

05.1

О влиянии состояния границ раздела на характер локальных смещений в разломно-блоковых и интерфейсных средах

© С.Г. Псахье, В.В. Ружич, Е.В. Шилько, В.Л. Попов,
А.В. Димаки, С.В. Астафуров, В.В. Лопатин

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

E-mail: asta@usgroups.com

Институт земной коры СО РАН, Иркутск

E-mail: ruzhich@crust.irk.ru

Берлинский технический университет, Берлин, Германия

E-mail: v.popov@tu-berlin.de

Научно-исследовательский институт высоких напряжений при ТПУ, Томск

E-mail: lopatin@hvd.tpu.ru

Поступило в Редакцию 23 марта 2005 г.

Проведено изучение возможности направленного воздействия на процесс релаксации локальных напряжений в интерфейсных средах, находящихся в сложном напряженном состоянии, путем изменения состояния границ раздела структурных элементов. Исследования проводились на примере ледового покрова озера Байкал, который представляет собой иерархически организованную разломно-блоковую среду и относится к классу интерфейсных сред. Показано, что изменением состояния границ раздела структурных элементов можно направленным образом менять режим деформации интерфейсной среды в целом. Теоретически подтверждена общность полученного эффекта.

В настоящее время все большее внимание уделяется классу так называемых „интерфейсных материалов“. Данный термин объединяет материалы, механический отклик которых в значительной степени определяется процессами локализации деформации на границах раздела структурных элементов [1]. Это, прежде всего, относится к наноструктурным материалам, в которых размер зерна в значительной степени ограничивает традиционные дислокационные механизмы деформации [2]. Вследствие этого на первый план выходят зерно-

граничные процессы, обеспечивающие деформацию на более высоком мезоструктурном уровне, а именно путем относительных смещений структурных элементов (блоков) [3].

К классу интерфейсных сред принадлежат и разломно-блоковые среды, к которым относятся, в частности, природные системы, такие как земная кора. Характерной особенностью земной коры является иерархическая многоуровневая организация блочной структуры [4], которая обеспечивает ее относительно высокую деформационную способность в целом. В соответствии с положениями физической мезомеханики высвобождение накопленной упругой энергии среды связано, прежде всего, с процессами локализации деформаций в зонах так называемых активных границ контакта блоков, которые определяются напряженным состоянием разломно-блоковой среды и особенностями ее структуры [5]. Отметим, что режим диссипации энергии в таких системах носит пространственно-согласованный характер.

Характер относительного движения структурных элементов в разломно-блоковых средах в значительной степени определяется физико-механическими характеристиками (состоянием) активных интерфейсных зон. Поэтому следует ожидать, что, изменяя состояние активной границы раздела блоков, можно управлять механизмами релаксации локальных напряжений. В случае „природных“ интерфейсных сред изменение состояния зон разломов может быть достигнуто, например, их обводнением. Это следует из результатов моделирования и натурных экспериментов [6,7], а также косвенно подтверждается наблюдаемой в ряде регионов корреляцией сейсмической активности и уровня грунтовых вод, которые могут проникать в зоны разломов [8,9].

Следует отметить, что изучение реальных геологических сред встречает существенные трудности, связанные с масштабами объектов (например, характерная длина разломов составляет десятки–тысячи километров) и значительными временами геологических процессов (для получения достоверной информации об особенностях отклика разломов на воздействия необходимы многолетние наблюдения).

Поэтому в настоящей работе задача исследования возможности воздействия на режим релаксации напряжений в интерфейсных средах путем изменения состояния активных границ раздела решалась на основе экспериментов на разломно-блоковой системе ледового покрова озера Байкал.

