

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.242

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
НА ОТКЛИК ГРАНИЦ РАЗДЕЛА БЛОКОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ
ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

С.В. Астафуров, Е.В. Шилько, В.В. Ружич*, С.Г. Псахье

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634021, Томск, просп. Академический, 2/1, Россия

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

На основе компьютерного моделирования методом подвижных клеточных автоматов изучено влияние напряженного состояния границ раздела блоков в геологических средах на их деформационный отклик при динамических воздействиях. Результаты показывают, что по изменению деформационного отклика межблочных границ на тестовые слабые и нестационарные воздействия можно оценить близость их напряженного состояния к критическому, при котором может инициироваться неустойчивая подвижка в тектонических разрывах. Результаты теоретических исследований хорошо коррелируют с полученными авторами экспериментальными данными. Проведенный анализ позволяет предложить новый подход для оценки напряженно-деформированного состояния во фрагментах зон активных разломов земной коры.

Блоковая среда, границы раздела, динамическое воздействие, отклик, смещения, напряженное состояние.

**EFFECT OF LOCAL STRESS ON THE INTERFACE RESPONSE
TO DYNAMIC LOADING IN FAULTED CRUST**

S.V. Astafurov, E.V. Shilko, V.V. Ruzhich, and S.G. Psakhie

The effect of local stress on the interface response to dynamic loading in faulted crust has been studied through MCA (movable cell automata) simulation. Knowing the strain response of a fault block boundary to test impacts, one can estimate the proximity of the fault to critical stress that allows an unstable slip. The computing results are consistent with data of field experiments in fault fragments (vibration, water injection, explosions). The reported analysis makes a basis for a new approach to estimating stress and strain in active faults.

Faulted crust, interface, dynamic loading, response, slip, stress

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что характерной особенностью геологических сред является иерархическая многоуровневая организация их блочной структуры [Садовский и др., 1987; Кочарян, Спивак, 2003]. Так, любой участок земной коры представляет собой совокупность блоков, разделенных нарушениями сплошности разного масштаба — разломами, зонами трещиноватости, трещинами и т. д. Межблочные области (границы раздела) обычно имеют значительно более низкие эффективные прочностные и деформационные характеристики, нежели материал самих блоков. Это приводит к тому, что нарушения сплошности различного масштаба являются одним из способов существования породного массива при больших, необратимых деформациях [Родионов и др., 1986]. Следует отметить, что механизмы реализации упругой энергии геосреды, находящейся в сложном напряженно-деформированном состоянии, могут быть различными [Гольдин, 2005]. Одним из основных механизмов является локализация необратимых деформаций на границах раздела блоков земной коры различных масштабов.

Режим и скорости относительных смещений блоков по активным разломам или трещинам определяются особенностями структуры и локального напряженного состояния, а также внешними природными и техногенными факторами [Кочарян, Родионов, 1988; Садовский и др., 1988; Ружич и др., 1999]. Характерные значения скорости смещений могут варьировать от нескольких миллиметров в год (криповый режим деформации) до первых метров в секунду (при сильных землетрясениях), что связано с достижением предельного значения сдвиговых напряжений на границе раздела. Поэтому актуальной задачей геофизики является создание методов оценки локального напряженного состояния геосреды на

участках активных тектонических разломов. В качестве характеристики локального напряженного состояния целесообразно выбрать величину относительных локальных сдвиговых напряжений, поскольку именно этот параметр и определяет близость границы раздела к критическому состоянию, при котором инициируется неустойчивая подвижка. Отметим, что в работах Л.А. Назарова с соавт. [2004, 2006] близость напряженно-деформированного состояния межблочного нарушения к критическому уровню оценивалась с использованием сходного критерия, связанного с относительной величиной проскальзывания берегов.

Одним из возможных способов оценки напряженного состояния среды в зоне активного разлома является анализ его деформационного отклика на внешние воздействия с контролируемыми характеристиками. Для понимания механизмов такого отклика полезным является проведение компьютерного моделирования, поскольку оно позволяет явным образом изучать связь локальных напряжений и смещений, что в натурных испытаниях практически невозможно. Авторами настоящей работы на основе компьютерного моделирования методом подвижных клеточных автоматов [Псахье и др., 2000] проведено исследование отклика модельной межблочной границы, находящейся в сложном напряженном состоянии, на динамические (включая вибрационные) воздействия (основные положения метода подвижных клеточных автоматов приведены, см. приложение I). Выбор данного метода обусловлен тем, что он на протяжении уже ряда лет успешно используется для изучения особенностей деформирования и разрушения сложных гетерогенных материалов и сред, в том числе и геологических [Psakhie et al., 2001; Псахье и др., 2002; Шилько, 2005; Dmitriev et al., 2005]. Результаты моделирования сопоставлены с данными экспериментальных исследований, проводимых на протяжении ряда лет на небольших фрагментах активных разломов Прибайкалья.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для решения поставленных задач в работе на основе метода подвижных клеточных автоматов была предложена качественная двумерная модель границы раздела структурных элементов блочной среды (рис. 1, а). Модельная система состояла из двух блоков, разделенных областью межблочного нарушения, механический отклик которой соответствовал механическим свойствам катаклазированного вещества. Функции отклика подвижных клеточных автоматов, моделирующих блоки и границу раздела, приведены на рис. 1, б. Можно видеть, что функция отклика элементов блоков является линейно-упругой, в то время как для автоматов интерфейсной области она имеет длинный участок, соответствующий необратимым деформациям. Отметим, что функция отклика определяет характер механического взаимодействия автомата с окружением и является некоторым аналогом диаграммы нагружения моделируемого автоматом фрагмента материала (основные положения используемой в работе модели взаимодействия подвижных клеточных автоматов приведены в приложении II).

