывов, вибраций, инъекции водных растворов). Важным дополнением и расширением этих исследований являлось компьютерное моделирование процессов, контролирующих изменение режима смещений в разломных зонах методом подвижных клеточных автоматов. Акцент в исследованиях сделан на выяснении раздельного и совместного влияния гидродинамического водонасыщения зоны разлома и механического вибрационного воздействия. Одним из концептуальных результатов стало понимание важности применения междисциплинарного подхода для создания эффективных

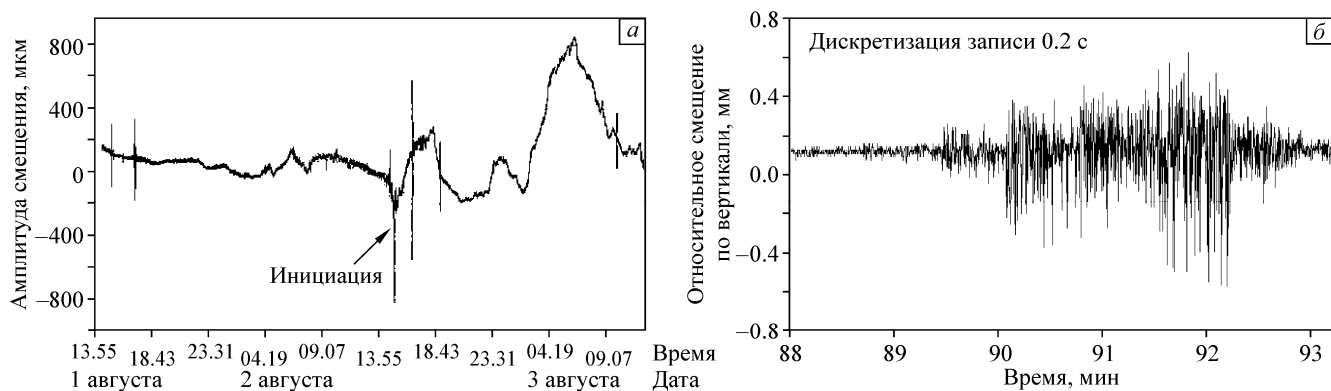


Рис. 1. Результаты динамического воздействия (слабый взрыв) на сегмент сейсмодислокации Тормхон: график инициированных слабым взрывом смещений (а); детальная запись отдельного пакета длиннопериодных колебаний в форме, аналогичной «медленному землетрясению», свидетельствующая о высвобождении избыточных напряжений в окружающем породном массиве (б)

способов реализации техногенно индуцированного изменения характера смещений в зоне разлома и замедленной (в режиме вязкого скольжения) разгрузки избыточных тектонических напряжений [13].

Известно, что высвобождение эндогенной тектонической энергии, накопленной в земной коре, в виде упругих (сейсмических) колебаний осуществляется через механизм динамических смещений крыльев разломов. Сильным землетрясениям соответствуют смещения со скоростью до 1–10 м/с. По мере уменьшения скорости динамических смещений в зоне разлома уменьшается и высвобождаемая упругая энергия в виде колебаний сейсмического диапазона (при этом возрастает энергия, затрачиваемая на тепловые процессы и разрушение горных пород). Такие смещения не представляют угрозы в виде сильных землетрясений. Предельным случаем «медленных» динамических смещений является ускоренная ползучесть. Отсюда следует, что скорость относительного тангенциального смещения крыльев разлома является одним из главных параметров, определяющих режимы высвобождения части аккумулированной упругой энергии в геологической среде [14, 15]. Соответственно, знание механизмов возбуждения смещений и управление режимом этих смещений в сейсмоактивных разломах является основой контроля масштаба высвобождаемой сейсмической энергии. Обсуждаемым далее перспективным способом реализации такого контроля является управление прерывистым скольжением (stick-slip) на наиболее высоконапряженных и сейсмически активных участках разломов [16, 17].

3. Результаты проведения натуральных экспериментов на приповерхностных участках разломных зон

3.1. Испытания на сегменте сейсмодислокации Гоби-Алтайского землетрясения (Монголия)

По результатам геологического обследования для проведения испытаний был выбран участок субмеридионального ответвления косейсмического разрыва (Тормхонский сегмент) от субширотной основной зоны сейсмодислокации Гоби-Алтайского землетрясения 1957 г. с $M = 8.1$. В результате мониторинга естественных смещений и проведения локальных динамических воздействий в форме слабых взрывов было обнаружено проявление механизма замедленного деформационного отклика на динамические воздействия в виде пакета деформационных импульсов, типичный пример которых показан на рис. 1.

Результаты испытаний на участках сейсмодислокаций в Монголии, возникших после сильных землетрясений в 1957 и 1967 гг., позволили сделать следующие выводы. Слабые локальные виброимпульсные воздействия приводят к релаксационным эффектам в виде ускоренного скольжения крыльев разлома со скоростями до 10 мкм/с, сопровождаемого умеренными по амплитуде виброимпульсными микросмещениями, имеющими качественное сходство с «медленными землетрясениями». Проявление подобных деформационных откликов на слабые взрывные воздействия однозначно интерпретируется как следствие распределенной во времени и пространстве релаксации сдвиговых напряжений на изучаемом участке разлома и в прилегающих областях среды.



Рис. 2. Испытательный полигон в пос. Листвянка, на котором проводились многолетние наблюдения и эксперименты с воздействиями на фрагмент Ангарского разлома (серии ударов тяжелым копром, закачки воды через скважины в сочетании с внутрискважинными слабыми взрывами). Пунктиром отмечена траектория плоскости сегмента разлома (цветной в онлайн-версии)

3.2. Сегмент Ангарского разлома (побережье оз. Байкал)

Территория полигона расположена вблизи поселка Листвянка, где сегмент зоны сейсмоактивного Ангарского разлома взбросо-сдвигового типа смещений имеет северо-западное простирание (рис. 2). Его пересекает более молодая зона Приморского магистрального разлома сбросового типа, имеющего северо-восточное простирание. Начиная с 1995 г. и до настоящего времени на данном полигоне осуществляется мониторинг смещений по разлому и проводятся испытания с применением техногенных воздействий различного типа. Исследования проводились научным коллективом Института земной коры СО РАН (Иркутск) при участии научных групп Института физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск), Института динамики геосфер РАН (Москва) и Берлинского технического университета.

В пределах полигона располагается солнечный оптический телескоп Института солнечно-земной физики СО РАН, имеющий форму башни высотой около 30 м. Фундамент этой башни возведен на скальном основании гранито-гнейсов в зоне Ангарского разлома. Колебания башни, вызванные, например, сильными ветрами, через фундамент оказывают значимое влияние на напряженное состояние прилегающей зоны разлома. На рис. 3 приведены записи характерных смещений в плоскости

сместителя и в нормальном к ней направлении в период мощного циклона с порывами ветра до 20–25 м/с. Шторм сопровождался обильным ливнем, в

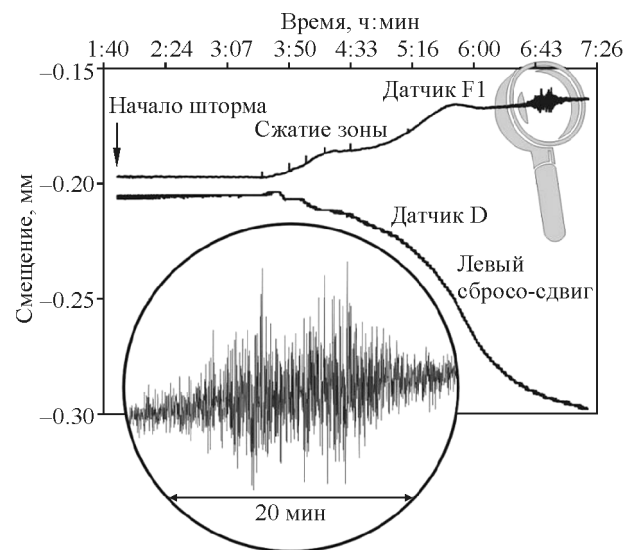


Рис. 3. Характерный деформационный отклик при длительном комбинированном воздействии на разлом (иницированные штормом знакопеременные механические воздействия башни телескопа на зону разлома в сочетании с водонасыщением поверхностного слоя горного массива глубиной до нескольких десятков метров). Смещения происходили в режиме ускоренной ползучести. В нижней части показан увеличенный фрагмент записи пакета квазиупругих импульсов с периодами 2–4 с, отражающий проявление эффекта «дрожания», т.е. ускоренного колебания стенок разрыва, к которому прикреплены датчики перемещений