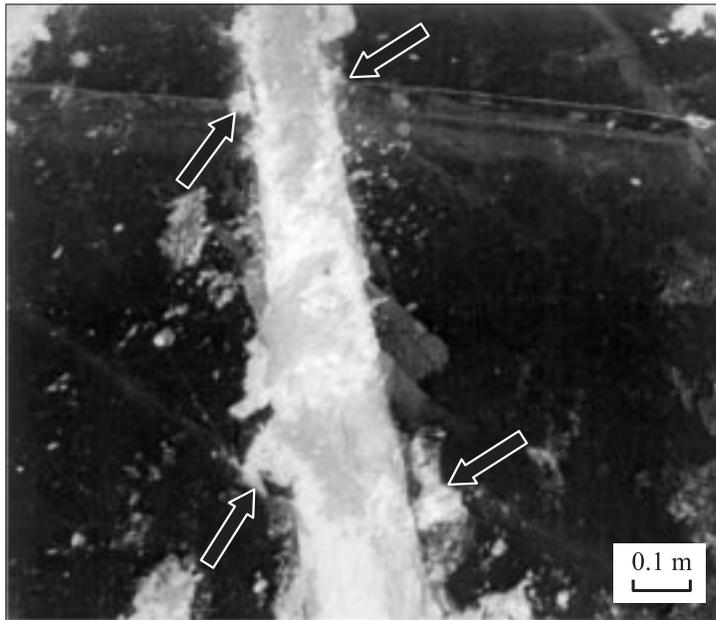


Рис. 1. Фотография активной границы раздела блоков ледового покрова озера Байкал. Стрелками показаны концы разорванных сдвигом более старых трещин.

Выбор ледового массива в качестве объекта изучения закономерностей поведения разломно-блоковых сред наряду с хорошим подобием реологического поведения определяется и рядом других преимуществ. Среди них можно выделить возможность выбора характерных размеров блоков в широком интервале масштабов (от нескольких метров до километров), относительно небольшие характерные времена процессов деформации и разрушения (как правило, не превышающие нескольких суток), а также возможность воздействия на фрагменты ледового покрова по всей глубине.

На рис. 1 показана одна из активных границ раздела ледового поля озера Байкал, на которых проводились эксперименты. Границы раздела в ледовом массиве обычно называют трещинами. Полная длина приведенной на фотографии трещины составляет несколько километров. Выбор данной границы раздела как объекта исследования был обу-

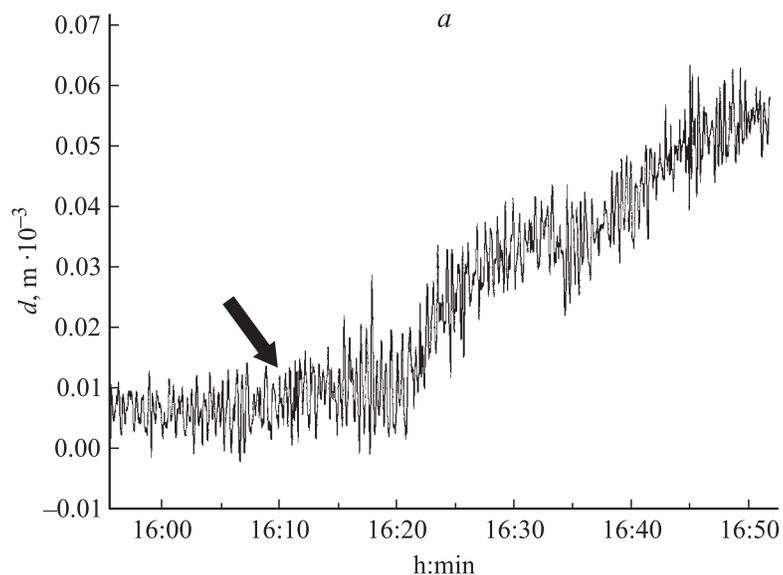


Рис. 2. Нормальные (а) и сдвиговые (b) смещения по ледовой трещине в интервале $30 \div 90$ min после начала „обводнения“. Стрелками указано начало активизации смещений.

словлен, в частности, тем, что она относится к активным трещинам, по которым происходят основные сдвиговые смещения в ледовой разломно-блоковой среде. Величину сдвига (~ 0.1 m) можно оценить по относительному смещению концов разорванных более старых трещин, которые хорошо видны на рис. 1. Одним из показателей активности ледовых трещин является уровень воды в них. В исследуемой трещине уровень воды составлял менее 0.1 m от поверхности, что характеризует границу раздела как достаточно активную и привлекательную для проведения экспериментальных исследований. Для сравнения отметим, что толщина льда в прилегающих блоках составляла 0.75–0.78 m.