В работе учитывалась сильная фрагментированность интерфейсной зоны и высокая концентрация в ней повреждений различного масштаба. При этом повреждения и несплошности, протяженность которых

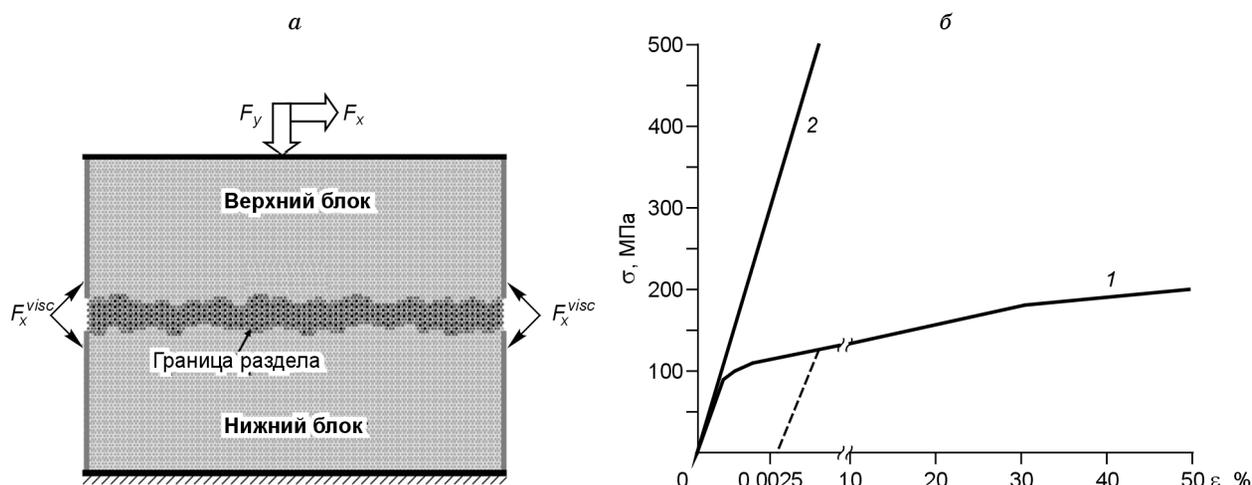


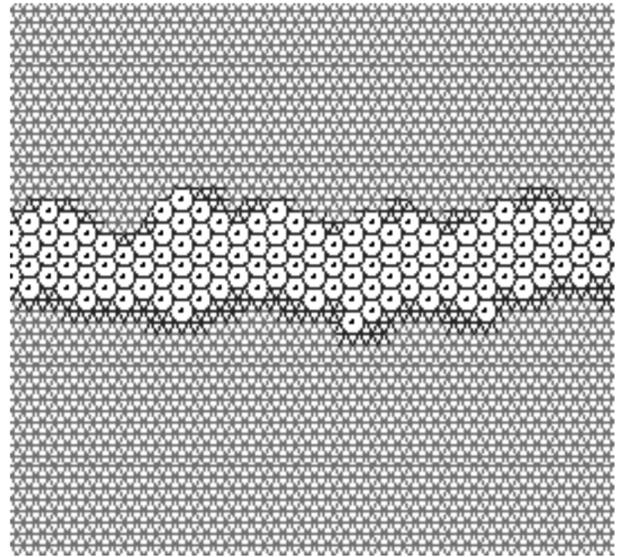
Рис. 1. Двумерная модель модельной границы раздела структурных элементов блочной среды:

а — структура и схема нагружения образца; б — функции отклика автоматов, моделирующих интерфейсную область (кривая 1) и высокопрочные блоки (кривая 2). Штриховая линия соответствует разгрузке.

Рис. 2. Система межавтоматных связей фрагмента модельной границы раздела блоков.

значительно меньше размера клеточного автомата, моделировались неявно, через функцию отклика (см. рис. 1, б, кривая 2). Нарушения, масштаб которых сопоставим с размером клеточного автомата, моделировались заданием несвязанных пар клеточных автоматов (рис. 2).

Использовалась следующая схема нагружения модельного образца. Нижний ряд элементов нижнего блока закреплялся, а внешние воздействия оказывались на верхний ряд элементов верхнего блока (см. рис. 1, а). Как отмечалось выше, важной особенностью напряженного состояния фрагментов геосреды является наличие стесненных условий, ограничивающих как объемные деформации блоков, так и свободу их относительного перемещения по границам раздела. В настоящей работе рассматривалась „незафиксированная“ пара блоков, влияние



окружения которых сводилось в основном к увеличению инерционности движения, а также к интенсивному поглощению энергии механического нагружения. Для имитации свойств окружения на автоматы боковых поверхностей блоков действовала дополнительная вязкая сила, направленная по оси X : $F_x^{visc} = -\alpha V_x$, где V_x — компонента x скорости соответствующего автомата.

В работах [Ружич и др., 2003; Назаров и др., 2004, 2006; Шилько, 2005] было показано, что влияние нестационарных (в том числе вибрационных) воздействий становится существенным, когда уровень напряжений на границах раздела близок к интегральному значению предела текучести. Поэтому нами исследовался отклик „нагруженного“ модельного образца. Исходное напряженно-деформированное состояние системы достигалось приложением к верхнему ряду автоматов моделируемого образца внешней силы, имеющей нормальную (F_y) и тангенциальную (F_x) компоненты, и последующей релаксации образца (см. рис. 1, а). Во всех расчетах использовалось одинаковое значение F_y , удельное значение которого составляло около 20 % от величины предела текучести материала, слагающего границу раздела (см. рис. 1, б, кривая 2). По окончании релаксации проводилось исследование отклика модельной границы раздела на динамические воздействия.

Зависимость силы сопротивления модельного образца F^{res} сдвиговому деформированию с постоянной скоростью от величины тангенциального смещения l_{sh} (при заданном значении F_y) приведена на рис. 3. На графике переменные F^{res} и l_{sh} нормированы соответственно на максимальную силу сопротивления F^{max} и толщину граничного слоя h_{infr} . Можно видеть, что кривая сопротивления сдвигу характеризуется тремя основными стадиями: квазиупругая, квазипластического течения и запредельная (участки разупрочнения и остаточной прочности). Следует отметить, что величина остаточной прочности в рассматриваемом примере ($F^{res}/F^{max} \approx 0.23$) достаточно низкая, а наклон участка разупрочнения диаграммы нагружения крутой ($\alpha \approx 87^\circ$). Это связано главным образом с локализацией процессов накопления необратимых деформаций и повреждений исключительно в узкой области между массивными блоками, деформирующимися упруго. Кроме того, в рассматриваемой модельной системе не учитывалась возможность „залечивания“ исходных или образовавшихся при нагружении повреждений. Тем не менее предложенная модель, хотя и является идеа-

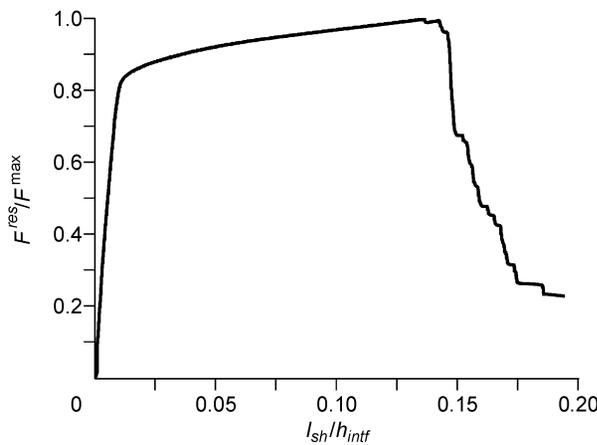


Рис. 3. Зависимость силы сопротивления тангенциальному смещению активного крыла модельного разлома (F^{res}/F^{max}) от величины смещения l_{sh}/h_{infr} .

