

## ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОТКЛИКА ГРАНИЦ РАЗДЕЛА В РАЗЛОМНО-БЛОКОВЫХ СРЕДАХ НА ИЗМЕНЕНИЕ ИХ СОСТОЯНИЯ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ. Ч. 1. РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА И НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

С.В. Астафуров<sup>1</sup>, Е.В. Шилько<sup>1</sup>, А.В. Димаки<sup>1</sup>, В.В. Ружич<sup>2</sup>, В.В. Лопатин<sup>3</sup>, В.Л. Попов<sup>4</sup>, С.Г. Псахье<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН. г. Томск

<sup>2</sup>Институт земной коры СО РАН. г. Иркутск

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт высоких напряжений при ТПУ. г. Томск

<sup>4</sup>Берлинский технический университет. г. Берлин, Германия

E-mail: lopatin@hvd.tpu.ru

*Проведено экспериментальное исследование отклика границ раздела структурно-тектонических блоков земной коры (активных разломов) на вибрационные воздействия и изменение их состояния, реализуемое обводнением. Важнейшим результатом исследования является установление того факта, что совместное влияние вибрационного воздействия и обводнения может принципиально изменять характер отклика сейсмически активных разломов и приводить к инициации аномальных по величине, но плавных смещений гео-блоков без выделения мощных сейсмических импульсов. Анализ результатов на основе обобщенной модели Томлинсона показал, что обнаруженное изменение характера отклика границ раздела структурных элементов является общим для разломно-блоковых сред различной природы. Поведенные исследования позволили авторам предложить новый подход к техногенному управлению режимом смещений в зонах сейсмоактивных разломов, который может быть использован для решения проблем обеспечения сейсдобезопасности.*

### Введение

Хорошо известно, земная кора имеет исключительно сложную гетерогенную структуру. Любой ее участок, как на поверхности, так и на значительных глубинах, пересекается нарушениями сплошности разного масштаба, которые делят его на структурные составляющие – блоки горной породы. Блочная структура земной коры является постоянно обновляемой системой. В процессе деформирования коры некоторые блоки консолидируются в конгломераты, формируя новые подсистемы, а существующие подсистемы наоборот могут распадаться на составные части. На разных иерархических уровнях подобные процессы протекают с различной скоростью и под воздействием разных факторов, но все они имеют общую закономерность – наиболее активно деформационные и геохимические процессы идут на границах блоков, поскольку податливость и проницаемость межблочных зон на несколько порядков выше, чем у основного материала блоков [1].

Любой горный массив представляет собой высокодефектную структуру. Основные элементы структуры массива разделяются квазилинейными нарушениями сплошности. Масштаб нарушений заключен в весьма широком диапазоне размеров: от  $10^{-8}$  м (дефекты кристаллической решетки породообразующих минералов) до  $10^7$  м (протяженность крупных тектонических разрывов). На блоки разбиты не только скальные массивы, составляющие основной объем земной коры, но и нескальные породы. Отдельные участки массивов нескальных пород разделены зонами разуплотнения аналогично тому, как массивы горных пород разделены трещинами, разломами, зонами дробления. Таким образом, земная кора представляет собой дискретную систему блоков, обладающую свойствами иерархичности и самоподобия [2, 3], и может рассматриваться в качестве яркого представителя класса разломно-блоковых сред.

Структурные элементы разломно-блоковых сред отделены друг от друга межблоковыми промежутками. Эти промежутки (в случае земной коры – тектонические разломы и трещины различного масштаба) имеют обычно значительно более низкие эффективные прочностные характеристики по сравнению с блоками. Нарушения сплошности горных пород ответственны за многие механические, геологические и геофизические процессы и являются важнейшим элементом блоковых моделей.

Фундаментальным свойством земной коры является подвижность, которая обуславливает то, что любое распределение деформаций в среде не является статическим, а изменяется со временем с той или иной скоростью [4]. Важно отметить, что основные деформационные процессы в разломно-блоковых средах протекают в зонах активных разломов. Активными разломами являются границы раздела современных структурно-тектонических блоков, в которых локализуются наибольшие амплитуды и скорости деформаций. При этом характер накопления деформаций в интерфейсных зонах определяется особенностями силового взаимодействия блоков, их размерами и величиной аккумулированной упругой энергии. Подтверждением этому служат многочисленные наблюдения за сейсмоактивными территориями. Как правило, размеры активных зон хорошо сопоставимы с размерами структурных блоков [5, 6], что в полной мере соответствует классическим представлениям о том, что каждый конкретный класс землетрясения связан с разгрузкой блока определенного размера [7].

По мнению ряда авторов, аккумулированная в земной коре потенциальная энергия высвобождается через разломный механизм, за счет смещения крыльев разломов. В зависимости от ситуации эта энергия может быть высвобождена одной большой порцией, инициировав сильное землетрясение,

или относительно малыми долями без генерации сильных сейсмических ударов. Характер относительного движения структурных элементов, а также объемы и интенсивность высвобождения потенциальной энергии в разломно-блоковых средах в значительной степени определяется напряженно-деформированным состоянием, строением и физико-механическими характеристиками (состоянием) активных интерфейсных зон.