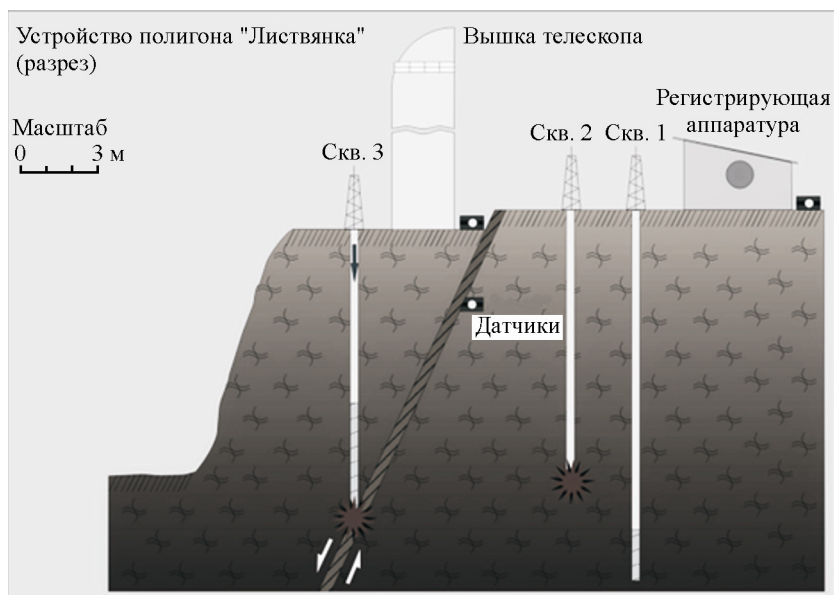


Рис. 4. Схема организации полигона для проведения натуральных экспериментов на участке зоны Ангарского разлома в п. Листвянка. Показаны вертикальный разрез участка с тремя скважинами для закачки водных растворов и размещения зарядов взрывчатого вещества, датчики измерения деформаций и сейсмических сигналов, а также башня телескопа высотой около 30 м (цветной в онлайн-версии)

связи с чем поверхностный слой зоны разлома был сильно обводнен поступлением осадков (об этом свидетельствует полуметровое повышение уровня подземных вод, наблюдаемое в скважине пятнадцатиметровой глубины в зоне разлома).

При шторме под воздействием порывов сильно-го ветра фиксировались колебания металлической вышки телескопа с периодом 3–4 с ($\nu \approx 0.25$ Гц), которые передавались через фундамент башни в скальный массив и проявлялись в виде микросмещений в разломной зоне. В зоне разрывного нарушения северо-западного простирания было инициировано сжатие (датчик F1) и левостороннее сбросо-сдвиговое смещение (датчик D). Примечательно, что это инициированное смещение было направлено в противоположную сторону в сравнении с естественными правосторонними взбросо-сдвиговыми смещениями. Поэтому в последующий период закономерно фиксировались смещения противоположного направления, являющиеся следствием упругопластической «отдачи» породного массива. Врезка на рис. 3 характеризует запись деформационных колебаний, которые напоминают записи колебаний при «медленных землетрясениях», ранее зарегистрированных в зоне сейсмодислокации на монгольском полигоне Тормхонский сегмент.

Следует отметить, что при штормовом воздействии на участок разлома фиксировались возрос-

шие скорости скольжения (~ 10 мкм/с), что на порядок величины больше зарегистрированных здесь же значений скорости тектонического крипа. Таким образом, массивный телескоп, установленный в зоне разлома, при штормовых воздействиях выполняет функцию низкочастотного вибратора и возбуждает умеренное повышение микросейсмической активности. Важно отметить, что в данном природном явлении реализуется совместное действие двух факторов: обводнения разлома и низкочастотной вибрации. Оба фактора способствуют снижению эффективного коэффициента трения на поверхности контакта крыльев разлома, а их комбинированное влияние обеспечивает ускорение релаксационных процессов в сейсмобезопасном режиме (ускоренная ползучесть) [18], что было показано авторами с использованием теоретической модели Томлинсона [19, 20].

Описанные результаты мониторинга легли в основу методологии осуществления последующих испытаний с применением обводнения зоны разлома через специально пробуренные скважины глубиной 10–15 м (рис. 4) и высокоамплитудных динамических (взрывных) воздействий на дне обводненных или сухих скважин. Данные испытания сопровождались проведением тестовых низкоамплитудных воздействий (серии ударов копром) для идентификации различий в уровне сдвиговых напряжений до, во время и после окончания испыта-

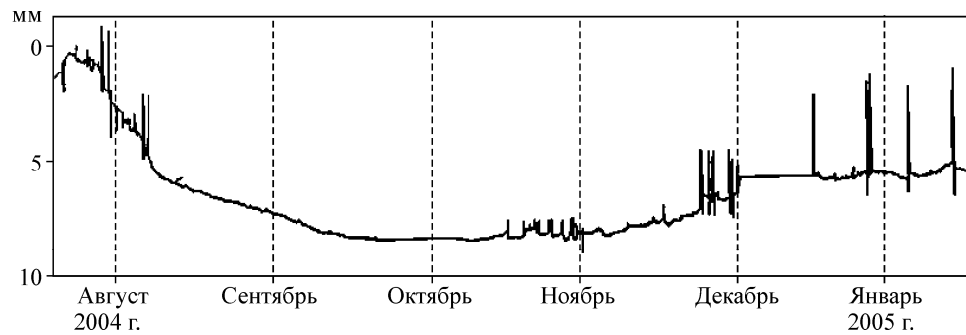


Рис. 5. Характерный график тангенциальных (сбросо-сдвиговых) смещений в сегменте Ангарского разлома, инициированных виброимпульсными и гидравлическими воздействиями на полигоне Листвянка в августе 2004 г. Амплитуда смещений за короткий период достигла 8 мм и в последующий период постепенно уменьшилась на 2.5 мм, что можно интерпретировать как следствие частичного упругопластического возврата

ний. Осуществлялся непрерывный мониторинг деформационной и сейсмической активности в изучаемом сегменте разлома.

Длительные (хотя и низкоэнергетические) вибровоздействия в процессе бурения, последующие многократные заполнения скважин водой и осуществление в скважинах слабых кумулятивных взрывов привели к изменению естественного режима медленного крипа. До начала испытаний характерные значения скорости тангенциального смещения по разлому составляли 0.65–3.3 мкм/сут. (0.24–1.2 мм/год). Проведенными техногенными воздействиями удалось инициировать многократное ускорение смещения до значений 5–10 мкм/сут. Амплитуда ускоренных смещений в ходе испытаний и в течение некоторого периода после его окончания достигла 8–10 мм (данные датчиков, размещенных на разных участках сегмента, рис. 5). Подтверждением релаксации сдвиговых напряжений на изучаемом сегменте разлома является зафиксированное снижение характерной амплитуды деформационного отклика на тестовые низкоамплитудные воздействия ударами копра (величина инициированных ударами необратимых тангенциальных смещений снизилась на порядок величины). Отметим, что помимо выявленного снижения амплитуд сейсмического и деформационного откликов на тестовые воздействия ударами копра, которые проводились в процессе и по окончании испытаний на полигоне, в течение последующих 14 лет фиксировался медленный естественный крип и крайне слабая микросейсмичность. Это также подтверждает существенное снижение уровня сдвиговых напряжений на изучаемом сегменте разлома в результате комбинированных (динамических механических и гидравлических) локальных воздействий.

