

УДК 531/534, 550.3

Моделирование «медленных движений» — автоволн неупругой деформации в пластичных и хрупких материалах и средах

П.В. Макаров^{1,2}, А.Ю. Перышкин²¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, 634050, Россия² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 634055, Россия

В работе выполнен обзор современного состояния работ по изучению так называемых «медленных движений» — деформационных волн Земли. Высказана и обоснована гипотеза, что все наблюдаемые в твердых телах и геосредах возмущения напряженно-деформированного состояния, распространяющиеся в форме медленных деформационных фронтов, включая фронты пластической деформации в металлах, фронты в геосредах и разломах разных масштабов, имеют общую физическую природу. Нагружаемые твердые тела и геосреды являются активными иерархически организованными многомасштабными средами. Различные динамические процессы на границах блоков, подвижки на разломах разных масштабов приводят к потере устойчивости в среде как нелинейной динамической системе. Кооперативный отклик и параметрическое возбуждение подобной активной среды приводят к формированию в них медленных деформационных фронтов. Таким образом, формирование деформационных автоволн в твердых телах и геосредах есть процесс самоорганизации. В работе предложена математическая модель, которая описывает связанные процессы эволюции напряженно-деформированного состояния и формирования в нагруженной неустойчивой упругопластической среде медленных деформационных автоволн. В качестве примеров приведены расчеты автоволн деформации, возникающих в малых образцах пластичных материалов при их растяжении, смоделированы медленные деформационные фронты в квазихрупкой геосреде при ее нагружении сжатием, а также автоволновые возмущения, движущиеся по разлому.

Ключевые слова: «медленные движения», деформационные автоволны, геосреда, нелинейная динамическая система, самоорганизация, связанная математическая модель

Modeling of “slow movements” or inelastic deformation autowaves in ductile and brittle materials and media

P.V. Makarov^{1,2} and A. Yu. Peryshkin²¹ National Research Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia² Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, 634055, Russia

The paper reviews the modern studies on so-called slow movements, or deformation waves of the Earth. A hypothesis is proposed and substantiated that all stress-strain state perturbations observed in solids and geomeia and propagating in the form of slow deformation fronts, including plastic deformation fronts in metals, fronts in geomeia and different-scale faults, are of common physical origin. Loaded solids and geomeia are active hierarchically organized multiscale media. Various dynamic processes occurring at block boundaries as well as different-scale fault displacements lead to loss of stability in the medium as a nonlinear dynamic system. The cooperative response and parametric excitation of the active medium cause the formation of slow deformation fronts in them. Thus, the generation of deformation autowaves in solids and geomeia is a self-organization process. The paper proposes a mathematical model to describe coupled processes of stress-strain state evolution and generation of slow deformation autowaves in a loaded unstable elastic-plastic medium. Deformation autowaves generated in small specimens of ductile materials under tension have been calculated. Slow deformation fronts in a quasi-brittle geomeium under compression and autowave disturbances propagating along the fault have been modeled.

Keywords: slow movements, deformation autowaves, geomeium, nonlinear dynamic system, self-organization, coupled mathematical model

1. Введение

Как известно, возмущения в сплошных средах передаются волнами напряжений со скоростями звука в этих средах. Существуют также волны пластичности (волны

Кольского), скорости которых заметно меньше, но близки по порядку. Скорости тектонических течений, которые определены по геологическим данным и GPS-измерениям, составляют не более нескольких см/год,

на 14–15 порядков ниже скоростей звука и характеризуют крип [1]. Эти движения нельзя интерпретировать как волны. В физике пластичности достаточно хорошо изучены медленные деформационные процессы — фронты Людерса, распространяющиеся в виде волн пластичности. Скорости этих возмущений занимают промежуточное значение и составляют порядка $2 \cdot 10^{-5}$ м/с. В науках о Земле за прошедшие 40 лет получила развитие и широко обсуждается концепция деформационных волн Земли, или «медленных движений», скорости которых на 5–6 порядков ниже скоростей звука и на 7–8 порядков выше типичных скоростей тектонических течений [1–17]. Речь идет фактически о возмущениях напряженно-деформированного состояния в геосредах, которые интерпретируются как волна и распространяются от источника возмущения (как правило, это границы тектонических плит и разломы разных масштабов). Скорости этих деформационных возмущений обычно составляют 1–100 км/год [1, 2], т.е. занимают промежуточное значение между сейсмическими волнами и тектоническими течениями. Прямые измерения параметров медленных волн деформации отсутствуют по причине чрезвычайно низких их скоростей и амплитуд. Они обнаруживаются косвенно по вариациям геофизических полей в том случае, когда эти вариации носят достаточно выраженный пространственно-временной характер. Впервые о медленных движениях в геосредах заговорили после установления Ч. Рихтером в 1958 г. направленной миграции очагов землетрясений вдоль Северо-Анатолийского разлома в Турции. В дальнейшем было установлено, что явление направленной миграции землетрясений распространено повсеместно, например в Центральной Азии, в том числе Байкальской рифтовой зоне [7, 11, 15, 17–19], на Памире и Гиндукуше [8–10] и т.д. Сформировалась идея, что распространяющаяся вдоль разлома медленная волна деформации действует как триггер, запуская последовательность землетрясений на разломе. Эта идея вызвала ряд вполне обоснованных возражений. Более того, сама идея трактовки наблюдаемых пространственно-временных распределений геофизических полей, включая их изменения, связанные с направленной миграцией землетрясений, в терминах волновой динамики подвергалась критике [20]. Один из первых обзоров по этой теме был сделан С.В. Гольдиным с соавторами [1]. Дискуссионность этой проблематики отражена в самом названии обзора «Медленные движения — миф или реальность?». За прошедшие 15 лет после опубликования этой работы ситуация с наблюдениями медленных движений в средах практически не изменилась. Существуют как сторонники гипотезы о волновом характере ряда деформационных процессов в земной коре, так и ее критики.

Дальнейшее развитие концепции деформационных волн в геосредах связано с синергетическим взглядом

на их физическую природу. Медленные деформационные фронты в различных материалах и геосредах стали трактовать как автоволновые процессы, обусловленные неустойчивостью нагруженной поврежденной среды, ее кооперативным откликом и параметрическим возбуждением [3, 12, 13, 16, 21–23]. По мнению авторов [24–26], медленные деформационные фронты в пластичных металлах также имеют автоволновую природу. По-видимому, автоволны в малых образцах пластичного материала и медленные деформационные автоволновые движения в геосредах — это схожие по физической природе кооперативные деформационные процессы, развивающиеся на разных масштабах.

Мы также считаем, что подобные кооперативные деформационные процессы, которые развиваются как в малых образцах пластичных материалов и в хрупких образцах горных пород, так и в геосредах есть явление самоорганизации деформационных процессов разных масштабных уровней. Они проявляют себя как фронты деформаций и/или повреждений разных масштабов, распространяются с очень малыми скоростями в нагруженной неустойчивой среде. По этой причине эти разномасштабные медленные деформационные движения можно рассматривать как автоволновые процессы в деформируемых твердых телах и средах. Разработанные методы численного моделирования деформационных волн [27, 28] основываются на решении фундаментальных уравнений механики деформируемого твердого тела вместе с определяющими уравнениями типа переноса, что в целом приводит к уравнениям смешанного типа. Решения этих систем уравнений в частных производных приводят как к волнам напряжений, распространяющимся со скоростями звука, так и к деформационным волнам, скорости которых могут быть сколь угодно малыми [27, 28]. Эти теоретические результаты фундаментального характера также позволяют с уверенностью говорить о реальности существования разномасштабных медленных волновых движений в различных материалах и геосредах. Полученные результаты численных расчетов волновых параметров хорошо коррелируют с наблюдениями [29].

Автоволновая концепция медленных движений имеет фундаментальное значение для понимания физической природы деформационных процессов на всех масштабных уровнях. Особенно важно выяснить роль медленных деформационных фронтов в формировании критических состояний нагружаемой прочной среды, установить их вклад в формирование очагов разрушения разных масштабов, в том числе при землетрясениях.

С самого начала исследований природы деформационных фронтов их связывали с миграцией землетрясений и процессами активизации разломов. Исследования последних 10–20 лет выявили многомасштабную природу этих автоволновых деформационных процессов. Медленные фронты деформаций наблюдаются как

на малых масштабах в металлах [25, 26] и в хрупких образцах горных пород [30], так и на масштабах, соизмеримых с масштабом земли в целом (глобальные тектонические волны [2], D-волны [3]).

Широкий спектр пространственно-временных вариаций автоволн деформаций обусловлен фрактально-блочной организацией твердых тел и геосред. Все больше появляется данных, подтверждающих существенную роль медленных волн деформации в формировании критических состояний в нагружаемых твердых телах и средах. Последнее обстоятельство важно для установления особенностей эволюции напряженно-деформированного состояния в поврежденной нагруженной среде, выяснения механизмов формирования очагов разрушения и, в конечном итоге, прогноза различных разрушений, включая землетрясения. Авторами [24–26], экспериментально изучающими параметры медленных деформационных фронтов в пластичных материалах и хрупких образцах горных пород, впервые было показано, как деформационные автоволны формируют в пластичном образце при растяжении металлических образцов место будущей шейки, т.е. фактически автоволны являются надежными индикаторами места будущего разрушения. Численное моделирование медленных волн деформаций полностью подтвердило это положение. Более того, численные расчеты для изучаемого модельного материала в ряде случаев предсказывают и место, и время будущего макроскопического разрушения. Эти численные эксперименты с пластичными металлами позволили разработать модель для описания фронтов локализованной деформации, определить ее параметры и перейти к рассмотрению проблемы о «медленных движениях» — фронтах деформаций и повреждений в геосредах и геоматериалах. Эксперименты по наблюдению волн деформации в хрупких и квазихрупких образцах горных пород показали реальность существования таких автоволновых процессов и в этих материалах [30].