Многочисленные литературные данные свидетельствуют о том, что одним из факторов, способных влиять на характер смещений геоблоков в зонах сейсмоактивных разломов, являются циклические (вибрационные) воздействия [8–10]. Действительно, в соответствии с существующими теоретическими представлениями любая область разломно-блоковой среды в условиях вибрационного нагружения может находиться в одном из двух состояний – консолидированном или неконсолидированном [1]. В случае консолидированного состояния вся совокупность блоков, составляющих данную область, при наложении внешнего воздействия деформируется как единое целое. Неконсолидированное состояние характеризуется независимым деформированием составных частей (блоков) среды. Таким образом, для неконсолидированного состояния характерно возникновение несогласованных деформаций и значимых межблоковых перемещений. Одна и та же структура по отношению к различным внешним воздействиям может выступать и как консолидированная, и как неконсолидированная. Простейшим примером этого эффекта является распространение упругих колебаний в напряженной зернистой среде. Если длина волны велика по сравнению с размером зерна, то материал ведет себя подобно сплошной среде. В случае высокочастотного воздействия каждое зерно выступает в качестве отдельного агрегата. Фактически это означает возможность эффективного применения локальных («точечных») источников «высокочастотных» вибрационных воздействий для инициации или ускорения смещений во фрагментах активных разломов земной коры. Термин «высокочастотное» в данном случае означает циклическое воздействие с частотой, превышающей собственные частоты геоблоков.

Среди ряда известных механизмов влияния вибраций на смещения в зонах сейсмоактивных разломов можно выделить два. Первый из них обусловлен тем, что подвижки инициируются при определенном пороговом уровне напряжений, который при наложении вибрации достигается быстрее за счет возникновения локальных максимумов синусоидального напряжения на контактирующих неровностях поверхностей [10]. Второй механизм связан с ролью вибрации как своеобразного «деформационного насоса», накачивающего деформации в области границы раздела, в которых достигнуто локальное значение предела текучести [11].

Другим важным фактором, определяющим состояние, а следовательно и отклик зон активных

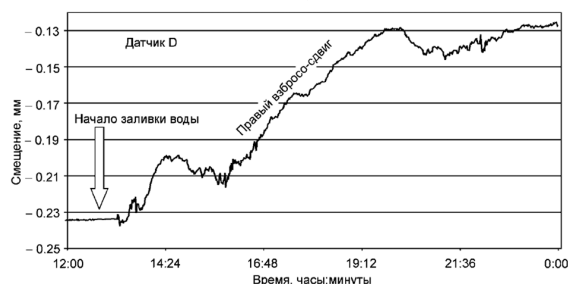
разломов, является их обводненность [12–14]. Влияние этого фактора связано, в частности, с тем, что жидкость играет роль смазки, снижая значение эффективного коэффициента трения на контактах геоблоков. Из результатов моделирования и натуральных экспериментов [15, 16] следует, что обводнением разлома (изменением его состояния) можно инициировать смещения по разлому и тем самым снизить уровень локальных напряжений. Эти результаты также косвенно подтверждаются наблюдаемой в ряде регионов корреляцией сейсмической активности и уровня подземных вод, которые могут проникать в зоны разломов [12–14].

Изучение деформационных процессов в земной коре представляет значительный интерес не только с точки зрения определения фундаментальных свойств и закономерностей поведения разломно-блоковых сред, но также для решения целого ряда прикладных задач геомеханики. Одной из них является разработка новых методов сейсмически безопасного высвобождения аккумулированной в земной коре потенциальной энергии с целью релаксации локальных напряжений и снижения вероятности возникновения сильных землетрясений. В связи с этим настоящая статья посвящена анализу основных результатов проводимого в течение последних лет специального изучения влияния обводнения и вибраций на режим смещений в зонах сейсмоактивных разломов. Исследования включали в себя многолетние инструментальные наблюдения за относительными тангенциальными и нормальными смещениями крыльев разломов, а также натурные эксперименты на фрагментах хорошо изученных разломов. Это позволяет авторам с достаточной долей достоверности судить о влиянии различных факторов на отклик разломов [17].

#### **Результаты мониторинга смещений и натуральных экспериментов в зонах разломов**

Экспериментальное изучение отклика активных границ раздела в земной коре проводилось на активных разломах, относящихся к Байкальской рифтовой зоне. Проведенные исследования показали, что, как и ожидалось, обводненность зоны разлома оказывает существенное влияние на амплитуду и характерные скорости относительных смещений блоков. Яркий пример такого влияния представлен на рис. 1. Здесь представлены инициированные искусственным обводнением смещения во фрагменте Ангарского разлома северо-западного простирания, находящемся на геодинамическом полигоне вблизи пос. Листвянка (Иркутская обл.). Обводнение осуществлялось заливкой воды в три разные участка фрагмента зоны разлома. При этом, как видно из рис. 1, были инициированы сравнительно плавные и медленные, но достаточно большие по амплитудам смещения крыльев разлома. Механизм подобного эффекта, по-видимому, связан со снижением сдвигового сопротивления в плоскости разлома, из-за чего под действием

имеющихся в горном массиве напряжений началось смещение крыльев разлома без приложения дополнительных внешних усилий.



**Рис. 1.** Фрагмент записи взбросо-сдвиговых смещений, инициированных заливкой жидкости в зону разлома в ходе эксперимента 10 июля 2003 г.