В последующие месяцы после испытаний в разломе фиксировались смещения обратного знака: амплитуда инициированного смещения уменьшилась от 8 до 5 мм, т.е. произошло частичное упругопластическое восстановление. Подобные проявления отдачи в геологической среде в виде уменьшения остаточных деформаций обычно наблюдаются и в сейсмодислокациях после сильных землетрясений. При этом на фоне возвратных движений возникают серии сейсмических импульсов, соизмеримых по амплитудам с первоначальными. Таким образом, создаваемые воздействиями неравновесные условия, способствующие инициированию ускоренного крипа, аналогичного медленным землетрясениям, приводят к релаксационной разгрузке сегмента разлома. Описанные процессы в зоне контакта блоков горных пород могут быть эффективно охарактеризованы с использованием классических трибологических законов и моделей [21].

Натурные испытания были дополнены компьютерным моделированием поведения насыщенного жидкостью фрагмента активного разлома методом подвижных клеточных автоматов [22]. При построении функции отклика насыщенного жидкостью материала использовался вывод о том, что поступление жидкости в трещинно-поровое пространство зон разломов геологической среды уменьшает силы сцепления поверхностей мелких повреждений и трещин. Результаты расчетов показали, что данный эффект приводит на макромасштабном уровне к уменьшению предела упругости материала и снижению наклона необратимого участка диаграммы сдвигового деформирования. В частности, установлено, что насыщение жидкостью фрагмента зоны разлома в сочетании с вибрациями может обеспечивать почти двукратное

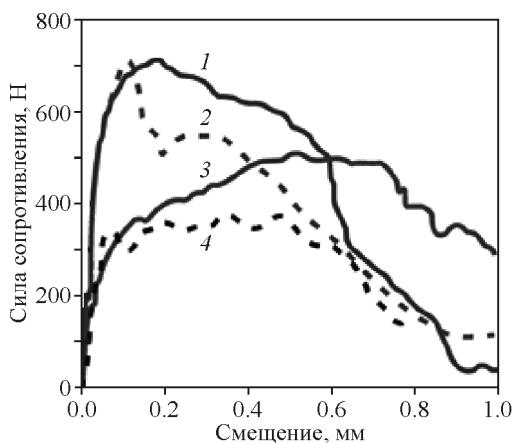


Рис. 6. Зависимость силы сдвигового сопротивления модельного фрагмента разлома от величины сдвигового смещения. Компьютерное моделирование методом подвижных клеточных автоматов. Демонстрируется влияние закачки жидкости в разлом и виброимпульсных воздействий на снижение сдвигового сопротивления смещению берегов разломов (режим сдвига с постоянной приложенной скоростью): 1 — «сухой» разлом без дополнительных динамических воздействий; 2 — «сухой» разлом, дополнительные виброимпульсные воздействия; 3 — водонасыщенный разлом без дополнительных динамических воздействий; 4 — водонасыщенный разлом, дополнительные виброимпульсные воздействия. В последнем случае стимуляция путем совмещения виброимпульсных воздействий и закачки жидкости приводит к наибольшему снижению сопротивления сдвигу

уменьшение сдвигового сопротивления и ускоренное тангенциальное смещение крыльев разлома (рис. 6).

Действительно, введение лубриканта в «сухой» разлом с высоким уровнем внутренних напряжений позволяет инициировать или ускорять тангенциальное смещение в режиме ускоренного крипа. При этом величина и характерная скорость смещений, согласно известным законам трибологии, определяются уровнем внутренних напряжений, степенью обводнения и спецификой внутреннего строения самого разлома, в частности, шероховатостью его плоскости скольжения [21]. Следовательно, насыщение фрагмента зоны разлома жидкостью и вибрационные воздействия, также снижающие эффективный коэффициент трения, являются ключевыми инструментами управления режимом скольжения и генерации упругих волновых колебаний сейсмического диапазона в сегментах активных разломов [19]. Естественный криповый режим смещений на участке разлома за несколько актов виброимпульсных воздействий в сочетании с закачками воды может быть переведен в фазу ускоренного крипа и, соответственно, ускоренной

релаксации локальных сдвиговых напряжений с последующим переходом в замедленный крип. Важно отметить, что такая релаксация носит сейсмобезопасный характер в отличие от динамических релаксационных явлений (динамического проскальзывания) при землетрясениях. При этом величина диссипировавшей потенциальной энергии области горного массива в процессе ускоренного крипа может быть сопоставимой с энергией, выделяющейся при землетрясении.

На разработанный способ сейсмобезопасной релаксационной «разрядки» исследуемого участка разлома был получен патент Российской Федерации [5]. Позднее другие научные группы запатентовали иные способы воздействий, но также ориентированные на контролируемую техногенную разгрузку породных массивов и зон разломов [23].

3.3. Испытания в зоне Приморского разлома

Техногенные воздействия на небольшие сегменты разломных зон с применением домкратов и слабых взрывов проводились в зоне Приморского рифтогенного сброса на побережье Байкала (в районе поселков Куяда и Большая Бугульдейка). Данный район примечателен тем, что в нем стали доступными для визуального изучения глубинные сегменты зоны древнейшего краевого шва Сибирского кратона, эксгумированные на земную поверхность с глубин порядка 12–18 км. Возникший в период рифтогенной активизации Приморский сброс развивается в пределах высокометаморфизованного субстрата, где по находкам псевдотахилитов выявлены признаки палеоземлетрясений (косейсмические разрывы) [24, 25]. На рис. 7 можно видеть небольшой фрагмент Приморского разлома, на котором оборудован пункт для проведения мониторинга и изучения откликов на механические воздействия (маломощные взрывы и нагружение домкратом) в местах стесненного контакта блоков горного массива. Описанные ниже исследования проводились на специально созданной искусственной шероховатости. В выбранную крупную трещину в зоне разлома был введен гидравлический плоский домкрат ДН-150, и с его помощью стенки разрыва были раздвинуты с усилием 43 т. В трещину был вставлен штуф гранито-гнейса для детальных наблюдений за его последующей деструкцией в условиях стесненного тангенциального контакта со стенками трещины. После сброса давления в домкрате штуф был зажат в полости трещины (нормальная контактная нагрузка составляла 43 т). Таким образом, был создан модельный кон-



Рис. 7. Организация измерительного полигона на участке зоны Приморского рифтогенного сброса для мониторинга деформаций и сейсмической активности, а также проведения локальных воздействий с применением домкратов и слабых кумулятивных взрывов. Справа показана искусственная шероховатость (туф гранито-гнейса, вставленный в раздвинутую домкратом трещину), разрушенная в результате проведенных техногенных воздействий

центратор локальных нормальных и сдвиговых напряжений на контактной поверхности для последующего изучения его отклика на различные воздействия. Эксперименты сопровождалось измерением деформаций и сейсмических импульсов вблизи контакта стенок трещины с искусственной шероховатостью.

После предварительного мониторинга естественной деформационной и сейсмической активности в трещине была произведена серия механических воздействий в виде раздвигания стенок разрыва домкратом с усилиями в десятки тонн и последующей разгрузкой при различных значениях скорости нагружения. Для сравнения особенностей отклика позднее проводились маломощные взрывы с применением пороховых зарядов в металлических патронах с навеской пороха 0.1 кг. Камера взрыва располагалась в нижней части породного массива, на удалении 3 м от места исследования. На рис. 8 представлен образец записи сейсмостанцией сейсмических ускорений в течение 5 ч после одного из взрывов. Можно видеть, в частности, сейсмическую активизацию в течение временного интервала 15–40 мин от момента взрыва и последующее «затишье». В период «затишья» фиксировались умеренные деформации сжатия трещины в диапазоне амплитуд 25–35 мкм в сочетании со взбросовыми смещениями.

