



<http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0141>

EXPERIMENTAL MODELLING OF MECHANISMS CAUSING OCCURRENCE OF SEISMIC OSCILLATION SOURCES IN CASE OF INTERACTIONS OF UNEVEN SURFACES IN FAULTS

V. V. Ruzhich, E. N. Chernykh, E. I. Ponomareva

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

Abstract: Field experiments were carried out using TRIBO, a specially designed testing stand including a concrete plate that can be moved at different rates. In our experiment, the plate served as an artificial allochthonous wing placed at the uneven surface of the segment of the Angarsky fault in Pribaikalie. Tribological effects of contact interaction of the uneven surfaces in the zone of sliding movements of the plate were recorded by strain gauges, linear displacement gauges and four Baikal-7HR seismic stations; such stations are commonly used for earthquake recording. The effect of shocks in initiation of seismic oscillation sources was studied with changes of the regimes of destruction of the uneven surfaces (underneath the base of the plate) which differ in size and strength. The study was focused on stages in the process of friction at preparation to transition from quasi-regular decelerated sliding movement of the plate to its breakaway and occurrence of a high-energy seismic impulse.

The applied method of large-scale modelling at natural objects in field provides new data that may prove useful for studies of mechanisms causing seismicity, identification of stages in occurrence of earthquakes in fault zones and interpretation of seismic monitoring data. Results of such physical tests can contribute to the development of methods aimed at forecasting of rock shocks and earthquakes and also for the development of new physical models showing formation of earthquake foci of various scales in tectonic faults.

Key words: fault zone, earthquake foci, uneven surfaces, friction, physical modelling, models of foci, intermittent sliding, trigger effects, earthquake forecasting / prediction.

Recommended by K.G. Levi

Citation: Ruzhich V.V., Chernykh E.N., Ponomareva E.I. 2014. Experimental modelling of mechanisms causing occurrence of seismic oscillation sources in case of interactions of uneven surfaces in faults. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (2), 563–576. doi:10.5800/GT-2014-5-2-0141.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НЕРОВНОСТЕЙ В РАЗЛОМАХ

В. В. Ружич, Е. Н. Черных, Е. И. Пономарева

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация: Проведена серия натуральных экспериментов с применением созданного испытательного стенда «Трибо», представленного в виде перемещаемой с разными скоростями бетонной плиты, которая рассматривается как искусственное аллохтонное крыло на шероховатой плоскости сегмента Ангарского разлома в Прибайкалье. Наблюдаемые при испытаниях трибологические эффекты контактного взаимодействия неровностей в зоне скольжения фиксировались с применением деформометрической и динамометрической аппаратуры, а также четырех сейсмических станций

«Байкал-7НР», широко используемых для регистрации землетрясений. Изучалось также влияние ударных воздействий на инициацию источников сейсмических колебаний в процессе меняющихся режимов при разрушении различных по размерам и прочности неровностей под основанием плиты. Повышенное внимание было уделено стадийности процесса фрикционного трения при подготовке переходов от квазиравномерного замедленного скольжения плиты к ее срыву и возникновению энергетически крупного сейсмического импульса.

Примененный способ более масштабного физического моделирования на реальных природных объектах позволяет получать новые сведения, которые могут быть полезными в изучении механизмов и стадийности возникновения землетрясений в зонах разломов, при интерпретации данных сейсмологических наблюдений. Подобные результаты физических испытаний важны для совершенствования методических подходов к прогнозу горных ударов и землетрясений, а также для разработки новых физических моделей формирования разномасштабных очагов землетрясений в тектонических разломах.

Ключевые слова: зона разлома, очаг землетрясения, неровности в разломах, фрикционное трение, физическое моделирование, модели очагов, прерывистое скольжение, триггерные воздействия, прогноз землетрясений.

1. ВВЕДЕНИЕ

Подавляющее число коровых землетрясений генетически связано с деформационными явлениями в зонах тектонических разломов. Однако из-за невозможности прямыми наблюдениями и измерениями изучать механизмы возникновения очагов землетрясений многие вопросы, связанные с проблемами обеспечения сейсмотехники, например с повышением точности прогноза землетрясений или с поиском новых путей снижения ущерба от проявлений динамического разрушения в геологической среде, еще далеки от решения. Существующие на сегодня модели очагов землетрясений были созданы сейсмологами, физиками и механиками еще в 60–70-х годах прошлого века преимущественно на основе лабораторных физических экспериментов и небольших образцов, без регистрации сейсмических импульсов, то есть с ограниченными возможностями [Breis, Byerlee, 1966; Scholz, 1990; и др.]. Позднее существующие представления были дополнены и уточнены с учетом новых, более сложных лабораторных экспериментов и данных о подготовке землетрясений и горных ударов в подземных горных выработках [Vinogradov, Ponomarev, 1999; Myachkin et al., 1975; Nersesov et al., 1976; Sobolev, 1993]. Тем не менее в современных представлениях о важных деталях механизмов подготовки очагов землетрясений в зонах разломов еще остаются малопонятными условия возникновения сейсмических брешей, проявления форшоковой активизации и кольцевой миграции слабых землетрясений на местах подготовки очагов будущих сейсмических событий, переходов от фазы затишья к шоковой фазе. Одной из причин замедленного продвижения по пути к решению вопросов, связанных с моделями очагов землетрясений, механизмами и условиями возникновения сейсмогенных деформаций в разломах, является неостребованность огромного объема имеющихся геолого-геофизических данных о сеймотектонических процессах в сейсмофокальных

сегментах зон разломов. Недостаточно востребованы также многие подходы и закономерности, выявленные в трибологии – успешно развивающейся науке о трении, в частности в [Chichinadze, 1995; Popov, 2013; Berkovich, Gromakovsky, 2000; Heinicke, 1987; Garkunov, 1989]. Становится очевидным, что для дальнейшего решения поставленных вопросов необходимо применение новых способов натуральных испытаний, физического и численного моделирования. Одним из наиболее эффективных из них может быть применение методов физического моделирования в условиях, более приближенных к естественным, то есть геологическим, с большей степенью масштабного и геомеханического подобия. В процессе проведения подобных экспериментов авторами были использованы достижения в сфере решения современных задач трибологии, представленные в работах о трении в движущихся системах. В статье изложены результаты, полученные с помощью созданной экспериментальной установки «Трибо» для физического моделирования условий подготовки источников сейсмического излучения в зонах разломов. Эксперименты проводились при тесном сотрудничестве геологов и сейсмологов, а также специалистов, работающих в области физической мезомеханики и трибологии [Dimaki, Popov, 2012; Popov, Psakhie, 2007].

2. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРОЕНИИ ЗОН СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩИХ РАЗЛОМОВ

Как показывает авторский опыт проведения лабораторных экспериментов, физического моделирования и многолетних геолого-структурных исследований, представления о геологическом строении очагов землетрясений можно получить при полевых наблюдениях в тех местах, где эти очаговые области в зонах разломов выведены на современную земную поверхность вследствие многокилометрового денудационного среза



Рис. 1. Плоскость разлома с зеркалами скольжения, открывшаяся после обвала в сверхглубоком карьере алмазоносной трубки «Удачная» (Республика Саха).

Слева на врезках: *a* – образец зеркала скольжения, взятый для петрографического изучения; *b* – деталь аншлифа зеркала скольжения, где стрелками отмечены еще две плоскости скольжения, возникшие в более ранние периоды активизации разлома.

Fig. 1. The fault plane with slickensides which got outcropped after rock collapse in the super-deep quarry of the Udachnaya diamond-bearing pipe in the Sakha (Yakutia) Republic.