Изменение состояния трещины достигалось бурением в ней серии сквозных отверстий диаметром 25 mm на расстоянии 0.1–0.12 m друг от друга. Отверстия бурились на достаточно протяженном участке длины трещины (более 100 m). Это привело к подъему воды к поверхности трещины, т.е. к ее искусственному обводнению.

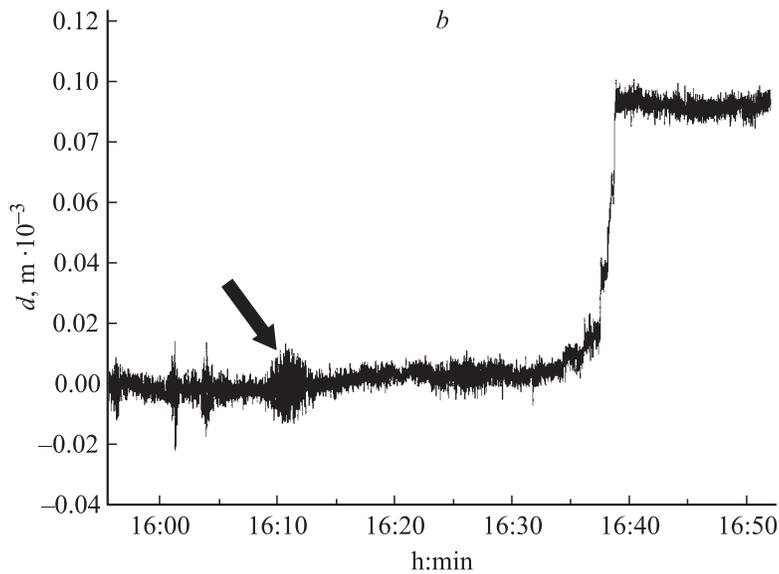


Рис. 2 (продолжение).

На рис. 2 приведены результаты мониторинга относительных смещений краев трещины в интервале $30 \div 90 \text{ min}$ после начала „обводнения“ (15:25). Можно видеть, что начиная с 16:10 (приблизительно через 45 min после начала „обводнения“) на диаграмме нормальных смещений (рис. 2, *a*) начинается некоторая тенденция к их росту. Основной рост смещений начинается приблизительно в 16:21 (т.е. через час после начала „обводнения“). Полная величина необратимых нормальных смещений краев трещины составила около $50 \mu\text{m}$ в течение получаса.

Активизация сдвиговых смещений также началась с 16:10 (рис. 2, *b*) и на начальном этапе проявилась как кратковременная ($\sim 3 \text{ min}$) „вспышка“ обратимых знакопеременных смещений с максимальной амплитудой, в несколько раз превышающей фоновую. Последующее наблюдение смещений показало, что изменение состояния границы раздела блоков повлекло за собой и изменение характера диссипации упругой энергии среды. В частности, как видно на рис. 2, *b*, это проявилось в виде „скачкообразного“ смещения краев границы раздела,

которое произошло менее чем за полторы минуты (с 16:37:25 по 16:38:40). После этого сдвиговые смещения практически стабилизировались. Как видно из рис. 2, *b*, величина необратимого „скачкообразного“ смещения, достигнутого менее чем за 5 min, превысила 90 μm , что приблизительно соответствует зарегистрированному естественному суточному ходу сдвиговых смещений в таких трещинах.

Полученный в работе результат демонстрирует 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 [10]. 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 следующий вид:

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

где η — вязкость среды, x — координата тела, $\dot{x} = dx/dt$, $\ddot{x} = d^2x/dt^2$, t — время. В приведенных переменных $\tilde{x} = 2\pi x/a$ и $\tilde{t} = t\sqrt{2\pi N/m a}$ уравнение (1) может быть переписано в следующем виде:

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

где $\tilde{x}' = d\tilde{x}/d\tilde{t}$, $\tilde{x}'' = d^2\tilde{x}/d\tilde{t}^2$, $k_1 = \eta/\sqrt{2\pi N m/a}$, $k_2 = F/N$.

Можно видеть, что уравнение (2) определяется всего двумя коэффициентами: k_1 и k_2 . На рис. 3 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 $k_1 < 1$ отвечает движению в режиме „stick-slip“. При этом амплитуда „скачков“ уменьшается с ростом k_1 . При $k_1 \geq 1$ тело движется с постоянной скоростью.