На верхней врезке рисунка представлен график колебательной скорости с амплитудой 7 см/с, на нижней — запись наведенного первого и самого крупного импульса, возникшего спустя 22 мин после момента взрыва (амплитуда ускорения 70 см/с^2 , частота 160–175 Гц). На основном графике можно видеть, что через 190 мин после начала испытания проявилась вторая фаза отклика длительностью 140 мин, состоящая из пакета низкочастотных импульсов со средним периодом около 18 мин и амплитудами сейсмических ускорений 15–20 см/с^2 . Подобные низкочастотные волновые колебания можно интерпретировать как проявление механизма сейсмодеформационного отклика массива горных пород на взрывное воздействие. Примечательно то, что он проявился в виде упругопластической отдачи на фоне возвратного прерывистого скольжения. Таким образом, был экспериментально воспроизведен механизм генерации «медленных волн» в виде низкоскоростных колебаний. На примере подобных испытаний была сформулирована концепция двухстадийного механизма релаксации и перераспределения локальных напряжений, инициированных динамическим возмущением напряженного состояния (взрывом): первая стадия — генерация упругих высокоскоростных сейсмических импульсов; вторая стадия — проявление медленных сейсмодеформационных волновых колебаний

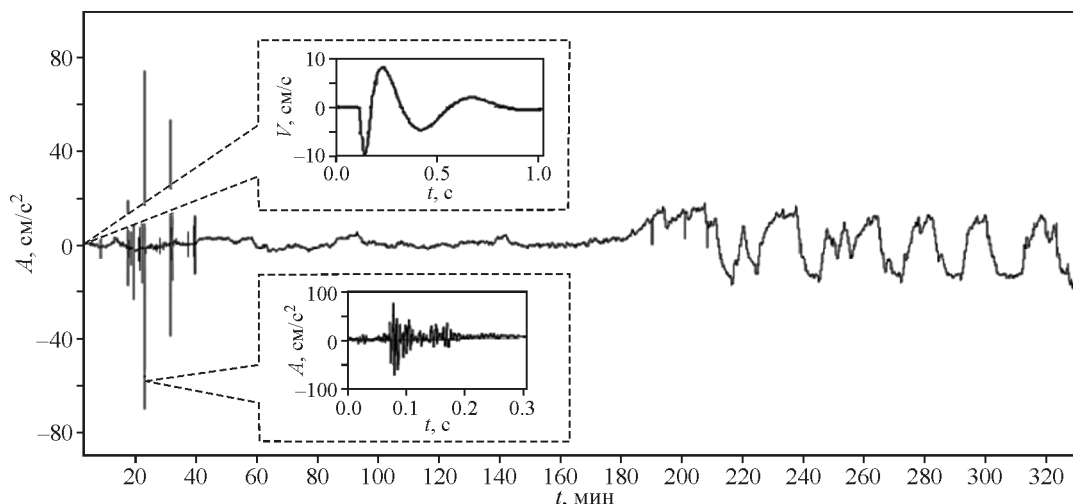


Рис. 8. Сейсмический отклик изучаемого участка трещины в зоне Приморского разлома на взрыв малой мощности. Общий вид сейсмической записи в течение 330 мин от момента взрыва. Наряду с динамическими проявлениями видны медленные волновые колебания

породного массива, возникающих в ходе возвратного прерывистого скольжения в области стесненного пятна контакта. В последующих испытаниях дополнительно производилось обводнение участка контакта вставки и стенок разрыва, что спровоцировало ускорение скольжения и возникновение серии слабых импульсов в сейсмоакустическом частотном диапазоне. При этом визуально наблюдалось динамическое растрескивание штуфа в месте контакта со стенками трещины.

Описанный эксперимент наглядно демонстрирует проявление опасного эффекта упругой отдачи на взрывное высокоскоростное воздействие в первой фазе отклика, сопровождающейся мощными сейсмическими импульсами. Более того, после относительно длительного «затишья» возникают медленные возвратные движения, аналогичные медленным землетрясениям [26, 27]. В отличие от взрывов, при значительно более медленных воздействиях домкратом первая фаза с генерацией мощных сейсмических импульсов не фиксируется, тогда как проявление второй фазы происходит в режиме умеренного сейсмического излучения.

3.4. Подземные испытания в штольне Талая

Важные дополнительные сведения удалось получить в результате исследований в подземной горной выработке в районе Слюдянского месторождения. Оно приурочено к сейсмоактивному сегменту зоны Главного Саянского глубинного разлома, эксгумированного на земную поверхность с глубин порядка 15–20 км. Эксперименты проводились в разведочной штольне Талая в гор-

ном массиве, состоящем из высокометаморфизованного гнейсового комплекса раннего протерозоя, залегающего на глубинах порядка 15–20 км. Изучение откликов на воздействия проводилось с применением мощных гидравлических домкратов ДН-150 и ДН-50, установленных в зонах глубинных разрывных нарушений, залеченных флюидами (рис. 9). С помощью усилий, достигающих 40–60 т, производились раздвигающие воздействия на стенки разрывов с различной скоростью и последующие сбросы давления в поэтапном (в том числе динамическом) и плавном (медленном) режимах. В случае динамического сброса давления домкрата возникал характерный эффект схлопывания стенок трещин за десятые доли секунды, что сопровождалось микросейсмическими эффектами, сходными по записям с микроземлетрясениями. Проявления микросейсмичности свидетельствуют о вибрационном режиме упругой разгрузки в окружающей области породного массива. При медленном снижении давления домкрата диссипация энергии массива сопровождалась крайне слабой сейсмической активностью.

Натурные исследования подтвердили возможность и необходимые условия безопасной разгрузки высоконапряженных участков массивов горных пород контролируемыми локальными механическими воздействиями. Было установлено, в частности, что сходные с описанными выше реакции области горного массива, содержащего разрывные нарушения, воспроизводятся при определенных режимах закачки растворов в разломную зону через скважины. Выбор режима механического воз-

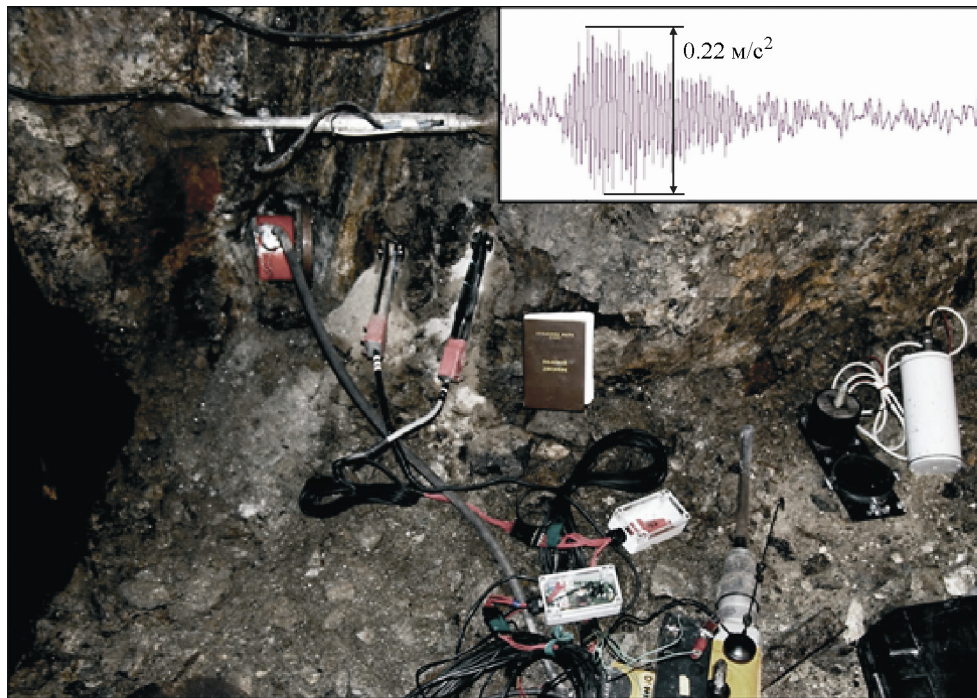


Рис. 9. Место проведения испытаний в зоне Главного Саянского разлома (штольня Талая) для изучения отклика залеченных разрывных нарушений на механические динамические и квазистатические воздействия различной энергии. Показаны домкрат с насосом, сейсмодатчики и деформометрические датчики. На врезке приведена сейсмическая запись одного из инициированных сейсмических импульсов в результате «мгновенного» сброса давления домкрата, сходная с записью микроземлетрясений (цветной в онлайн-версии)

действия или насыщения жидкостью разломной зоны позволяет контролировать генерацию сейсмических импульсов в процессе инициированного скольжения поверхностей разрывов с шероховатыми поверхностями. В случае выбора оптимальных параметров воздействия избыточная упругая энергия глубинного породного массива высвобождается за счет потерь на работу по механическому диспергированию, а также на термический разогрев, за длительный временной интервал. Это позволяет исключить генерацию высокоамплитудных (высокоэнергетических) сейсмических колебаний.