Inserts (left): *a* – slickenside sample taken for petrographic studies; *b* – detail of slickenside's polished section (arrows show two sliding planes formed in the earlier periods of fault activation).

поднимающихся горных массивов. Именно в них становится возможным визуальное обследование строения «палеоочагов», то есть очагов доисторических землетрясений, некогда возникших в земной коре на глубинах 5–15 км. Возраст подобных палеоземлетрясений может исчисляться десятками-сотнями миллионов лет. Помимо геолого-структурных и петрологических данных, одним из наиболее важных и наглядных признаков распознавания подобных сегментов зон долгоживущих сейсмогенерирующих разломов являются зеркала скольжения со следами высокотемпературного фрикционного разогрева до уровня возникновения пленочного плавления («остеклования») на их поверхностях. Такие зеркала возникают в очаговых областях при скоростях смещения крыльев разломов 1–10 м/с. Подобный признак был выявлен в ходе геологического обследования на территории Монголии в пределах зоны Долиноозерского разлома, где детально

изучались следы катастрофического Гоби-Алтайского землетрясения 1957 г. с $M=7.9$ [Ruzhich, 1997]. В дальнейшем подобные признаки также были выявлены во многих зонах долгоживущих разломов Монголии, Прибайкалья и ряда других регионов [Ruzhich, 2008].

При геологических наблюдениях в выявленных сегментах зон разломов, где обнаружены признаки палеоземлетрясений, установлено, что размеры площадей с проявлениями зеркал скольжения могут достигать сотен квадратных метров (рис. 1). Соответственно, по этим прикидкам можно судить о преимущественных размерах наиболее крупных пятен контактного взаимодействия тех неровностей, разрушение которых могло инициировать сильные землетрясения, достигающие магнитудных значений $M=5.0-9.0$. Благодаря средствам современных петрофизических измерений есть возможности при изучении зеркал скольжения, возникающих при разрушении неровностей в зонах



Рис. 2. Устройство испытательного стенда «Трибо», размещенное на фрагменте плоскости Ангарского разлома. Видна плита с датчиками сейсмостанций, домкратом, датчиками силы и линейных перемещений.

Fig. 2. The TRIBO Testing Stand placed at the fragment of the Angarsky fault plane.

On the plate, gauges of seismic stations, a hoisting jack, strain gauges and linear displacement gauges are installed.

жесткого и быстрого контактного скольжения, восстанавливать температуру, давление, деформации нано- и мезо- кристаллов, претерпевших трибологические изменения на глубинах формирования очагов землетрясений.

Сейчас становится очевидным, что в лабораторных условиях при испытаниях на малых образцах горных пород весьма сложно проводить надлежащие замеры и соблюдать приемлемые для проведения надежных прямых измерений условия, близкие к природным процессам разрушения неровностей в разломах. Это вызвано, в первую очередь, тем, что практически невозможно добиться соблюдения даже близкого подобия в соотношениях таких параметров, как стадийность, масштаб, энергия и время протекания изучаемых процессов подготовки горных ударов и тем более землетрясений. На данном этапе исследований для авторов важно было соблюдать в первом приближении механическое сходство деформационных и сейсмических деструктивных явлений на разных стадиях разрушения неровностей в разломах.

3. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ЗОНАХ РАЗЛОМОВ

Для более углубленного изучения механизмов разрушения неровностей на геодинамическом полигоне в п. Листвянка в 2012 г. была создана экспериментальная установка «Трибо». Она размещена на ложе шероховатой плоскости скольжения зоны Ангарского сейсмоактивного разлома с углом падения 43–45° на ЮЗ. Сконструированная плита, армированная стальными прутьями, имеет размеры 110×90×25 см и вес 525 кг, который при необходимости увеличивается за счет размещения на плите дополнительного груза (рис. 2). Принудительные перемещения плиты вверх-вниз по склону осуществлялись в диапазоне скоростей порядка 0.1–10.0 мм/с с помощью специальных гидравлических домкратов или с использованием сил гравитационного сползания. Помимо проведения испытаний с естественными неровностями сместителя разлома, имелась возможность изменять режимы фрикционного трения и путем подбора размеров, геометрии и

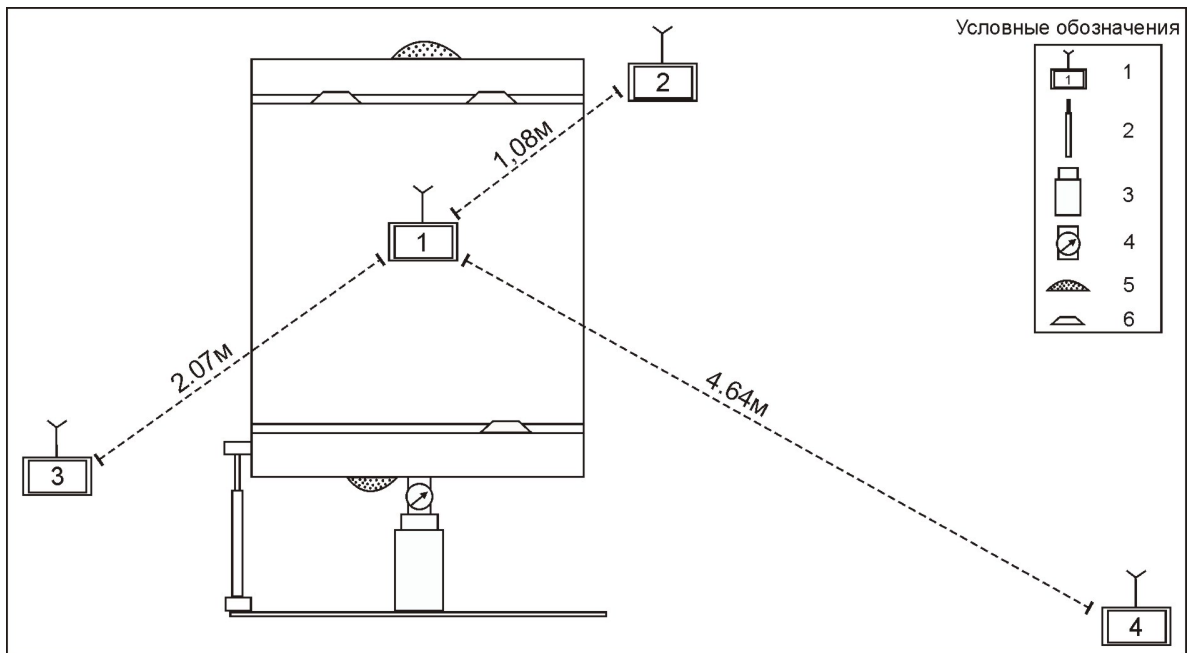


Рис. 3. Схема устройства плиты для проведения испытаний по моделированию трибологических процессов на фрагменте Ангарского разлома в п. Листвянка.

1 – сейсмостанции HR-7 с их нумерацией и указанием удаления от датчика на плите; 2 – датчик линейных перемещений PG; 3 – домкрат 50-тонный; 4 – датчик силы «Токвес»; 5 – зеркала скольжения, возникшие при разрушении неровностей на плоскости разлома; 6 – места расположения вставок в нижней части плиты из образцов горных пород, для изучения их механического взаимодействия с неровностями на плоскости сместителя разлома.

Fig. 3. The scheme of the plate used in tests to model tribological processes at the fragment of the Angarsky fault in Listvyanka settlement.