лизированной, может рассматриваться как представительный объект для теоретического изучения общих закономерностей поведения реальных границ раздела в блоковых средах.

Одним из возможных способов оценки близости напряженного состояния среды во фрагментах активных тектонических разломов к предельному может быть измерение величины локальных смещений, инициированных виброимпульсными или вибрационными воздействиями с контролируемыми параметрами. В основе данного подхода лежит ярко выраженная нелинейная зависимость отклика среды в зоне разлома от уровня локальных напряжений. При этом для интерпретации результатов измерений необходимо построение калибровочных зависимостей, связывающих изменение различных регистрируемых параметров отклика разлома с относительной величиной локальных напряжений.

Одним из видов калибровочных параметров отклика может являться количество циклов или энергия вибрации, необходимые для инициации локальных необратимых смещений в изучаемом фрагменте границы раздела. При этом, как отмечалось ранее, информативным является использование не абсолютных значений сдвиговых напряжений, а их отношения к эффективной сдвиговой прочности границы. Актуальность такого способа оценки „степени опасности“ напряженного состояния связана с тем, что блочные геосреды функционируют в условиях постоянного воздействия слабых возмущений как естественного, так и искусственного генезиса.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ СДВИГОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ГРАНИЦАХ РАЗДЕЛА

Напряженно-деформированное состояние в зонах активных разломов является неоднородным. При этом в областях, где локальные напряжения достигают предела упругости, каждый „импульс“ вибрации вносит свой вклад в накопление необратимых деформаций. При этом важна информация не столько о величине смещения, сколько об изменении этого параметра в процессе приложения воздействия. Поэтому для изучения влияния единичных динамических возмущений на величину инициированных смещений блоков по границе раздела была проведена следующая серия расчетов. На стадии установки исходного напряженного состояния модельный образец нагружался с заданными F_x и F_y (величина F_y была одинакова во всех расчетах) согласно описанной выше процедуре. По окончании релаксации всем клеточным автоматам верхнего блока задавался импульс, соответствующий скорости $V_x = 0.2$ м/с (при этом система оставалась в нагруженном состоянии). Выведенный из равновесия верхний блок начинал смещаться вправо. В процессе движения его кинетическая энергия диссипировала за счет действия вязких сил на боковых границах, а также расходовалась на необратимое деформирование интерфейсной области. В результате этих процессов верхний блок останавливался, пройдя некоторое расстояние вдоль границы раздела, и система вновь возвращалась в состояние равновесия.

Результаты расчетов показали, что в зависимости от величины напряженного состояния (F_x) длина пути верхнего блока может меняться на порядок, причем характер этого изменения носит ярко выра-

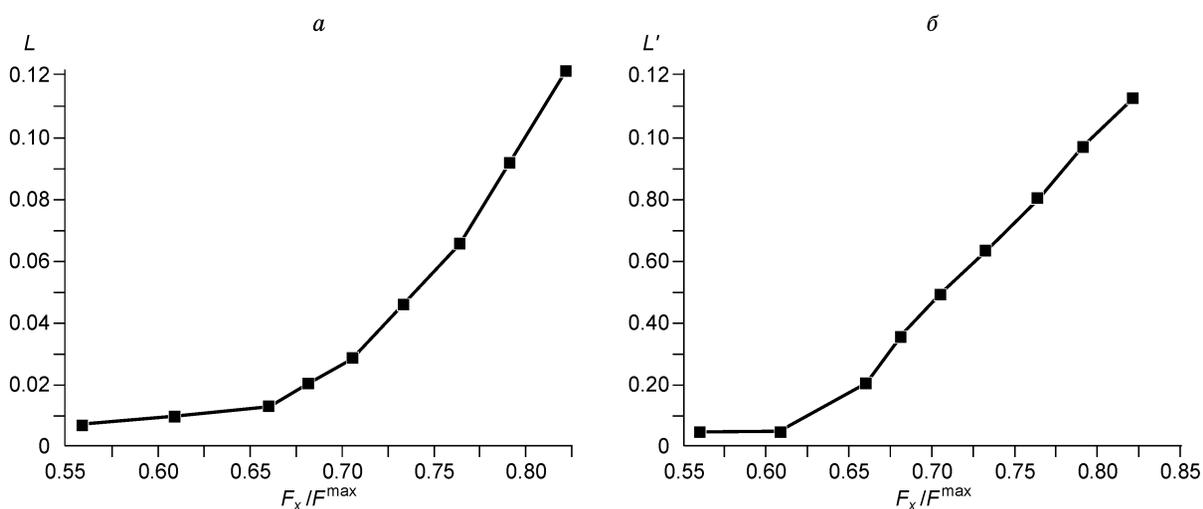


Рис. 4. Зависимость характеристик инициированного импульсом тангенциального смещения активного блока от уровня сдвиговых напряжений в образце F_x / F^{\max} :

а — величины смещения (L), б — производной смещения (L').

женный нелинейный характер (рис. 4, а). График зависимости производной

$$L' = \frac{d(L/h_{inf})}{d(F_x / F^{max})}$$

(где L — величина инициированного импульсом сдвига), от величины F_x / F^{max} приведен на рис. 4, б. Можно видеть, что скорость роста смещений в рассматриваемом интервале F_x также возрастает на порядок. При этом качественное изменение отклика системы наблюдается в области напряжений $F_x / F^{max} > 0.65$. В то же время при меньших значениях приложенной тангенциальной силы изменение длины инициированных смещений является крайне слабым. Следует отметить, что резкое изменение наклона кривых $L(F_x / F^{max})$ и $L'(F_x / F^{max})$ происходит значительно раньше видимого изменения наклона кривой нагружения модельной границы раздела (см. рис. 3) ($F_x / F^{max} \approx 0.82$). Указанное различие определяет истинные интервалы квазиупругого и квазипластического участков диаграммы нагружения ($F_x / F^{max} \sim 0.65$).