В приложении к проблеме инициации смещений по границам раздела в разломно-блоковых средах рис. 3 может быть интерпретирован следующим образом. Относительные смещения блоков иницируются при превышении внутренними напряжениями силы трения покоя N в трещине. Иницированное движение продолжается до тех пор, пока сопротивление не превысит действующие внутренние напряжения.

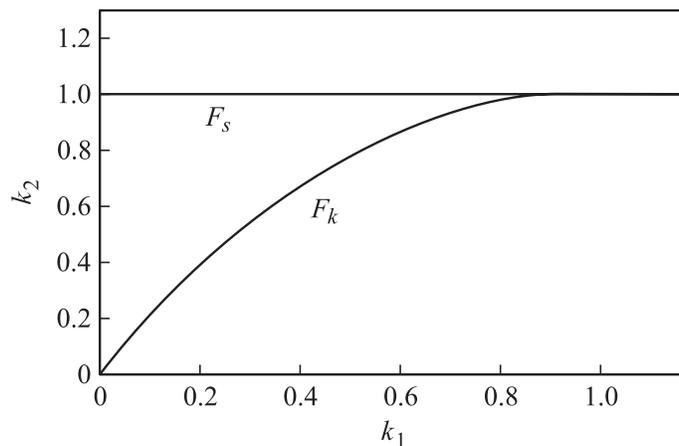


Рис. 3. „Фазовая диаграмма“ одномерной модели Томлинсона.

Далее, когда внутренние напряжения снова превысят текущее значение силы трения покоя, возможна повторная инициация движения. Величина k_1 возрастает с уменьшением амплитуды силы сопротивления N или возрастанием вязкости среды η (т.е. при изменении состояния интерфейсной зоны), 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. Очевидно, что в частном случае для ледовой трещины увеличение k_1 может быть достигнуто обводнением.

Таким образом, на примере границ раздела блоков ледового покрова показано, что изменением состояния зоны границ раздела в разломно-блоковых (интерфейсных) средах, находящихся в сложном напряженном состоянии, можно инициировать или ускорять относительные смещения блоков в направлении, определяемом локальным полем напряжений. Это может рассматриваться как эффективный способ релаксации „избыточных“ локальных напряжений в разломно-блоковых средах различной природы. Полученные результаты и их анализ на основе обобщенной модели Томлинсона позволяют с новых позиций объяснить закономерности, приведенные в работах [6–9].

Авторы выражают благодарность председателю президиума СО РАН академику Н.Л. Добрецову за предложенную идею использовать ледовый массив озера Байкал в качестве модельной системы при изучении закономерностей поведения разломно-блоковых сред, инициирование работ, а также полезные обсуждения и рекомендации.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 04-05-64707, итерационного проекта СО РАН № 101, гранта президента РФ № НШ-2324.2003.1 и гранта Министерства образования и науки РФ и CRDF в рамках программы BRNE (проект № 016-02).

Список литературы

- [1] Псахье С.Г., Шилько Е.В., Астафуров С.В. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 6. С. 45–51.
- [2] Гусев А.И., Ремпель А.А. Нанокристаллические материалы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 224 с.
- [3] Колобов Ю.Р., Валиев Р.З., Грабовецкая Г.П. и др. Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных материалов. Новосибирск: Наука, 2001. 232 с.
- [4] Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 100 с.
- [5] Кочарян Г.Г., Стивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. М.: ИКЦ „Академкнига“, 2003. 423 с.
- [6] Ружич В.В., Псахье С.Г., Борняков С.А. и др. // Физическая мезомеханика. 2003. Т. 6. № 1. С. 41–53.
- [7] Псахье С.Г., Ружич В.В., Шилько Е.В. и др. // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. № 1. С. 23–30.
- [8] Costain J.K., Bollinger G.A., Speer J.A. // Geology. 1987. V. 15. P. 618–621.
- [9] Saar M.O., Manga M. // Earth and Planetary Science Letters. 2003. V. 214. P. 605–618.
- [10] Tomlinson G.A. // Philos. Mag. 1929. V. 7. P. 905–939.