1 – HR-7 seismic stations, their numbers and distances from each gauge at the plate; 2 – PG linear displacement gauge; 3 – jack (50 tonne capacity); 4 – Tokves strain gauge; 5 – slickensides formed due to destruction of the uneven surface of the fault plane; 6 – locations of inserted rocks placed at the lower part of the plate in order to study their mechanical interaction with uneven features on the fault plane.

прочностных свойств искусственных неровностей, размещаемых в основании самой плиты, а также на кристаллическом ложе плоскости разлома в соответствии с решаемыми задачами. Измерения механических параметров и режимов динамического разрушения неровностей, в том числе и искусственно созданных, осуществлялись с применением специально разработанной деформометрической аппаратуры «Сдвиг-4м», силового датчика «Токвес», а также с использованием нескольких трехканальных сейсмостанций «Байкал-HR7», созданных в Новосибирском институте лазерной физики СО РАН. При испытаниях имелась возможность визуального слежения, фото- и видеорегистрации явлений разрушения неровностей по ходу проведения эксперимента. Изучалось также влияние смазывания водными растворами поверхности скольжения. Физическое моделирование соответствовало условиям механической модели, представленной в виде комбинации элементов пластического скольжения тела Сен-Венана и упругой модели Гука.

В рассматриваемых экспериментах использовались возможности четырех сейсмостанций, одна из которых

была установлена в центре плиты, а три других располагались на автохтонном скальном основании плоскости скольжения разлома (рис. 3). Ход плиты при перемещении по плоскости разлома составлял 20–60 см, при этом менялись морфология плоскости разлома и местоположение источников излучения, так же как и параметры механического взаимодействия. При анализе сейсмических станций было установлено, что амплитуды ускорения сейсмических колебаний заметным образом меняются при изменении расстояний от источника в процессе перемещения плиты, а также в зависимости от механического состояния скальных грунтов в местах установки сейсмических датчиков. Перечисленные особенности локации источников колебаний в общих чертах воспроизводят условия пространственной регистрации очагов землетрясений сетью сейсмостанций. При анализе получаемых сейсмологических данных применялись разработанные программные модули, предназначенные для обработки каталогов тектонических землетрясений и анализа сейсмического режима с целью их прогнозирования.

Ниже (рис. 4) приведен пример сейсмической за-

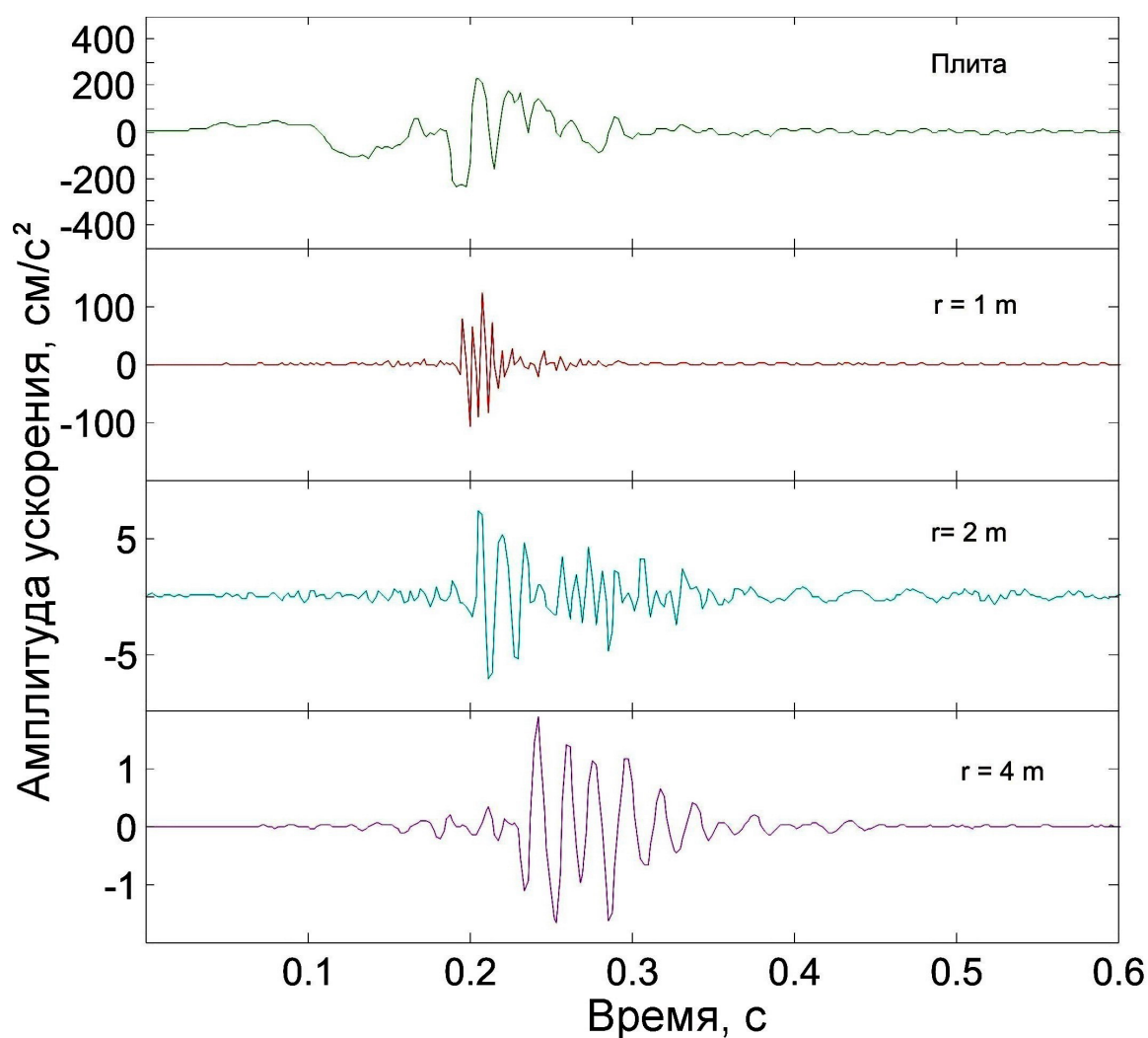


Рис. 4. Пример кратковременной сейсмической записи момента разрушения вставки в виде прочного гранитного образца в основании плиты при ее смещении под действием домкрата.

Верхний график отражает изменение нагрузки в кгс, нижние графики показывают изменение амплитуд ускорения сейсмических колебаний при разных удалениях от вставки, разрушение которой при скольжении плиты привело к возникновению источника сейсмических колебаний.

Fig. 4. A short-term record of the moment when the strong granite sample inserted at the base of the plate was destructed due to the plate's displacement by the jack.

The top curve shows changes of load (kgf); the bottom curves show changes of acceleration amplitudes of seismic oscillations at various distances from the inserted rock that was destructed due to the sliding displacement of the plate and caused a source of seismic oscillations.

писи кратковременного момента разрушения прочного гранитного образца, установленного в качестве искусственного выступа в основании плиты, которая передвигалась вверх по склону под воздействием мощного домкрата. На верхнем графике показаны значения амплитуд ускорений сейсмических импульсов, записанных сейсмостанцией, установленной на плите, а ниже – записи трех сейсмических станций на плоскости разлома, расположенных при разных удалениях от центра плиты. Обращают на себя внимание очень большие амплитуды сейсмического ускорения, зарегистрированные датчиком, расположенным на подвижной плите.

Они сформировались ввиду высокой прочности разрушенного гранитного образца с сечением 5 см^2 , что и способствовало генерации сейсмических импульсов с повышенными энергетическими значениями, имеющими подобие с микроземлетрясениями.