Важно указать, что при $F_x / F^{max} > 0.9$ описанное импульсное воздействие приводит к инициации безостановочного движения верхнего блока и, как следствие, к возникновению неустойчивой подвижки. Таким образом, при напряженном состоянии границы раздела, близком к предельному значению, даже единичные динамические воздействия достаточной интенсивности могут инициировать события, сопровождающиеся высвобождением значительного количества упругой энергии. Отметим, что используемая в „импульсных“ расчетах скорость 0.2 м/с по порядку величины соответствует скорости колебаний почвы вблизи эпицентра 8—9-балльного землетрясения. Поэтому полученный результат можно рассматривать как один из аргументов в дискуссии о возможности инициирования землетрясений удаленными источниками мощных динамических возмущений: землетрясениями, подземными взрывами и т. д. [Николаев, Верещагина, 1991; Emter, 1997].

Полученный результат говорит о резком возрастании влияния динамических воздействий в области квазипластического отклика границы раздела (когда напряженное состояние значительной доли клеточных автоматов достигло предела текучести). Кроме того, можно сделать некоторые выводы о характере такого возрастания. В частности, как видно из рис. 4, б, в области „высоких“ напряжений ($F_x / F^{max} > 0.65$) наблюдается линейный рост скорости изменения величины инициированного импульсом смещения L' .

Тестовые расчеты, проводимые с целью оценки влияния величины приложенного импульса, показали, что конкретное значение V_x определяет величину инициированного смещения (L), однако не изменяет характер отклика модельной границы раздела. В частности, при $F_x / F^{max} > 0.65$ начинается линейное возрастание параметра L' , а при $F_x / F^{max} > 0.9$ даже слабые импульсные воздействия, соответствующие V_x порядка нескольких миллиметров в секунду, приводят к возникновению неустойчивой подвижки. Отсюда следует, что в ситуации, когда L много меньше длины квазипластического участка диаграммы нагружения границы раздела (см. рис. 3), зависимость, представленная на рис. 4, б, может, с известной осторожностью, использоваться и для не слишком продолжительных и интенсивных вибрационных воздействий. При этом наклон „интегральной“ кривой скорости роста смещений будет пропорционален аналогичной кривой для одиночного импульса с коэффициентом пропорциональности N (N — количество циклов воздействия).

Переноса полученные выше результаты на границы раздела блоков земной коры, можно рассматривать пару зависимостей вида $L(F_x / F^{max})$ и $L'(F_x / F^{max})$, полученных путем компьютерного моделирования, лабораторных экспериментов или натуральных испытаний, как один из вариантов калибровочных кривых для оценки близости напряженного состояния активного разлома или его фрагмента к предельному уровню. При этом регистрируемые локальные смещения могут инициироваться как единичными динамическими воздействиями достаточной мощности, так и низкоамплитудными кратковременными вибрационными. Зная величину приложенного импульса и вызванное им смещение, можно оценивать близость текущего напряженного состояния к предельному значению, при котором возможна неустойчивая подвижка.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ОТКЛИК ГРАНИЦ РАЗДЕЛА ПРИ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Отмеченные при численном моделировании закономерности деформационного отклика активной границы раздела, находящейся в сложном напряженном состоянии, на динамические (включая вибрационные или виброимпульсные) воздействия сопоставлялись с результатами натуральных экспериментов, проводимых в 1995—2006 гг. в Прибайкалье, в частности, на геологических обнажениях северной оконечности о. Ольхон (участок Обручевского разлома), а также на участке Приморского разлома (бухта

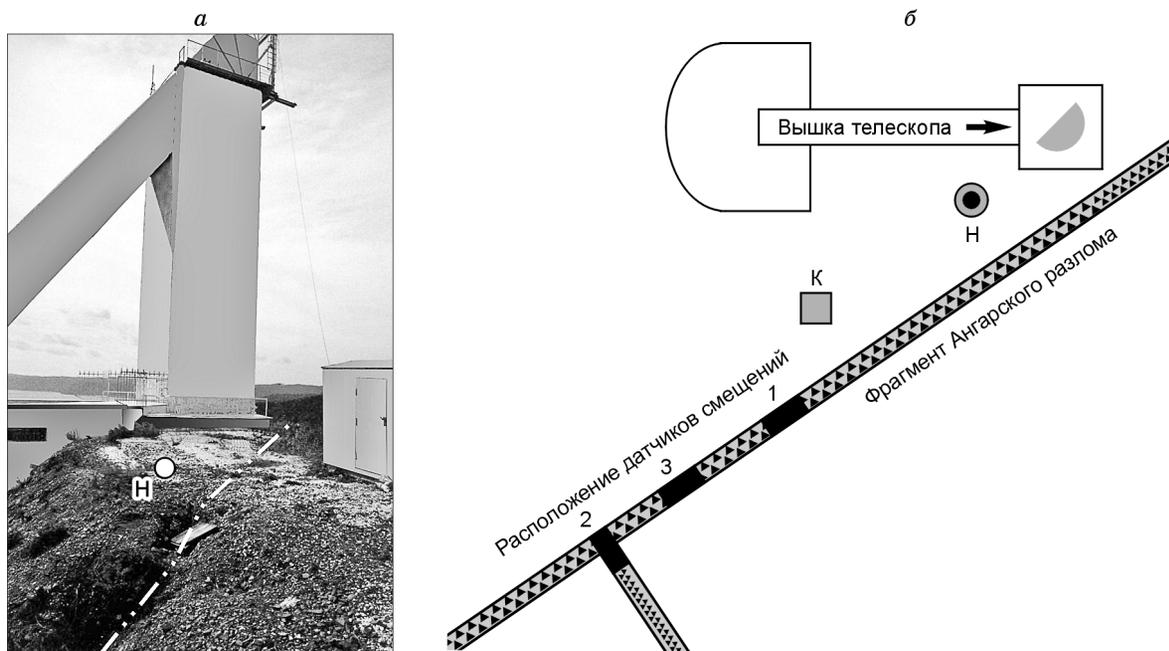


Рис. 5. Полигон в пос. Листвянка, используемый для проведения экспериментов по воздействию на фрагмент Ангарского разлома:

а — общий вид; *б* — план-схема. Н — скважина для закачки воды в зону разлома. Штрихпунктирная линия на части (*а*) — линия разлома северо-западного простирания. К — место проведения ударов копром.