4. Направленные воздействия на глубинные сегменты разломов давлением растворов, инжектируемых через скважины

Геологическое обследование эксгумированных глубинных сегментов разломов показывает, что косейсмические разрывы палеоочагов землетрясений, имеющих возраст десятки-сотни миллионов лет, являются «залеченными», т.е. заполненными новообразованными минералами с пониженным сдвиговым сопротивлением. Наличие менее прочного заполнителя не только способствует повторным косейсмическим смещениям в тех же местах, где ранее происходили сейсмогенные подвижки,

но и свидетельствует о важной роли потоков флюидов в подготовке очагов последующих землетрясений. Данное геологическое свидетельство является подтверждением широкого распространения флюидов в зонах разломов и обоснованности применения закачки водных растворов в разломы как составляющей перспективных техногенных способов воздействий на процессы формирования очагов землетрясений. Обратимся к изучению возможностей воздействий на глубинные сегменты разломов с использованием современной технологии бурения вертикальных, наклонных и горизонтально направленных скважин с закачкой в них растворов с разными скоростями и объемами жидкости [28–32]. Большой опыт накоплен при поисках и разработках в пределах древней Сибирской платформы, где вскрывались флюидные резервуары порово-трещинного и трещинного типов, залегающие на глубинах порядка 1300–5300 м и вмещающие нефть, газ и рассолы. Рассмотрим известные способы проведения гидравлического воздействия через сеть наклонно-направленных скважин с целью управляемого изменения сдвигового сопротивления путем раскрытия или смыкания стенок сместителей разломов [33]. Подобный эффект можно в первом приближении сравнить с рассмот-

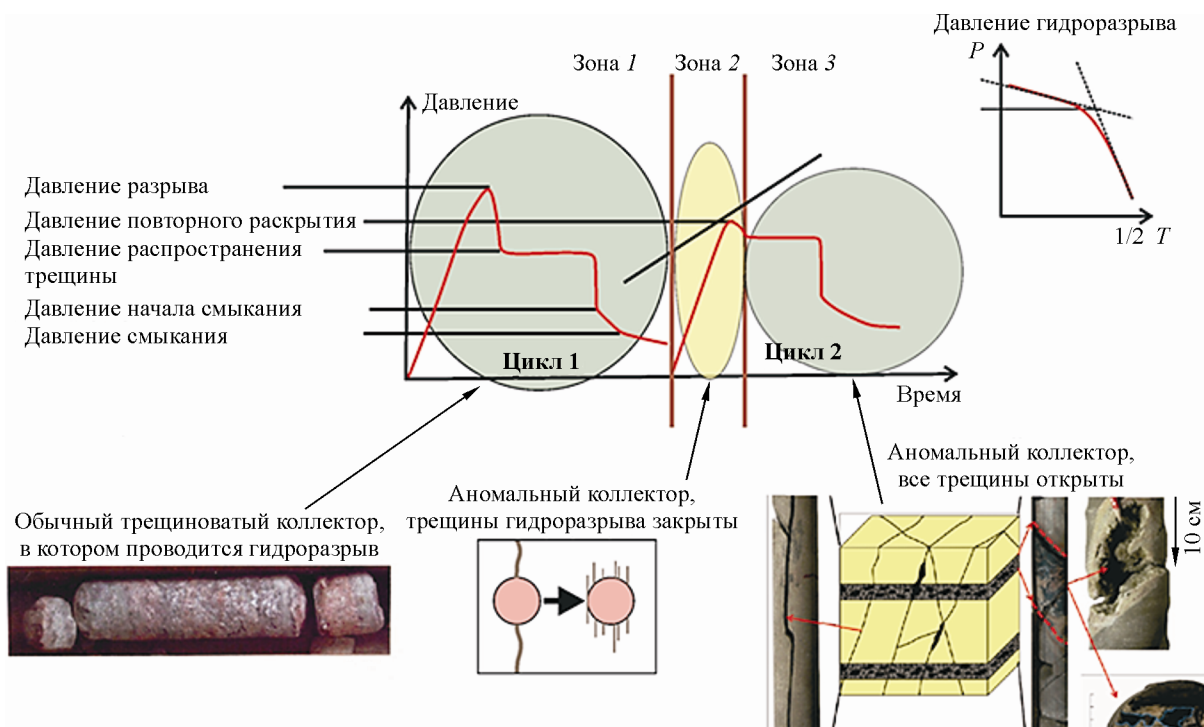


Рис. 10. Иллюстрация влияния первичного гидравлического разрыва горных пород (ГРП, зона 1) и повторного приоткрывания вновь образованных проницаемых трещин (зоны 2, 3) при воздействиях через скважины [34] (цветной в онлайн-версии)

ренными выше воздействиями мощных гидравлических домкратов. Конструкция глубокой скважины позволяет изолировать ее внутреннее пространство от вмещающих горных пород и передать значительное по величине (сотни МПа) давление жидкости в локальный участок (сегмент) обводненной разломной зоны. В таких случаях управляемое повышение давления в отдельных участках зон обводненных разломов позволяет локализованно изменять эффективный коэффициент трения и режим скольжения берегов разрывов в конкретном сегменте. В частности, установлено, что техногенные барические воздействия любого знака, передаваемые через слабо сжимаемую жидкость в пластовой флюидной системе, позволяют перевести трещиноватый резервуар в пределах области гидродинамического влияния в другое напряженно-деформированное состояние [34]. Таким образом, изменяя фильтрационно-емкостные свойства трещиновато-пористого коллектора, пересекаемого разломной зоной, давлением нагнетаемой в скважину жидкости, можно управлять напряженно-деформированным состоянием соответствующих участков разлома и режимом их сейсмической активности. На рис. 9 приведен график, характеризующий эффект гидравлического воздействия на пласт гор-

ной породы и последовательно возникающие три зоны напряженного состояния.

Зона 1 характеризует породный массив, в котором существует сеть трещин с естественной проницаемостью. При закачке возникает переходная зона, в которой давление начинает постепенно возрастать в начале поглощения или «утечки» растворов, что приводит к расширению имеющихся разрывных нарушений и плавному снижению сдвигового сопротивления. В случаях быстрого достижения предельно высоких давлений жидкости возможно появление гидроразрывов (искусственно созданных трещин) и резкие спады давления. В таких случаях возникают условия для более интенсивной генерации сейсмических импульсов (индуцированных землетрясений). Далее имеет место стабилизация давления на определенном уровне, что соответствует значению приемистости конкретной трещины или системы фильтрующих трещин пласта. При дальнейшей закачке начинается утечка жидкости из скважины в пласт. При снижении забойного давления происходят смыкание трещин гидроразрыва, плавное падение порового давления и стабилизация его на определенном уровне. Зона 2 характеризует горный массив, представленный трещиноватым коллектором с уже созданной

трещиной гидроразрыва, которая в этой зоне является сомкнутой. Давление повторного открытия трещины меньше величины давления гидроразрыва в зоне 1. Зона 3 характеризует горный массив, представленный трещиноватым коллектором с уже созданной трещиной гидроразрыва, которая в определенном диапазоне давлений может быть постоянно открыта.