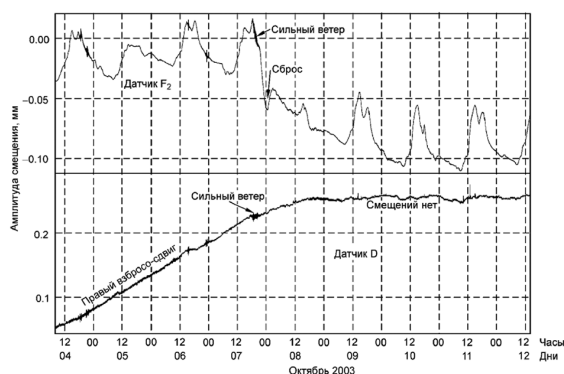
Отметим, что на полигоне в п. Листвянка располагается 30-метровая башня солнечного оптического телескопа Института солнечно-земной физики СО РАН (рис. 2, а). Фундамент этой башни встроен в одно из крыльев разлома. При шторме под воздействием порывов сильного ветра происходит раскачивание металлической вышки телескопа. Ее упругие вынужденные колебания инициируют вибрационное воздействие с частотой 0,3...0,7 Гц и амплитудой, определяемой силой ветра. Через фундамент башни вибрация передается крылу разлома и вносит возмущения в напряженное состояние среды. Таким образом, вышка телескопа выполняет функции ультранизкочастотного вибратора и оказывает механическое сдвиговое воздействие на одно из крыльев разлома, которое может способствовать ускорению или наоборот замедлению подвижек по разлому. Многолетние наблюдения показывают, что вибрационное воздействие также способно спровоцировать переключенные режимы смещений берегов разлома. В качестве примера можно привести кривые смещений по разлому в период мощного бездождевого шторма в ночь с 7 на 8 октября 2003 г. (рис. 2, б), сопровождавшего резкому понижению температуры (на 15 °С) и давления (на 1,3...2,0 кПа). Отметим, что уровень подземных вод (связанный со степенью обводнения зоны разлома) в этот период времени был достаточно низким. Анализ полученных записей (рис. 2, б), показывает, что наблюдавшиеся по разлому северо-западного простирания правосторонние взбросо-сдвиговые смещения после шторма практически прекратились (датчик "D"). В то же время по оперяющему разлому северо-восточного простирания (датчик "F2") произошла инициированная подвижка сбросового типа, нарушившая характерный суточный ход более чем на сутки.

Приведенные примеры наглядно демонстрируют принципиальную возможность изменения режима смещений по разлому путем приложения внешних динамических воздействий и/или изменением их состояния (обводнением). Для детального анализа влияния этих факторов на полигоне в п. Листвянка летом (июль-август) 2004 г. проводились специальные натурные эксперименты, заклю-

чающиеся в искусственном обводнении фрагмента разлома и последующем изучении влияния вибрационного воздействия со стороны башни телескопа на обводненную зону разлома.



а



б

**Рис. 2.** а) Вид геодинамического полигона в п. Листвянка (пунктирной линией показана линия фрагмента разлома северо-западного простирания); б) характер смещений по разломам в период шторма 7–8 октября 2003 г.

На рис. 3 приведена подробная план-схема участка (рис. 2, а), на котором осуществлялось комплексное воздействие на исследуемый фрагмент зоны разлома. Отметим, что мониторинг смещений, а также изучение сейсмической активности этого разлома и структуры геологической среды в данном районе Прибайкалья проводятся на протяжении более чем 15 лет. Именно поэтому данный хорошо изученный разлом был выбран для испытаний.

Для эффективного обводнения зоны разлома в нависающем активном крыле в непосредственной близости от линии разлома была пробурена скважина 10-метровой глубины (скв. 1 на рис. 3). При этом, поскольку «северо-западный» разлом является наклонным, скважина пересекала его плоскость, что обеспечивало непосредственное обводнение границы раздела блоков. Бурение скважины

1 проходило в три этапа. На первом этапе оно осуществлялось без подачи воды. На втором этапе бурение сопровождалось закачкой воды под давлением. Такой способ заливки воды в разлом использовался для более эффективного распространения воды в трещинно-поровом пространстве зоны разлома. На третьем этапе в пробуренную скважину под давлением воздуха с вибрацией устанавливалась обсадка, после чего скважина промывалась водой. Общий расход воды составил около 3 м<sup>3</sup>. В тот же день в другом крыле разлома была пробурена еще одна скважина 11-метровой глубины (скв. 2 на рис. 3). Общее время бурения двух скважин превысило 6 ч. Отметим, что, наряду с башней телескопа, буровая установка стала еще одним мощным, хотя и кратковременным, источником локальных вибрационных воздействий на изучаемый фрагмент разлома.

