

УДК 51-72 : 539.3 : 550.34

О влиянии динамических возмущений напряженного состояния на процесс накопления необратимых деформаций на границах раздела в блочных средах

А.С. Григорьев¹, Е.В. Шилько^{1,2}, С.В. Астафуров^{1,2}, А.В. Димаки^{1,2,3},
Е.М. Высоцкий⁴, С.Г. Псахье^{1,2,3}

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 634055, Россия

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, 634050, Россия

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050, Россия

⁴ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия

Изучено влияние напряженного состояния границ раздела структурных элементов блочной среды на ее деформационный отклик при динамических воздействиях. Показано, что приведенная величина сдвигового напряжения и среднее напряжение являются основными факторами, определяющими деформационный отклик границы раздела. Для аналитического описания зависимости величины инициированного необратимого смещения на границе от приведенного сдвигового напряжения предложено использовать логистическую функцию, центральная точка которой соответствует переходу от квазиупругой к квазипластической стадии сдвигового деформирования межблочной границы. Показана значимость полученных эмпирических зависимостей для понимания закономерностей накопления необратимых деформаций во фрагментах разломных зон и, в частности, для развития предложенного ранее авторами подхода к оценке характерного уровня действующих сдвиговых напряжений на отдельных участках тектонических разломов.

Ключевые слова: блочная среда, граница раздела, интерфейс, динамическое воздействие, численное моделирование, метод подвижных клеточных автоматов, необратимое смещение, сдвиговое напряжение, логистическая функция, разломная зона, диагностика

Effect of dynamic stress state perturbation on irreversible strain accumulation at interfaces in block media

A.S. Grigoriev¹, E.V. Shilko^{1,2}, S.V. Astafurov^{1,2}, A.V. Dimaki^{1,2,3}, E.M. Vysotsky⁴, and S.G. Psakhie^{1,2,3}

¹ Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, 634055, Russia

² National Research Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia

³ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russia

⁴ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia

The paper studies how the stress state of interfaces between structural elements in a block medium affects its deformation response to dynamic impact. It is shown that the reduced shear stress and average stress are the major factors that determine the deformation response of an interface. We propose to describe the dependence of the value of initiated irreversible displacement at the interface on the reduced shear stress using a logistic function. The central point of this function corresponds to the transition from the quasi-elastic to quasi-plastic stage of the interface shear deformation. The obtained empirical dependences are important for understanding the mechanism of irreversible strain accumulation in fault zone fragments and, particularly, for the development of an earlier proposed approach to estimate the characteristic level of active shear stresses in individual tectonic fault regions.

Keywords: block medium, interface, dynamic impact, numerical simulation, movable cellular automata method, irreversible displacement, shear stress, logistic function, fault zone, diagnostics

1. Введение

Важной и во многих отношениях определяющей особенностью строения геологических сред является

их иерархическая блочная организация [1–6]. Блочная структура геосреды проявляется в широком диапазоне размеров: от масштаба отдельных зерен минералов и

их конгломератов, разделенных локальными микроповреждениями, до крупных фрагментов горного массива и далее земной коры. Границами раздела последних (называемых также структурно-тектоническими блоками) являются разломные зоны. Разломная зона является сложным объектом, развитие которого проходит через несколько основных стадий от зарождения системы микро/мезо/макротрещин и их объединения в магистральный разрыв до формирования широкой зоны с ослабленными механическими характеристиками и градиентной внутренней структурой [2, 7–13]. «Зрелые» разломные зоны характеризуются сложной (градиентной) внутренней структурой и представляют собой относительно широкие (сотни метров) зоны повышенной поврежденности (трещиноватости), плотность трещин в которых убывает экспоненциально по мере удаления от центра разлома. Центральная часть разломной зоны (магистральная часть) представляет собой узкую полосу горной породы шириной от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров, раздробленной до мелкодисперсного состояния, спрессованной и зачастую метаморфизированной. Интегральные механические (в том числе прочностные) характеристики центральной части разлома значительно ниже, чем в периферийных областях и тем более в объеме блоков [2, 7, 11, 14]. При этом степень деградации центральной части тем выше, чем выше деформационная активность разлома. Описанные особенности структуры и механических свойств межблоковых границ в геосреде способствуют локализации деформаций, проявляющейся преимущественно в форме относительного сдвигового перемещения блоков.

Интерфейсная структура массивов горных пород приводит к появлению большого количества дополнительных степеней свободы и, как следствие, к проявлению такой важной особенности отклика горных массивов, как подвижность и реакция даже на весьма слабые воздействия [15, 16]. Действительно, необратимые смещения по «ослабленным» границам раздела являются способом существования блочных сред при больших необратимых деформациях и одним из важнейших механизмов релаксации внутренних напряжений [15–20]. Сказанное позволяет рассматривать разломы как типичные трибологические системы, эволюция которых характеризуется механическими, физическими и химическими аспектами. В рамках такого рассмотрения разломная зона представляет собой «третье тело», во многих отношениях подобное так называемому «трибомутированному слою» в классических трибологических системах [21].

Смещения в разломных зонах (в первую очередь в их магистральной части) является предметом активных натурных, лабораторных и теоретических исследований в последние десятилетия. В результате этих исследо-

ваний выявлены основные режимы деформационных процессов: устойчивое (стабильное) скольжение, условно-стабильное скольжение и неустойчивое, именуемое также режимом stick-slip [14, 22–25]. Последний случай является предметом наиболее пристального внимания геомехаников и геофизиков, поскольку связан с эпизодическим инициированием кратковременных высокоамплитудных актов динамических смещений, которые регистрируются как землетрясения. Реализующийся для конкретного разлома или его участка режим деформирования определяется целым рядом внутренних и внешних факторов. Среди них основными считаются интегральные реологические свойства «тела разлома» (связанные в том числе с размерами фрагментов во внутриразломной области и степенью их поврежденности), соотношение жесткости разлома и разделяемых блоков и градиент региональных скоростей смещения (определяющий скорость деформаций в разломной зоне) [26].

Несмотря на то что динамика смещений в разломных зонах в целом зависит от региональной деформационной активности, скорости внутриразломных деформаций, как правило, на 2–3 порядка величины выше, чем во внутриблоковых областях [20, 27–29]. При этом ключевой особенностью деформационных процессов в разломных зонах является наличие «кратковременных» (длительностью не более нескольких месяцев) и высокоамплитудных (достигающих десятков миллиметров) «импульсов» смещений [28, 29]. Такие кратковременные импульсы могут обеспечивать основную часть современных интегральных смещений в разломных зонах. Важным результатом анализа современных смещений в разломных зонах является констатация того факта, что регистрируемая импульсная деформационная активность границ раздела в геосреде не может быть объяснена вариациями регионального поля напряжений, приливными явлениями, колебаниями атмосферного давления и другими глобальными причинами [28, 29]. В связи со сказанным актуальным является вопрос о механизмах импульсного характера деформирования разломных зон. В работах [28, 29] с использованием модифицированной реологической модели Максвелла показано, что резкое ускорение деформационных процессов в вязкоупругой среде может являться результатом параметрического возбуждения вследствие кратковременной флуктуации внутренних параметров. Концептуально сходные выводы получены в работах [16, 26, 30], где возникновение значительных по величине остаточных перемещений на границе раздела объясняется кратковременным снижением ее эффективной вязкости или жесткости.

Описанные особенности механических свойств интерфейсных зон в хрупких блочных средах обуславливают высокую восприимчивость границ раздела даже к низкоэнергетическим механическим воздействиям (в

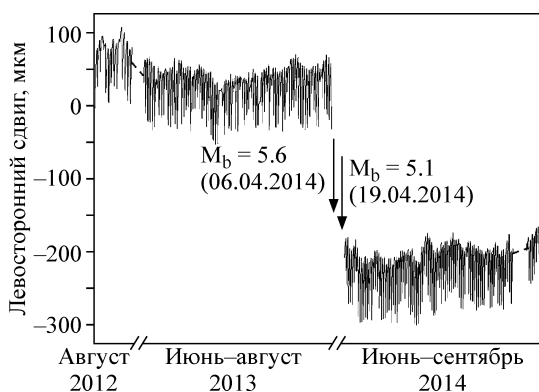


Рис. 1. Кривая сдвиговых смещений по одной из линий скольжения на участке разломной зоны (южный склон Курайского хребта вблизи северо-восточной окраины Чаган-Узунского горста). Пунктирные линии отмечают временные интервалы, в течение которых мониторинг смещений не осуществлялся по техническим причинам. Короткопериодные «колебания» смещений на графиках связаны с обратимыми деформациями поверхностного слоя горного массива вследствие суточных и сезонных изменений температуры воздуха. Стрелками отмечены моменты инициации двух крупных региональных землетрясений (по данным Алтае-Саянского филиала Геофизической службы СО РАН)

том числе динамическим). Анализ результатов натуральных наблюдений и лабораторных экспериментов позволил ряду авторов высказать предположение, что одной из причин кратковременных вариаций механических свойств границ раздела являются возмущения локального напряженного состояния проходящими низкоамплитудными упругими (акустическими, сейсмическими) волнами [31–37]. Более того, в некоторых работах данный тип возбудителей смещений в разломных зонах рассматривается в качестве едва ли не основного.