Каждая из трех зон на рис. 10 может быть одним из состояний реального флюидонасыщенного массива в текущий момент времени [34]. Контроль открытия и смыкания трещин в каждом участке выделенной зоны тектонического нарушения закачками жидкости через горизонтальный ствол глубокой скважины позволяет направленно изменять сдвиговое сопротивление, а соответственно, и скорость скольжения в конкретном участке разлома. При снижении забойного давления до определенного уровня снижается проницаемость в области падения давления, происходит закрытие трещин, возрастают локальные силы трения и интегральное сдвиговое сопротивление. Чтобы в дальнейшем снова раскрыть эти трещины, недостаточно «вернуть» давление к начальным значениям. Необходимо повысить давление флюидной системы до уровня раскрытия трещины (зона 2), т.е. до величины утечки P . Барические воздействия такой амплитуды, как правило, осуществляются для увеличения проводимости породных массивов при добыче углеводородов и нередко сопровождаются повышением сейсмической активности, что является негативным эффектом. В реальных геологических условиях, когда закачки через глубокие скважины осуществляются в уже «готовые» зоны сейсмоактивных разломов, нет необходимости достигать предельно высокого уровня давления жидкости и принудительного разрыва пласта с образованием новых трещин, т.е. состояния гидроразрыва пласта.

Суть предлагаемого подхода состоит в том, что достижение эффекта гидроразрыва пласта при повышенной скорости закачки растворов в зоны существующих разломов не требуется. Более того, используются оптимальные режимы воздействий гидравлическим давлением, при которых исключаются условия возникновения гидроразрывов и сопровождающих их сейсмических явлений. Для реализации безопасного управляющего воздействия на трибологические процессы в зонах разломов необходимо учитывать ряд определенных условий. В частности, необходимо проводить оценку соотношения углов наклонов зон разломов с вер-

тикальной направленностью вектора земного притяжения. Как свидетельствует опыт, вертикальные трещины, как и зоны разломов сдвигового типа, имеют более высокую раскрытость в сравнении с наклонными. Хорошо известно, что в большинстве случаев величина обусловленного горным давлением нормального (сжимающего) напряжения на стенки вертикальных трещин и, следовательно, сдвиговое сопротивление будут значительно меньше, чем в случае наклонных трещин. При разбуривании коллекторов в пределах субвертикальных зон разломов следует ожидать резкого падения забойного давления жидкости до фонового (пластового) давления флюидонапорной системы в окружающем породном массиве. В пределах субгоризонтальных зон разрывов надвигового типа (пологие разломные зоны и трещины) поровое давление жидкости может достигать предельно высоких значений, близких к сдвиговому напряжению, вследствие передачи части горного давления на скелет породы трещинного пласта-коллектора [34]. В подобных случаях применение стандартных технологий бурения может приводить к мощному динамическому отклику разломной зоны. Так, при исходном отсутствии флюидов в зоне субгоризонтального разрыва интенсивная закачка бурового раствора может спровоцировать резкое снижение сдвигового сопротивления и активацию косейсмических смещений [6, 31, 34]. Во избежание подобных явлений следует контролировать гидравлический режим, в частности, обеспечивать условие медленного повышения давления раствора с периодом 1–6–12 ч. Такое варьирование скорости нагнетания и стравливания давления растворов дает возможность осуществлять циклические волновые воздействия давлением водонапорной системы через скважину на фрикционное состояние конкретных сегментов зон разломов. Экспериментальное изучение нагнетания воды в разломы через скважины показало, что отклик в режиме раскрытия или смыкания природных фильтрующих трещин регулируется управлением давления закачки, скоростью нагнетания (расходом) и сброса давления буровых растворов [35].

Добавление в буровые растворы, например, гранул сополимеров (alpine drill beads) способствует снижению трения на участках контактного взаимодействия шероховатостей в участках зон разломов и соответствующему уменьшению величины плотности аккумулированной упругой энергии, при которой генерируются сейсмические колебания (а следовательно, и снижению амплитуды са-

мих колебаний). В процессе бурения можно использовать имеющиеся благоприятные гидродинамические и горно-тектонические условия, например естественную фильтрующую трещиноватость, упрощая закачку флюидов, и доставку гранул в сместитель разлома через пробуренные веерные боковые ответвления (стволы) в горизонтальных скважинах типа «fishbones» (рыбий хвост).

Таким образом, новые технологические решения, адаптированные к задачам управляющих воздействий на высоконапряженные разломы, могут дополняться применением пропантов и триботехнических добавок в буровые растворы, которые позволяют, в частности, закреплять пропантом просветы природных фильтрующих трещин. Использование добавок в виде гранул сополимеров позволяет уменьшать коэффициент трения на участках контактного взаимодействия неровностей в зоне разлома и снижать энергетический потенциал волновых упругих колебаний. В сейсмоопасных районах представленный вариант управляющего воздействия позволяет контролировать сложное взаимовлияние природных и технических факторов в системе «пласт – разлом – скважина» и обеспечивать умеренный уровень индуцированной сейсмичности ($M \approx 1-2$), не приводя к опасным землетрясениям.

Применяя современное техническое оснащение и достижения в технологии проходки глубоких нефтедобывающих скважин, возможно поэтапно воздействовать на деформируемые трещиноватопористые системы посредством гидравлического и волнового воздействия давлением жидкости в забое на стенки фильтрующих трещин в открытом стволе и окружающем породном массиве. Внедрение этого решения, ранее разработанного применительно к проходке нефтедобывающих скважин, в купе с плавным гидравлическим волновым воздействием на проницаемый пласт позволит контролировать и поддерживать режимы упруго-вязкопластического скольжения в потенциально сейсмоопасных сегментах зон разломов. В качестве примера в работе [36] приводится проект бурения сегмента Тункинского разлома с целью релаксации сдвиговых напряжений. В этом сегменте на основании анализа выявленных палеосейсмодислокаций и современного сейсмического режима обнаружены признаки подготовки очередного этапа сильной сейсмической активизации, ожидаемой с высокой вероятностью в ближайшие годы или первые десятки лет.

5. Обсуждение результатов

Перспективность предлагаемых представлений о сейсмобезопасной релаксации напряжений в зонах потенциально опасных разломов с применением передовых буровых технологий находит подтверждение в выводах работ многих зарубежных ученых [37–41]. В частности, в работе [37], посвященной детальному анализу результатов геолого-геофизических исследований нефтяных месторождений на юго-западе Китая (провинция Сычуань), представлен следующий ряд условий, определяющих реактивацию участков разломов при закачках жидкости: геологическое строение разлома, исходное поровое давление, длительность и скорость закачек растворов, проницаемость вмещающего породного массива, уровень давлений и объем закачиваемой жидкости. Авторы цитируемой работы придают важное значение условиям дальнего действия гидравлического воздействия на участки разломов. В частности, зафиксировано распространение гидравлического давления на удалении порядка 10 км от нагнетательной скважины. Эмпирически выявлено, что наиболее опасный отклик на закачки часто возникает в начальный период, особенно при давлениях в скважине порядка 0.9 МПа. Отмечаются случаи возрастания энергии индуцированных землетрясений при увеличении протяженности участка разлома, подвергнувшегося быстрой высоконапорной гидравлической активации в режиме многомесячных закачек и быстрого распространения порового флюида (распространение флюида фиксировалось по движению фронта диффузии напряжений и скорости миграции гипоцентров слабых землетрясений). Окончание нагнетания жидкости, как правило, сопровождалось быстрым снижением сейсмической активности. Рассмотренные возможности безопасной релаксации напряжений в потенциально опасные сегменты разломных зон с применением закачки растворов подкрепляются новыми результатами численного моделирования, например, в работе [41].