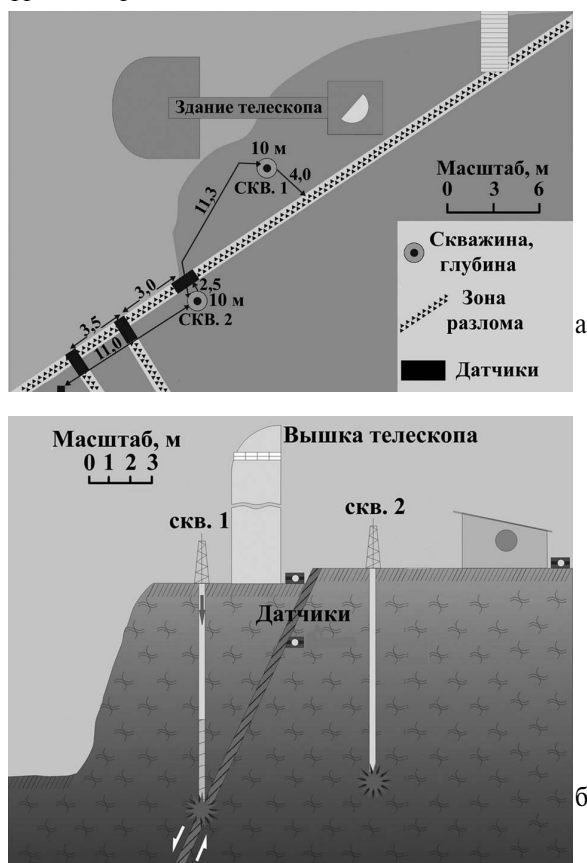


Рис. 3. План-схема геодинамического полигона «Литвянка»: а) вид сверху; б) вид в разрезе

Мониторинг сдвиговых смещений по разлому показал, что совместное воздействие искусственного обводнения и вибраций со стороны башни телескопа привело к аномальной по своим характеристикам активизации фрагмента разлома. Так, на рис. 4 приведены записи сбросо-сдвиговых смещений берегов разлома в течение двух недель после бурения. Сравнение двух кривых показывает резкое изменение тренда смещений после бурения скважин, выраженное в многократном увеличении наклона кривой, и общую активизацию зоны раз-

лома, проявившуюся в появлении большого количества обратимых взбросо- и сбросо-сдвиговых «всплесков». При этом полная величина необратимых смещений, достигнутых в течение двух недель после заливки воды, превысила 10 мм. Следует указать, что характерная годовая величина сдвиговых смещений на данном участке разлома не превышает нескольких миллиметров, поэтому полученные значения являются показателем деятельности аномальной активности разлома, никогда ранее не регистрируемой. Отметим, что резкая активизация смещений зарегистрирована и датчиками, измеряющими относительные нормальные перемещения крыльев разлома. Результаты мониторинга показали, что обводнение зоны разлома совместно с вибрационным воздействием инициировали аномальные по величине смещения в плавном («квазивязком») режиме (средняя величина скорости смещений не превышала 0,8 мм/сут.) без выделения мощных сейсмических импульсов.

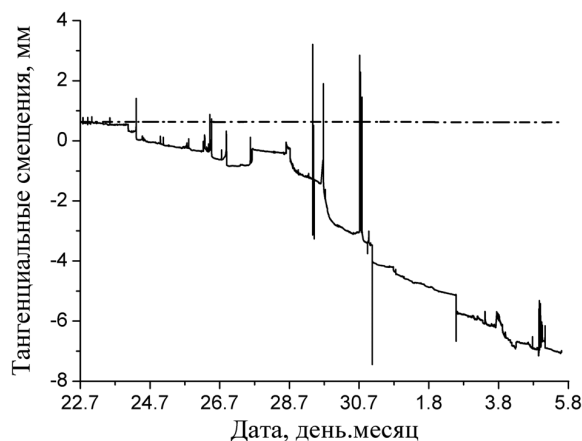
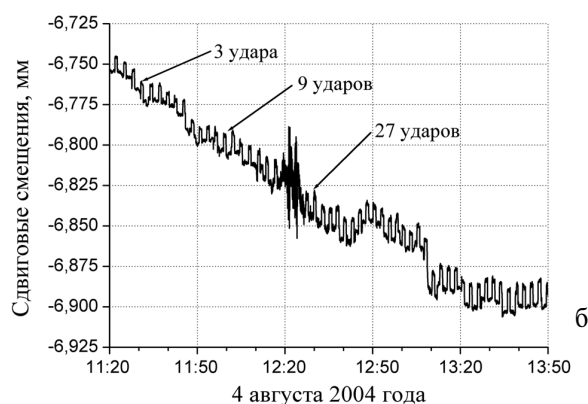
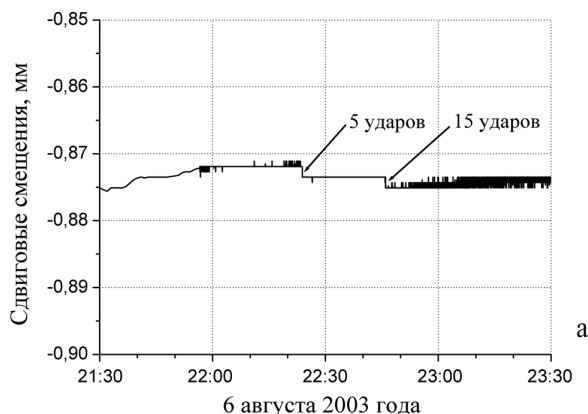


Рис. 4. Характер сбросо-сдвиговых смещений по Ангарскому разлому: сплошная линия – смещения в течение первых двух недель после заливки воды (лето 2004 г.); штрихпунктирная линия – типичные двухнедельные смещения для данного разлома в это время года (данные усреднены по предыдущим годам).