В качестве примера, демонстрирующего роль удаленных динамических событий в накоплении смещений в разломных зонах, можно привести результаты мониторинга смещений, осуществляемого авторами на участках активных разломов вблизи северо-восточной и юго-восточной окраин Чаган-Узунского горста (Республика Алтай). Регистрировались относительные перемещения блоков по нескольким активным линиям скольжения (трещинам, заполненным мелко раздробленной и спрессованной породой) в разломных зонах. Анализ результатов мониторинга показал крайне низкие интегральные значения скоростей смещений по линиям скольжения, составляющие не более 20–40 мкм/год. На этом фоне хорошо выделяются несколько краткосрочных активизаций деформационных процессов, в ходе которых характерные значения скорости смещений возрастали на несколько порядков величины. Пример такой «импульсной активизации» приведен на рис. 1. Характерная величина сдвиговых и сбросовых смещений по изучаемым

линиям скольжения в этот период превысила среднегодовые «фоновые» значения на порядок величины. Анализ региональной сейсмической активности показал, что наиболее вероятной причиной такой краткосрочной активизации могли являться два следующих друг за другом региональных землетрясения с эпицентрами на расстоянии 80–100 км от измерительных полигонов. Отметим, что процесс накопления малых по величине «фоновых» смещений (20–40 мкм/год) также является крайне неравномерным и реализуется посредством одной или нескольких кратковременных активизаций малой амплитуды. Вероятной причиной этих активизаций также могут быть региональные землетрясения меньшей магнитуды.

При обсуждении данного примера важно отметить пороговый характер деформационной реакции изучаемых линий скольжения в разломных зонах на динамические воздействия. В период мониторинга, приведенный на рис. 1, помимо указанных мощных землетрясений, имели место и другие региональные динамические события существенно меньшей магнитуды. Однако эти события не вызвали появления необратимых смещений достоверно регистрируемой амплитуды или заметного увеличения скоростей смещений. Данный вывод согласуется с результатами натуральных, лабораторных и теоретических исследований различных авторов, свидетельствующих о возможности инициирования «импульсной активизации» смещений по границе раздела динамическим воздействием, энергия которого превышает некоторое пороговое значение [15, 16, 30, 33, 37–39].

В связи со сказанным актуальной задачей является изучение влияния динамических возмущений локального напряженного состояния на динамику накопления смещений на границах раздела структурных блоков геосреды. Актуальность таких исследований подтверждается, в частности, тесной связью данного вопроса с вопросами изучения сейсмического цикла разломов. В рамках современных моделей трения одним из ключевых параметров, характеризующих режим stick-slip, является характерная величина относительного тангенциального перемещения блоков, за которое происходит полное обновление системы «пятен контакта» [14, 22]. Иницирование необратимых смещений по разлому может способствовать существенному ускорению процесса обновления контактных зон и тем самым оказывать влияние на сейсмический цикл. Кроме того, ранее рядом авторов был выявлен качественный эффект резкого изменения деформационного отклика разломной зоны при изменении величины сдвиговых напряжений [15, 16, 22, 34, 40, 41]. Это позволило высказать идею о возможности оценки уровня сдвиговых напряжений в активных разломных зонах путем регулярного измерения деформационного отклика на низкоамплитудные

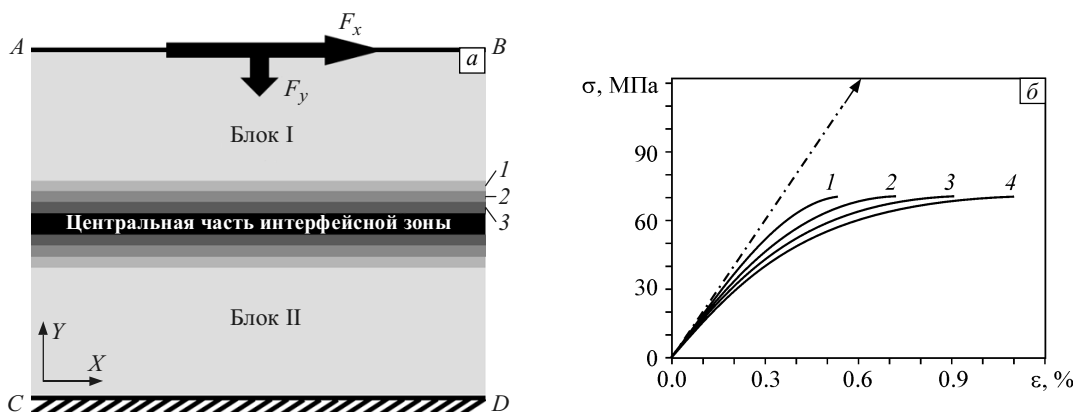


Рис. 2. Структура и схема нагружения модельной границы раздела (а) и диаграммы одноосного сжатия для материалов блоков и различных областей интерфейсной зоны (б). На рисунке (а) цифрами 1–3 обозначены переходные слои интерфейсной зоны в порядке приближения к центральной части. На рисунке (б) кривые 1–3 соответствуют материалам переходных слоев (номера кривых соответствуют номерам слоев на рисунке (а)), кривая 4 отвечает материалу центральной части, пунктирной линией отмечена диаграмма нагружения материала блоков

динамические воздействия [16, 34, 42, 43]. Для формулировки подхода и методов проведения такой оценки необходимо установление количественных взаимосвязей величины инициированных смещений на межблочной границе с ее напряженным состоянием и граничными условиями. Ввиду затруднительности реализации таких исследований в натурных условиях перспективным представляется их проведение на физических лабораторных моделях или путем компьютерного моделирования.

Целью настоящей работы являлось изучение связи параметров деформационного отклика границы раздела структурных элементов блочной среды на динамические воздействия с напряженным состоянием границы. Исследования проводились путем численного моделирования методом подвижных клеточных автоматов [44, 45], который является представителем класса методов дискретных элементов [48–50] и в настоящее время широко применяется для изучения особенностей деформирования и разрушения сложных гетерогенных материалов и сред различной природы, включая геологические [21, 42, 43, 51, 52].

2. Постановка задачи численного моделирования

Исследование проводилось с использованием двумерной структурной модели границы раздела элементов блочной среды (рис. 2, а), имитирующей горизонтальный срез разломной зоны на некоторой глубине H от дневной поверхности. Моделируемый участок разломной зоны включает в себя фрагменты двух структурных блоков и «ослабленную» интерфейсную зону, находящуюся между ними. Интерфейсная область имеет градиентную внутреннюю структуру, в которой можно вы-

делить центральную часть (наиболее «ослабленная» часть интерфейса) и переходные слои, прочность, жесткость и плотность которых возрастают с удалением от центральной зоны. Отметим, что такое представление границы раздела качественно отражает градиентную структуру реальных разломных зон (в том числе их магистральной области) и отвечает так называемому континуально-евклидову приближению к описанию зон тектонических разломов и трещин [7].

Моделировался фрагмент границы раздела между структурными блоками геосреды, имеющий следующие размеры: $L = 0.3$ м — длина моделируемой области (в направлении оси X); $W = 0.25$ м — ширина моделируемой области (в направлении оси Y). С целью имитации бесконечно протяженной границы раздела между блоками геосреды по оси X применялись периодические граничные условия. Ширина межблочной границы составляла $h = 0.024$ м, что по порядку величины соответствует ширине слоя заполнителя в ядрах небольших разломных зон [14]. Каждый структурный элемент системы (блоки и интерфейсная зона) моделировался ансамблем подвижных клеточных автоматов. Диаметр автомата в проводимых расчетах полагался равным $d = 0.002$ м.

Важной характеристикой пространственно распределенных моделей, определяющей особенности численного решения, является пространственная дискретизация моделируемого объекта. В рассматриваемой задаче основными параметрами такой дискретизации являются размер подвижного клеточного автомата и ширина переходных слоев интерфейсной зоны (другими словами, пространственный шаг кусочно-линейной аппроксимации кривой изменения свойств при переходе от центральной части интерфейса к блокам). Для определения влияния этих параметров на результаты моделирования

проводились специальные серии расчетов для моделей границ раздела, аналогичных приведенной на рис. 2, а, но характеризующихся различными значениями указанных параметров дискретизации. Отметим, что при изменении ширины переходных слоев их количество изменялось, а полная ширина переходной зоны интерфейса сохранялась неизменной. Специальные исследования показали, что уменьшение размера клеточных автоматов и ширины переходных слоев в сравнении с используемыми в работе значениями приводит к незначительным (второго порядка малости) количественным изменениям результатов моделирования. Это свидетельствует о корректности выбора параметров пространственной дискретизации модели межблочной границы.

Модельные блоки I и II полагались монолитными, упругохрупкими и высокопрочными. Используемые в расчетах физико-механические свойства подвижных клеточных автоматов, моделирующих блоки, близки к соответствующим характеристикам низкопористого песчаника (модуль Юнга $E = 20$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, плотность $\rho = 2700$ кг/м³).