Многочисленные исследования вариаций геофизических полей и особенностей сейсмических процессов, выполненные более чем за 40 лет, дают очень широкий спектр разномасштабных деформационных процессов, позволяющих интерпретировать их проявления в терминах автоволновых процессов. В фундаментальном обзоре по этой проблеме [2] проведена классификация выявленных типов медленных деформационных волн в Земле, которые были описаны в литературе за этот период.

Согласно концепции, развиваемой в коллективе авторов настоящей работы [31–35], все твердые тела, включая геосреды, являются сложными многомасштабными нелинейными динамическими системами. Показано, что в любом твердом теле минимальный масштаб соизмерим с межатомным расстоянием [36], в то время как максимальные разрушения в геосредах соизмери-

мы с размерами гигантских разломов и могут достигать нескольких тысяч километров.

Иерархическая многомасштабная блочная организация геосреды (а также любых твердых тел), в которой блоки контактируют друг с другом через разломы разных масштабов, представляющих собой менее прочную поврежденную среду, приводят к тому, что в такой среде может быть сгенерирована иерархия автоволн различной энергетики и различного дальнего действия. Скорости таких автоволн могут варьироваться в достаточно широком интервале возможных скоростей медленных движений. Именно такая картина и наблюдается в реальности. При этом разные авторы выявляют большое разнообразие подобных деформационных проявлений в виде фронтов разных амплитуд, масштабов и различного происхождения.

В обзоре [2] выделены в том числе два вида автоволн: 1) тектонические волны (в том числе глобального характера), распространяющиеся в литосфере, и 2) автоволновые возмущения, распространяющиеся вдоль разломов в земной коре и литосфере, причем в этом случае часто наблюдается эффект быстрой миграции сейсмической активности, при которой скорость деформационной волны оценивается в 1–10 км/сут, или 0.0116–0.1160 м/с [2].

Возникает вопрос о механизмах генерации таких медленных движений. Так как наблюдения медленных движений приурочены к областям сейсмической активности, в частности к разломам, их происхождение связывается с динамическими явлениями — быстрыми подвижками элементов земной коры, землетрясениями, горными обвалами и т.д. [2, 8–13, 29]. Мелкомасштабные медленные движения, когда волны деформаций распространяются на десятки метров, зафиксированы при взрывах, инициировавших смещения берегов естественного разрыва, а также при других динамических воздействиях на геосреду (падающий груз, работающие буровые установки и т.д. [11, 37]).

Таким образом, медленные движения генерируются в геосреде различными динамическими воздействиями природного и техногенного происхождения.

В табл. 1 и 2 приведены данные по параметрам деформационных волн — медленных движений, определенных косвенным образом, на основе анализа геофизических полей, которые составлены по данным обзоров [1, 2], оригинальных источников, которые приведены в табл. 1, и дополнены данными из [24]. В табл. 1 и 2 приведены как результаты наблюдений за геодинамическими процессами, так и данные, полученные при взрывах и в лабораторных экспериментах.

В табл. 2 измерялась непосредственно деформация разноориентированными деформографами, установленными в выходящих на поверхность разрывных нарушениях. Деформации в виде смещений берегов разры-

Таблица 1

Источник	Область исследования	Скорость деформационных волн, м/с
[3, 21]	Гипотеза о существовании медленных волн (D-волн), распространяющихся вдоль меридианов	$52.6 \cdot 10^{-5}$
[4, 38]	Изучение деформаций на разломах (Сан-Андреас и Копетдаг). Волновой характер деформаций вдоль разломов	$126.8 \cdot 10^{-5}$
[39, 40]	Пространственно-временные вариации геофизических полей с Ю-В на С-З в районе Гармского полигона	$95.1 \cdot 10^{-5}$
[22]	Миграция землетрясений Тихого океана в виде расходящегося сферического фронта	$602.3 \cdot 10^{-5}$
[41, 42]	Данные мониторинга ядерных подземных взрывов (1964–1984 гг.). Обнаружен фронт волны тектонического сжатия, движущийся в С-З направлении	$951.0 \cdot 10^{-5}$
[43]	Скорость распространения радонового предвестника (Средняя Азия)	$8101.0 \cdot 10^{-5}$
[25]	Сu, автоволны	$8.0 \cdot 10^{-5}$
	Al, автоволны	$11.0 \cdot 10^{-5}$
	Zr, автоволны	$3.5 \cdot 10^{-5}$

вов инициировались главным образом взрывами, но также и другими воздействиями (падающий груз, вращающийся буровой инструмент, землетрясения, штормы). Более подробно измерения приведены в [11].

Мы полагаем, что в любой прочной многомасштабной среде (пластичном материале, в хрупких горных породах, в квазихрупких геологических средах и т.д.) могут возникать медленные фронты волн деформаций, скорости которых полностью регулируются фактически одним фактором — скоростью генерации дефектов и/или повреждений в этих средах под приложенными к среде динамическими воздействиями. Неважно, как нагружается среда: непрерывно воздействующей нагрузкой (растяжением или сжатием образцов, напряжениями тектонической или гравитационной природы в геосреде, ударно-волновым воздействием или динамичес-

кими процессами в горных массивах и средах, в том числе взрывом). Важно, что в такой прочной многомасштабной среде как типичной нелинейной динамической системе, обладающей свойством самоорганизованной критичности [32], возможен кооперативный отклик на приложенное воздействие. Так как в нагружаемой прочной среде, обладающей свойством самоорганизованной критичности, нет статистически независимых масштабов [32, 33], в ней становятся возможными процессы самоорганизации. Самоорганизация приводит к корреляции отдельных актов и возможна только при наличии информационного обмена в среде. Информационный обмен в среде осуществляется волнами напряжений, которые распространяются со скоростью звука в среде и на многие порядки больше скоростей деформационных процессов. Таким образом, любые изме-

Таблица 2

Серия измерений, полученных на расстоянии 2–18 м в разломных зонах вблизи оз. Байкал

Вид воздействия	Расстояние, м	Время распространения волны	Скорость деформационной волны, м/с	Примечание
Буровая установка	9	4 ч	$62.5 \cdot 10^{-5}$	Длительное воздействие (4 ч)
Взрывы	2		$5 \cdot 10^{-4} \dots 3 \cdot 10^{-3}$	Листвянка
Взрывы	2		$5 \cdot 10^{-4} \dots 3 \cdot 10^{-3}$	Приморский разлом
Взрывы	2		$5 \cdot 10^{-3} \dots 3 \cdot 10^{-2}$	Обручевский разлом
Землетрясение	25 000	4 ч 39 мин	$1.5 \cdot 10^{-3}$	Южнобайкальское землетрясение
Взрывы	15–18	3 и 7 мин	$8 \cdot 10^{-2}$ и $3.6 \cdot 10^{-2}$	10^5 Дж
		7 и 23 мин	$3.6 \cdot 10^{-2}$ и $1.1 \cdot 10^{-3}$	
		30 мин	$8 \cdot 10^{-3}$	

нения в напряженно-деформированном состоянии в каждой точке среды успевают повлиять на напряженно-деформированное состояние окружающего объема. Именно по этой причине в среде становятся возможны кооперативные деформационные процессы, объединяющие единичные акты неупругой деформации и/или разрушения в самосогласованный процесс, что и приводит (при определенных условиях) к формированию фронтов деформации на соответствующем макромасштабе. Этот макромасштаб полностью определен интенсивностью воздействия, т.е. величиной подводимой энергии. От интенсивности деформирующего воздействия будет также зависеть и скорость кинетических процессов, включающих как процессы генерации в нагружаемой среде деформационных дефектов и/или повреждений, так и эффекты дальнего действия и перераспределения подведенной к среде энергии, либо перераспределения ранее запасенной энергии активной и неустойчивой средой. Эти процессы регулируют и скорость распространения в среде медленных волн деформации.

2. Математическая модель генерации автоволновых деформационных фронтов

Предлагаемая нами модель описания медленных волн деформации основана на самых общих фундаментальных соображениях относительно нагружаемой прочной среды:

1. Все нагружаемые твердые тела, включая геосреды, являются многомасштабными, иерархически организованными нелинейными динамическими системами. В такой многомасштабной среде открывается возможность генерации деформационных волн различной физической природы, включая медленные волны пластической деформации — фронты Людерса в металлических образцах, волны деформаций, а также волны повреждений и/или разрушений в квазихрупких и хрупких материалах и геосредах, обусловленные возмущениями напряженно-деформированного состояния. Эти волновые возмущения порождаются различными физическими причинами, в частности подвижками на границах блоков. В силу многомасштабной иерархической организации прочной среды в ней могут быть сгенерированы цуги медленных деформационных волн различного масштаба, начиная от микромасштабов, соизмеримых с масштабами элементарных актов неупругой (пластической) деформации, и заканчивая глобальными «тектоническими течениями» в геосредах, масштабы которых соизмеримы с масштабами крупных тектонических плит. В силу самоподобия деформационных процессов на разных масштабах эти волны деформаций могут быть описаны единой математической моделью.

2. Процесс генерации медленных волн деформации является кооперативным самосогласованным деформационным откликом на внешнее воздействие нагружае-

мой среды как нелинейной динамической системы, обладающей свойством самоорганизованной критичности. Таким образом, формирование фронтов медленных деформационных движений есть процесс самоорганизации в нагружаемой среде.