Аномально большие смещения по разлому привели к значительному снижению уровня локальных напряжений в изучаемом фрагменте геосреды. Косвенным подтверждением этого является, в частности, отсутствие динамического сдвигового отклика «разряженного» разлома на слабые виброимпульсные воздействия, реализуемые ударами копра или взрывами малой мощности. В то же время, при проведении на данном участке аналогичных тестов в предыдущие годы регистрировалась быстрая реакция разлома в виде слабых «скачков» тангенциальных и нормальных смещений. Так, на рис. 5, а, приведены записи сбросо-сдвиговых смещений по разлому во время проведения тестовых воздействий 6 августа 2003 г. Можно видеть, что серийные удары тяжелым копром массой около 100 кг приводят к появлению «быстрых» тангенциальных смещений с амплитудой порядка нескольких микрон. Следует отметить, что в тот период времени никаких активных техногенных воздействий на зону разлома не

осуществлялось, и уровень напряжений в исследуемом фрагменте был достаточно высоким. В то же время, при проведении аналогичных испытаний 4 августа 2004 г. (после комбинированного воздействия на зону разлома обводнения и вибраций) видимых динамических тангенциальных смещений по разлому не обнаружено (рис. 5, б). Представляется, что уменьшение «чувствительности» фрагмента воздействиям при снижении уровня внутренних напряжений связано с тем, что в условиях высоких локальных напряжений даже слабое динамическое воздействие может инициировать микроскопические подвижки.

Отметим, что на кривых нормальных смещений инициированные ударами копра динамические подвижки амплитудой в несколько микрон были зафиксированы в обоих описанных случаях. Это, по-видимому, связано с тем, что при «разрядке» среды в зоне разлома нормальные напряжения изменяются значительно слабее сдвиговых. Таким образом, обнаруженное направленное изменение отклика фрагмента активного разлома на слабые динамические воздействия при изменении локального напряженного состояния среды дает ключ к разработке новых, сейсмовибрационных методов оценки уровня напряженного состояния различных участков разломов.



**Рис. 5.** Фрагменты кривых сбросо-сдвиговых смещений по Ангарскому разлому во время проведения серий тестовых ударов копром: а) 6 августа 2003 г.; б) 4 августа 2004 г.

Отсутствие видимого мгновенного отклика разлома на слабые динамические воздействия при изменении уровня локальных напряжений не означает, что разлом является нечувствительным к таким воздействиям. Как показали предшествующие исследования [15, 16], помимо первой фазы реакции разлома, связанной с прохождением упругих иницирующих колебаний от источника, после некоторой временной задержки продолжительностью минуты или даже часы может иметь место также и вторая фаза отклика. В зависимости от мощности и энергии источника динамического воздействия, а также от уровня напряжений в зоне разлома, величина смещений во второй фазе может быть как крайне малой, так и на порядок превосходить смещения в первой фазе. Важно отметить, что смещения эти происходят в криповом режиме, а продолжительность второй фазы может быть соизмерима с временем задержки или даже значительно (на порядок) превосходить ее. Вторая фаза отклика разлома, как правило, сопровождается появлением пакетов (или серий пакетов) обратимых импульсных смещений с амплитудами десятки микрон и периодом несколько секунд. По виду пакет смещений напоминает замедленное землетрясение, при этом его продолжительность может достигать 10...15 мин. Очевидно, что регистрация подобных пакетов быстрых импульсных смещений после некоторого динамического воздействия на зону разлома может свидетельствовать в пользу утверждения, что, даже несмотря на отсутствие видимого влияния такого воздействия, состояние и, как следствие, отклик системы все же претерпели некоторые изменения.

В качестве примера можно привести запись смещений по исследуемому разлому после серии из двух взрывов мощности 0,1 и 0,3 кг взрывчатых веществ, проведенных 7 августа 2004 г. в 10:10 и 11:02 соответственно. Для эффективной реализации энергии взрыва подрывы зарядов производились на дне скважины 1 (рис. 3) в столбе воды. Мониторинг смещений по «северо-западному» разлому показал, как и в случае ударов копром (рис. 5, б), отсутствие видимой мгновенной реакции на взрывы. Общая скорость тренда смещений также не претерпела заметных изменений. Тем не менее, через несколько часов после взрывов была отмечена активизация разлома, которая проявилась в виде «возбужденных» участков на кривых нормальных и тангенциальных смещений продолжительностью до 10 мин (рис. 6). «Высокочастотные» колебания во второй фазе отклика характеризовались периодом несколько секунд, амплитудами до 0,05 мм и по виду напоминали смещения, регистрируемые при небольших землетрясениях (рис. 6, а). Физическая природа появления пакетов импульсных смещений, по-видимому, связана с процессами перераспределения локальных деформаций и напряжений между подобластями изучаемого фрагмента разлома. При этом рассогласованность во времени появления таких смещений в нормальном и танген-

циальном направлениях говорит о крайне сложном характере релаксации локальных напряжений в зоне разлома. Таким образом, в описанном выше эксперименте каждая из тестовых динамических нагрузок вносила свой вклад в изменение состояния зоны разлома, однако их эффект незаметен на фоне активного процесса релаксации локальных концентраторов напряжений, инициированного совместным воздействием обводнения и вибраций (рис. 4).