В работе рассматривалась модель «залеченной» границы раздела структурных блоков геосреды. В данном случае термин «залеченная» подразумевает, что структура интерфейсной зоны на рис. 2, а является не гранулированной (т.е. состоящей из контактирующих или слабосвязанных фрагментов), но поврежденной. Полагалось, что характерные размеры повреждений меньше размера подвижных клеточных автоматов (<1 мм), а концентрация повреждений возрастает по мере перемещения от объема блоков к центральной, наиболее ослабленной, части интерфейса. В рамках такой модели влияние повреждений на механические свойства материала учитывается неявно через задание соответствующих упругих и неупругих реологических параметров механического отклика подвижных клеточных автоматов. В связи со сказанным обоснованным является приближение, в соответствии с которым степень поврежденности определяет главным образом неупругие свойства автоматов и значительно слабее влияет на величины упругих констант. Для рассматриваемой в работе интерфейсной зоны физико-механические характеристики подвижных клеточных автоматов изменялись в пределах от $E = 15$ ГПа и $\rho = 2000$ кг/м³ в центральной части интерфейса (эти свойства соответствуют литературным данным о низкопрочных песчаниках) до $E = 18.5$ ГПа и $\rho = 2500$ кг/м³ в наиболее удаленном от центра переходном слое. В соответствии с современными представлениями о реологических свойствах сред с микроповреждениями [53–58] интерфейсная зона моделировалась как упругопластическая, механические свойства которой способствуют локализации необратимых деформаций. На рис. 2, б приведены диаграммы одноосного сжатия для материалов блоков и различных областей интер-

фейсной зоны. Данные диаграммы деформирования определяют механическое поведение подвижных клеточных автоматов, моделирующих соответствующие структурные элементы модельной разломной зоны.

Учет неоднородности пространственного распределения механических (в том числе реологических) свойств на границе раздела осуществлялся заданием стохастически (случайно) определяемого отклонения величины предела упругости и коэффициента упрочнения материала автоматов интерфейсной зоны от соответствующих средних значений. Это обеспечивало равномерное распределение варьируемых параметров в интервале заданной ширины около среднего значения. В проводимых расчетах величина этого интервала полагалась равной 10 % от среднего значения соответствующего параметра.

Для моделирования упругого отклика блоков и границы раздела применялась развитая авторами модель линейно-упругого взаимодействия подвижных клеточных автоматов, построенная на основе обобщенного закона Гука для изотропных материалов [44, 45]. Моделирование неупругого механического отклика подвижных клеточных автоматов осуществлялось на основе использования модели пластичности горных пород с неассоциированным законом течения и критерием Мизеса–Шлейхера достижения предела упругости [57, 58]:

$$\Phi_i = \beta_i \bar{\sigma}_{\text{mean}}^i + \frac{\bar{\sigma}_{\text{eq}}^i}{\sqrt{3}} - Y_i = 0, \quad (1)$$

где Y_i — предел упругости материала автомата i при сдвиге; β_i — коэффициент внутреннего трения; $\bar{\sigma}_{\text{mean}}^i$ и $\bar{\sigma}_{\text{eq}}^i$ — среднее напряжение и интенсивность напряжений в объеме автомата, определяемые на основе тензора усредненных напряжений $\bar{\sigma}_{\alpha\beta}^i$ (определение данного тензора и детальное описание реализации модели Николаевского в рамках метода подвижных клеточных автоматов приведено в работе [44]). Отметим, что особенностью модели Николаевского является постулируемая линейная связь между скоростями объемной и сдвиговой составляющих пластической деформации с коэффициентом пропорциональности Λ , называемым коэффициентом дилатансии. Выбор данной модели определяется тем, что она адекватно описывает отклик широкого класса хрупких материалов (т.е. материалов, неупругая деформация которых связана с возникновением и функционированием сети повреждений различного масштаба [59]). В рамках модели Николаевского реологические свойства подвижного клеточного автомата задаются зависимостью $Y_i(\bar{\epsilon}_{\text{ms}}^i)$, где $\bar{\epsilon}_{\text{ms}}^i = \bar{\epsilon}_{\text{mean}}^i \times K_i \beta_i / (3G_i) + \bar{\epsilon}_{\text{eq}}^i / \sqrt{3}$ — комбинация средней деформации $\bar{\epsilon}_{\text{mean}}^i$ и интенсивности деформаций $\bar{\epsilon}_{\text{eq}}^i$ автомата (G_i и K_i — модули сдвига и всестороннего сжатия). В настоящей работе зависимости $Y_i(\bar{\epsilon}_{\text{ms}}^i)$ для автоматов, моделирующих блоки и различные области интерфей-

ной зоны, вычислялись на основе задаваемых кривых одноосного сжатия (рис. 2, б). Параметры β и Λ полагались постоянными и одинаковыми для различных областей интерфейса ($\beta = 0.57$ и $\Lambda = 0.36$, что соответствует некоторым усредненным значениям для песчанников).

В методе подвижных клеточных автоматов разрушение моделируется переключением состояния пары взаимодействующих автоматов из связанного (отвечающего наличию сцепления в паре) в несвязанное [44]. Такое переключение имитирует возникновение трещины на поверхности взаимодействия автоматов. В настоящей работе в качестве критерия разрыва связи в паре использовался критерий разрушения Друкера–Прагера, являющийся одной из форм записи критерия Мизеса–Шлейхера наступления предельного состояния:

$$\sigma_{DP}^{ij} = 0.5(\lambda_{ij} + 1)\sigma_{eq}^{ij} + 1.5(\lambda_{ij} - 1)\sigma_{mean}^{ij} = \sigma_c^{ij}, \quad (2)$$

где $\lambda_{ij} = \sigma_c^{ij} / \sigma_t^{ij}$ — отношение прочностей сцепления пары автоматов i и j при одноосном сжатии (σ_c^{ij}) и растяжении (σ_t^{ij}); σ_{mean}^{ij} и σ_{eq}^{ij} — соответствующие инварианты тензора напряжений $\sigma_{\alpha\beta}^{ij}$, определенного на поверхности взаимодействия пары (детальное описание расчета критерия прочности для пар связанных подвижных клеточных автоматов приведено в работах [44, 45]). Поскольку в работе рассматривается модель «залеченной» границы раздела, значения параметров критерия (2) для центральной (наиболее «ослабленной») части интерфейсной зоны были взяты на основе литературных данных о прочности консолидированных песчанников: $\sigma_c = 70$ МПа, $\lambda = 7$ [46, 47]. Для переходных слоев интерфейса величина параметра σ_c увеличивалась по отношению к значению в центральной части пропорционально увеличению модуля Юнга. Специально проведенные тестовые расчеты показали, что величина градиента прочностных параметров в интерфейсной зоне приводит к количественному, но не качественному изменению результатов моделирования.

Исходное напряженное состояние системы задавалось путем приложения к внешней границе блока I (граница AB) внешней силы, имеющей нормальную F_y и тангенциальную/сдвиговую F_x компоненты (рис. 2, а), и последующей релаксации системы. Внешняя граница блока II (граница CD) полагалась неподвижной. Учет диссипативного влияния окружения сводился к поглощению кинетической энергии автоматов на внешних границах AB и CD (что имитирует высокоинерционные перемещения массивных блоков геосреды). Диссипация энергии на этих границах моделировалась приложением к соответствующим автоматам дополнительной вязкой силы, направленной по оси X : $F_x^{visc} = -\alpha V_x$, где V_x — компонента X скорости автомата.

В соответствии с целями исследования в модели использовалось приближение плоскодеформированного

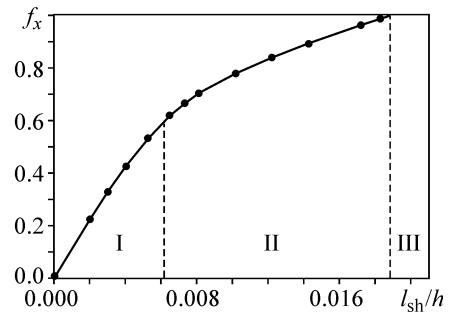


Рис. 3. Характерная зависимость силы сопротивления f_x сдвиговому смещению «активного» блока (блок I на рис. 2, а) от величины сдвигового смещения l_{sh} по границе раздела ($\sigma_{zz} \approx 13$ МПа, $H \approx 500$ м). На графике величина смещения приведена к ширине интерфейсной зоны h . Символами (черными кружками) отмечены «выделенные» значения f_x , при которых осуществлялось изучение отклика границы раздела на динамические воздействия

состояния, которое позволяет адекватно учитывать особенности напряженного состояния областей среды вдали от свободной поверхности. В рамках данного приближения напряжения, действующие в третьем измерении (σ_{zz}), в общем случае не равны нулю и их значения определяются приложенной нагрузкой в плоскости образца (в данном случае величиной нормальной силы F_y). Поскольку модельный образец, приведенный на рис. 2, а, имитирует горизонтальный слой геосреды на некоторой глубине, напряжение σ_{zz} может интерпретироваться как литостатическое давление. Соответствующее значение глубины H залегания моделируемого горизонтального залегания может быть вычислено на основе известной величины σ_{zz} с использованием соотношения $\sigma_{zz} = \rho g H$, где g — ускорение свободного падения. Варьируя F_y , можно моделировать напряженные состояния системы на различных глубинах H . Отметим, что в данной постановке горизонтальные напряжения значительно (в несколько раз) превышают вертикальные. Это соответствует литературным данным, свидетельствующим о существенном (в 2 и более раз) превышении горизонтальными напряжениями вертикальных в регионах с высокой деформационной активностью.