Наряду с рассматриваемыми в данной работе способами техногенных воздействий на потенциально опасные сегменты разломов, востребованными могут быть и другие технические достижения. В частности, заслуживает углубленного анализа запатентованная российскими учеными и инженерами технология воздействий на разломы с применением разработанного плазменно-импульсного генератора. Он предназначен для увеличения отдачи нефтяного пласта и способен в импульсном

режиме через создаваемый в скважине плазменный канал вызывать резонансные явления в геологической среде. Данная технология успешно прошла валидацию на ряде месторождений в России и за рубежом. Предполагается, что подобными экологически безопасными вибровоздействиями можно с минимальными энергозатратами и за короткие временные интервалы изменять режимы скольжения в разломах для плавного снижения сейсмического потенциала. Заслуживают внимание и полученные в последние годы результаты полевых испытаний с применением мощных магнитно-резонансных генераторов для эпизодических управляемых воздействий на многокилометровые глубинные участки разломов, проводимых научной станцией РАН на территории Бишкекского геодинамического полигона.

В работе [42] обсуждалась возможность инициирования умеренных землетрясений посредством закачек жидкости через скважины в одном из выбранных разломов дна Тихого океана. При попытках реализации подобного проекта возникнут большие геомеханические и техногенные препятствия. По мнению авторов [14], реактивация в существующих разломах косейсмических смещений общей протяженностью во многие десятки-сотни километров (что реализуется при сильных землетрясениях с $M \geq 7.5$) вряд ли осуществима даже с применением подземных ядерных взрывов с мегатонными зарядами [43]. Это означает, что искусственно индуцировать разрушительное или катастрофическое землетрясение с $M = 7.5-8.9$ путем инжестирования жидкости в разломную зону практически невозможно. Однако необходимо учитывать печальный опыт непреднамеренного индуцирования менее сильных, но достаточно опасных антропогенных сейсмических событий или горных ударов в результате бесконтрольных длительных и масштабных техногенных воздействий на высоконапряженные участки активных разломов [44, 45]. Поэтому необходимо проведение предварительного полномасштабного «тестирования» выбираемых способов техногенных воздействий на разломы. Для реализации подобных сложных и дорогостоящих мероприятий и решения проблемы материального ущерба и человеческих потерь от крупных землетрясений необходимо объединение усилий мирового научного сообщества.

6. Заключение

Приведенные результаты и обобщения многолетних междисциплинарных исследований позволяют авторам обосновать вывод о реальной возможности создания технологии, позволяющей значительно снизить или не допускать масштабных динамических разрушений вследствие землетрясений. Такая технология может быть реализована на основе применения рассмотренных выше виброимпульсных и гидродинамических волновых воздействий на опасные сегменты тектонических разломов. Такие сегменты выявляются в рамках общего сейсмического районирования и долгосрочного вероятностного прогноза землетрясений при проведении более детального районирования. При этом исчезает острая необходимость осуществления краткосрочного прогноза землетрясений, возможности которого в обозримом будущем остаются неопределенными и который не предполагает снижения масштаба ущерба от сейсмических катастроф.

В настоящее время в мировом научном сообществе накоплены достаточные знания о природе землетрясений и достигнут высокий технологический уровень бурения глубоких скважин с закачкой растворов в зоны разломов в сочетании с виброимпульсными воздействиями. С их помощью становится реальным управление параметрами сдвигового сопротивления, скорости скольжения и выделения избыточной упругой энергии в форме сейсмических колебаний в потенциально опасных сегментах тектонических разломов.

Применение масштабных техногенных воздействий на разломы должно быть контролируемым, поскольку при отработке технологий воздействия нельзя исключать вероятность непреднамеренного индуцирования опасного сейсмического события. Поэтому для разработки и совершенствования технологии воздействий, направленных на безопасное снижение сейсмического риска, необходимо создание тестовых полигонов для проведения крупномасштабных сеймотектонических испытаний.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю признательность участникам проведенных многолетних исследований. Их ценный вклад в получение представленных результатов лишь в малой степени отражен в

библиографическом списке. Глубокою признательность авторы приносят члену-корреспонденту РАН Сергею Григорьевичу Псахье как талантливому организатору и вдохновителю ряда научных разработок, посвященных решению проблем обеспечения сейсмобезопасности.

Работа выполнена 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.

Литература

1. *Ogata Y.* Statistics of earthquake activity: Models and methods for earthquake predictability studies // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* – 2017. – V. 45. – P. 497–527.
2. *Booth E.* Dealing with earthquakes: the practice of seismic engineering “as if people mattered” // *B. Earthq. Eng.* – 2018. – V. 16. – P. 1661–1724.
3. *Panza F.G., Kossobokov V.G., Peresan A., Nekrasova K.* Why are the Standard Probabilistic Methods of Estimating Seismic Hazard and Risks Too Often Wrong // *Earthquake Hazard, Risk and Disasters* / Ed. by J.F. Shroder, M. Wyss. – Cambridge: Academic Press, 2014. – P. 309–357.
4. *Ruzhich V.V., Psakhie S.G., Popov V.L.* Seismic Hazard Mitigation by Technological Impact on Displacements in Segments of Active Faults // *Proceedings of the Conference Commemorating the 50th Anniversary of the 1957 Gobi–Altay Earthquake, 25 July–8 August, 2007, Ulaanbaatar, Mongolia.* – Ulaanbaatar, 2007. – P. 204–208.
5. *Пат. 2273035 РФ.* Способ управления режимом смещений во фрагментах сейсмоактивных тектонических разломов / С.Г. Псахье, Е.В. Шилько, С.В. Астафуров, В.В. Ружич, О.П. Смекалин, С.А. Борняков. – № 200410 8514, заявл. 22.03.2004, опубл. 27.03.2006. – Бюл. № 14.
6. *Ruzhich V.V., Psakhie S.G., Shilko E.V., Vakhromeev A.G., Levina E.A.* On the possibility of development of the technology for managing seismotectonic displacements in fault zones // *AIP Conf. Proc.* – 2018. – V. 2051. – Article number 020261.
7. *Shilko E.V., Dimaki A.V., Psakhie S.G.* Strength of shear bands in fluid-saturated rocks: a nonlinear effect of competition between dilation and fluid flow // *Sci. Rep.* – 2018. – V. 8. – Article number 1428.
8. *Chen X., Nakata N., Pennington C., Haffener J., Chang J.C., He X., Zhan Zh., Ni S., Walter J.I.* The Pawnee earthquake as a result of the interplay among injection, faults and foreshocks // *Sci. Rep.* – 2017. – V. 7. – Article number 4945.
9. *Miller S.* The role of fluids in tectonic and earthquake processes // *Adv. Geophys.* – 2013. – V. 54. – P. 1–46.
10. *Ide S., Aochi H.* Earthquakes as multiscale dynamic ruptures with heterogeneous fracture surface energy // *J. Geophys. Res.* – 2005. – V. 110. – Article number B11303.
11. *Aochi H., Ide S.* Role of multiscale heterogeneity in fault slip from quasi-static numerical simulations // *Earth Planets Space.* – 2017. – V. 69. – Article number 94.
12. *Smolin I.Yu., Makarov P.V., Kulkov A.S., Eremin M.O., Bakeev R.A.* Blow-up modes in fracture of rock samples and Earth’s crust elements // *Phys. Mesomech.* – 2018. – V. 21. – No. 4. – P. 297–304.
13. *Filippov A.E., Popov V.L., Psakhie S.G., Ruzhich V.V., Shilko E.V.* Converting displacement dynamics into creep in block media // *Tech. Phys. Lett.* – 2006. – V. 32. – No. 6. – P. 545–549.
14. *Ruzhich V.V., Kocharyan G.G.* 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 // *Geodyn. Tectonophys.* – 2017. – V. 8. – No. 4. – P. 1021–1034.
15. *Nielsen S.* From slow to fast faulting: Recent challenges in earthquake fault mechanics // *Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci.* – 2017. – V. 375. – Article number 20160016.
16. *McGarr A.* Relating stick-slip friction experiments to earthquake source parameters // *Geophys. Res. Lett.* – 2012. – V. 39. – Article number L05303.
17. *Mclaskey G.C., Yamashita F.* Slow and fast ruptures on a laboratory fault controlled by loading characteristics // *J. Geophys. Res. Solid Earth.* – 2017. – V. 122. – P. 3719–3738.
18. *Ruzhich V.V., Truskov V.A., Chernykh E.N., Smekalin O.P.* Neotectonic movements in fault zones of the Baikal region and their origin mechanisms // *Rus. Geol. Geophys.* – 1999. – V. 40. – No. 3. – P. 356–368.
19. *Psakhie S.G., Ruzhich V.V., Shilko E.V., Popov V.L., Astafurov S.V.* A new way to manage displacements in zones of active faults // *Tribol. Int.* – 2007. – V. 40. – P. 995–1003.
20. *Psakhie S.G., Ruzhich V.V., Shilko E.V., Popov V.L., Dimaki A.V., Astafurov S.V., Lopatin V.V.* Influence of the state of interfaces on the character of local displacements in fault-block and interfacial media // *Tech. Phys. Lett.* – 2005. – V. 31. – P. 712–715.
21. *Popov V.L.* Contact Mechanics and Friction. Physical Principles and Applications. – Berlin: Springer-Verlag, 2010.
22. *Psakhie S.G., Shilko E.V., Grigoriev A.S., Astafurov S.V., Dimaki A.V., Smolin A.Yu.* A mathematical model of particle–particle interaction for discrete element based modeling of deformation and fracture of heterogeneous elastic-plastic materials // *Eng. Fract. Mech.* – 2014. – V. 130. – P. 96–115.
23. *Мирзоев К.М., Николаев А.В., Лукк А.А., Юнга С.Л.* Наведенная сейсмичность и возможности регулируемой разрядки накопленных тектонических напряжений в земной коре // *Физика Земли.* – 2009. – № 10. – С. 49–68.
24. *Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., Ruzhich V.V., Batukhtin I.V., Vinogradov E.A., Kamai A.M., Markov V.K.* Experimental study of different modes of block sliding along interface. Part 2. Field experiments and phenomenological model of the phenomenon // *Phys. Mesomech.* – 2017. – V. 20. – No. 2. – P. 193–202.