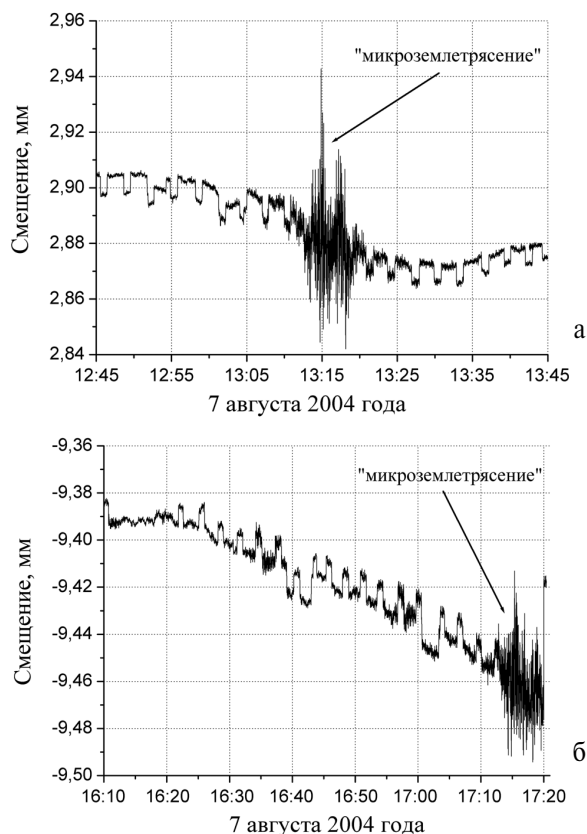


Рис. 6. Кривые смещений: а) сжатие-растяжение через 2 ч после завершения серии взрывов в скважине № 1; б) сбросо-сдвиг через 6 ч взрывов

Приведенные результаты свидетельствуют в пользу того, что даже слабые воздействия оказывают некоторое влияние на процесс диссипации упругой энергии изучаемого фрагмента среды. Поэтому вибрация (то есть многократно повторяющееся динамическое нагружение) действительно может быть эффективным инструментом управления процессом релаксации локальных концентраторов напряжений в геосреде.

Следует отметить, что проведение динамических воздействий на зону разлома в обводненной среде может приводить не только к более эффективной реализации энергии нагружения, но и к изменению структуры зоны разлома. Так, после проведения описанной выше серии из двух взрывов в наполненной водой скважине 1 было зафиксировано резкое (более чем в 3 раза) увеличение скорости фильтрации воды в изучаемом фрагменте зоны разлома (рис. 7). Также возросла и «поглощающая»

способность фрагмента разлома. Это свидетельствует об изменении трещинно-поровой структуры фрагмента зоны разлома в результате множественных повреждений, вызванных распространением ударной волны в насыщенной водой среде. А изменение структуры может приводить и к уменьшению эффективного коэффициента трения.

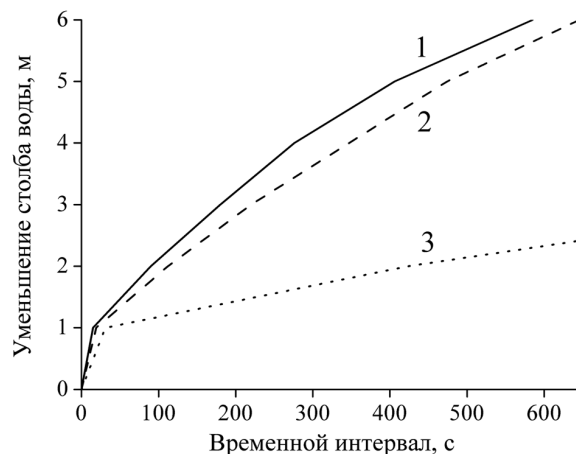


Рис. 7. Кривые уменьшения столба воды («расхода воды») со временем в контрольной скважине № 1: 1) 10 мин после взрывов; 2) 2,5 ч после взрывов; 3) до начала взрывных работ

Таким образом, результаты натурных экспериментов показывают, что совместная реализация обводнения (изменения состояния зоны разлома) и вибрационного воздействия инициируют аномально большие по амплитуде смещения в зонах сейсмоактивных разломов в «квазивязком» режиме. Это способствует существенному снижению уровня внутренних напряжений и выделению аккумулярованной в земной коре потенциальной энергии относительно малыми порциями без генерации мощных сейсмических ударов.