В расчетах использовались различные значения нормальной нагрузки F_y , обеспечивающие различные значения «литостатического давления» σ_{zz} в интервале от 2.7 МПа ($H \approx 100$ м) до 54 МПа ($H \approx 2000$ м). Для каждого F_y рассматривались различные уровни сдвигового напряжения $f_x = F_x / F_x^{ct}$, где F_x^{ct} — максимальная (предельная) сила сопротивления границы раздела сдвиговому деформированию (при заданном значении F_y). Величина F_x^{ct} определялась на основе сдвигового нагружения рассматриваемой модельной системы с по-

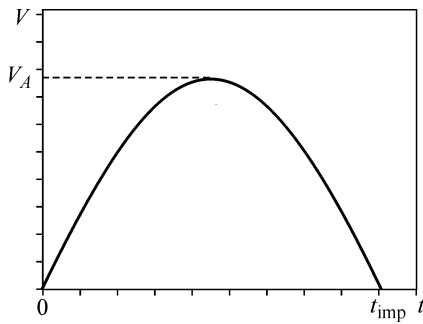


Рис. 4. График изменения скорости горизонтального смещения внешней границы блока I модельного образца (границы AB на рис. 2, а) в ходе динамического «импульсного» воздействия на границу раздела

стоянной скоростью. Отметим, что кривая сопротивления сдвигу модельной границы (рис. 2) имеет профиль, типичный для границ раздела фрагментов горного массива при значительных нормальных нагрузках, и характеризуется тремя основными стадиями: квазиупругой (I), квазипластического течения (II) и стадией разрушения и остаточной прочности (III) (рис. 3). Последняя стадия связана с формированием разрыва и динамическим проскальзыванием его берегов (в случае разломных зон такого рода явление происходит в очаге землетрясения). В настоящей работе рассматривались состояния границы раздела, отвечающие стадиям I и II (до начала стадии скольжения).

По окончании предварительного нагружения с силами F_x и F_y и последующей релаксации системы осуществлялось исследование деформационного отклика модельной границы раздела на одиночные («импульсные») динамические воздействия. В качестве основной характеристики деформационного отклика использовалась величина необратимого относительного тангенциального перемещения блоков, инициированного динамическим воздействием.

«Импульсное» динамическое воздействие на предварительно нагруженный с силами F_x и F_y фрагмент границы раздела осуществлялось кратковременным (в течение $t_{\text{imp}} = 0.003$ с) заданием клеточным автоматам на внешней границе AB блока I горизонтальной скорости V_x , изменяющейся по синусоидальному закону (нижняя поверхность образца, как отмечалось выше, является закрепленной) (рис. 4):

$$V_x = V_A \sin(\pi t / t_{\text{imp}}), \quad (3)$$

где V_A — амплитуда колебания скорости; t — время с момента начала воздействия ($0 < t < t_{\text{imp}}$). Ориентация вектора скорости вдоль оси X имитировала прохождение волны сдвига (S-волны). В работе рассматривались различные значения амплитуды колебаний V_A (в пределах от 0.1 до 100 мм/с) и периода колебаний $2t_{\text{imp}}$ (от

0.001 до 0.01 с). Отметим, что выбранный интервал изменения V_A отвечает характерным амплитудам скоростей колебаний земной поверхности на различном удалении от очага землетрясения умеренной магнитуды. По окончании импульсного воздействия (3) к внешней границе блока I вновь прикладывалась исходная сдвиговая нагрузка F_x . После релаксации системы определялась величина необратимого относительного тангенциального перемещения блоков, инициированного импульсным воздействием.

3. Результаты моделирования и обсуждение

3.1. Общий вид зависимости величины инициированного смещения от уровня сдвигового напряжения

Известно, что даже слабые динамические воздействия на границу раздела могут приводить к появлению необратимых относительных перемещений блоков, если уровень сдвиговых напряжений f_x превышает некоторую пороговую величину [2, 7, 14–16]. Данный порог, как правило, находится ниже формальной границы перехода от квазиупругой к квазипластической стадии (определяемой на основе анализа диаграммы сдвигового нагружения), и его значение во многом определяется приложенной нормальной нагрузкой.

Результаты расчетов показали, что с возрастанием уровня сдвиговых напряжений f_x величина инициированного импульсным воздействием (3) относительного сдвигового смещения блоков l_x^{imp} (вдоль оси X) систематически возрастает. При этом зависимость $l_x^{\text{imp}}(f_x)$ носит ярко выраженный нелинейный характер. Далее величина инициированного смещения l_x^{imp} будет приво-

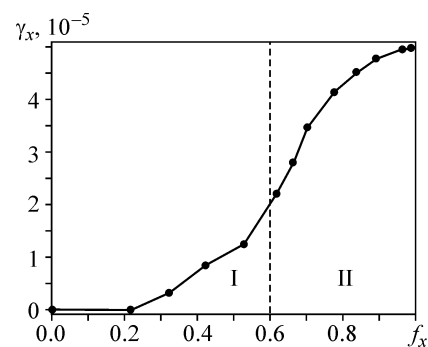


Рис. 5. Характерная зависимость приведенной величины относительного тангенциального перемещения блоков по границе раздела γ_x , инициированного динамическим воздействием ($V_A = 1$ мм/с, $t_{\text{imp}} = 0.003$ с), от уровня сдвиговых напряжений f_x ($\sigma_{zz} \approx 13$ МПа, $H \approx 500$ м). Символы (черные кружки) на графике показывают смещения, полученные в результате численного моделирования при сдвиговых напряжениях f_x , отмеченных символами на рис. 3

даться в безразмерном виде: $\gamma_x = l_x^{\text{imp}} / h$, полученном нормированием l_x^{imp} на ширину интерфейса h .

На рис. 5 приведен пример зависимости $\gamma_x(f_x)$ для импульсного нагружения с $V_A = 1$ мм/с и $t_{\text{imp}} = 0.003$ с (характерное «литостатическое давление» в системе составляет $\sigma_{zz} = 13$ МПа, что соответствует $H \approx 500$ м; соответствующая диаграмма сдвигового деформирования изображена на рис. 3). Кривая $\gamma_x(f_x)$ характеризуется несколькими основными участками. На первом из них (значительно ниже формальной точки перехода от квазиупругой (I) к квазипластической (II) стадии отклика границы $f_x \approx 0.5$) величина инициированных смещений близка к нулю и изменяется крайне слабо. При приближении к точке перехода к квазипластической стадии ($f_x > 0.3$) величина инициированного смещения начинает резко возрастать (скорость изменения γ_x увеличивается на порядок величины). Максимальное значение скорости роста γ_x достигается за формальным пределом упругости ($f_x \approx 0.5–0.6$). В первом приближении характер изменения γ_x на этом участке можно полагать линейным. По мере дальнейшего увеличения уровня сдвигового напряжения рост величины инициированного смещения постепенно замедляется. При приближении к критическому состоянию ($f_x \rightarrow 1$, что соответствует достижению предельного сдвигового сопротивления) зависимость $\gamma_x(f_x)$ выполаживается и величина γ_x стремится к насыщению.

Таким образом, в области перехода от квазиупругой к квазипластической стадии отклика границы раздела имеет место кардинальное (на порядок) возрастание величины инициированного динамическим «импульсом» относительного перемещения блоков. Анализ результатов моделирования показал, что характер зависимости $\gamma_x(f_x)$ является общим и справедлив для различных значений реологических ($Y(\epsilon_{\text{ms}})$, β и Λ) и прочностных (σ_c , λ) параметров границы раздела. В то же время количественные характеристики зависимости $\gamma_x(f_x)$ являются чувствительными как к характерной величине, так и к величине градиента реологических и прочностных параметров в интерфейсной зоне. Такими характеристиками являются уровень сдвигового напряжения f_x , при котором начинается резкое возрастание инициированного смещения, ширина интервала f_x , в котором имеет место основное изменение величины γ_x , а также максимальная величина смещений (γ_x^{max}) в области $f_x \rightarrow 1$.