3. Масштабы, дальнее действие и скорости формирующихся фронтов деформации полностью определяются величиной подводимой к среде энергии, уровнем генерируемых напряжений и скоростями кинетических процессов генерации в нагружаемой среде неупругих (пластических) деформаций и/или повреждений.

4. Источниками генерации медленных деформационных фронтов являются динамические процессы на конвергентных границах плит, границах блоков разных масштабов, а также динамические процессы на разломах. Другими словами, деформационные фронты генерируются динамическими процессами на интерфейсах различной физической природы.

Сформулированные положения не только не противоречат сложившимся представлениям о природе медленных движений, но и опираются на гипотезы, высказанные различными исследователями этого явления в разное время. Эти положения позволяют построить простую феноменологическую модель явления, не привлекая дополнительных часто спорных и недостаточно аргументированных предположений, на которые опираются некоторые уже имеющиеся модельные представления. Для предлагаемой феноменологической модели общего характера не важен масштаб явления, наличие изгиба плиты или особых тектонических сил или иных причин, приводящих к генерации деформационной волны. Важны уровень формирующихся в результате различных причин в среде напряжений и величина накапливаемых в каждой частице среды неупругих деформаций и/или повреждений.

Математическая реализация этих положений включает базовое вычислительное ядро (уравнения механики деформируемого твердого тела, выражающие законы сохранения — уравнения (1)–(3)). Это ядро также содержит кинетические уравнения, задающие скорости накопления неупругих деформаций и/или повреждений. В комбинации с методикой клеточных автоматов эти уравнения позволяют реализовать в расчетах кооперативный согласованный отклик среды на ее нагружение [28, 32, 33]. Эта процедура позволяет численно смоделировать самоорганизацию отдельных актов неупругой деформации в виде фронтов локализованной пластичности или волн повреждений:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} + \rho \operatorname{div} \mathbf{v} &= 0, \quad \rho \frac{dv_i}{dt} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x^j} + \rho F_i, \\ \frac{\partial E}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \sigma_{ij} \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial t} - q_{i,i}, \\ \sigma_{ij} &= -P \delta_{ij} + S_{ij}^c + S_{ij}^v, \quad -P = \frac{1}{3} \sigma_{ii}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_{ij} &= \lambda(\dot{\theta}^t - \dot{\theta}^p)\delta_{ij} + 2\mu(\dot{\epsilon}_{ij}^t - \dot{\epsilon}_{ij}^p), \\ \dot{\epsilon}_{ij}^t &= \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p, \quad \dot{\theta}^t = \dot{\epsilon}_{ii}^t, \\ \dot{\epsilon}_{ij}^t &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x^j} + \frac{\partial v_j}{\partial x^i} \right), \quad \dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{3}{2} \frac{\dot{\epsilon}_{ef}^p}{\sigma_{ef}} S_{ij}; \\ \dot{\epsilon}_{ef}^p &= \frac{\sqrt{2}}{3} [(\dot{\epsilon}_1^p - \dot{\epsilon}_2^p)^2 + (\dot{\epsilon}_2^p - \dot{\epsilon}_3^p)^2 + (\dot{\epsilon}_3^p - \dot{\epsilon}_1^p)^2]^{1/2}, \\ \sigma_{ef} &= \frac{1}{\sqrt{2}} [(S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2]^{1/2}, \\ f &= \frac{\alpha}{3} I_1(\sigma_{ij}) + J_2^{1/2}(\sigma_{ij}) - Y. \end{aligned} \quad (2)$$

$$\quad (3)$$

Макроскопические определяющие уравнения (2) записаны в скоростях в релаксационной форме и позволяют ввести в расчеты кинетические уравнения для задания скоростей неупругих деформаций, например как это сделано в работе [33] заданием дислокационной кинетики для $\dot{\epsilon}_{ef}^p$. В настоящих расчетах релаксация напряжений считалась мгновенной и осуществлялась приведением напряжений к заданной поверхности текучести. Эта методика подробно описана в [28].

Все численные решения задач о формировании и распространении фронтов деформации, включая как фронты неупругой деформации в металлах, так и фронты волн повреждений в хрупких средах, представленные в настоящей работе, получены на основе комбинированного подхода, объединяющего численный метод второго порядка точности решения задач упругопластического течения нагружаемой прочной среды (метод Уилкинса [44]) и дискретный метод клеточных автоматов [28].

В каждом конкретном случае система уравнений (1)–(3) дополняется соответствующими кинетиками, задающими скорости накопления в среде повреждений или неупругих деформаций, о чем будет сказано ниже.

В случае пластичных материалов, в которых наблюдаются медленные деформационные фронты (фронты Людерса), скорости неупругой деформации $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ или $\dot{\epsilon}_{ef}^p$ в (2) определялись либо снесением напряжений на известную поверхность текучести [45], либо заданием дислокационной кинетики пластического течения [33]. Представленные в настоящей работе расчеты деформационных фронтов в хрупких и квазихрупких материалах и геосредах определяют неупругую деформацию на основе определяющих уравнений В.Н. Николаевского [46] и модели накопления повреждений [45]. В модели квазихрупкой среды учтено влияние среднего давления P на сопротивление среды нагружению и процессы дилатансии.

Назначение клеточных автоматов — определить состояние среды на основе сложившихся к текущему времени параметров напряженно-деформированного состояния в каждой расчетной ячейке и ее соседях. Каж-

дая расчетная ячейка является бистабильным клеточным автоматом, который может находиться в двух устойчивых состояниях — упругом и неупругом (пластическом).

В предлагаемом подходе к решению задачи о формировании в среде деформационных фронтов была применена процедура, основанная на следующих физических идеях, определяющих условия перехода частицы из упругого состояния в неупругое (пластическое): 1) если напряжение в любой расчетной ячейке превышает теоретическую сдвиговую прочность материала, то он переходит в пластическое состояние; 2) в противном случае пластические сдвиги могут первоначально зародиться либо на свободной поверхности, либо на интерфейсе, например границе зерен в материале в пластическом состоянии или на любом интерфейсе, разделяющем структурные элементы среды, т.е. в ячейках, принадлежащих интерфейсам либо свободным поверхностям, если напряжение в них превысило некоторое заданное пороговое значение; 3) для продвижения сдвигов вглубь материала необходимо одновременное выполнение двух следующих условий: напряжения в ячейке, еще находящейся в упругом состоянии, должны превышать некоторое критическое значение (это условие является необходимым, но недостаточным); достаточным условием является достижение в любой соседней ячейке накопленной пластической (неупругой) деформации некоторого порогового значения; значение накапливаемой неупругой деформации ϵ_{ef}^p рассчитывается для каждой ячейки в соответствии с формулой

$$\Delta \epsilon_{ef}^p = \sum \dot{\epsilon}_{ef}^i \Delta t_i.$$

Таким образом, состояние каждого элемента определяется последовательно в соответствии с локально определенными правилами перехода 1–3, которые и управ-

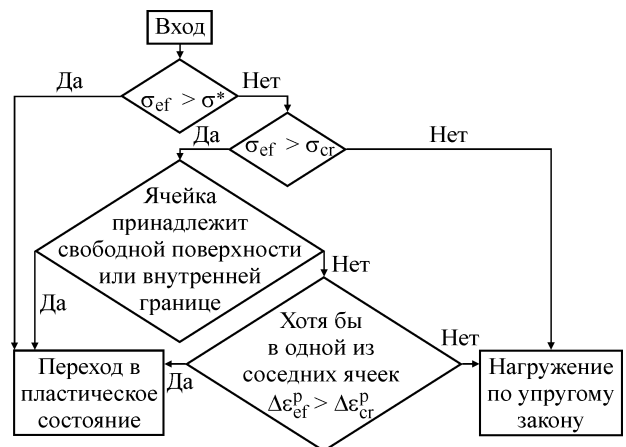


Рис. 1. Алгоритм перехода расчетной ячейки в пластическое состояние: σ_{cr} — критическое напряжение зарождения пластической деформации, σ^* — теоретическая сдвиговая прочность, $\Delta \epsilon_{cr}^p$ — критическое значение накопленной неупругой деформации



Рис. 2. Геометрическая модель нагружаемых образцов, 1 — область первоначального зарождения пластических сдвигов на свободной поверхности

ляют клеточными автоматами. Эти правила могут быть представлены в виде алгоритма на рис. 1.

3. Численное изучение динамики фронтов медленных движений в металлических образцах при их растяжении

Математическая модель описания процессов формирования и распространения деформационных фронтов была отработана на примере моделирования фронтов пластической деформации в образцах из сплавов алюминия при их нагружении растяжением. На рис. 2 показан плоский образец в форме двусторонней лопатки с захватами и рабочей частью $10 \times 2 \times 1$ см. Плотность материала 2.7 г/см^3 , модуль объемного сжатия 72.8 ГПа , модуль сдвига 27.7 ГПа , предел текучести 30 МПа .

В численных экспериментах скорость нагружения на 4–5 порядков выше, чем в соответствующих экспериментах. Это обусловлено как ограничениями, связанными с выбором шага по времени при решении задач деформирования в динамической постановке (он должен удовлетворять условию устойчивости Куранта), так и техническими возможностями компьютеров. Таким образом, масштаб отношения реального времени нагружения к расчетному обычно различается на эти 4–5 порядков в 2D- и 3D-расчетах для сеток порядка $400 \times 40 \times 20$ ячеек. В расчетах также выполняется условие «медленных процессов», т.е. скорость расчетного деформационного процесса является существенно бо-

лее низкой, чем скорость информационного обмена в среде. Действительно, скорость упругих волн напряжений составляет несколько км/с, при расчетной скорости нагружения порядка 1 м/с и общей деформации, например, в 1 % волны напряжений успеют пройти через образец 100–1000 раз и более, что обеспечит информационный обмен в среде. Таким образом, модельная среда в вычислительном эксперименте, как и в реальности, оказывается способной к самосогласованному кооперативному отклику на нагружение, в ней также достигается состояние самоорганизованной критичности.