25. Ruzhich V.V., Kocharyan G.G., Travin A.V., Savel'eva V.B., Ostapchuk A.A., Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Yudin D.S. Determination of the PT conditions that accompanied a seismogenic slip along a deep segment of the marginal suture of the Siberian Craton // *Dokl. Earth Sci.* – 2018. – V. 481. – P. 1017–1020.
26. Bürgmann R. The geophysics, geology and mechanics of slow fault slip // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2018. – V. 495. – P. 112–134.
27. Michel S., Gualandi A., Avouac J.-P. Similar scaling laws for earthquakes and Cascadia slow-slip events // *Nature.* – 2019. – V. 574. – P. 522–526.
28. Butler R.M. *Horizontal Wells for the Recovery of Oil, Gas and Bitumen.* – Westmount: Petroleum Society of the CIM, 1996.
29. 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. – № 29. – С. 16–20.
30. 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. – С. 110–116.
31. Vakhromeev A.G., Sizykh V.I. The role of nappe tectonics in the development of abnormally high formation pressure and economic metalliferous brines: A case study of the southern Siberian craton // *Dokl. Earth Sci.* – 2006. – V. 407. – P. 209–212.
32. Ma T., Chen P., Zhao J. Overview on vertical and directional drilling technologies for the exploration and exploitation of deep petroleum resources // *Geomech. Geophys. Geo-Energ. Geo-Resour.* – 2016. – V. 2. – P. 365–395.
33. Vakhromeev A.G., Sverkunov S.A., Ivanishin V.M. et al. 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 // *Geodyn. Tectonophys.* – 2017 – V. 8. – No. 4. – P. 903–921.
34. Vakhromeev A.G., Ivanishin V.M., Sverkunov S.A., Polyakov V.N., Razyapov R.K. Deep well as a facility for on-line hydraulic studies of the stress state of the rock mass in fluid-saturated fractured reservoirs // *Geodyn. Tectonophys.* – 2019. – V. 10. – No. 3. – P. 761–778.
35. Пат. 2602437 РФ. Способ первичного вскрытия бурением горизонтального ствола в трещинном типе нефтегазонасыщенного карбонатного коллектора в условиях аномально-низких пластовых давлений / А.Г. Вахромеев, С.А. Сверкунов, Р.У. Сираев, Р.К. Разяпов, А.К. Сотников, К.А. Чернокалов. – № 2015138931, заявл. 11.09.2015, опублик. 20.11.2016. – Бюл. № 32.
36. Ruzhich V.V., Psakhie S.G., Shilko E.V., Levina E.A. Physical mesomechanics based interdisciplinary approach to the development of new methods for managing deformation process in fault zones // *AIP Conf. Proc.* – 2019. – V. 2167. – Article number 020300.
37. Lei X., Ma S., Chen W. et al. A detailed view of the injection-induced seismicity in a natural gas reservoir in Zigong, southwestern Sichuan Basin, China // *J. Geophys. Res. Solid Earth.* – 2013. – V. 118. – P. 4296–4311.
38. Zhuang L., Kim K.Y., Jung S.G. et al. Laboratory Evaluation of Induced Seismicity Reduction and Permeability Enhancement Effects of Cyclic Hydraulic Fracturing // *Proc. 51st U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium.* – 2017. – Article number ARMA-2017-0757.
39. Rutqvist J., Rinaldi A.P., Cappa F. et al. Fault activation and induced seismicity in geologic carbon storage—lessons learned from recent modeling studies // *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* – 2016. – V. 8. – P. 775–966.
40. Mazzoldi A., Rinaldi A.P., Borgia A., Rutqvist J. Induced seismicity within geologic carbon sequestration projects: Maximum earthquake magnitude and leakage potential // *Int. J. Greenh. Gas Control.* – 2012. – V. 10. – P. 434–442.
41. Rinaldi A.P., Rutqvist J. Joint opening or hydroshearing? Analyzing a fracture zone stimulation at Fenton Hill // *Geothermics.* – 2019. – V. 77. – P. 83–98.
42. Savage H.M., Kirkpatrick J.D., Mori J.J., Brodsky E.E., Ellsworth W.L., Carpenter B.M., Chen X., Cappa F., Kano Ya. Scientific exploration of induced seismicity and stress (SEISMS) // *Sci. Dril.* – 2017. – V. 23. – P. 57–63.
43. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. Влияние ядерных взрывов на сейсмический режим // *Докл. РАН.* – 1995. – Т. 343. – № 4. – С. 543–546.
44. Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V. et al. Mining-induced seismicity at open pit mines in Kuzbass (Bachatsky earthquake on June 18, 2013) // *J. Min. Sci.* – 2014. – V. 50. – P. 224–228.
45. Mirzoev K., Nikolaev A.V., Lukk A.A. et al. Induced seismicity and the possibilities of controlled relaxation of tectonic stresses in the Earth's crust // *Izv. Phys. Solid Earth.* – 2009. – V. 45. – P. 885–904.

Поступила в редакцию 18.05.2020 г.,
 после доработки 14.06.2020 г.,
 принята к публикации 15.06.2020 г.

Сведения об авторах

Ружич Валерий Васильевич, д.г.-м.н., гнс ИЗК СО РАН, ruzhich@crust.irk.ru
 Вахромеев Андрей Гелиевич, д.г.-м.н., внс ИЗК СО РАН, проф. ИрНИТУ, vakhromeevag@ifmb.ru
 Левина Елена Алексеевна, к.г.-м.н., нс ИЗК СО РАН, levina@crust.irk.ru
 Сверкунов Сергей Александрович, нс ИЗК СО РАН, SverkunovSA@rn-burenje.rosneft.ru
 Шилько Евгений Викторович, д.ф.-м.н., гнс ИФПМ СО РАН, shilko@ispms.tsc.ru