Значительное влияние на эти характеристики оказывает и пространственная неоднородность распределения механических (в том числе реологических) свойств в интерфейсной зоне. Она определяется градиентом механических свойств (вследствие наличия переходных слоев и прилегающих фрагментов блоков с отличными механическими свойствами), а также параметрами стохастического распределения величины предела упру-

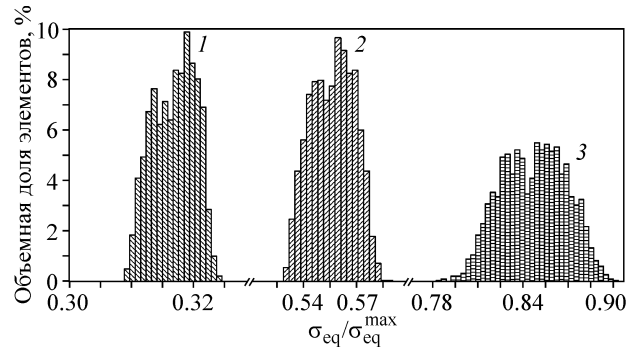


Рис. 6. Гистограммы плотности распределения интенсивности напряжений σ_{eq} в центральной части интерфейсной области при различных значениях уровня сдвиговых напряжений $f_x = 0.31$ (1), 0.62 (2), 0.89 (3). Гистограммы построены на основе локальных значений интенсивности напряжений в подвижных клеточных автоматах, составляющих центральную часть границы раздела (рис. 2, а). Приведенные данные соответствуют результатам на рис. 3 и 5

ги и коэффициента упрочнения материала в каждом из слоев. Наличие пространственной неоднородности реологических параметров приводит к тому, что, начиная с некоторого значения приложенной сдвиговой нагрузки F_x (характеризуемой параметром f_x), пространственное распределение напряжений и неупругих деформаций в интерфейсной зоне становится неоднородным. Это можно иллюстрировать приведенными на рис. 6 гистограммами распределения интенсивности напряжений σ_{eq} в центральной (наиболее «ослабленной») области интерфейсной зоны для рассмотренного выше примера (рис. 5). Здесь значения σ_{eq} отложены в приведенных единицах, полученных нормированием на максимальную величину $\sigma_{\text{eq}}^{\text{max}}$, отвечающую напряженному состоянию $f_x = 1$. При низких значениях f_x (в данном примере при $f_x < 0.3$) граница раздела деформируется упруго, и ее напряженное состояние является почти однородным. Начиная с некоторого f_x , отдельные области интерфейса переходят в область неупругого деформирования, что сопровождается возникновением неоднородности пространственного распределения напряжений. Дальнейшее увеличение уровня сдвигового напряжения сопровождается резким возрастанием степени неоднородности распределения напряжений. Максимальная величина дисперсии μ_{max} достигается в критической точке $f_x = 1$.

Результаты моделирования показали, что величина параметра μ_{max} возрастает с увеличением нормальной силы F_y (другими словами, с увеличением характерного значения среднего напряжения на границе раздела). В то же время отношение μ_{max} к соответствующему значению математического ожидания M_{max} не зависит от F_y и определяется только особенностями структуры

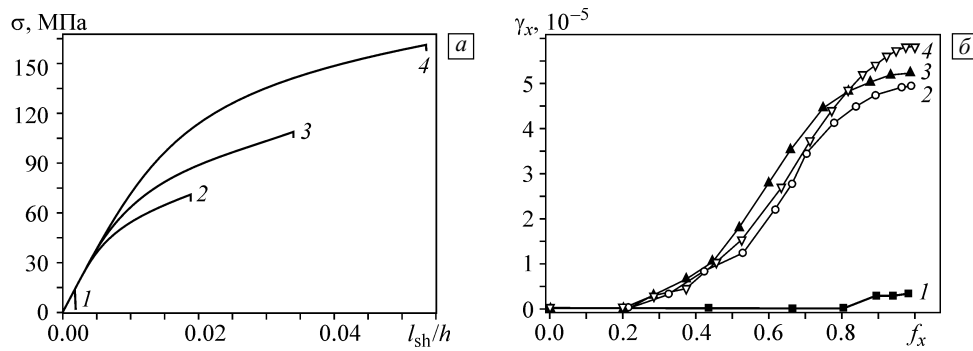


Рис. 7. Примеры диаграмм сдвигового деформирования модельной границы раздела (а) и соответствующие зависимости величины динамически инициированного относительного перемещения блоков по границе от уровня сдвиговых напряжений (б) для напряженных состояний, имитирующих различные глубины залегания слоя $H = 100$ (1), 500 (2), 1000 (3), 2000 м (4). Данные на рисунке (б) получены при динамическом воздействии (3) с параметрами $V_A = 1$ мм/с и $t_{imp} = 0.003$ с

интерфейсной зоны и параметрами стохастического распределения механических свойств. Уменьшение неоднородности пространственного распределения механических свойств в интерфейсной зоне приводит к уменьшению отношения μ_{max}/M_{max} и сужению интервала значений f_x , в котором имеет место основное изменение величины инициированных смещений. Отметим также, что с уменьшением неоднородности пространственного распределения механических свойств возрастает абсолютное значение предельной силы сопротивления границы раздела сдвиговому деформированию F_x^{cr} и, соответственно, максимальная величина динамически инициированного смещения γ_x^{max} . Детальный анализ этих зависимостей является предметом отдельного исследования.

Следует отметить, что характерный вид зависимости $\gamma_x(f_x)$ позволяет объяснить результаты натурных экспериментов, проводимых на протяжении ряда лет научной группой В.В. Ружича (ИЗК СО РАН). Эти эксперименты были направлены на инициирование/активизацию и анализ особенностей деформационных процессов во фрагментах разломных зон. В работах [34, 42] приведены данные, свидетельствующие о резком снижении величины инициированных маломощными ударными воздействиями сдвиговых смещений в центральных частях тектонических разломов после проведения специальных мероприятий по релаксации локальных сдвиговых напряжений. Как следует из результатов моделирования, данные мероприятия приводили к снижению величины локальных сдвиговых напряжений в изучаемых фрагментах разломных зон до значений ниже переходной области между областями квазиупругого и квазипластического деформирования.

3.2. Влияние величины нормальной нагрузки

Описанный характер зависимости величины инициированных смещений от уровня сдвигового напряжения на границе раздела блоков (рис. 5) является об-

щим для различных значений приложенной нормальной силы F_y . В то же время вследствие сильной зависимости механического отклика хрупких материалов от величины среднего напряжения (в применяемом здесь критерии Мизеса–Шлейхера наступления предельного состояния вклад среднего напряжения полагается аддитивным) конкретные параметры кривой $\gamma_x(f_x)$ должны определяться величиной F_y . В связи с этим в работе проведено исследование влияния нормальной силы на механический отклик границы на «импульсные» динамические воздействия. Структура модельного образца и схема нагружения (рис. 2, а) позволяют интерпретировать его как модель тонкого горизонтального слоя разломной зоны на некоторой глубине H от дневной поверхности (величина H пропорциональна «литостатическому давлению» σ_{zz} , определяемому величиной нормальной силы F_y). Поэтому при проведении дальнейшего анализа объемное напряженное состояние системы будет характеризоваться эффективной глубиной залегания слоя H . Термин «эффективная глубина» в данном контексте означает, что величина H соответствует некоторому определенному соотношению между горизонтальными и вертикальными напряжениями.

На рис. 7, а приведены примеры диаграмм сдвигового нагружения модельной границы раздела блоков на различных «глубинах» H . Можно видеть, что с увеличением H (другими словами, с ростом характерного среднего напряжения в системе) отклик границы раздела изменяется от типично хрупкого вблизи дневной поверхности (кривая 1) до квазипластического с протяженной областью неупругого деформирования на глубинах от нескольких сотен метров и более (кривые 2–4). При этом уже в интервале глубин 100–2000 м значения предела упругости на сдвиг, сдвиговой прочности, предельной деформации возрастают на порядок величины.

На рис. 7, б представлены соответствующие зависимости величины динамически инициированного относительного перемещения блоков по границе от уровня

сдвиговых напряжений. Здесь для каждого набора точек, отвечающего определенной глубине H , f_x определялась нормированием абсолютных значений силы сопротивления сдвигу F_x к максимальному значению F_x^{cr} на данной глубине. Из рисунка можно видеть, что изменение характера механического отклика границы раздела от хрупкого к квазипластическому сопровождается кардинальным изменением значений параметров зависимости $\gamma_x(f_x)$. При малых значениях H динамические воздействия не приводят к появлению необратимых смещений на границе практически во всем интервале изменения f_x (за исключением области $f_x \rightarrow 1$, где величина смещений становится отличной от нуля, но крайне незначительной, кривая 1 на рис. 7, б). С ростом глубины H (и характерного давления в системе) величина инициированных необратимых смещений по границе быстро возрастает. При этом «пороговое» значение f_x , отвечающее началу участка резкого роста γ_x , быстро уменьшается. Уже при $H \sim 500$ м оно достигает характерной величины 0.3 и практически не изменяется с дальнейшим ростом H (кривые 2–4 на рис. 7, б). Одновременно с этим резко увеличивается, а затем стремится к насыщению и ширина интервала значений f_x , в пределах которого происходит основное возрастание величины инициированных смещений. Отметим также, что на малых глубинах максимальное значение γ_x (соответствующее $f_x \rightarrow 1$) возрастает практически «скачкообразно» с ростом H . Далее оно изменяется пропорционально H , но достаточно медленно. Так, четырехкратное изменение эффективной глубины залегания слоя (от 500 до 2000 м) сопровождается увеличением максимальной величины γ_x менее чем на 20 %.