На рис. 3 представлена диаграмма $X-t$ распространения расчетных фронтов пластической деформации при скорости движения захвата 1 м/с в сравнении с экспериментами работы [24]. В численном эксперименте положение фронта определялось по средней линии образца при скорости движения захвата 1 м/с . Как и в экспериментах, в расчетах фронты локализованной пластической деформации формируются вблизи захватов и распространяются по образцу со скоростями, пропорциональными скорости движения захватов. Они стекаются в область формирования будущей шейки (эта область отмечена на рис. 3, а пунктирными горизонтальными линиями).

Последовательные картины пространственно-временного распределения фронтов пластической деформации в образце в течение временных интервалов, отмеченных на рис. 3, а вертикальными штриховыми линиями, приведены на рис. 4. Данные о скоростях фронтов неупругой деформации в образце на рис. 4 представлены в табл. 3. Так как величины изменения деформаций, по которым устанавливались координаты фронта, малы, скорости фронтов определялись с некоторой погрешностью и вычислялись по нескольким точкам (до 10). Для совокупности вычисленных скоростей определялся коэффициент корреляции, отражающий точность определения скорости фронта.

Для сравнения с физическим экспериментом были рассчитаны приведенные скорости деформационных

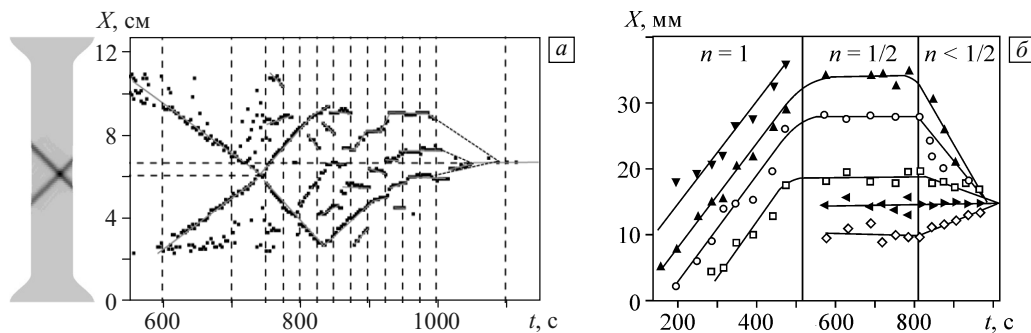


Рис. 3. Пространственно-временное распределение фронтов локализованной пластической деформации: образец на стадии активного формирования шейки (а); движение доменов локализованной пластичности в ванадиевом сплаве на стадиях линейного деформационного упрочнения ($n = 1$), параболической ($n = 1/2$) и предразрушения ($n < 1/2$) [24] (б)

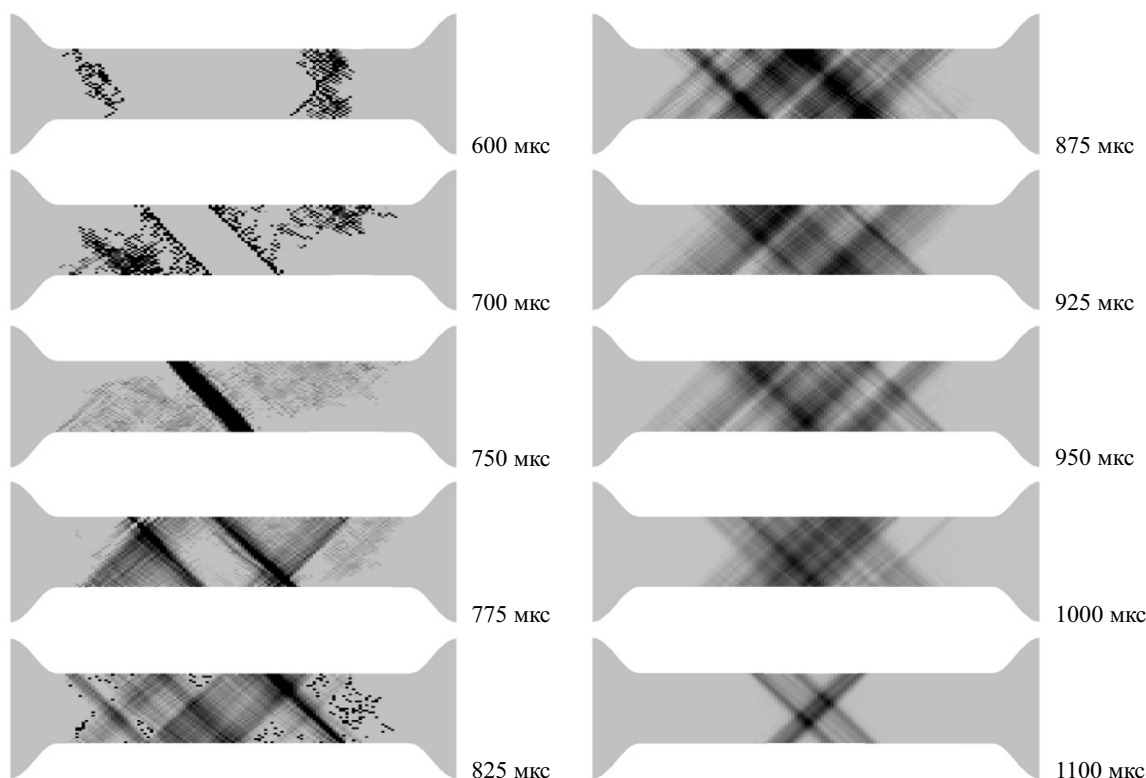


Рис. 4. Последовательные картины пространственно-временного распределения фронтов неупругой деформации в образце

фронтов, учитывающие эффект сжатия времени в расчетах. Если разделить скорость движения захвата в численном эксперименте на скорость в физическом, то по-

Таблица 3

Расчетная и приведенная расчетная скорость деформационного фронта в численном эксперименте (скорость автоволн локализованной деформации из данных физического эксперимента [25] $11 \cdot 10^{-5}$ м/с)

Скорость фронта, м/с	Коэффициент корреляции	Приведенная к экспериментальным скоростям нагружения скорость деформационного фронта, м/с
214.8	0.971	$71 \cdot 10^{-5}$
223.9	0.991	$74 \cdot 10^{-5}$
322.5	0.990	$107 \cdot 10^{-5}$
344.0	0.996	$114 \cdot 10^{-5}$
451.7	0.982	$150 \cdot 10^{-5}$
345.3	0.964	$115 \cdot 10^{-5}$
260.0	0.947	$86 \cdot 10^{-5}$
110.6	0.823	$36 \cdot 10^{-5}$
196.4	0.949	$65 \cdot 10^{-5}$
244.0	0.992	$81 \cdot 10^{-5}$
389.2	0.989	$129 \cdot 10^{-5}$
78.4	0.738	$26 \cdot 10^{-5}$
64.6	0.861	$21 \cdot 10^{-5}$

лучим коэффициент сжатия расчетного времени. Скорость фронта в численном эксперименте надо уменьшить в соответствии с полученным масштабом времени (в данных расчетах он равен $3 \cdot 10^5$). Приведенные расчетные скорости волновых фронтов представлены в табл. 3 в сравнении с экспериментами работы [25]. Из сравнения численного и физического эксперимента видно, что расчетные скорости распространения деформационных фронтов примерно на порядок выше экспериментальных. Этот результат можно считать удовлетворительным для тестовых расчетов, если принять во внимание существенное завышение скорости деформирования в расчетах за счет сжатия времени и нелинейности процесса накопления неупругой деформации, а также отсутствие в тестовых расчетах релаксации напряжений за фронтом деформационной волны.

Пространственно-временное распределение фронтов локализованной деформации для случая движения подвижного захвата 2 м/с в численном эксперименте показано на рис. 5, соответствующие картины распределения фронтов неупругой деформации для различных последовательных времен, отмеченных на рис. 5 вертикальными линиями, представлены на рис. 6.

На последовательных картинах распределения скоростей пластической деформации жирными линиями нанесены основные наблюдаемые фронты локализованной деформации, пунктирными линиями отмечается их положение, а стрелками указано направление движения каждого фронта неупругой деформации. Начиная с

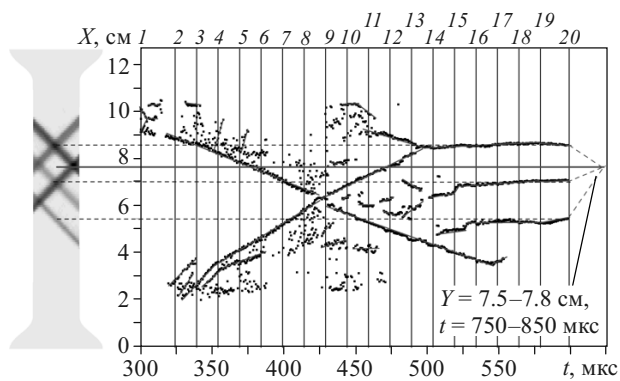


Рис. 5. Пространственно-временное распределение фронтов локализованной деформации в численном эксперименте

кадра 14 на рис. 6, скорости фронтов падают практически до нуля, образуются стационарные полосы локализованного сдвига. Они отмечены противоположно на-

правленными стрелками. Более слабые деформационные фронты (показаны оттенками серого цвета) продолжают стекаться в эти области формирующегося макроскопического разрушения. Таким образом, медленные движения (деформационные автоволны) активно участвуют в формировании очагов разрушения.