Обутеиха), включая также геодинамический полигон ИЗК СО РАН в пос. Листвянка Иркутской области [Ружич и др., 1999].

В последние годы наиболее масштабные натурные эксперименты проводились на полигоне в Листвянке, где изучался фрагмент зоны Ангарского сейсмоактивного разлома северо-западного простирания [Ружич и др., 2003; Псахье и др., 2004; Астафуров и др., 2005; Шилько, 2005]. Фотография и схема участка, на котором расположен изучаемый фрагмент разлома, приведена на рис. 5. Важно отметить, что на территории полигона располагается 25-метровая башня солнечного оптического телескопа Института солнечно-земной физики СО РАН (см. рис. 5), фундамент которой „встроен“ в юго-западное крыло разлома. Установлено, что под действием сильных штормовых ветров башня может раскачиваться с частотой 0.4—1.0 Гц. При этом колебания от конструкции передаются через фундамент непосредственно на фрагмент разлома. Таким образом, вышка телескопа эпизодически способна выполнять функции естественного вибратора, оказывающего периодическое воздействие на одно из крыльев разлома. Необходимо также отметить, что мониторинг смещений, а также изучение сейсмической активности этого разлома и его геолого-геофизического строения в данном районе Прибайкалья проводятся, начиная с 1995 г., специалистами Института земной коры СО РАН, а с 2004 г. — совместно с исследователями Института физики прочности и материаловедения СО РАН. Именно поэтому данный хорошо изученный фрагмент Ангарского разлома был выбран для углубленных экспериментальных исследований.

В августе 2004 г. с целью изучения совместного влияния вибрационных воздействий и техногенного изменения физико-механического состояния зоны Ангарского разлома (реализуемого обводнением) на режим смещений в его зоне были проведены специальные натурные эксперименты с применением интенсивных динамических воздействий. Основной задачей проводимых работ являлось изучение возможности инициирования больших по амплитуде и скорости смещений в ускоренном, но плавном режиме с целью снижения локальных напряжений в изучаемом фрагменте разлома.

Обводнение границы раздела осуществлялось путем закачек воды непосредственно в плоскость сместителя через специально пробуренную на полигоне 11-метровую скважину (см. рис. 5). Вибрационное воздействие на фрагмент разлома осуществлялось путем многочасовой работы буровой установки при проходке скважин в сочетании с колебаниями башни телескопа, а виброимпульсное — за счет использования подземных взрывов малой мощности или ударов копра, вес которого составлял 80 кг. Анализ результатов мониторинга сдвиговых смещений по разлому показал, что совместное воздействие локального искусственного обводнения и вибраций привело к аномальной по своим характеристикам активизации смещений в пределах фрагмента зоны разлома (рис. 6). Это проявилось в резком возрастании

Рис. 6. Характер сбрососдвиговых смещений по Ангарскому разлому в течение первых двух недель после начала эксперимента (лето 2004 г.).

скорости смещений по разлому, а в графическом выражении нашло отражение в виде аномального увеличения наклона кривой и появления большого количества обратимых „всплесков“ крупноамплитудных смещений продолжительностью до нескольких минут (см. рис. 6). Полная величина инициированных остаточных смещений, достигнутых в течение нескольких недель, составила 10 мм. Следует отметить, что среднегодовая скорость тренда, т. е. измеряемых в ходе мониторинга смещений на данном фрагменте Ангарского разлома, лежит в пределах 0.1—0.2 мм/год. Таким образом, полученные значения инициированного воздействиями смещения являются показателем действительно аномальной активизации разлома, ранее не регистрируемой [Ружич и др., 2003; Псахье и др., 2004; Астафуров и др., 2005; Шилько, 2005].

Достигнутые аномально большие смещения по разлому привели, по-видимому, к значительному снижению уровня локальных напряжений в его изучаемом фрагменте. Красноречивым подтверждением этого является, в частности, отсутствие в 2005—2006 гг. ярко выраженного быстрого сбрососдвигового или взбрососдвигового типа характерных смещений, т. е. отклика разлома на тестовые виброимпульсные воздействия, реализуемые слабыми взрывами или сериями ударов копра (соответствующая площадка указана, см. рис. 5, б). В то же время при проведении на данном участке аналогичных тестов в предыдущие годы регистрировалась намного более сильная реакция разлома в виде слабых „скачков“ тангенциальных и нормальных смещений. Так, на рис. 7, а приведены записи тангенциальных смещений по разлому во время проведения тестовых импульсных воздействий 6 августа 2003 г. Можно видеть, что серийные удары тяжелым копром приводят к появлению „быстрых“ смещений с амплитудой порядка 2—3 мкм (скорость подвижки ~1.2 мкм/с). Следует отметить, что в тот период активные техногенные воздействия на зону разлома не проводились. В то же время при проведении аналогичных испытаний в 2005—2006 гг. (во время и после комбинированного воздействия на зону разлома обводнением и вибрациями) амплитуда и скорость смещений, инициированных локальными динамическими воздействиями, значительно снизилась. В качестве иллюстрации данного примера на рис. 7, б приведены записи смещений по тому же фрагменту зоны разлома, полученные 9 августа 2006 г., где показано, что амплитуда сдвиговых смещений по активной границе раздела, вызванная сериями из 10 и 20 ударов копром, составляет всего 0.25—0.5 мкм. При этом скорость подвижек снизилась до 0.1 мкм/с, что почти на порядок ниже, чем в случае „высоконапряженного“ фрагмента разлома.