Из результатов моделирования следует, что, начиная с некоторой глубины H_0 (соответствующей некоторому пороговому значению среднего напряжения в системе σ_{mean}^0), кривая $\gamma_x(f_x)$ изменяется достаточно слабо. Основные изменения кривой с ростом глубины H имеют место на стадии квазипластического отклика границы раздела ($f_x > 0.6$) и заключаются в систематическом возрастании величины инициированных смещений с глубиной. В частности, максимальное значение γ_x (в области $f_x \rightarrow 1$) линейно возрастает с ростом глубины H (другими словами, с ростом характерной величины среднего напряжения σ_{mean} в системе):

$$\gamma_x^{max} = \alpha(H - H_0) = -\alpha'(\sigma_{mean} - \sigma_{mean}^0),$$

где коэффициент пропорциональности для рассматриваемой границы раздела $\alpha \approx 6 \cdot 10^{-9} \text{ м}^{-1}$ ($\alpha' \approx 8 \cdot 10^{-13} \text{ Па}^{-1}$). В интервале $f_x < 0.5$ зависимости $\gamma_x(f_x)$, соответствующие различным $H > H_0$, практически совпадают.

Семейства точек $\gamma_x(f_x)$, соответствующих различным $H > H_0$, с хорошей точностью аппроксимируются логистической (S-образной) кривой:

$$\gamma_x = \frac{\gamma_x^{max}}{1 + e^{-k(f_x - f_x^c)}} = \frac{\alpha(H - H_0)}{1 + e^{-k(f_x - f_x^c)}}, \quad (4)$$

где k — параметр крутизны кривой; f_x^c — положение срединной части кривой на оси абсцисс ($\gamma_x(f_x^c) = \gamma_x^{max}/2$). Анализ результатов моделирования показал, что в интервале H от нескольких сотен метров ($H_0 \sim 300\text{--}400$ м) до нескольких километров наборы точек $\gamma_x(f_x)$ для различных H хорошо описываются зависимостью (4) при одних и тех же значениях параметров $k \approx 0.6$, $f_x^c \approx 0.6$. При больших значениях H для улучшения аппроксимации необходимо вводить зависимость f_x^c от глубины слоя.

Отметим, что выбор логистической функции для аппроксимации результатов численного моделирования не является случайным. Семейство логистических функций характеризуется наличием двух пороговых значений, переходная область между которыми является достаточно узкой. Как следует из результатов моделирования, основное изменение функции γ_x также имеет место в достаточно узком интервале значений аргумента f_x . За пределами этого интервала величина γ_x быстро выходит на насыщение, т.е. стремится к нижнему или верхнему пределу. Как показано выше, характерный вид кривой не меняется в широком интервале изменения параметров модели.

3.3. Влияние величины энергии динамического воздействия

Как отмечалось во введении, для инициирования необратимых смещений по границе раздела в блочной среде энергия динамического воздействия должна превышать некоторый минимальный (пороговый) уровень. При этом величина инициированного смещения определяется превышением энергии воздействия над пороговым значением. В настоящей работе на примере модельной границы раздела (рис. 2) проведено исследование характера зависимости величины γ_x от энергии динамического воздействия.

В проводимых расчетах динамическое воздействие моделировалось посредством задания автоматам на внешней границе AB модельного образца (рис. 2, а) синусоидально изменяющейся скорости на протяжении половины временного периода синусоиды t_{imp} (рис. 4). При таком воздействии по окончании динамического «импульса» автоматы на границе AB смещались в горизонтальном направлении на расстояние $l_{imp} \approx V_A t_{imp}$ (имитация проходящей упругой волны сдвига). Упругая энергия, сообщенная системе в результате динамического воздействия, может быть оценена как $A \sim l_{imp}^2$. Таким образом, деформационный отклик границы раздела должен в равной степени определяться и амплитудой скорости возмущающего смещения V_A , и временем воздействия t_{imp} .

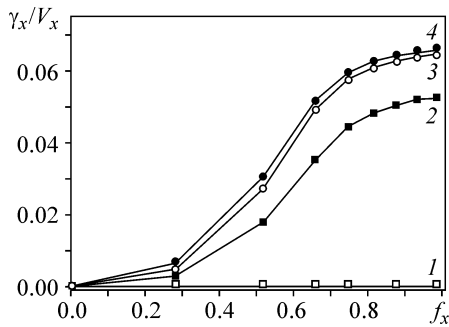


Рис. 8. Примеры зависимости величины динамически инициированного относительного перемещения блоков по границе от уровня сдвиговых напряжений при различных амплитудах динамического воздействия V_A (во всех случаях $t_{\text{имп}} = 0.003$ с). Перемещения нормированы на соответствующие значения $V_A = 0.1$ (1), 1 (2), 10 (3), 100 мм/с (4). Приведены данные для $H \approx 500$ м ($\sigma_{zz} \approx 13$ МПа)

Результаты моделирования подтвердили наличие энергетического порога воздействия, при превышении которого динамическое возмущение инициирует необратимые смещения на границе. На рис. 8 приведены примеры зависимостей $\gamma_x(f_x)$, полученные для различных значений V_A , различающихся в пределах четырех порядков величины (продолжительность воздействия $t_{\text{имп}}$ во всех случаях была одинаковой). Можно видеть, что, начиная с некоторого минимального значения $V_A = V_A^{\text{мин}}$ (в рассмотренном примере $V_A^{\text{мин}} \sim 10^{-4}$ м/с), величина инициированных необратимых смещений становится отличной от нуля и кривая $\gamma_x(f_x)$ приобретает типичный вид. При этом зависимость $\gamma_x(V_A)$ является нелинейной, стремящейся к линейной при больших значениях амплитуды скорости V_A . Она может быть с хорошей точностью аппроксимирована функцией $\gamma_x = \mu(V_A - V_A^{\text{мин}})$, где μ — коэффициент пропорциональности, являющийся экспоненциальной функцией V_A вида $\mu = a(1 - e^{-(V_A - V_A^{\text{мин}})/\sqrt{A_{\text{эфф}}}})$. Отметим, что величина нормировочного коэффициента $V_{\text{эфф}}$, имеющего размерность скорости, в рассмотренном примере близка к скорости продольной упругой волны.

Анализ влияния времени динамического воздействия $t_{\text{имп}}$ на вид кривой $\gamma_x(f_x)$ и количественные значения γ_x подтвердил сделанные выше предположения о том, что результат изменения $t_{\text{имп}}$ полностью аналогичен изменению V_A . Таким образом, величина инициированного динамическим воздействием необратимого смещения по границе определяется произведением $V_A t_{\text{имп}}$, т.е. квадратным корнем энергии воздействия \sqrt{A} . Полученный результат позволяет записать соотношение (4) в обобщенном виде, учитывающем энергию динамического воздействия A :

$$\gamma_x = \frac{\gamma_x^{\text{max}}}{1 + e^{-k(f_x - f_x^c)}} = \frac{a(1 - e^{-(\sqrt{A} - \sqrt{A_{\text{мин}}})/\sqrt{A_{\text{эфф}}}})}{1 + e^{-k(f_x - f_x^c)}} \times (\sqrt{A} - \sqrt{A_{\text{мин}}})(H - H_0). \quad (5)$$

Заметим, что в данном соотношении энергия динамического воздействия на границу раздела характеризуется экстенсивным параметром $l_{\text{имп}}$, а характерное среднее напряжение в системе — эффективной глубиной слоя H . Поэтому пороговые значения этих параметров (H_0 и $\sqrt{A_{\text{мин}}}$) зависят не только от реологических свойств границы раздела и ее внутренней структуры, но также от геометрических характеристик образца и особенностей реализации объемного напряженного состояния. В этой связи представляется важным провести дальнейшее обобщение соотношения (5) таким образом, чтобы величина инициируемого смещения γ_x являлась функцией инвариантов тензора напряжений и плотности потока мощности, переносимой упругой волной. Построение зависимости в этих терминах является предметом дальнейших исследований.

Отметим также, что соотношения вида (4), (5) применимы для «залеченных» границ раздела, деформирование которых сопровождается упрочнением. В современных трибологических моделях, учитывающих зависимость коэффициента трения от скорости скольжения и времени контакта [22, 60, 61], это соответствует стадии прилипания режима stick-slip (т.е. «залеченному» состоянию интерфейсной зоны). Построение зависимостей $\gamma_x(f_x, H, A)$ для стадии проскальзывания берегов сформировавшегося разрыва является отдельной задачей.

4. Заключение

Известно, что нелинейные эффекты при деформировании границ раздела в блочных средах (в том числе зон тектонических разломов) определяются, в первую очередь, реологическими свойствами границ. В частности, в условиях регулярного динамического возмущения напряженного состояния имеет место эффект постепенного накопления необратимых смещений на границе (т.е. постепенного относительного тангенциального перемещения блоков). В различных геомеханических моделях влияние низкоамплитудных динамических воздействий на деформационный отклик межблочного интерфейса описывается с позиций кратковременного изменения эффективной жесткости или вязкости материала интерфейсной зоны. При этом актуальным является вопрос о влиянии напряженного состояния (в том числе среднего сдвигового напряжений на границе) и параметров воздействий на динамику накопления неупругих смещений.