Была численно изучена зависимость скорости распространения деформационных фронтов от скорости нагружения (от скорости движения захвата), а также от величины порога $\Delta \epsilon_{cf}^p$, при превышении которого фронт волны деформации может охватить соседнюю ячейку при условии, что в ней уже достигнут соответствующий уровень напряжений (рис. 7). Как и в экспериментах [24], скорость фронта деформации линейно зависит от скорости нагружения для всех уровней пороговой деформации $\Delta \epsilon_{cf}^p$.

Скорость движения фронта тем больше, чем ниже значение пороговой деформации (рис. 7). Действитель-

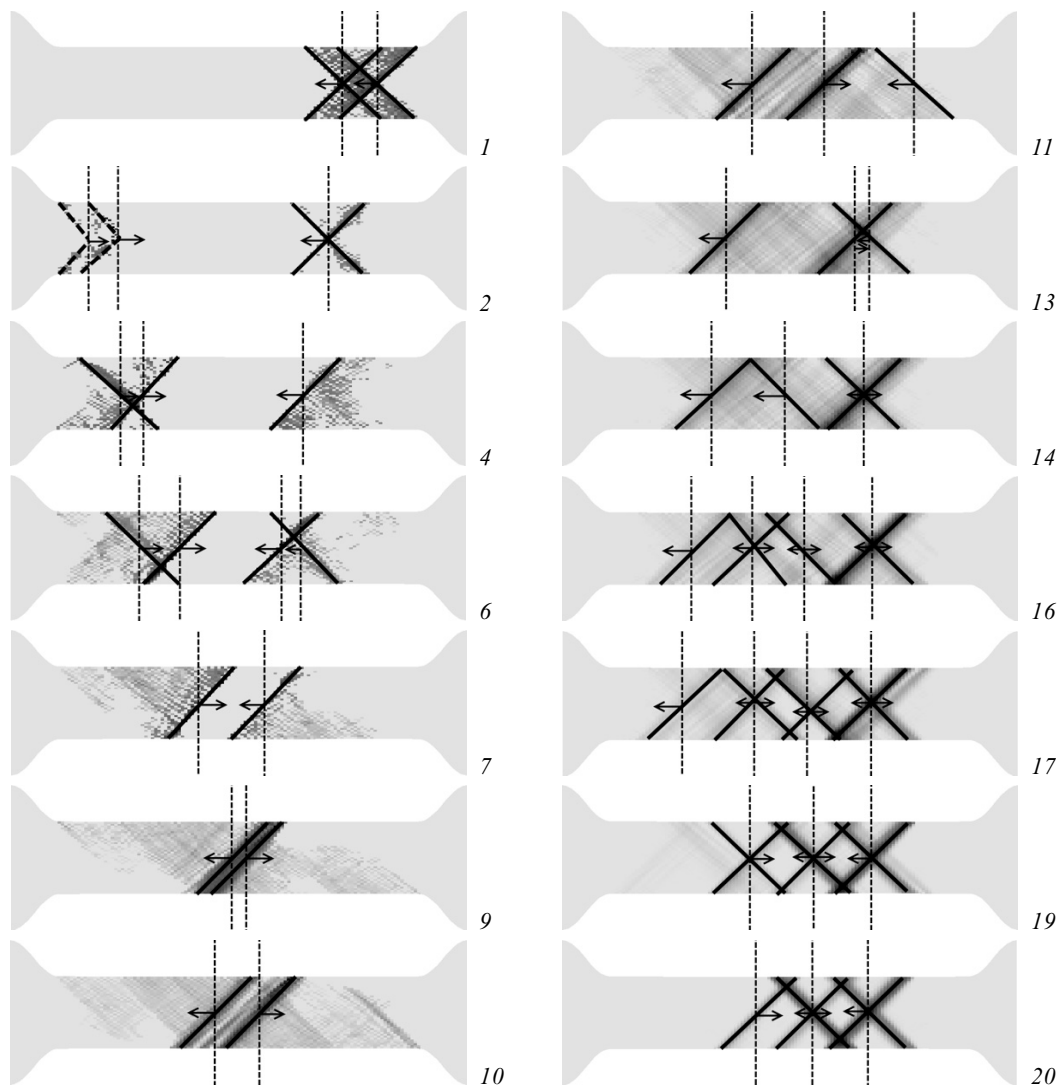


Рис. 6. Распределение фронтов неупругой деформации для различных последовательных времен 1–20

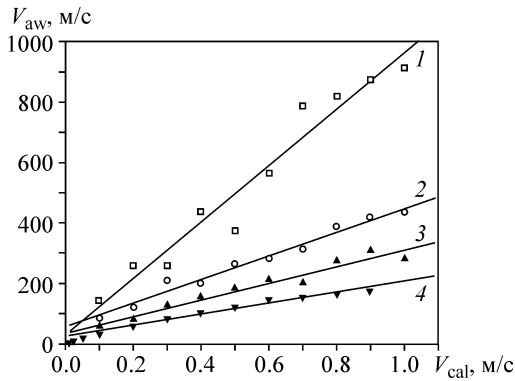


Рис. 7. Зависимость скорости медленных деформационных волн V_{aw} от скорости движения захвата V_{cal} при различных пороговых значениях накопленной неупругой деформации $\Delta \epsilon_{ct}^p = 0.0003$ (1), 0.0005 (2), 0.0007 (3), 0.0010 (4)

но, чем ниже значение пороговой деформации, тем быстрее она накопится и передаст возмущение в соседнюю ячейку. Следовательно, скорость распространения возмущения по среде будет выше.

4. Моделирование фронтов локализованной неупругой деформации в квазихрупких образцах при сжатии и в геосредах

Были также выполнены расчеты медленных деформационных фронтов в образцах прочной квазихрупкой среды при ее сжатии (рис. 8). Слева показано распределение локализованной деформации в образце на заключительной стадии, когда фронты остановились и образовались полосы локализованного сдвига. В табл. 4 приведены параметры фронтов деформации, отмеченных цифрами 1–18 на рис. 8.

Динамика фронтов показана на рис. 9. Их приведенные скорости оказались в 10–20 раз выше, чем в экспериментах. Такое завышение можно объяснить, как и при растяжении, отсутствием релаксации напряжений в тестовых расчетах.

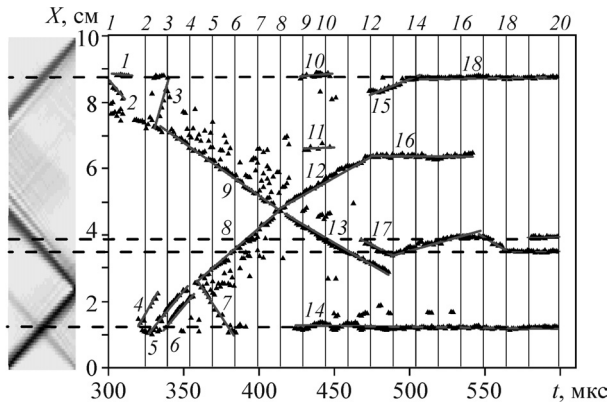


Рис. 8. Пространственно-временное распределение фронтов локализованной деформации

На последовательных картинах распределения скоростей неупругой деформации жирными линиями отмечены основные наблюдаемые фронты локализованной деформации, пунктирными линиями — их положение на графике пространственно-временного положения фронтов, стрелки указывают направление движения каждого фронта неупругой деформации. Для стационарных фронтов, в которых наблюдаются незначительные отклонения фронта от его положения, используются противоположно направленные стрелки. Это не относится к кадру 8, т.к. в этом случае фронты локализованной деформации проникают друг через друга как солитоны. Возможно, это взаимное проникновение только кажущееся. В точке встречи фронтов за счет возникновения концентрации напряжений генерируются новые медленные деформационные фронты. Сначала фронты движутся навстречу друг другу (кадры 3–7), встречаются (7) и расходятся (9, 10).

Были также выполнены тестовые расчеты, моделирующие процесс активизации разлома медленными деформационными фронтами. На рис. 10 показана схема геосреды, состоящей из двух блоков 1 и 2 квазихрупкой геосреды, по физико-механическим параметрам отвечающим параметрам осадочного чехла, и разлома 3, прочностные характеристики которого в 5 раз ниже, чем в блоках 1, 2.