Представленные на данном рисунке графики можно интерпретировать следующим образом. Все четыре варианта записей отражают параметры волновых колебаний, возникших при разрушении прочного выступа в основании плиты. В самой плите возникли преимущественно низкочастотные вибрации в диапазоне порядка 5–14 Гц, но с очень большой амплитудой ус-

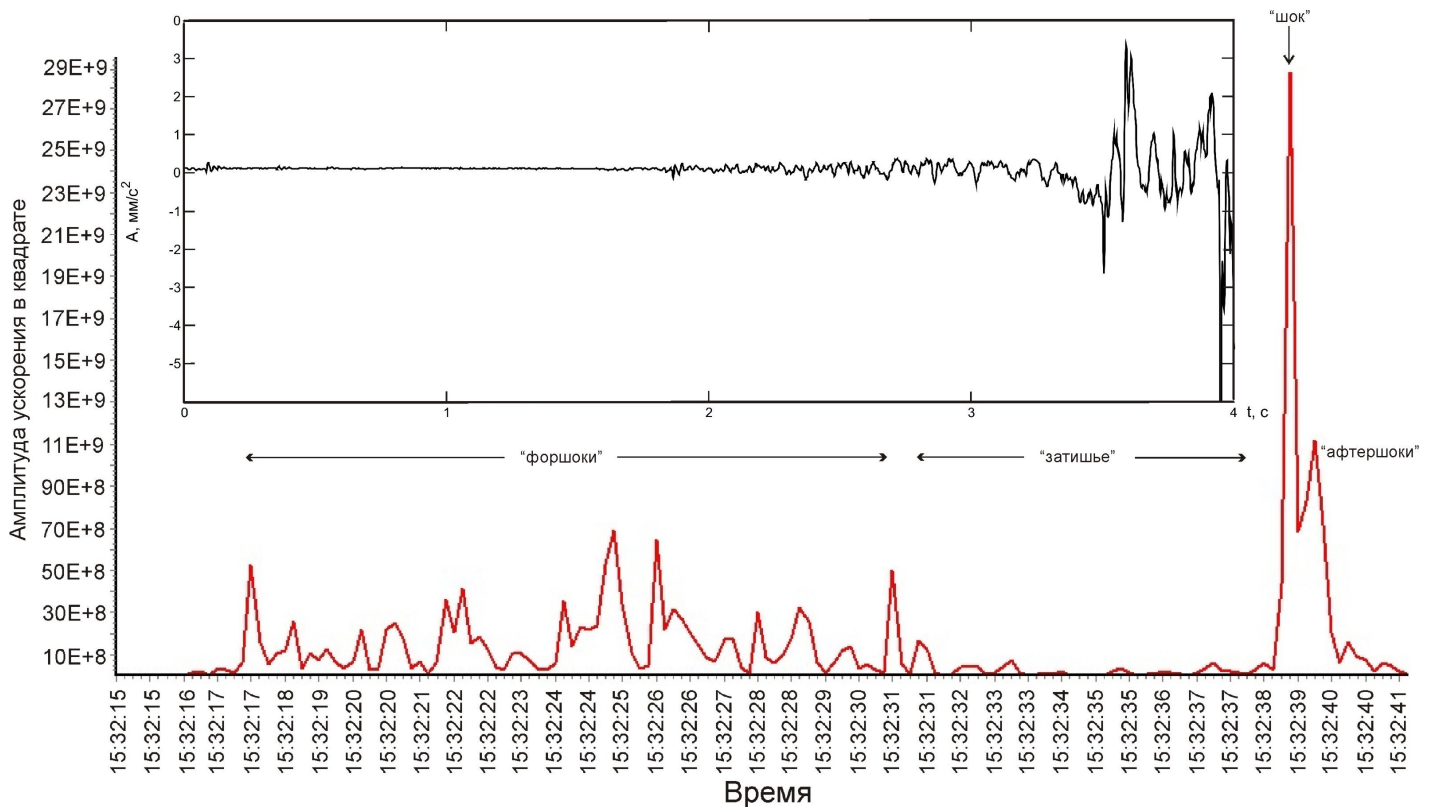


Рис. 5. Сейсмическая запись со сглаживанием, полученная во время эпизода разрушения выступа на плоскости разлома при скольжении плиты вниз по склону.

Выделяются четыре стадии излучения сейсмических колебаний. На врезке сверху показана запись 4-секундного момента сейсмических колебаний, проявившегося перед главным сейсмическим импульсом в момент срыва плиты с неровности. Остальные пояснения в тексте.

Fig. 5. A smoothed seismic record of the moment when a stub at the fault plane was destroyed when the plate was sliding down the slope.

Four stages of seismic oscillation emanation are distinguished. The insert shows a record of seismic oscillations lasting for four (4) seconds prior to the main seismic impulse at the moment of breakaway of the plate from the uneven surface. See explanations in the text.

корения колебаний. Датчиком самой ближней к плите сейсмостанции № 2 (удаление 1 м), установленным на скальном основании, зарегистрирован спектр более высокочастотных колебаний – 40–60 Гц. На более удаленных датчиках амплитуда ускорения колебаний заметно меньшая, а спектральный диапазон колебаний расширен в сторону более высоких частот – до 140–160 Гц. На самой дальней сейсмостанции № 4 (удаление 4.6 м), установленной на полускальном грунте, частотный диапазон колебаний имеет промежуточные значения при самой малой их амплитуде ускорения. Несмотря на то, что все событие уместилось во временной интервал порядка 0.6 с, в нем можно выделить четыре стадии сейсмического события: форшоковую, затишья, шока и афтершоковой последовательности. Для стадии подготовки характерно проявление относительно низкочастотных колебаний, которые для условий эксперимента могут рассматриваться как форшоки, после которых наблюдалось и кратковременное сейсмическое затишье. При переходе от стадии

затишья непосредственно к главному событию (шоку) также можно выделить очень кратковременный эпизод возрастания сейсмических колебаний. Длительность его составляет 1–10 % от длительности афтершоковой последовательности.

На рис. 5 представлена 25-секундная запись сейсмических колебаний, сделанная при свободном скольжении плиты вниз по плоскости разлома на расстоянии 18 см под действием ее веса после полного снятия поддерживающей силы домкрата. Запись можно рассматривать как иллюстрацию проявления эпизода деформации неровности в разломе, сопровождающегося формированием источника генерации сейсмических колебаний с характерным проявлением сейсмического цикла в процессе подготовки и реализации значительного по амплитуде сейсмического импульса. На фоне гравитационного сползания плиты со средней скоростью 7 мм/с при столкновении ее с неровностью на плоскости разлома зафиксировано 6-секундное замедление скорости скольжения, имело место затишье с

последующим очень кратковременным ускорением, срывом и серией затухающих импульсов – афтершоков. На врезке к рисунку 5 вверху приведен график, где отражены эти кратковременные нарастающие по амплитуде сейсмические колебания непосредственно перед срывом плиты. Их можно отнести к краткосрочному предвестнику, по длительности проявления он соизмерим с афтершоковой последовательностью. Рассмотренный механизм возникновения источников излучения сейсмических колебаний, связанный с разрушением сравнительно небольшой по размерам естественной неровности на плоскости разлома, авторам представляется достаточно правдоподобным.