Результаты проведенного численного исследования показали, что зависимость величины инициированного

смещения от напряженного состояния границы может быть представлена логистической функцией приведенного значения сдвигового напряжения на границе. Положение центральной точки такой логистической кривой приблизительно соответствует границе между квазиупругой и квазипластической стадиями сдвигового деформирования интерфейса. При этом влияние среднего напряжения на границе на величину инициированного смещения становится существенным на квазипластической стадии. При «умеренных» значениях среднего напряжения, соответствующих напряженному состоянию геосреды в интервале глубин от нескольких сотен метров до нескольких километров (т.е. на шахтных глубинах), его роль может быть учтена введением линейной зависимости числителя логистической кривой. Аналогичным образом может быть определено влияние и энергии инициирующего динамического воздействия. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что величина инициирующего смещения зависит от корня плотности мощности потока упругой энергии возмущения и эта зависимость имеет нелинейный вид и характеризуется нижним порогом.

Полученные результаты имеют большое значение не только для понимания закономерностей и особенностей накопления необратимых деформаций на участках границ раздела фрагментов горного массива или земной коры, но и в контексте создания методов оценки локального напряженного состояния (в частности, уровня действующих сдвиговых напряжений) на таких границах. Важность данной задачи связана с тем, что большинство землетрясений связано с динамическим проскальзыванием блоков горного массива друг относительно друга при достижении предельного значения сдвиговой прочности границы раздела. Результаты расчетов показывают принципиальную возможность анализа напряженного состояния границы раздела (или ее фрагмента) с использованием регистрируемых относительных тангенциальных смещений блоков, инициированных «импульсными» динамическими воздействиями с известными энергетическими характеристиками. Анализ изменения данного деформационного параметра дает возможность диагностировать переход напряженного состояния границы раздела из квазиупругой области в квазипластическую, а также приближение критического состояния (отвечающего началу формирования разрыва и динамического проскальзывания). Отметим, что актуальность информации о «переключении» напряженного состояния из квазиупругой стадии в квазипластическую (или обратно) связана, в частности, с тем, что в квазипластической области даже небольшие изменения регионального напряженного состояния могут приводить к быстрому достижению критического состояния границы раздела.

При интерпретации результатов моделирования необходимо иметь в виду, что представленные в работе

зависимости получены в рамках допущения об одинаковой структуре границы раздела и реологических свойствах пород в рассмотренном интервале средних напряжений (глубин залегания слоя). Одним из следствий этого допущения является наличие минимальной глубины слоя и энергии динамического воздействия, при превышении которых величина инициируемых необратимых смещений на границе становится отличной от нуля. В то же время известно, что в непосредственной близости от земной поверхности структура разломных зон характеризуется значительно более высокой степенью нарушенности, нежели на глубинах сотни-тысячи метров. В континуальном приближении это может быть интерпретировано как понижение эффективной жесткости/вязкости (или увеличение неупругой составляющей отклика) с приближением к дневной поверхности. Очевидно, что вследствие существенного ослабления механических свойств приповерхностные слои могут служить эффективным усилителем деформационных процессов в более глубоких слоях разломных зон. Тем не менее, для однозначной интерпретации результатов измерений естественных и инициированных смещений во фрагментах тектонических разломов предпочтительным является проведение таких исследований в специальных скважинах или небольших штольнях на удалении от земной поверхности в десятки-сотни метров.

В целом полученные результаты подтверждают сделанные в предшествующих работах выводы о перспективности развития подхода к диагностике напряженного состояния фрагментов межблочных границ в геологической среде (разломных зон). В основе этого подхода лежит долговременный мониторинг динамики естественных и инициированных тестовыми воздействиями смещений на изучаемом участке границы. Периодическое проведение испытаний с использованием импульсных (и вибрационных [43]) воздействий обеспечивает возможность анализа близости напряженного состояния интерфейсной области к предельному значению, а также установления конкретной стадии деформирования интерфейса.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы.

Литература

1. *Sadovskiy M.A.* Distribution of preferential sizes in solids // *Trans. USSR Acad. Sci. Earth Sci. Ser.* – 1983. – V. 269. – P. 8–11.
2. *Кочарян Г.Г., Спивак А.А.* Динамика деформирования блочных массивов горных пород. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 423 с.
3. *Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction / Ed. by V. Keilis-Borok, A.A. Soloviev.* – Berlin: Springer-Verlag, 2003. – 337 p.
4. *Макаров П.В., Смолин И.Ю., Стефанов Ю.П., Кузнецов П.В., Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Ворошилов С.П.* Нелинейная механика геоматериалов и геосред. – Новосибирск: Изд-во «Гео», 2007. – 235 с.