В работе [Ружич и др., 1999] изложены сведения о подобных, но более ранних измерениях в зонах Приморского и Обручевского сейсмоактивных разломов. В частности, было показано, что зафиксиро-

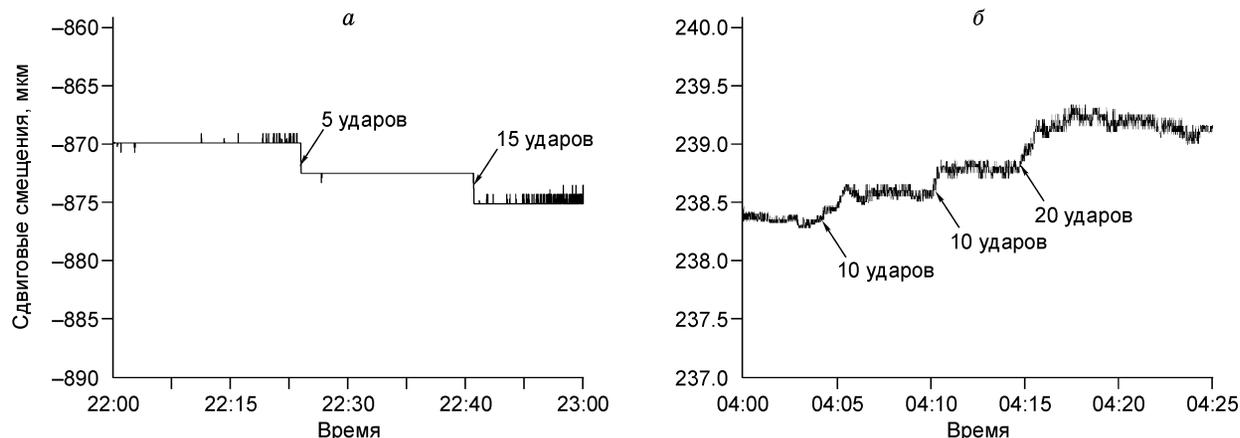
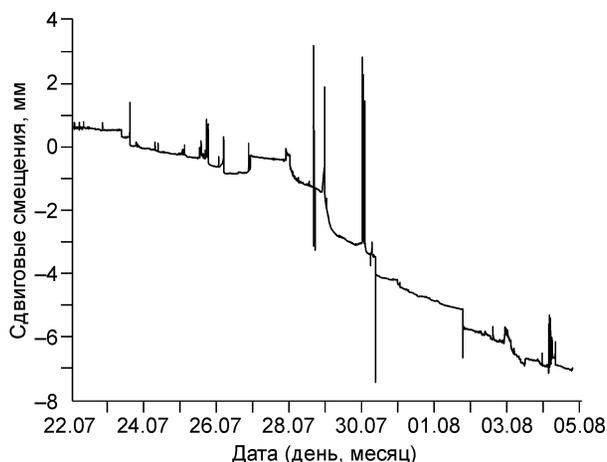


Рис. 7. Фрагменты записей сбрососдвиговых смещений по фрагменту Ангарского разлома во время проведения серий тестовых ударов копром:

а — 6 августа 2003 г., б — 9 августа 2006 г.

ванные в них скорости тектонического крипа, а также смещений, инициированных динамическими воздействиями, оказались на 1—2 порядка выше, чем в зоне Ангарского разлома. Наиболее высокие показатели были отмечены в Ольхонском фрагменте зоны Обручевского разлома, где скорость тектонического крипа достигала значений 13—35 мкм/ч, а амплитуды инициированного отклика на слабый тестовый взрыв (25—30 г порохового заряда) достигали 30—90 мкм. Измеренные значения параметров смещений во фрагментах трех зон разломов хорошо сочетаются с относительными уровнями их современной сейсмической активности. Наиболее низкий из них соответствует Ангарскому разлому, а наиболее высокий — Обручевскому, который способен генерировать мощные землетрясения с $M \geq 7.5$.

Выявленные особенности отклика фрагментов зон Ангарского, Приморского и Обручевского разломов на динамические воздействия совместно с результатами компьютерного моделирования дают основание для следующего вывода. Путем тестовых динамических техногенных воздействий возможно не только качественно, но и количественно оценивать уровень напряженно-деформированного состояния фрагментов зон активных разломов, а следовательно, получать важные сведения об их современном сейсмическом потенциале.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе на основе компьютерного моделирования и анализа результатов натурных экспериментов проведено изучение влияния локального напряженного состояния в зонах активных границ раздела в геологических средах на их деформационный отклик при динамических воздействиях. Результаты натурных экспериментов и компьютерного моделирования наглядно демонстрируют, что по величине изменения смещений, инициированных динамическими воздействиями, можно оценить относительную величину сдвиговых напряжений, действующих во фрагменте активной границы раздела. Другими словами, по изменению отклика межблочной границы на слабые динамические воздействия можно оценить близость ее состояния к критическому, при котором возможно возникновение высокоскоростной и большеамплитудной, а потому опасной подвижки. Важно отметить, что теоретически полученные зависимости отклика границ раздела структурных элементов блоковых сред от относительного уровня действующих сдвиговых напряжений хорошо коррелируют с экспериментальными данными. В конечном счете, это позволяет на достаточных основаниях предложить новый подход для оценки локального напряженного состояния фрагментов зон активных разломов в блоковой геологической среде.

Работа выполнена в рамках интеграционных проектов СО РАН № 26, 27, 87 и 6.18, проекта № 3 программы Президиума РАН № 16, а также при поддержке РФФИ (гранты 06-05-64792-а и 06-05-79061-к).

ПРИЛОЖЕНИЯ

I. Основные положения метода подвижных клеточных автоматов

Метод подвижных клеточных автоматов (английская аббревиатура МСА от movable cellular automaton) является развитием классического подхода клеточных автоматов, позволившим расширить области его применения и включить в круг рассматриваемых проблем задачи, связанные с механическим откликом конденсированных материалов и сред на внешние воздействия (включая процессы деформации и разрушения).

В рамках концепции клеточных автоматов моделируемая среда рассматривается как ансамбль локально взаимодействующих элементов конечного размера (клеточных автоматов). Каждый клеточный автомат характеризуется дискретным набором состояний, определяющих характер его реакции (отклика) на внешние воздействия [Лоскутов, Михайлов, 1990]. Состояние автомата количественно характеризуется контролирующим параметром состояния. Правила переключения между состояниями определяются только локальными значениями контрольных параметров в рассматриваемом и соседних автоматах.

Концепция метода МСА основана на введении нового типа состояний — состояний пространственного отношения пары клеточных автоматов. В качестве основного параметра нового типа состояний используется величина перекрытия пары: $h_{ij} = r_{ij} - r_0^i$. Здесь r_{ij} — расстояние между центрами масс автоматов, $r_0^i = (d_i + d_j)/2$, $d_{i(j)}$ — характерный размер автомата i (j). Пара взаимодействующих клеточных автоматов, характеризующаяся параметром h_{ij} , рассматривается как новый („виртуальный“) клеточный автомат. Следует особо отметить, что понятие перекрытия элементов заимствовано из формализма методов частиц.