Стоит еще раз обратить внимание на сходство подобной записи с эффектами сейсмического «затишья», проявляемого в сейсмическом режиме перед возникновением значительного по энергии землетрясения. Его возникновение может быть связано с заметным снижением скорости движения плиты в момент надвигания на неровность, иногда вплоть до приостановки, когда генерация волновых колебаний снижается до фонового уровня, который едва фиксируется сетью сейсмостанций в том месте, где сформировалась сейсмическая брешь, а точнее проекция контактного скольжения на дневную поверхность. Следствием контактного взаимодействия плиты с неровностью обычно является образование отчетливого зеркала скольжения, по которому можно оценивать многие трибологические параметры при их углубленном изучении. В данном эпизоде кинетической энергии движущейся плиты хватило для совершения работы по механическому преодолению неровности. Согласно проведенным наблюдениям, важно отметить, что максимальный по амплитуде сейсмический импульс возникает в момент резкого ускорения движения плиты при ее срыве с поверхности преодоленной неровности. Следовательно, местоположение источника максимального импульса, т.е. его гипоцентра, оказывается, как правило, приуроченным к краевой части пятна скольжения, где произошли разрыв контакта и высокоскоростной срыв находившейся в напряженном состоянии плиты. Следовательно, данный эксперимент подтверждает предположения о причинах часто наблюдаемой приуроченности форшоков к краевой части сейсмической бреши [Sobolev, Ponomarev, 1999].

Приведенные (рис. 6) графики иллюстрируют механизм возникновения многочисленных источников сейсмических импульсов, генерируемых при контактом взаимодействии плиты с многочисленными неровностями разлома на уровне появления тангенциальной силы трения. На верхней части графика можно видеть, что датчик силы трения покоя плиты и кристаллического основания зафиксировал сопротивление сдвигу, достигавшее значений 800–900 кг, что характеризует величину трения покоя. После его преодоления плита скользила вверх с усилиями на уровне 200–400 кг. В ходе неравномерного скольжения плиты при

каждом встречном соприкосновении ее основания с неровностями сместителя происходило замедление скорости движения плиты или короткая приостановка на фоне роста силового давления на десятки – первые сотни килограмм, необходимые для преодоления возросшего контактного сопротивления сдвигу. При последующем частичном разрушении неровности и образовании зеркала скольжения на фоне динамических колебаний возникает источник излучения сейсмических импульсов, что фиксируется сейсмодатчиками и находит отражение в повышенных значениях амплитуд сейсмического ускорения. Наиболее сильное излучение колебаний проявлялось в теле скользящей вибрирующей плиты, когда генерировался спектр колебаний с частотным диапазоном колебаний на уровне 4–15 Гц, возникающих при скольжении и контакте с шероховатой поверхностью разлома. Более чем на порядок слабее регистрировались амплитуды сейсмических импульсов в станциях, расположенных на кристаллическом основании в плоскости разлома и на удалении от источника излучения импульсов. В таких случаях более характерными были высокочастотные колебания в диапазоне 90–160 Гц.

На основании приведенных примеров важно отметить, что неперенным условием возбуждения сейсмического сигнала (возникновения сейсмического события) является высокоскоростной переход потенциальной энергии в кинетическую, что и отмечалось при срыве плиты с неровности. Можно предполагать, что возбужденный сейсмический сигнал распространялся в породном массиве в виде сейсмических волн, приобретаемая, по мере удаления от источника, определенную структуру и знакопеременную форму, отраженную в сейсмических записях. В точке контакта взаимодействующих неровностей горные породы испытывают волновые вибрации различной интенсивности в зависимости от разнообразия реологических свойств геологической среды в зоне скольжения крыльев разломов. Соответственно такому механизму интенсивность сотрясения характеризуется длительностью и амплитудами кинематического движения почвы: амплитудой смещения, скоростью смещения или амплитудой ускорения.

Важной характеристикой сейсмического излучения считается ее энергетическая величина, однако ее оценка весьма затруднительна и потому неоднозначна. Различными специалистами в области сейсмологии по записям колебаний почвы используются разные способы оценок таких параметров сейсмических событий, как их энергия и сейсмический момент [Kogan, 1975; Mashkov, 1996; Mishin, 2004]. При этом приходится пользоваться многими эмпирическими зависимостями, например для оценки энергии землетрясения по параметрам сейсмических волн.

Обратимся к оценкам некоторых энергетических параметров на основании простейших расчетов. Прерывистое движение плиты по шероховатой поверх-

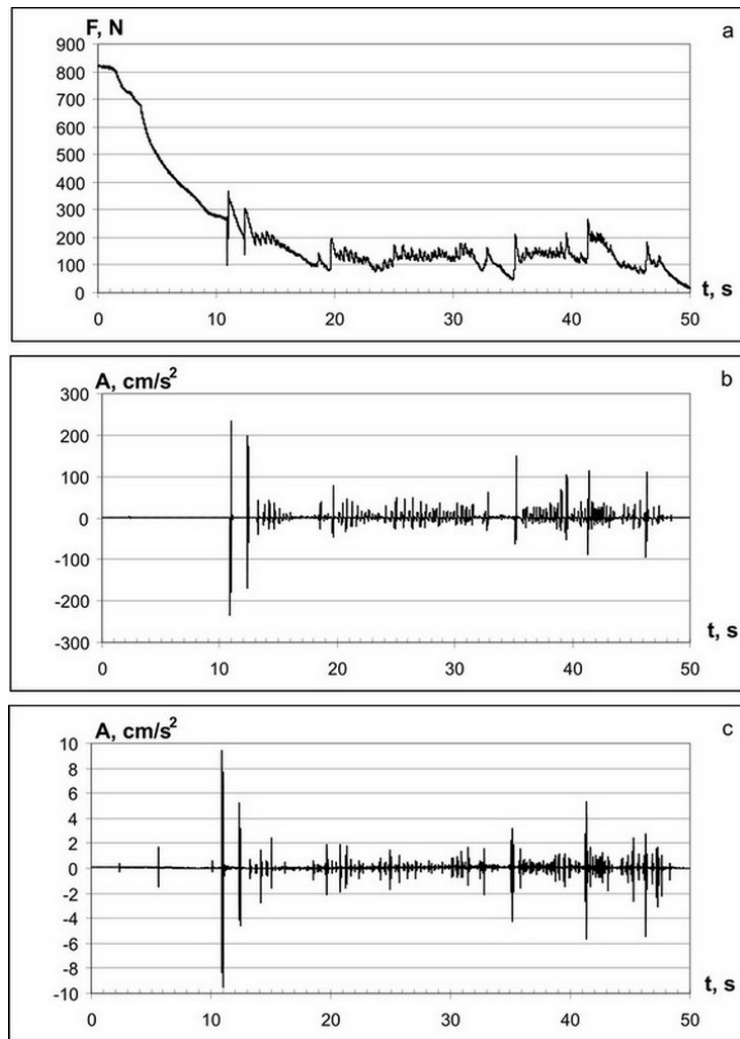


Рис. 6. Соотношение прерывистого движения плиты вниз по склону разлома при слабой контролирующей поддержке ее дократом и сейсмических импульсов двух сейсмостанций.

a – показатели силового датчика в кгс на стадии спада нагрузки и начавшегося скольжения плиты вниз; *b* – запись сейсмических импульсов, зафиксированных сейсмостанцией № 1 на плите (генерация импульсов осуществлялась в ходе прерывистого скольжения плиты по шероховатой плоскости разлома); *c* – запись сейсмостанции № 3, установленной на скальном грунте. Можно видеть, что каждый рывок в движении плиты сопровождается всплеском сейсмических колебаний.

Fig. 6. The ratio of intermittent movement of the plate down the fault slope (it was slightly supported by the jack) and seismic impulses recorded at two seismic stations.

a – strain gauge data (kgf) at the stage when the load was decreased and the plate started to slide down the slope; *b* – seismic impulses recorded at Seismic Station 1 on the plate (the impulses were generated during intermittent movement of the plate sliding down at the uneven surface of the fault); *c* – record from Seismic Station 3 installed on the rocks. It is evident that each jerk of the plate movement was followed by a burst of seismic oscillations.