5. *van der Pluijm B.A., Marshak S.* Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics. – New York: WW Norton & Company Ltd, 2004. – 656 p.
6. *Dobretsov N.L., Psakhie S.G., Ruzhich V.V., Popov V.L., Shil'ko E.V., Granin N.G., Timofeev V.Yu., Astafurov S.V., Dimaki A.V., Starchevich Ya.* Ice cover of Lake Baikal as a model for studying tectonic processes in the Earth's crust // *Dokl. Earth Sci.* – 2007. – V. 413. – No. 2. – P. 155–159.
7. *Ben-Zion Y., Sammis C.G.* Characterization of fault zones // *Pure Appl. Geophys.* – 2003. – V. 160. – P. 677–715.
8. *Davatzes N.C., Eichhubl P., Aydin A.* Structural evolution of fault zones in sandstone by multiple deformation mechanisms: Moab fault, Southeast Utah // *Geol. Soc. Am. Bull.* – 2005. – V. 117. – No. 1–2. – P. 135–148.
9. *Finzi Y., Hearn E.H., Ben-Zion Y., Lyakhovsky V.* Structural properties and deformation patterns of evolving strike-slip faults: numerical simulations incorporating damage rheology // *Pure Appl. Geophys.* – 2009. – V. 166. – P. 1537–1573.
10. *Sagy A., Brodsky E.E., Axen G.J.* Evolution of fault surface roughness with slip // *Geology.* – 2007. – V. 35. – No. 3. – P. 283–286.
11. *Kocharyan G.G., Kishkina S.B., Ostapchuk A.A.* Seismic picture of a fault zone. What can be gained from the analysis of fine patterns of spatial distribution of weak earthquake centers? // *Geodyn. Tectonophys.* – 2010. – V. 1. – No. 4. – P. 419–440.
12. *Seminsky K.Zh.* Internal structure of fault zones: spatial and temporal evolution studies on clay models // *Geodyn. Tectonophys.* – 2012. – V. 3. – No. 3. – P. 183–194.
13. *Psakhie S.G., Dobretsov N.L., Shilko E.V., Astafurov S.V., Dimaki A.V., Ruzhich V.V.* Model study of the formation of deformation-induced structures of subduction type in block-structured media. Ice cover of Lake Baikal as a model medium // *Tectonophysics.* – 2009. – V. 465. – P. 204–211.
14. *Marone C.* Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* – 1998. – No. 26. – C. 643–696.
15. *Кочарян Г.Г., Костюченко В.Н., Павлов Д.В.* Иницирование деформационных процессов в земной коре слабыми возмущениями // *Физ. мезомех.* – 2004. – Т. 7. – № 1. – С. 5–22.
16. *Кочарян Г.Г., Кулюкин А.А., Марков В.К., Марков Д.В., Павлов Д.В.* Малые возмущения и напряженно-деформированное состояние земной коры // *Физ. мезомех.* – 2005. – Т. 8. – № 1. – С. 23–36.
17. *Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М.* Основы геомеханики. – М.: Изд-во «Недра», 1986. – 301 с.
18. *Sherman S.I., Gorbunova E.A.* Variations and origin of fault activity of Baikal rift system and adjacent territories in real time // *Earth Sci. Front.* – 2008. – V. 15. – No. 3. – P. 337–347.
19. *Psakhie S.G., Ruzhich V.V., Shilko E.V., Popov V.L., Dimaki A.V., Astafurov S.V., Lopatin V.V.* Influence of the state of interfaces on the character of local displacements in fault-block and interfacial media // *Tech. Phys. Lett.* – 2005. – V. 31. – No. 8. – P. 712–715.
20. *Churikov V.A., Kuzmin Yu.O.* Relation between deformation and seismicity in the active fault zone of Kamchatka, Russia // *Geophys. J. Int.* – 1998. – V. 133. – P. 607–614.
21. *Psakhie S.G., Ruzhich V.V., Shilko E.V., Popov V.L., Astafurov S.V.* A new way to manage displacements in zones of active faults // *Tribol. Int.* – 2007. – V. 40. – P. 995–1003.
22. *Dieterich J.H., Kilgore B.* Implications of fault constitutive properties for earthquake prediction // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* – 1996. – V. 93. – P. 3787–3794.
23. *McGarr A., Fletcher J.* Maximum slip in earthquake fault zones, apparent stress, and stick-slip friction // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 2003. – V. 93. – P. 2355–2362.
24. *Filippov A.E., Popov V.L., Psakhie S.G., Ruzhich V.V., Shilko E.V.* Converting displacement dynamics into creep in block media // *Tech. Phys. Lett.* – 2006. – V. 32. – No. 6. – P. 545–549.
25. *Ferdowsi B., Griffa M., Guyer R.A., Johnson P.A., Marone C., Carmeliet J.* Microslips as precursors of large slip events in the stick-slip dynamics in sheared granular layers: A discrete element model analysis // *Geophys. Res. Lett.* – 2013. – V. 40. – P. 4194–4998.
26. *Кочарян Г.Г.* Разломная зона как нелинейная механическая система // *Физ. мезомех.* – 2010. – Т. 13. – Спец. вып. – С. 5–17.
27. *Chen Q., Freymueller G.T.* Geodetic evidence for a near-fault compliant zone along San Andreas fault in the San Francisco Bay area // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 2002. – V. 92. – No. 2. – P. 656–671.
28. *Kuzmin Yu.O.* Recent geodynamics of the faults and paradoxes of the rates of deformation // *Izv. Phys. Solid Earth.* – 2013. – V. 49. – No. 5. – P. 626–642.
29. *Kuzmin Yu.O.* Recent geodynamics of fault zones: Faulting in real time scale // *Geodyn. Tectonophys.* – 2014. – V. 5. – No. 2. – P. 401–443.
30. *Кочарян Г.Г., Кулюкин А.А., Павлов Д.В.* Роль нелинейных эффектов в механике накопления малых возмущений // *Физ. мезомех.* – 2006. – Т. 9. – № 1. – С. 5–14.
31. *Кочарян Г.Г., Кулюкин А.А., Павлов Д.В.* Некоторые особенности динамики межблокового деформирования в земной коре // *Геология и геофизика.* – 2006. – Т. 47. – № 5. – С. 669–683.
32. *Melosh H.J.* Acoustic fluidization: A new geological process? // *J. Geophys. Res.* – 1979. – V. 84. – P. 7513–7520.
33. *Melosh H.J.* Dynamical weakening of faults by acoustic fluidization // *Nature.* – 1996. – V. 379. – P. 601–606.
34. *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.
35. *Gomberg J., Bodin P., Reasenber P.* Observing earthquakes triggered in the near field by dynamic deformations // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 2003. – V. 93. – P. 118–138.
36. *Johnson P.A., Carpenter B., Knuth M., Kaproth B.M., Le Bas P.-Y., Daub E.G., Marone C.* Nonlinear dynamical triggering of slow slip on simulated earthquake faults with implications to Earth // *J. Geophys. Res. B.* – 2012. – V. 117. – P. 04310(1–9).
37. *Kostic S., Franovic I., Perc M., Vasovic N., Todorovic K.* Triggered dynamics in a model of different fault creep regime // *Sci. Rep.* – 2014. – V. 4. – P. 5401(1–7).
38. *Johnson P.A., Jia X.* Nonlinear dynamics, granular media and dynamic earthquake triggering // *Nature.* – 2005. – V. 437. – P. 871–874.
39. *Duan B., Kang J., Li Y.-G.* Deformation of compliant fault zones induced by nearby earthquakes: theoretical investigations in two dimensions // *J. Geophys. Res. B.* – 2011. – V. 116. – P. 03307-1–03307-22.
40. *Псахье С.Г., Ружич В.В., Шилько Е.В., Попов В.Л., Димаки А.В., Астафуров С.В., Лопатин В.В.* О влиянии состояния границ раздела на характер локальных смещений в разломно-блоковых и интерфейсных средах // *Письма в ЖТФ.* – 2005. – Т. 31. – № 16. – С. 80–87.
41. *Hearn E.H., Fialko Y.* Can compliant fault zones be used to measure absolute stresses in the upper crust? // *J. Geophys. Res. B.* – 2009. – V. 114. – P. 04403-1–04403-18.
42. *Астафуров С.В., Шилько Е.В., Ружич В.В., Псахье С.Г.* Исследование влияния локального напряженного состояния границ раздела блоков геологических сред на их отклик при динамических воздействиях // *Геология и геофизика.* – 2008. – Т. 49. – № 1. – С. 67–77.
43. *Шилько Е.В., Астафуров С.В., Ружич В.В., Псахье С.Г.* О возможности оценки уровня сдвиговых напряжений на границах раздела в блочных средах // *Физ. мезомех.* – 2009. – Т. 12. – № 3. – С. 15–22.
44. *Psakhie S.G., Shilko E.V., Grigoriev A.S., Astafurov S.V., Dimaki A.V., Smolin A.Yu.* A mathematical model of particle–particle interaction for discrete element based modeling of deformation and fracture of heterogeneous elastic–plastic materials // *Eng. Fract. Mech.* – 2014. – V. 130. – P. 96–115.
45. *Shilko E.V., Psakhie S.G., Schmauder S., Popov V.L., Astafurov S.V., Smolin A.Yu.* Overcoming the limitations of distinct element method

- for multiscale modeling of materials with multimodal internal structure // *Comp. Mater. Sci.* – 2015. – V. 102. – P. 267–285.
46. *Lin W.* Mechanical properties of mesaverde sandstone and shale at high pressures: Technical Report UCRL-53419. – Lawrence Livermore National Laboratory, University of California. – 1983. – 37 p.
47. *Labuz J.F., Dai S.-T., Papamichos E.* Plane-strain compression of rock-like materials // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* – 1996. – V. 33. – P. 573–584.
48. *Mustoe G.G.W.* A generalized formulation of the discrete element method // *Eng. Comput.* – 1992. – V. 9. – P. 181–190.
49. *Bićanić N.* Discrete Element Methods // *Encyclopedia of Computational Mechanics. V. 1: Fundamentals* / Ed. by E. Stein, R. Borst, T.J.R. Hughes. – Chichester: Wiley, 2004. – P. 311–337.
50. *Jing L., Stephansson O.* Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering. – Amsterdam: Elsevier, 2007. – 545 p.
51. *Астафуров С.В., Шилько Е.В., Андреев А.В., Псахье С.Г.* Исследование влияния неравноосности сжатия на дилатансионные процессы в блочной среде в условиях сдвигового деформирования // *Физ. мезомех.* – 2011. – Т. 14. – № 2. – С. 47–55.
52. *Psakhie S., Ovcharenko V., Baohai Yu., Shilko E., Astafurov S., Ivanov Yu., Vyeli A., Mikhovikov A.* Influence of features of interphase boundaries on mechanical properties and fracture pattern in metal-ceramic composites // *J. Mater. Sci. Technol.* – 2013. – V. 29. – No. 11. – P. 1025–1034.
53. *Constitutive Modeling of Geomaterials* / Ed. by Q. Yang, J.-M. Zhang, H. Zheng, Y. Yao. – Berlin: Springer-Verlag, 2013. – 815 p.
54. *Yu M.-H., Ma G.-W., Qiang H.-F., Zhang Y.-Q.* Generalized Plasticity. – Berlin: Springer-Verlag, 2006. – 447 p.
55. *Zhou H., Jia Y., Shao J.F.* A unified elastic-plastic and viscoplastic damage model for quasi-brittle rocks // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* – 2008. – V. 45. – P. 1237–1251.
56. *Макаров П.В.* Математическая теория эволюции нагружаемых твердых тел и сред // *Физ. мезомех.* – 2008. – Т. 11. – № 3. – С. 19–35.
57. *Гарагаи И.А., Николаевский В.Н.* Неассоциированные законы течения и локализации пластической деформации // *Успехи механики.* – 1989. – Т. 12. – № 1. – С. 131–183.
58. *Стефанов Ю.П.* Локализация деформации и разрушение в геоматериалах. Численное моделирование // *Физ. мезомех.* – 2002. – Т. 5. – № 5. – С. 107–118.
59. *Nur A.* A note on the constitutive law for dilatancy // *Pure Appl. Geophys.* – 1975. – V. 113. – P. 197–206.
60. *Ruina A.* Slip instability and state variable friction laws // *J. Geophys. Res.* – 1983. – V. 88. – P. 10359–10370.
61. *Perrin G., Rice J., Zheng G.* Self-healing slip pulse on a frictional surface // *J. Mech. Phys. Solids.* – 1995. – V. 43. – P. 1461–1495.

Поступила в редакцию
30.05.2015 г.

Сведения об авторах

Григорьев Александр Сергеевич, асп. ИФПМ СО РАН, grigoriev@ispms.tsc.ru
Шилько Евгений Викторович, д.ф.-м.н., внс ИФПМ СО РАН, проф. ТГУ, shilko@ispms.tsc.ru
Астафуров Сергей Владимирович, к.ф.-м.н., нс ИФПМ СО РАН, снс ТГУ, svastafurov@gmail.com
Димаки Андрей Викторович, к.т.н., нс ИФПМ СО РАН, снс ТГУ, dav@ispms.tsc.ru
Высоцкий Евгений Михайлович, к.г.-м.н., нс ИГМ им. В.С. Соболева СО РАН, vysotsky@igm.nsc.ru
Псахье Сергей Григорьевич, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, дир. ИФПМ СО РАН, проф. ТГУ, зав. каф. ТПИУ, sp@ispms.tsc.ru