Таблица 4

Расчетная и приведенная расчетная скорость деформационного фронта в численном эксперименте

№	Скорость деформационного фронта, м/с	Приведенная к экспериментальным скоростям нагружения скорость деформационного фронта, м/с
1	29 ± 14	4.8 · 10 ⁻⁵
2	509 ± 64	84.8 · 10 ⁻⁵
3	2247 ± 89	374.5 · 10 ⁻⁵
4	702 ± 70	117.0 · 10 ⁻⁵
5	503 ± 24	83.8 · 10 ⁻⁵
6	502 ± 19	83.6 · 10 ⁻⁵
7	555 ± 34	92.5 · 10 ⁻⁵
8	377 ± 7	62.8 · 10 ⁻⁵
9	293 ± 5	48.8 · 10 ⁻⁵
10	41 ± 23	6.8 · 10 ⁻⁵
11	78 ± 40	13.0 · 10 ⁻⁵
12	264 ± 4	44.0 · 10 ⁻⁵
13	245 ± 3	40.8 · 10 ⁻⁵
14	0.1 ± 0.3	0.016 · 10 ⁻⁵
15	134 ± 10	22.3 · 10 ⁻⁵
16	2 ± 3	0.3 · 10 ⁻⁵
17	227 ± 15	37.8 · 10 ⁻⁵
18	88 ± 5	14.6 · 10 ⁻⁵

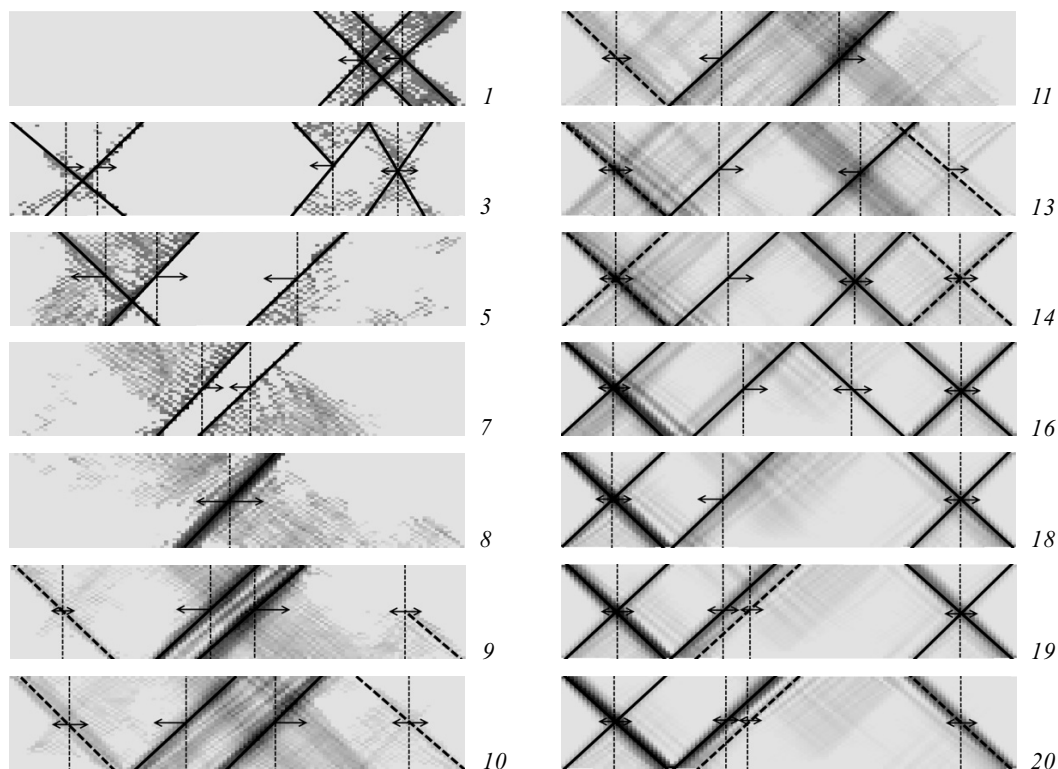


Рис. 9. Динамика фронтов локализованной неупругой деформации в модельном образце при сжатии

Такая модельная среда нагружалась сжатием. Скорость сжатия составляла 0.2 м/с при размерах всего геоблока 1500×1000 м. Такое нагружение обеспечило среднюю деформацию геоблока 1 % за расчетное время 60 с. За это время сформировавшаяся на границе разлома *A* деформационная волна пробежала весь разлом. Таким образом, расчетная скорость деформационной волны в разломе приблизительно равна $V = 1200 \text{ м} / 60 \text{ с} = 20 \text{ м/с}$. Согласно данным работ [2, 47, 48], скорости деформационных волн в разломах по наблюдениям быстрой миграции сейсмической активности оценены в 1–10 км/сут $\approx 1.16 \cdot 10^{-2} \dots 11.6 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$. Подобные наблюдения были сделаны на обширных территориях перед и после сильных землетрясений на основе фиксации радоновых, электрокинетических и гидрогеодинамических сигналов. К подобным оценкам приводят натурные эксперименты по возбуждению волн деформаций и напряжений при вибрационном и взрывном инициировании подвижек в зоне разлома [13]. Если принять коэффициент сжатия расчетного времени по отношению к реальному равным ≈ 500 для данного пространственно-временного масштаба, то получим оценку скорости в реальном процессе равной $4 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$. Эта оценка очень хорошо коррелирует с данными наблюдений. Динамика для двух случаев ориентации разлома по отношению к направлению сжатия показана на рис. 11.

Таким образом, во всех расчетах, как и в наблюдениях, мы получаем целый спектр медленных деформационных фронтов разных масштабов, которые движутся с различными скоростями. Скорости расчетных автоволн пропорциональны скоростям подвижки на разломе соответствующего масштаба. В расчетах этот коэффициент пропорциональности $K_{\text{cal}} = V_{\text{aw}} / V_f$ оказался равным 180–200, в то время как в экспериментах он приблизительно на порядок меньше $K_{\text{exp}} \approx 20$ [24].

Основная причина такого расхождения видится в отсутствии релаксации напряжений при накоплении поро-

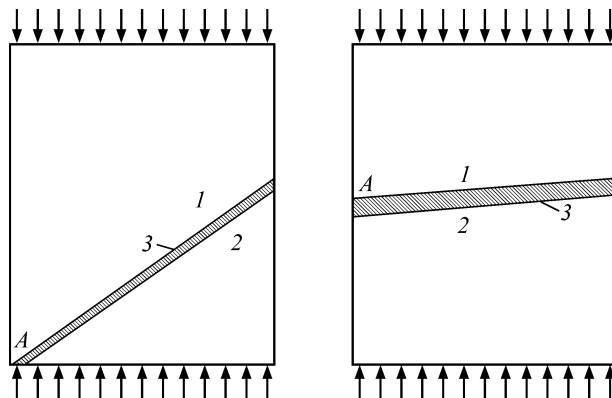


Рис. 10. Схемы нагружаемой геосреды

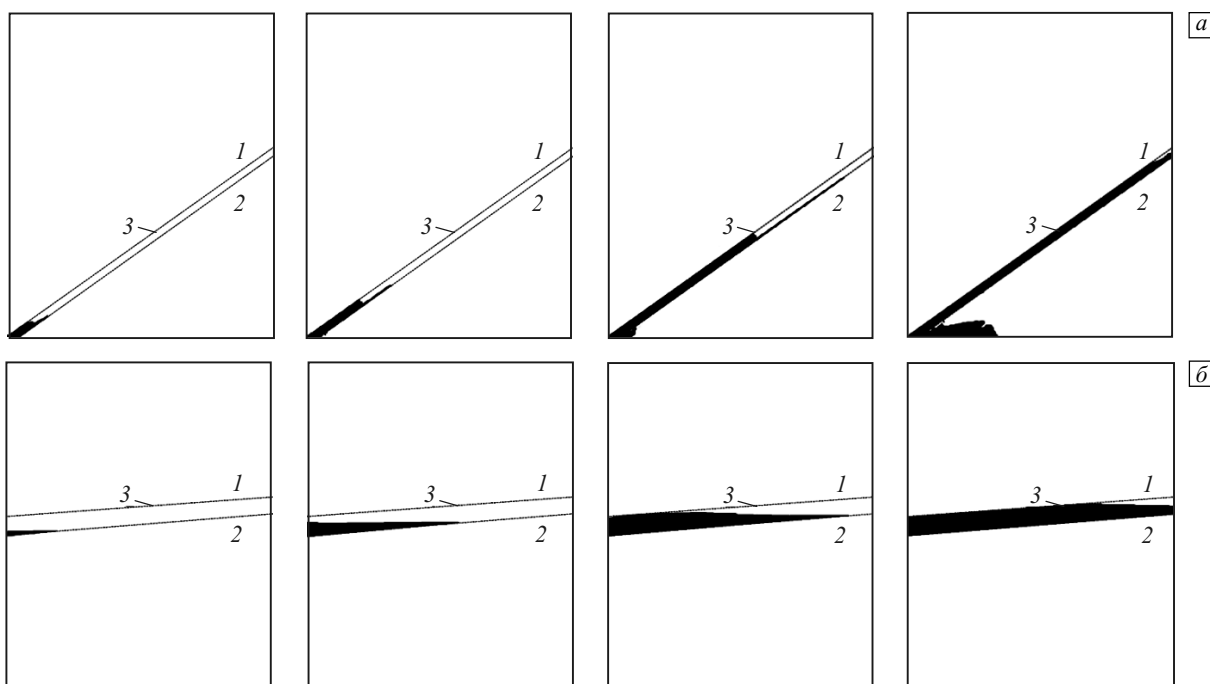


Рис. 11. Динамика фронта неупругой деформации в наклонном (а) и пологом разломе (б) при сжатии геосреды

говой неупругой деформации в частицах нагружаемой среды. Для согласования расчетных скоростей медленных деформационных фронтов с экспериментальными значениями были выполнены тестовые расчеты, в которых была учтена релаксация напряжений в каждой частице нагружаемой среды после достижения в ней предела текучести в процессе дальнейшего накопления деформации до достижения пороговой величины $\delta\epsilon$. На рис. 12 приведена схема такой σ – ϵ -диаграммы для мягкой стали ($Y_{\text{тек}} = 270$ МПа). В расчетах варьировались значения величины релаксации напряжений $\Delta\sigma$ и площадки текучести $\Delta\epsilon$ перед процессом деформационного упрочнения.