Отклик конденсированной среды на масштабах, на которых она может рассматриваться как сплошная, характеризуется сопротивлением тангенциальным нагрузкам. Для учета этого фактора в рамках метода МСА вводится второй контролирующий параметр (l_{sh}^{ij}), характеризующий величину относительного тангенциального (сдвигового) смещения автоматов взаимодействующей пары. При этом для

однозначной характеристики пространственного отношения в паре используется обобщенный параметр состояния: $\delta_{ij} = \mathbf{h}_{ij} + \mathbf{l}_{sh}^{ij}$.

Эволюция клеточного автомата определяется его функцией отклика и уравнениями (или правилами) взаимодействия с ближайшим окружением [Лоскутов, Михайлов, 1990]. В рамках предположения, что моделируемая клеточными автоматами среда может описываться с позиций классической механики, и для нее справедлив второй закон Ньютона, функция отклика $f(\delta_{ij})$ „виртуального“ клеточного автомата по аналогии с методами частиц может быть выражена с привлечением второго закона Ньютона:

$$\frac{d^2\delta_{ij}}{dt^2} = \frac{df(\delta_{ij})}{dt} = \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j}\right) \mathbf{p}_{ij}. \quad (1)$$

Здесь t — время; m_i и m_j — массы подвижных клеточных автоматов i и j , образующих взаимодействующую пару; \mathbf{p}_{ij} — вектор парной силы взаимодействия, имеющий нормальную ($p_n^{ij} = p_n(h_{ij})$) и тангенциальную ($p_{sh}^{ij} = p_{sh}(l_{sh}^{ij})$) компоненты.

Совокупность пар подвижных клеточных автоматов („виртуальных элементов“) формирует пространственно распределенную активную среду. В работе использовано описание пространственного (механического) взаимодействия соседних „виртуальных клеточных автоматов“ на основе модели распространения возмущений, развитой Н. Винером и А. Розенблютом [1961]. При этом изменение обобщенного параметра состояния δ_{ij} определяется уравнением (1), в правой части которого вместо \mathbf{p}_{ij} фигурирует „многочастичная“ сила взаимодействия \mathbf{F}_{ij} , компоненты которой определяются следующими выражениями [Псахье и др., 2000]:

$$\begin{cases} F_n^{ij} = m_{ij} \left[\left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j}\right) p_n^{ij} + \sum_{k \neq j} C(ij, ik) \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_k}\right) p_n^{ik} + \sum_{l \neq i} C(ij, jl) \left(\frac{1}{m_j} + \frac{1}{m_l}\right) p_n^{jl} \right], \\ F_{sh}^{ij} = p_{sh}^{ij} \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $m_{ij} = m_i m_j / (m_i + m_j)$; $C(ij, ik)$ — коэффициенты переноса возмущения от „виртуального“ клеточного автомата, образованного парой элементов i и k , к соседнему „виртуальному“ автомату $i-j$.

Уравнения движения подвижных клеточных автоматов в лабораторной системе координат имеют следующий вид:

$$\frac{d^2\mathbf{R}_i}{dt^2} = \frac{d\mathbf{V}_i}{dt} = \frac{1}{m_i} \sum_j (\mathbf{F}_n^{ij} + \mathbf{F}_{sh}^{ij}), \quad (3)$$

где \mathbf{R}_i и \mathbf{V}_i — соответственно координаты и скорости центров масс подвижных клеточных автоматов. Суммирование в правой части (3) проводится только по ближайшему окружению подвижного элемента i .

II. Основные положения модели для описания изотропной упругопластической среды

В работе моделировался отклик изотропной гетерогенной среды. Для ее описания использовалась деформационная теория пластичности (модель малых упругопластических деформаций) в приближении плосконапряженного состояния, адаптированная к формализму подвижных клеточных автоматов. Адаптация модели была реализована на основе следующих приближений. При рассмотрении пары автоматов:

1. Диагональная ($\sigma_{\alpha\alpha}^{ij}$) и недиагональная ($\sigma_{\alpha\beta}^{ij}$) компоненты тензора напряжений ассоциируются с удельными нормальной и тангенциальной силами взаимодействия:

$$\begin{cases} F_n^{ij} = \sigma_{\alpha\alpha}^{ij} S_{ij} \\ F_{sh}^{ij} = \sigma_{\alpha\beta}^{ij} S_{ij} \end{cases}$$

Здесь S_{ij} — площадь контакта подвижных клеточных автоматов i и j .

2. Диагональная ($\varepsilon_{\alpha\alpha}^{ij}$) и недиагональная ($\varepsilon_{\alpha\beta}^{ij}$) компоненты тензора деформаций ассоциируются с нормальным и тангенциальным относительными перемещениями в паре:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\alpha\alpha}^{ij} = \frac{h_{ij}}{r_0^{ij}} \\ \varepsilon_{\alpha\beta}^{ij} = \frac{1}{2} \int_0^{t_{cur}} \frac{V_{sh}^{ij}(t)}{r_{ij}^{ij}(t)} dt, \end{cases}$$

где V_{sh}^{ij} — скорость сдвига в паре $i-j$, t — время, t_{cur} — текущий момент времени.

Вывод конкретных видов зависимостей $\mathbf{p}_{ij}(\delta_{ij})$ и $C(ij, ik)$, фигурирующих в правой части (2), для плотной упаковки подвижных клеточных автоматов на плоскости приведен в работе [Псахье и др., 2001]. В соответствии с положениями деформационной теории пластичности механический отклик подвижного клеточного автомата, моделирующего некоторый фрагмент материала или среды, задается с помощью функции $\sigma_{int} = \Theta(\varepsilon_{int})$, где σ_{int} и ε_{int} — интенсивности напряжений и деформаций. В рамках используемой модели указанное выражение, также называемое функцией отклика подвижного автомата, определяет текущую величину упругопластических констант для зависимостей $\mathbf{p}_{ij}(\delta_{ij})$.