### Обсуждение результатов

Полученные в работе результаты демонстрируют вполне определенные закономерности поведения фрагментов разломно-блоковых сред. Так, если рассматривать границу раздела блоков как тривиальный трибологический контакт, то для ее анализа может быть применен формализм обобщенной одномерной модели Томлинсона [18]. В последние годы эта простая механическая модель активно используется для изучения процессов трения в режиме «stick-slip», а также влияния изменения параметров зоны контакта и вибрационных воздействий [19, 20]. В рамках этой модели рассматривается одномерное движение тела с массой  $m$  под действием силы  $F$  в поле периодической потенциальной силы сопротивления с амплитудой  $N$  и периодом  $a$ . Уравнение движения тела имеет вид:

$$m\ddot{x} = F - \eta\dot{x} - N \sin(2\pi x/a), \quad (1)$$

где  $\eta$  – вязкость среды,  $x$  – координата тела. В приведенных переменных  $\tilde{x}=2\pi x/a$  и  $\tilde{t}=t\sqrt{2\pi N/ma}$ , ур. (1) может быть переписано как:

$$\ddot{\tilde{x}} + k_1 \dot{\tilde{x}} + \sin(\tilde{x}) = k_2, \quad (2)$$

где  $k_1 = \eta / \sqrt{2\pi Nm/a}$ , а  $k_2 = F/N$ .

На рис. 8 приведена «фазовая диаграмма» модели в плоскости параметров  $(k_1, k_2)$ . Здесь горизонтальная линия  $F_s$  ( $k_2 = F/N = 1$ ) отвечает силе трения покоя, а кривая  $F_k$  – силе кинетического трения (минимальной силе, необходимой для поддержания движения тела). Область  $k_1 = \eta / \sqrt{2\pi Nm/a} < 1$  (до совпадения кривых  $F_k$  и  $F_s$ ) отвечает движению в режиме «stick-slip». При этом амплитуда «скачков» уменьшается с ростом  $k_1$ . В области  $k_1 \geq 1$  имеет место равномерное движение тела с постоянной скоростью.

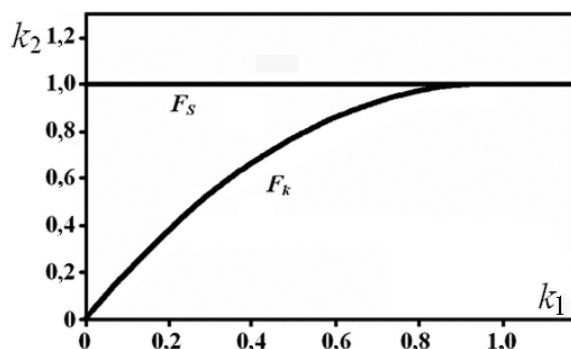


Рис. 8. «Фазовая диаграмма» одномерной модели Томлинсона

В приложении к проблеме инициации смещений по границам раздела в разломно-блоковых средах представленная на рис. 8 зависимость режима движения от величины  $k_1$  может быть интерпретирована следующим образом. Относительные смещения блоков инициируются при превышении внутренними напряжениями силы трения покоя  $N$  в трещине. При этом падает сила сопротивления. Инициированное движение продолжается до тех пор, пока сопротивление не превысит действующие внутренние напряжения. Далее возможна повторная инициация движения, когда внутренние напряжения снова превысят текущее значение силы трения покоя. Увеличение  $k_1$  фактически означает уменьшение различия между силами трения покоя и скольжения. Поэтому при прочих равных условиях инициация движения в системе с большим  $k_1$  будет происходить чаще, но с меньшими амплитудами. В интегральном выражении это приведет к возрастанию средней скорости относительного смещения блоков. Величина  $k_1$  возрастает с уменьшением амплитуды силы сопротивления  $N$  или возрастанием вязкости среды  $\eta$  (то есть, при

изменении состояния интерфейсной зоны). Очевидно, что в случае земной коры оба этих эффекта могут быть достигнуты обводнением.

### Заключение и благодарности

Проведенное в работе экспериментальное изучение отклика активных границ раздела структурно-тектонических блоков земной коры на изменение их состояния (обводнение) показало, что обводнение зоны разлома с высоким уровнем внутренних напряжений может спровоцировать достаточно большие необратимые смещения, величина и скорость которых определяются уровнем внутренних напряжений и строением зоны разлома. При этом наложение вибрационного воздействия на обводненную зону разлома может не просто инициировать аномальные по величине относительные смещения геоблоков, но делать это в «квазивязком» (криповом) режиме, не сопровождающемся выделением мощных сейсмических импульсов.