На рис. 13 показана динамика сформировавшихся волновых фронтов, на рис. 14 — траектории движения деформационных фронтов, на рис. 15 — усредненная по всему образцу σ – ϵ -диаграмма. Колебания напряже-

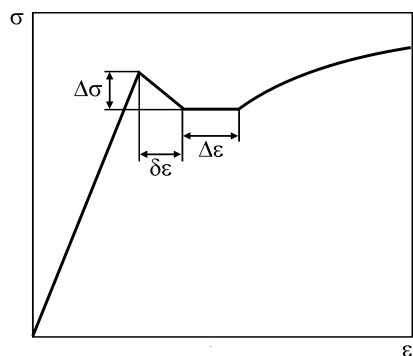


Рис. 12. Схема σ – ϵ -диаграммы с порогом $\Delta\sigma$ и $\Delta\epsilon$

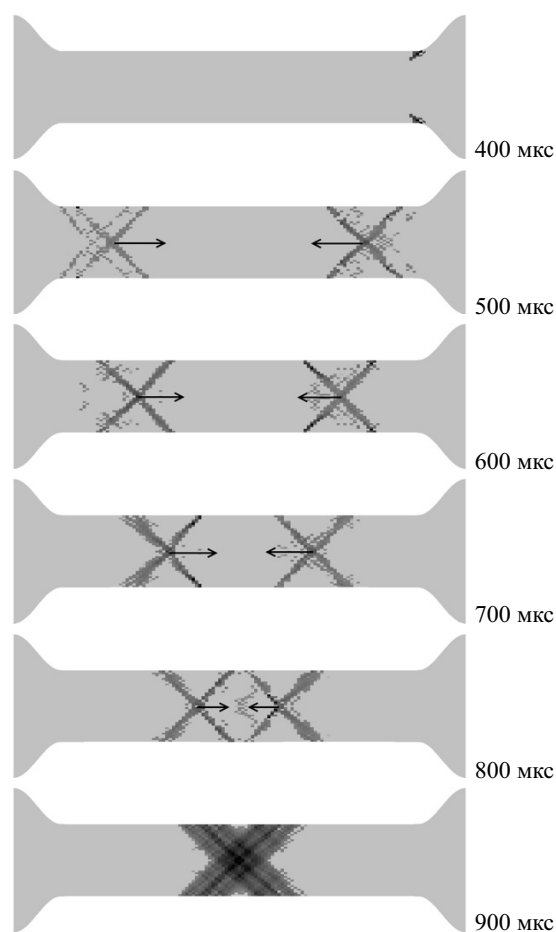


Рис. 13. Положение фронтов медленных деформационных волн в образце

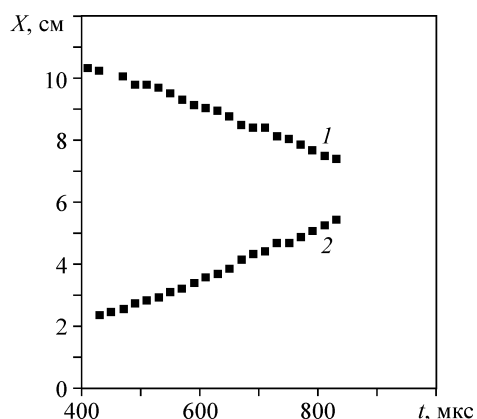


Рис. 14. Траектории движения деформационных фронтов $V = 79 \pm 2$ (1) и 72 ± 2 м/с (2)

ний на диаграмме (рис. 15) после достижения предела текучести обусловлены в данном случае формированием и распространением по образцу деформационных фронтов. Скорости деформационных фронтов 1 и 2, движущихся от правого и левого захватов (рис. 14), оказались равными 79 и 72 м/с при значениях порогов $\Delta\sigma \approx 10$ МПа и $\Delta\epsilon = 0.001$.

Отношение скорости автоволны к скорости движения захвата уменьшилось почти в 3 раза по сравнению с моделью без учета релаксации напряжений. При величинах этих порогов $\Delta\sigma \approx 40$ МПа и $\Delta\epsilon = 0.001$ значения скоростей деформационных автоволн оказались равными 24 и 23 м/с при скорости движения захвата 1 м/с, что совпадает с данными экспериментов [24], т.е. $V_{aw}/V_{зах} \approx 20$. Результаты этих расчетов показаны на рис. 16–18. Таким образом, варьируя порог $\Delta\epsilon$, управляющий передачей импульса от одного клеточного автомата к другому, а также пороги $\Delta\sigma$ и $\Delta\epsilon$, можно управлять скоростью автоволны.

5. Заключение

Представлен обзор исследований медленных деформационных фронтов, возбуждаемых в геосредах и в зонах разломов. Высказана и обоснована гипотеза, что

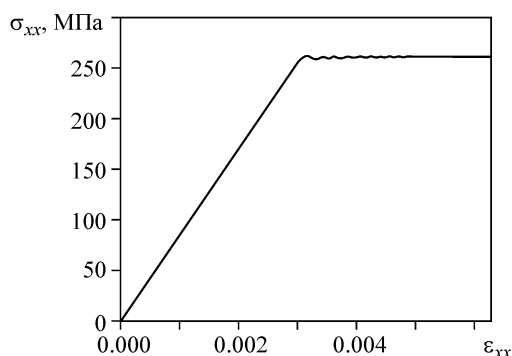


Рис. 15. Усредненная по образцу σ - ϵ -диаграмма

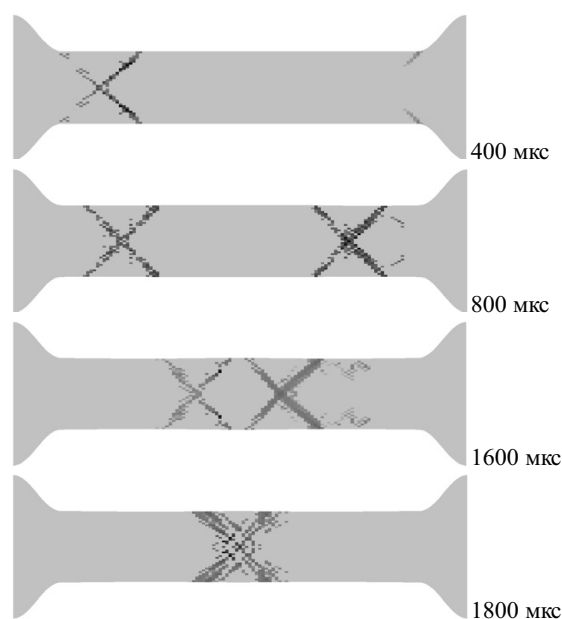


Рис. 16. Положение фронтов медленных деформационных волн в образце

все наблюдаемые в твердых телах и геосредах возмущения напряженно-деформированного состояния, распространяющиеся в форме медленных деформационных фронтов, включая фронты пластической деформации в металлах, фронты в геосредах и разломах разных масштабов, имеют общую физическую природу. Эти волновые возмущения рассматриваются в работе как автоволновые процессы. Деформационные автоволны возникают вследствие потери устойчивости и параметрического возбуждения нагруженной упругопластической среды. Таким образом, автоволны неупругой деформации разных масштабов в прочных средах есть результат кооперативного отклика нагруженной активной среды на различного рода динамические возмущения напряженно-деформированного состояния. В частности такими возмущениями в геосредах являются различного рода подвижки на границах блоков и тектонических

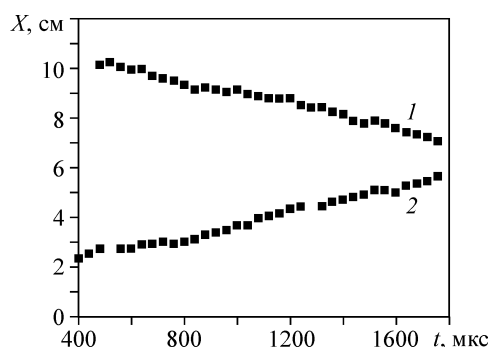
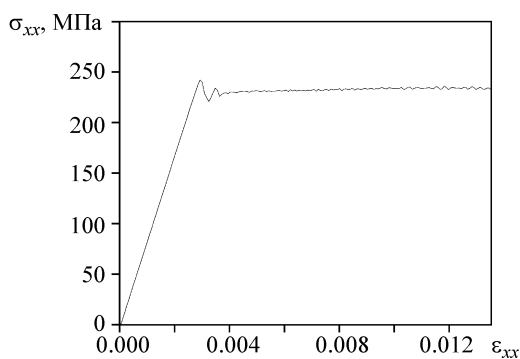


Рис. 17. Траектории движения деформационных фронтов $V = 23 \pm 1$ (1) и 24 ± 1 м/с (2)

Рис. 18. Усредненная по образцу σ – ε -диаграмма

плит. Процессы формирования в нагружаемой прочной среде деформационных автоволн являются процессами самоорганизации в твердых телах как нелинейных динамических системах, обладающих свойством самоорганизанной критичности. Эти процессы развиваются самоподобным образом на разных масштабах. По этой причине в многомасштабной блочной среде наблюдается большое разнообразие медленных автоволновых возмущений. Широкий спектр скоростей их распространения объясняется различиями интенсивностей динамических возмущений, генерирующих деформационные автоволны в среде. Показано, что скорость автоволны пропорциональна скорости такого динамического воздействия. Предложена математическая модель для описания медленных автоволновых возмущений в прочных средах в условиях их активного нагружения. Модель является связанной, описывает как обычные волны напряжений, распространяющиеся со скоростью звука, так и медленные деформационные возмущения, скорости которых на многие порядки ниже скоростей звука.

В работе представлены расчеты автоволн деформации, возникающих в малых образцах пластичных материалов при их растяжении, смоделированы медленные деформационные фронты в квазихрупкой геосреде при ее нагружении сжатием, а также автоволновые возмущения, движущиеся по разлому. Достигнуто согласие параметров расчетных автоволновых возмущений с наблюдениями.

Данные исследования выполнены в рамках Программы фундаментальных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы.