Неконсервативные процессы, связанные с диссипацией механической (кинетической) энергии подвижных элементов, учитываются введением парных сил демпфирования:

$$\begin{cases} \mathbf{F}_{dn}^{ij} = -\mathbf{F}_{dn}^{ji} = -\eta_n \mathbf{V}_n^{ij} \\ \mathbf{F}_{dsh}^{ij} = -\mathbf{F}_{dsh}^{ji} = -\eta_{sh} \mathbf{V}_{sh}^{ij} \end{cases}$$

Здесь \mathbf{F}_{dn}^{ij} и \mathbf{F}_{dsh}^{ij} — нормальная и тангенциальная демпфирующие силы, действующие на центр масс частицы i ; η_n и η_{sh} — коэффициенты нормальной и тангенциальной вязкости.

Механическое отношение пары взаимодействующих подвижных автоматов может рассматриваться в рамках модели бистабильных клеточных автоматов. При этом два устойчивых стационарных состояния, которыми характеризуется бистабильный клеточный автомат [Лоскутов, Михайлов, 1990], ассоциируются соответственно с наличием и отсутствием химической связи между подвижными автоматами. Соответствующие названия состояний пространственного отношения пары — связанное и несвязанное. Как правило, при моделировании сложных систем методом МСА в качестве критериев переключения из связанного состояния пары в несвязанное (что физически интерпретируется как разрушение) рассматриваются некоторые функции параметров состояния: $\Phi(\delta_{ij})$. В настоящей работе в качестве „критерия разрушения“ использовалась величина интенсивности напряжений в паре.

ЛИТЕРАТУРА

Астафуров С.В., Шилько Е.В., Димаки А.В., Ружич В.В., Лопатин В.В., Попов В.Л., Псахье С.Г. Изучение особенностей отклика границ раздела в разломно-блоковых средах на изменение их состояния и динамические воздействия. Результаты мониторинга и натурных экспериментов // Изв. ТПУ, 2005, т. 308, № 5, с. 25—32.

Винер Н., Розенблют А. Проведение импульсов в сердечной мышце. Математическая формулировка проблемы проведения импульсов в сети связанных возбудимых элементов, в частности, в сердечной мышце // Кибернетический сборник. Вып. 3. М., Изд-во иностр. лит., 1961, с. 3—56.

Гольдин С.В. Макро- и мезоструктуры очаговой области землетрясения // Физическая мезомеханика, 2005, т. 8, № 1, с. 5—14.

Кочарян Г.Г., Родионов В.Н. О природе тектонических сил // Докл. АН СССР, 1988, т. 302, № 2, с. 304—305.

Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. М., ИКЦ „Академкнига“, 2003, 423 с.

Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. Введение в синергетику. М., Наука, 1990, 272 с.

Назаров Л.А., Назарова Л.А., Фомин В.М., Ряшенцев Н.П., Ряшенцев А.Н., Соловьев А.В. Изменение режима фильтрации в пласте при перераспределении напряжений во вмещающем массиве горных пород // ПМТФ, 2004, т. 45, № 5, с. 94—101.

Назаров Л.А., Назарова Л.А., Фомин В.М., Ряшенцев Н.П., Ряшенцев А.Н., Соловьев А.В. Экспериментальное исследование изменения режима фильтрации в продуктивном пласте при нестационарном воздействии на вмещающий блочный массив горных пород // ПМТФ, 2006, т. 47, № 1, с. 131—138.

Николаев А.В., Верещагина Г.М. Об инициировании землетрясений подземными ядерными взрывами // Докл. АН СССР, 1991, т. 319, № 2, с. 333—336.

Псахье С.Г., Дмитриев А.И., Шилько Е.В., Смолин А.Ю., Коростелев С.Ю. Метод подвижных клеточных автоматов как новое направление дискретной вычислительной механики. I. Теоретическое описание // Физическая мезомеханика, 2000, т. 3, № 2, с. 5—13.

Псахье С.Г., Чертов М.А., Шилько Е.В. Интерпретация параметров метода подвижных клеточных автоматов на основе перехода к континуальному описанию // Физическая мезомеханика, 2001, т. 4, № 3, с. 93—96.

Псахье С.Г., Гриняев Ю.В., Дмитриев А.И., Чертова Н.В., Гриняев С.Ю. О законе взаимодействия движущихся масс в неидеальных средах // Физическая мезомеханика, 2002, т. 5, № 5, с. 93—98.

Псахье С.Г., Ружич В.В., Шилько Е.В., Астафуров С.В., Смекалин О.П. Изучение влияния водонасыщения и вибраций на режим смещений в зонах разломов // *Физическая мезомеханика*, 2004, т. 7, № 1, с. 23—30.

Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Основы геомеханики. М., Недра, 1986, 301 с.

Ружич В.В., Трусков В.А., Черных Е.Н., Смекалин О.П. Современные движения в зонах Прибайкалья и механизмы их инициирования // *Геология и геофизика*, 1999, т. 40 (3), с. 360—372.

Ружич В.В., Псахье С.Г., Борняков С.А., Смекалин О.П., Шилько Е.В., Черных Е.Н., Чечельницкий В.В., Астафуров С.В. Изучение влияния виброимпульсных воздействий на режим смещений в зонах сейсмоактивных разломов // *Физическая мезомеханика*, 2003, т. 6, № 1, с. 41—53.

Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М., Наука, 1987, 101 с.

Садовский М.А., Кочарян Г.Г., Родионов В.Н. О механике блочного горного массива // *Докл. АН СССР*, 1988, т. 302, № 2, с. 306—308.

Шилько Е.В. Теоретическое изучение поведения интерфейсных сред на различных масштабных уровнях в сложных условиях нагружения // *Физическая мезомеханика*, 2005, т. 8, № 3, с. 93—106.

Dmitriev A.I., Zolnikov K.P., Psakhie S.G., Goldin S.V., Panin V.E. Low-density layer formation and „lifting force“ effect at micro- and meso-scale levels // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2005, v. 43, № 3, p. 324—334.

Emter D. Tidal triggering of earthquakes and volcanic events // *Tidal phenomena* / Eds. H. Wilhelm., W. Zurn, H.-G. Wenzel. Berlin, Springer-Verlag, 1997, p. 293—309.

Psakhie S.G., Horie Y., Ostermeyer G.P., Korostelev S.Yu., Smolin A.Yu., Shilko E.V., Dmitriev A.I., Blatnik S., Spegel M., Zavsek S. Movable cellular automata method for simulating materials with mesostructure // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2001, v. 37, № 1—3, p. 311—334.

*Рекомендована к печати 12 апреля 2007 г.
А.Д. Дучковым*

*Поступила в редакцию
21 ноября 2006 г.*