ности происходит вследствие эпизодов торможения и срывов на неровностях, при этом доля потенциальной энергии переходит в кинетическую, возбуждая в колеблющейся среде сейсмические импульсы. Зная величину изменения потенциальной энергии, можно определить уровень корреляции этого показателя с параметрами сейсмического сигнала. На основании собранных данных было установлено, что аппроксимация измеренных значений линейной зависимостью имеет следующий вид:

$$\Delta E = 156 V,$$

где ΔE – изменение энергии, V – амплитуда скорости перемещений в мкм/с.

По выявленной зависимости можно оценить количество энергии, выделившейся в виде сейсмических волн. Так, например, сейсмическая энергия, выделившаяся при движении плиты со скоростью 7 мм/с на расстояние 8 см, составила 1.1 Дж при изменении оценки потенциальной энергии, равной 230 Дж. Таким

образом, доля потенциальной энергии, перешедшей в энергию сейсмическую, будет составлять ~0.5 %, что сопоставимо с известными в сейсмологии подобными значениями.

Понятно, что полученные в данной работе результаты физического моделирования механизмов подготовки и проявления источников сейсмических колебаний в зоне разлома можно отнести к числу широко распространенных, но отнюдь не универсальных, поскольку условия разрушения неровностей могут быть весьма разнообразными в зависимости от их размера, конфигурации и прочностных характеристик, а также скорости смещений. Вместе с этим стоит заметить, что явления прерывистого скольжения, использованные в известной модели «stick-slip», отражают всеобщий природный закон трения движущихся шероховатых поверхностей, поскольку идеально гладких трущихся поверхностей не бывает и трение присутствует везде и всегда, оно меняет лишь свои параметры, иногда уменьшаясь до ничтожно малых величин.

4. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПЛИТУ И НА РЕЖИМ ГЕНЕРАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Целью проведения подобных испытаний с ударами является изучение возможности применения внешних воздействий для управляемого изменения режимов скольжения плиты и генерации сейсмических колебаний, возникающих в пятнах скольжения. В природных условиях источниками подобного рода импульсных воздействий на зоны скольжения сейсмогенерирующих разломов могут быть, например, взрывы или близкие сильные землетрясения. Нами проводились испытания в условиях, когда при скольжении плиты вниз она затормаживалась из-за возникшего трения при столкновении с крупной неровностью. Для ее продвижения осуществлялось направленное воздействие в виде серии слабых ударов, например небольшим молотом (вес 0.75 кг). Эти воздействия приводили к проявлению смещений с суммарной амплитудой 0.55 мм и слабозаметным изменениям сейсмического режима. Иная реакция фиксировалась при воздействии деревянного молота с весом 10 кг. Кинетическая энергия такого удара оценивалась согласно известному уравнению:

$$E = mv^2/2.$$

Скорость удара v составляла ~1.2 м/с, из чего следует, что общая кинетическая энергия удара деревянного молота достигала порядка $E \sim 7.2$ Дж. Удары наносились в верхний торец плиты в направлении вниз по склону.

Ниже показаны результаты изучения отклика на воздействия деревянным молотом, полученные в од-

ном из экспериментов, когда удары осуществлялись тремя сериями по три удара в каждой (рис. 7). В последней серии были произведены вначале только два удара, а третий удар сделан через 57 с после временной задержки, связанной с осмотром состояния крупной неровности, препятствующей спуску плиты. Воздействие последнего удара практически слилось с инициированным срывом плиты и с проявлением мощного сейсмического импульса, после которого проявилось еще несколько более слабых импульсов. Согласно расчетам, выделившаяся полная кинетическая энергия плиты составила 4.14×10^2 Дж. Энергия самого удара в сейсмическом выражении составила 1–2 Дж. Последний удар можно рассматривать как решающее инициирующее импульсное воздействие, приведшее к высокоскоростному переходу части потенциальной энергии в кинетическую после срыва плиты с неровности. Следует обратить внимание на то, что во время паузы между 8-м и 9-м ударами происходило замедленное скольжение плиты вниз, что видно на указанном рисунке. Этот кратковременный эпизод можно интерпретировать как проявление деформационной подготовки плиты к срыву. Он был инициирован 9-м ударом, приведшим к мгновенному соскальзыванию плиты с неровности и генерации мощного сейсмического импульса.

Таким образом, с каждым ударом молота происходило суммирование небольших смещений в области взаимодействия плиты с неровностью, что привело к ее продвижению по крупной пологой неровности вплоть до срыва. В конечном счете, неровность была преодолена плитой с частичным ее разрушением, а далее произошел ускоренный срыв плиты со скоростью движения 0.1–0.3 м/с. Суммарная энергия серии из девяти ударов расходовалась на преодоление силы трения и генерацию умеренных по энергии импульсов. При скоростном срыве плиты часть ее потенциальной энергии преобразовалась в кинетическую, при этом небольшой процент последней был преобразован в волновые вибрации в виде сейсмических колебаний.

Испытания с ударными воздействиями показали возможности успешного изучения на испытательном стенде «Трибо» эффектов триггерных дозируемых воздействий на режим контактного взаимодействия в зоне прерывистого фрикционного скольжения по плоскости с неровностями. Ориентированная направленность ударных воздействий привела к ускоренному инициированному смещению плиты вниз, всплеску сейсмической эмиссии и снижению потенциальной энергии. Такое явление инициированного обрушения можно наблюдать в бортовых откосах глубоких карьеров, когда излишне мощными технологическими взрывами провоцируются крупные обвалы массивов горных пород объемами в десятки тысяч кубических метров. Из сказанного следует констатировать, что применение ударных воздействий в пределах досягаемости области контактного взаимодействия, находя-