Литература

1. Гольдин С.В., Юшин В.И., Ружич В.В., Смекалкин О.П. Медленные движения миф или реальность? // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: Матер. IX Межд. школы-семинара, Красноярск, 2002. – Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2002. – С. 213–220.
2. Быков В.Г. Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. – 2005. – Т. 46. – № 11. – С. 1176–1190.
3. Губерман Ш.А. D-волны и землетрясения. Теория и анализ сейсмических наблюдений // Вычислительная сейсмология. – 1979. – № 12. – С. 158–188.
4. Невский М.В., Фьюз Г.С., Морозова Л.А. Распространение деформационных возмущений: Наблюдения и модели // Физические основы сейсмического метода (нетрадиционная геофизика). – М.: Наука, 1991. – С. 39–56.
5. Невский М.В., Артамонов А.М., Ризниченко О.Ю. Волны деформаций и энергетика сейсмичности // Докл. АН СССР. – 1991. – Т. 318. – № 2. – С. 316–320.
6. Быков В.Г. Волны активизации разломов земной коры // Тихоокеанская геология. – 2000. – Т. 19. – № 1. – С. 104–108.
7. Быков В.Г. Нелинейные волновые процессы в геологических средах. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 190 с.
8. Маламуд А.С., Николаевский В.Н. Периодичность Памиро-Гиндукушских землетрясений и тектонические волны в субдуктированных литосферных плитах // Докл. АН СССР. – 1983. – Т. 269. – С. 1075–1078.
9. Маламуд А.С., Николаевский В.Н. Цикличность сейсмотектонических событий на краях Индийской литосферной плиты // Докл. АН СССР. – 1985. – Т. 283. – № 6. – С. 1333–1337.
10. Маламуд А.С., Николаевский В.Н. Активизация мантийного разлома под Гиндукушем в 1983–1985 гг. // Докл. АН СССР. – 1989. – Т. 308. – № 2. – С. 324–328.
11. Псахье С.Г., Ружич В.В., Смекалкин О.П., Шилько Е.В. Режимы отклика геологических сред при динамических воздействиях // Физ. мезомех. – 2001. – Т. 4. – № 1. – С. 67–71.
12. Кузьмин Ю.О. Деформационные автоволны в разломных зонах // Физика Земли. – 2012. – № 1. – С. 3–19.
13. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломов и парадоксы скоростей деформаций // Физика Земли. – 2013. – № 5. – С. 28–46.
14. Востриков В.И., Ружич В.В., Федеряев О.В. Система мониторинга обвалоопасных участков бортов глубоких карьеров // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2009. – № 6. – С. 118–127.
15. Левина Е.А., Ружич В.В. Миграция землетрясений как проявление волновых деформаций твердой оболочки Земли // Триггерные эффекты в геосистемах: Матер. Всерос. семинара-совещания. – М.: Геос, 2010. – С. 71–78.
16. Опарин В.Н., Саширин А.Д., Леонтьев А.В. и др. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в области сильного техногенного воздействия / Под ред. Н.Н. Мельникова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – 632 с.
17. Левина Е.А., Ружич В.В. Способ изучения миграции сейсмической активности с помощью построения пространственно-временных диаграмм // Геодинамика и тектонофизика. – 2015. – № 2. – С. 225–240.
18. Шерман С.И., Горбунова Е.А. Волновая природа активизации разломов Центральной Азии на базе сейсмического мониторинга // Физ. мезомех. – 2008. – Т. 11. – № 1. – С. 115–122.
19. Горбунова Е.А., Шерман С.И. Медленные деформационные волны в литосфере: фиксирование, параметры, геодинамический анализ (Центральная Азия) // Тихоокеанская геология. – 2012. – Т. 31. – № 1. – С. 18–25.
20. Мухамедиев Ш.А., Грачев А.Ф., Юнга С.Л. Нестационарный динамический контроль сейсмической активности платформенных областей со стороны срединно-океанических хребтов // Физика Земли. – 2008. – № 1. – С. 12–22.
21. Губерман Ш.А. О некоторых закономерностях возникновения землетрясений // ДАН СССР. – 1975. – Т. 224. – № 3. – С. 573–576.
22. Жадин В.В. Пространственно-временные связи сильных землетрясений // Физика Земли. – 1984. – № 1. – С. 34–38.
23. Андросов И.В., Жадин В.В., Поташиников И.А. Пространственно-временная структура миграции землетрясений и сейсмические пояса // ДАН СССР. – 1989. – Т. 306. – № 6. – С. 1339–1342.
24. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Бараникова С.А. Физика макролокализации пластического течения. – Новосибирск: Наука, 2008. – 328 с.

25. Зуев Л.Б. О волновом характере пластического течения. Макроскопические автоволны локализации деформации // Физ. мезомех. – 2006. – Т. 9. – № 3. – С. 47–54.
26. Данилов В.И., Баранникова С.А., Зуев Л.Б. Автоволны локализованной деформации на начальных стадиях пластического течения монокристаллов // ЖТФ. – 2003. – Т. 73. – № 11. – С. 69–75.
27. Макаров П.В., Романова В.А. О новом критерии пластического течения при моделировании деформационных процессов на мезоуровне // Математическое моделирование. – 2000. – Т. 12. – № 11. – С. 91–101.
28. Макаров П.В., Романова В.А., Балохонов Р.Р. Моделирование неоднородной пластической деформации с учетом зарождения локализованных пластических сдвигов на границах раздела // Физ. мезомех. – 2001. – Т. 4. – № 5. – С. 29–39.
29. Пeryшкин А.Ю., Макаров П.В. Моделирование медленных деформационных фронтов в прочных средах. Их роль в формировании критических состояний // Наука современности-2015: Матер. Межд. научн. конф., Москва, 29–30 января 2015 г. – Киров: МЦНИП, 2015. – С. 32–40.
30. Зуев Л.Б., Баранникова С.А., Надежкин М.В. О медленных волновых процессах в горных породах // Матер. Межд. научн. конф. молодых ученых «Перспективные материалы в строительстве и технике (ПМСТ-2014)». – Томск, 2014. – С. 582–589.
31. Макаров П.В. Математическая теория эволюции нагружаемых твердых тел и сред // Физ. мезомех. – 2008. – Т. 11. – № 3. – С. 19–35.
32. Макаров П.В. Самоорганизованная критичность деформационных процессов и перспективы прогноза разрушения // Физ. мезомех. – 2010. – Т. 13. – № 5. – С. 97–112.
33. Макаров П.В., Еремин М.О. Явление прерывистой текучести как базовая модель исследования неустойчивостей деформационных процессов // Физ. мезомех. – 2013. – Т. 16. – № 4. – С. 109–128.
34. Макаров П.В. Эволюционная природа деструкции твердых тел и сред // Физ. мезомех. – 2007. – Т. 10. – № 3. – С. 23–38.
35. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Стефанов Ю.П. и др. Нелинейная механика геоматериалов и геосред. – Новосибирск: Академич. изд-во «Гео», 2007. – 235 с.
36. Макаров П.В. Эволюционная природа блочной организации геоматериалов и геосред. Универсальный критерий фрактальной делимости // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48. – № 7. – С. 724–746.
37. Ружич В.В., Трусков В.А., Черных Е.Н., Смекалкин О.П. Современные движения в зонах разломов Прибайкалья и механизмы их инициирования // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40. – № 3. – С. 360–372.
38. Невский М.В., Морозова Л.А., Журба М.Н. Эффект распространения длиннопериодных деформационных возмущений // Докл. АН СССР. – 1997. – Т. 296. – № 5. – С. 1090–1094.
39. Нерсесов И.Л., Лукк А.А., Журавлев В.И., Галаганов О.Н. О распространении деформационных волн в земной коре юга Средней Азии // Физика Земли. – 1990. – № 5. – С. 102–112.
40. Лукк А.А., Нерсесов И.Л. Вариации во времени различных параметров сейсмотектонического процесса // Физика Земли. – 1982. – № 3. – С. 10–27.
41. Гамбурицева Н.Г., Люкэ Е.И., Николаевский В.Н. и др. Периодические вариации параметров сейсмических волн при просвечивании литосферы мощными взрывами // Докл. АН СССР. – 1982. – Т. 266. – № 6. – С. 1349–1353.
42. Родионов В.Н., Адушкин В.В., Костюченко В.Н. и др. Механический эффект подземного взрыва. – М.: Недра, 1971. – 224 с.
43. Абдувалиев А.К., Войтов Г.И., Рудаков В.П. Радонный предвестник некоторых сильных землетрясений Средней Азии // ДАН. – 1986. – Т. 291. – № 4. – С. 924–927.
44. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967. – С. 212–263.
45. Макаров П.В., Еремин М.О. Модель разрушения хрупких и квази-хрупких материалов и геосред // Физ. мезомех. – 2013. – Т. 16. – № 1. – С. 5–26.
46. Гарагаи И.А., Николаевский В.Н. Неассоциированные законы течения и локализации пластической деформации // Успехи механики. – 1989. – Т. 12. – № 1. – С. 131–183.
47. Hill D.P., Johnston M.J.S., Langbein J.O., Bilham R. Response of Long Valley caldera to the M = 7.3 Landers, California, Earthquake // J. Geophys. Res. B. – 1995. – V. 100. – No. 7. – P. 12985–13005.
48. Барабанов В.Л., Гриневский Л.О., Беликов В.М., Ишанкулиев Г.Л. О миграции коровых землетрясений // Динамические процессы в геофизической среде. – М.: Наука, 1994. – С. 149–167.

Поступила в редакцию
12.08.2015 г.

Сведения об авторах

Макаров Павел Васильевич, д.ф.-м.н., проф. ТГУ, зав. лаб. ИФПМ СО РАН, pvm@ispms.tsc.ru
 Пeryшкин Алексей Юрьевич, прогн. ИФПМ СО РАН, alexb700@yandex.ru