Таким образом, совместным воздействием на зону активного разлома обводнения и вибраций можно способствовать выделению части «избыточной» упругой энергии фрагментов земной коры (то есть снижению локальных напряжений) сейсмически безопасным способом. Анализ результатов на основе модели Томлинсона подтвердил общность сделанных выводов и их применимость для активных границ раздела в интерфейсных и разломно-блоковых средах различной природы. При этом, поскольку высокая степень водонасыщения зон разломов (или их фрагментов) и вибрационное воздействие с заданными параметрами могут быть достигнуты применением имеющихся и разрабатываемых технических средств, открывается возможность техногенного управления режимом смещений в зонах разломов. Известно, что накопление тектонической энергии в горных массивах происходит достаточно медленно, поэтому инициацией плавных и больших по амплитуде смещений по сейсмически активному разлому можно достигнуть значительного снижения уровня напряжений в горном массиве и отодвинуть сейсмогенную реализацию критических деформаций на периоды от десятков до тысяч лет.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№ 04-05-64707) и президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ (№ НШ-2324.2003.1), грантов конкурсов экспедиционных работ СО РАН 2003–2005 гг., а также гранта Министерства образования и науки РФ и CRDF в рамках программы BRHE (проект № 016-02).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 423 с.
2. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. – М.: Наука, 1987. – 100 с.
3. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы // Доклады АН СССР. – 1979. – Т. 247. – № 4. – С. 829–831.
4. Гольдин С.В. Деструкция литосферы и физическая мезомеханика // Физ. мезомеханика. – 2002. – Т. 5. – № 5. – С. 5–22.
5. Соболев Г.А., Завьялов А.Д. О концентрационном критерии сейсмогенных разрывов // Доклады АН СССР. – 1980. – Т. 252. – № 1. – С. 69–71.
6. Уломов В.И. Глобальная упорядоченность сейсмодинамических структур и некоторые аспекты сейсмического районирования и долгосрочного прогноза землетрясений // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. – Вып. 1. – М.: ИФЗ РАН, 1993. – С. 24–44.
7. Рыкунов Л.Н., Смирнов В.Б., Старовойт Ю.О. Об иерархичном характере сейсмической эмиссии // Доклады АН СССР. – 1986. – Т. 288. – № 1. – С. 81–86.
8. Кочарян Г.Г., Костюченко В.Н., Павлов Д.В. Иницирование деформационных процессов в земной коре слабыми возмущениями // Физ. мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – № 1. – С. 5–22.
9. Кочарян Г.Г., Кулюкин А.А., Марков В.К. и др. Малые возмущения и напряженно-деформированное состояние земной коры // Физ. мезомеханика. – 2005. – Т. 8. – № 1. – С. 23–36.
10. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. – М.: Наука, 2003. – 270 с.
11. Псахье С.Г., Шилько Е.В., Астафуров С.В. Изучение особенностей механического отклика материалов с границами раздела, характеризующимися высокой деформационной способностью // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30. – № 6. – С. 45–51.
12. Costain J.K., Bollinger G.A., Speer J.A. Hydroseismicity: A hypothesis for the role of water in the generation of intraplate seismicity // Geology. – 1987. – V. 15. – № 7. – P. 618–621.
13. Saar M.O., Manga M. Seismicity induced by seasonal groundwater recharge at Mt. Hood, Oregon // Earth and Planetary Science Letters. – 2003. – V. 214. – № 3. – P. 605–618.
14. Киссин И.Г. Землетрясения и подземные воды. – М.: Наука, 1982. – 177 с.
15. Ружич В.В., Псахье С.Г., Борняков С.А. и др. Изучение влияния виброимпульсных воздействий на режим смещений в зонах сейсмоактивных разломов // Физ. мезомеханика. – 2003. – Т. 6. – № 1. – С. 41–53.
16. Псахье С.Г., Ружич В.В., Шилько Е.В. и др. Изучение влияния водонасыщения и вибраций на режим смещений в зонах разломов // Физ. мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – № 1. – С. 23–30.
17. Ружич В.В., Трусков В.А., Черных Е.Н., Смекалин О.П. Современные движения в зонах Прибайкалья и механизмы их иницирования // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40. – № 3. – С. 360–372.
18. Tomlinson G.A. A molecular theory of friction // Philos. Mag. – 1929. – V. 7. – Ser. 7. – P. 905–939.
19. Persson B.N.J. Sliding friction. Physical Principles and Applications. 2<sup>nd</sup> edition. – N.Y.: Springer Verlag, 2000. – 515 p.
20. Popov V.L. A theory of the transition from static to kinetic friction in boundary lubrication layers // Solid State Communications. – 2000. – V. 115. – № 7. – P. 369–373.

УДК 553.411.071.242.4+550.4

## МИНЕРАЛОГ–ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЧЕРТЫ ОКОЛОРУДНОГО МЕТАСОМАТИЗМА В ЗАПАДНОМ ЗОЛОТОРУДНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ (СЕВЕРНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

И.В. Кучеренко

Томский политехнический университет  
E-mail: lev@tpu.ru

*Приведены данные об условиях залегания, морфологии рудных тел, минеральном составе, физико-химических и термодинамических режимах образования руд Западного золоторудного месторождения Северного Забайкалья. Впервые показаны порядок минеральной зональности (структура) и минералого-петрохимические черты аподолеритовых околожильных метасоматических ореолов. Доказывается принадлежность последних к березитовой метасоматической формации, а месторождения – к золотой субформации золото-уран-полиметаллической березитовой рудной формации. Слабо контрастные аномалии золота, серебра, ртути приурочены к тыловым зонам околожильных метасоматических ореолов в непосредственном обрамлении слабозолотоносных (первые г/т) интервалов кварцевых жил. Аргументируются генетические связи околожильных метасоматических и геохимических ореолов с рудами и образование их в рудообразующем процессе позднепалеозойской металлогенической эпохи. Основные минералого-петрохимические и геохимические черты околожильного метасоматизма рассмотрены в сравнении с таковыми других месторождений Северо-Забайкальского золоторудного района.*

### Введение

В золоторудных районах сланцевого типа рудовмещающие углеродистые сланцы несут в себе вещественные признаки минералого-химических преобразований исходных осадочных пород на этапах регионального зонального метаморфизма и по-

следующего окolorудного метасоматизма с временным интервалом между этапами до нескольких сотен млн лет [1, 2 и др.]. Горные породы, представляя итоговый результат реализации нескольких геологических процессов, обладают геохимическими чертами, которые, очевидно, формировались