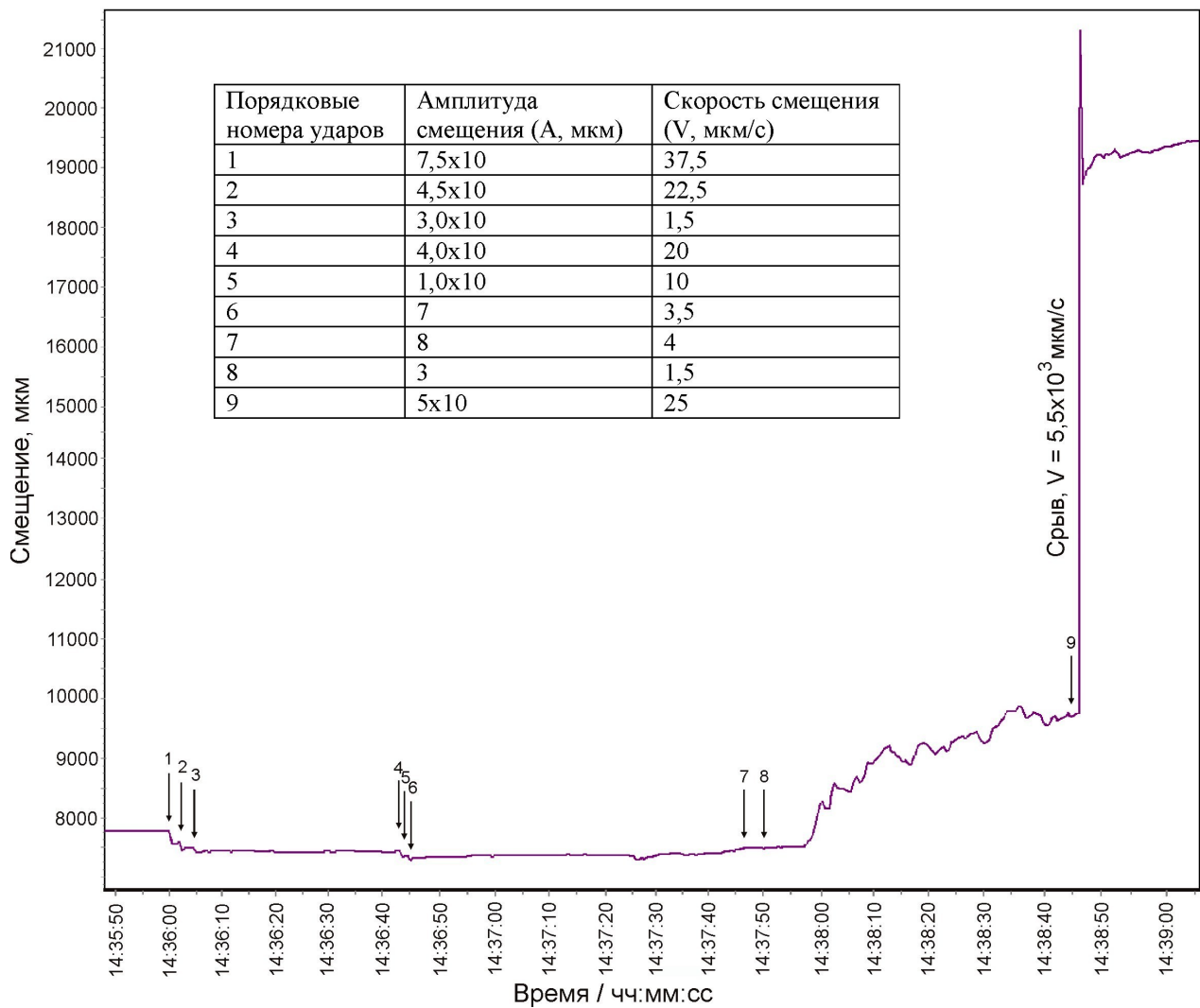


Рис. 7. Запись эпизода с проведением девяти ударных воздействий на плиту, затормозившуюся на неровности при скольжении вниз по склону.

Приведена нумерация последовательности ударов. Видно также, что после 8-го удара плита начала ускоренное перемещение перед срывом с препятствия. Вверху на врезке дана таблица скоростей инициированного ударами скольжения плиты. Показано значение скорости смещения плиты при срыве. Другие пояснения в тексте.

Fig. 7. A record of the episode when nine shocks were applied to the plate which sliding movements slowed down on the uneven surface.

Subsequent shocks are numbered. It is evident that after the 8th shock the plate's movements were accelerated before the moment of breakaway of the plate from the uneven surface. The insert at the top shows a table of velocities of the plate sliding movements triggered by the shocks. The velocity at the moment of breakaway is shown. See explanations in the text.

щегося в крайне неустойчивом состоянии, может инициировать возникновение крупноамплитудных сейсмических импульсов.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Авторы рассчитывают показать, что проведение натурных экспериментов на реальных геологических объектах с использованием установок типа испытательного стенда «Трибо» в рамках физического моде-

лирования геомеханических условий возникновения источников сейсмических колебаний позволяет получать весьма полезные сведения, касающиеся более эффективного изучения фрикционных процессов в зонах сейсмогенерирующих разломов в сравнении с лабораторными экспериментами. Подобный подход дает возможность изучать механизмы разрушения разномасштабных неровностей при различных режимах скольжения, когда можно легко менять и контролировать многие параметры трения с использованием флюидного насыщения контактирующих неровностей.

Становится более понятным, в частности, что разрушение крупномасштабных неровностей в зонах скольжения крупных разломов, например в зонах субдукции, происходит многократно и преимущественно в отдельных сегментах разломов в течение длительного по геологическим меркам времени. Как показывает практика сейсмо тектонических исследований, в зонах долгоживущих разломов очаги землетрясений формируются в областях контактного скольжения по неровностям в течение сотен или тысяч лет примерно в одних и тех же сегментах. Именно там возникают повторяющиеся землетрясения через определенные временные интервалы, необходимые для накопления энергии и амплитуд тектонических деформаций до критического уровня. В то же время в других сегментах разломов между крупными неровностями сейсмическая активность остается слабо выраженной. В местах многократного возникновения очагов землетрясений зачастую и обнаруживаются многочисленные следы былых сейсмических активизаций в виде палеосейсмодислокаций.

В зарубежной литературе крупные неровности в межплитных разломах (таких, как зоны Беньюфа) принято обозначать термином «asperity». С их разрушением многие исследователи связывают возникновение сильных землетрясений, в частности таких, как широкоизвестное японское катастрофическое землетрясение Тохоку, произошедшее 11 марта 2011 г. (M=9.1). Напомним для примера, что в плейстоценовой области этого землетрясения обнаружены следы более сильного подобного землетрясения, произошедшего около тысячи лет назад. Об этом же свидетельствуют исторические данные и сейсмогеологические изыскания, проведенные в пределах Байкальской рифтовой зоны, где отчетливо выявляются многочисленные проявления сейсмической активности, рассмотренные в ряде работ (в частности [Ruzhich, Khil'ko, 1987]).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С позиций полученных экспериментальных данных становится более обоснованным представление о том, что наиболее интенсивное контактное механическое взаимодействие в зонах сейсмоактивных разломов осуществляется именно на крупных неровностях, где, собственно, и готовятся очаги многих сильных землетрясений. Площадь таких контактных пятен скольжения может измеряться сотнями – тысячами квадратных метров. Однако в отношении ко всей площади соприкосновения крыльев разломов она невелика и, скорее всего, составляет первые проценты. Следовательно, именно в местах интенсивного контактного взаимодействия возникает возможность более эффективного управления режимом разрушения неровностей путем контролируемых техногенных воздействий, например в виде закачек через скважины поверхностно-актив-

ных флюидов, проведения гирляндных взрывов или применения мощных скважинных вибраторов современного поколения, используемых для повышения отдачи нефтяных пластов.

На основании собранных материалов предлагается экспериментально обоснованное физическое объяснение распространенного механизма возникновения сейсмического цикла при подготовке значимого сейсмического события, состоящего из таких известных эффектов, как сейсмическая «брешь» и «затишье», форшоковая, шоковая и афтершоковая активность. Во многих случаях они могут быть связаны с актами многократного разрушения (изнашивания) крупных неровностей в зонах долгоживущих тектонических разломов. С этих же позиций объясняется многократно фиксируемое проявление сейсмических активизаций (сейсмической сепарации) примерно в одних и тех же сегментах зон разломов на протяжении многих сотен или тысяч лет. Полученные рассмотренным способом новые сведения могут быть полезными для различных видов прогноза землетрясений и горных ударов, а также использоваться для разработки новых физических моделей очагов землетрясений, более адаптированных к тектонофизическим условиям. В наших экспериментах находят подтверждение ряд высказываний ученых, касающихся новых перспектив выявления краткосрочных предвестников деформационного и сейсмогенного типа, упоминаемых в недавних работах [Chebrov et al., 2011; Popov et al., 2010]. Однако для их выявления в реальных решениях проблем прогноза потребуются разработка и внедрение в практику новой высокоточной инструментальной базы, позволяющей проводить мониторинг в области формирования очагов готовящихся землетрясений.

Рассмотренный экспериментальный подход к изучению механики разрушения в зонах сейсмогенерирующих разломов с позиций трибологии, пока еще весьма упрощенный, позволяет более однозначно решать и обратные задачи, а именно: из записей сейсмограмм получать более обоснованные представления об источниках диссипации волновых колебаний из зон разломов. Расширение информационной базы данных о глубинных явлениях в разломах, в свою очередь, может способствовать повышению эффективности численных методов, что, в конечном счете, ляжет в основу создания новых моделей очагов землетрясений. Несомненно, что они будут более сложными, но при этом и адекватными геолого-геофизическим условиям в сегментах зон сейсмогенерирующих разломов на глубинах порядка 10–20 км.

Существующие сегодня представления об очагах землетрясений могут также быть углублены посредством применения новых методов изучения, включающих изучение трибофизических и трибохимических эффектов разрушения горных пород, в том числе возникающих при трении в зеркалах контактного скольжения.

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

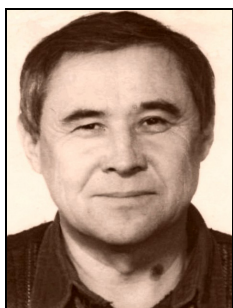
- Berkovich I.I., Gromakovskiy D.G., 2000. Tribology. Physical Bases, Mechanics, and Technical Applications. Textbook for Universities, edited by D.G. Gromakovskiy. Samara State Technical University, Samara, 268 p. (in Russian) [Беркович И.И., Громаковский Д.Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения. Учебник для вузов / Под ред. Д.Г. Громаковского. Самара: СГТУ, 2000. 268 с.].
- Breis W.F., Byerlee J.D., 1966. Stick-slip as mechanism for earthquakes. *Science* 153 (3739), 62–64. <http://dx.doi.org/10.2307/1719360>.
- Chebrov V.N., Saltykov V.A., Serafimova Yu.K., 2011. Earthquake Forecasting in Kamchatka. SvetochPlus, Moscow, 304 p. (in Russian) [Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. Прогнозирование землетрясений на Камчатке. М.: Светоч Плюс, 2011. 304 с.].
- Chichinadze A.V. (Ed.), 1995. Fundamentals of Tribology. Nauka i Tekhnika, Moscow, 778 p. (in Russian) [Основы трибологии / Под ред. А.В. Чичинадзе. М.: Наука и техника, 1995. 778 с.].
- Dimaki A.V., Popov V.L., 2012. Dimension reduction method and its application to modelling of friction elastomers under complex dynamic loads. *Fizicheskaya Mezomekhanika* 15 (4), 81–86 (in Russian) [Димаки А.В., Попов В.Л. Метод редукции размерности и его применение для моделирования трения эластомеров в условиях сложных динамических нагрузок // *Физическая мезомеханика*. 2012. Т. 15. № 4. С. 81–86].
- Garkunov D.N., 1989. Tribotechnics. Mashinostroenie, Moscow, 328 p. (in Russian) [Гаркунов Д.Н. Триботехника. М.: Машиностроение, 1989. 328 с.].
- Heinicke G., 1987. Tribochemistry. Translated from English. Mir, Moscow, 584 p. (in Russian) [Хайнике Г. Трибохимия: пер. с англ. М.: Мир, 1987. 584 с.].
- Kogan S.Ya., 1975. Seismic Energy and Methods of Its Determination. Nauka, Moscow, 153 p. (in Russian) [Коган С.Я. Сейсмическая энергия и методы ее определения. М.: Наука, 1975. 153 с.].
- Mashkov Yu.K., 1996. Tribology of Construction Materials. Omsk State Technical University, Omsk, 299 p. (in Russian) [Машков Ю.К. Трибология конструкционных материалов. Омск: ОмГТУ, 1996. 299 с.].
- Mishin S.V., 2004. Seismic Processes and Maintenance of Impulses. SVKNII, Far East Branch of RAS, Magadan, 115 p. (in Russian) [Мишин С.В. Сейсмические процессы и сохранение импульса. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2004. 115 с.].
- Myachkin V.I., Kostrov B.V., Sobolev G.A., Shamina O.G., 1975. Fundamentals of physics of foci and precursors of earthquake. In: Physics of Earthquake Foci. Nauka, Moscow, p. 6–29 (in Russian) [Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Основы физики очага и предвестники землетрясений // *Физика очага землетрясения*. М.: Наука, 1975. С. 6–29].
- Nersesov I.L., Ponomarev V.S., Teitel'baum Yu.M., 1976. The effect of seismic quiescence in case of large earthquakes. In: Studies of earthquake physics. Nauka, Moscow, p. 140–168 (in Russian) [Нерсесов И.Л., Пономарев В.С., Тейтельбаум Ю.М. Эффект сейсмического затишья при больших землетрясениях // *Исследования по физике землетрясения*. М.: Наука, 1976. С. 140–168].
- Popov V.L., 2013. Mechanics of Contact Interaction and Friction Physics. Fizmatlit, Moscow, 350 p. (in Russian) [Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. М.: Физматлит, 2013. 350 с.].
- Popov V.L., Grzember B., Starcevic J., Fabry C., 2010. Accelerated creep as a precursor of friction instability and earthquake prediction. *Physical Mesomechanics* 13 (5–6), 283–291. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physme.2010.11.009>.
- Popov V.L., Psakhie S.G., 2007. Numerical simulation methods in tribology. *Tribology International* 40 (6), 916–923. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2006.02.020>.
- Ruzhich V.V., 1997. Seismotectonic Destruction of the Earth's Crust in the Baikal Rift Zone. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 144 p. (in Russian) [Ружич В.В. Сейсмотектоническая деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 144 с.].
- Ruzhich V.V., 2008. On a research method for tribochemical processes in earthquake foci. In: German-Russian Workshop “Earthquakes and Friction Physics”, Abstracts Volume. Technische Universitat Berlin, Berlin, p. 13.
- Ruzhich V.V., Khil'ko S.D., 1987. Analysis of models of earthquake foci from seismogeological positions. In: Physical Foundations of Forecasting of Rock Destruction by Earthquakes. Nauka, Moscow, p. 113–122 (in Russian) [Ружич В.В., Хилько С.Д. Анализ моделей очагов землетрясений с сейсмогеологических позиций // *Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях*. М.: Наука, 1987. С. 113–122].
- Scholz C.H., 1990. The Mechanics of Earthquakes and Faulting. Cambridge University Press, Cambridge, 439 p.
- Sobolev G.A., 1993. Foundations of Earthquake Prediction. Nauka, Moscow, 313 p. (in Russian) [Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.].
- Sobolev G.A., Ponomarev V.A., 1999. Acoustic emission and stages of preparation of destruction in laboratory experiments. *Vulkanologiya i Seismologiya* (4–5), 50–62 (in Russian) [Соболев Г.А., Пономарев В.А. Акустическая эмиссия и стадии подготовки разрушения в лабораторном эксперименте // *Вулканология и сейсмология*. 1999. № 4–5. С. 50–62].

Vinogradov S.D., Ponomarev V.S., 1999. Experimental study of seismic regime. *Priroda* (3), 77–89 (in Russian) [Виноградов С.Д., Пономарев В.С. Экспериментальное изучение сейсмического режима // *Природа*. 1999. № 3. С. 77–89].



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

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



Черных Евгений Николаевич, канд. геол.-мин. наук, с.н.с.
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
Тел. (3952)425823; email: cher@crust.irk.ru

Chernykh, Evgeniy N., Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Tel. +7(3952)425823; email: cher@crust.irk.ru



Пономарева Елена Иннокентьевна, ведущий инженер
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
Тел. (3952)422776

Ponomareva, Elena I., leading engineer
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Tel. +7(3952)422776