



<https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0370>

SLOW DEFORMATION FRONTS: MODEL AND FEATURES OF DISTRIBUTION

P. V. Makarov^{1,2}, Yu. A. Khon¹, A. Yu. Peryshkin¹

¹*Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of RAS, Tomsk, Russia*

²*Tomsk State University, Tomsk, Russia*

Abstract: Our study aimed at investigating the origin and development of ‘slow’ movements in a solid body/medium under loading and studying the role of such movements in the occurrence of critical states, i.e. sources of destruction in a stable solid medium. Computerized modeling was conducted to simulate the evolution of the stress-strain state and the formation of slow deformation waves in a loaded medium. We have developed and justified a mathematical model of the loaded elastoplastic medium, which demonstrates the joint generation and propagation of ordinary stress waves (propagating with the velocity of sound) and slow deformation waves of the inelastic nature. The propagation rates of the latter are 5–7 orders of magnitude lower than the velocity of sound. The features of slow deformation wave propagation in the solid media are investigated. In the model, slow deformation waves interact under certain conditions as solitons and penetrate each other. Considering the properties, they are similar to both solitons satisfying the solutions of the non-linear Korteweg – de Vries equation and kinks satisfying the solutions of the sin-Gordon equation. Slow deformation fronts are actively involved into the formation of sources of destruction and provide an effective mechanism for the transfer and redistribution of energy in the loaded medium.

Key words: geomedium; slow deformation waves; solitons; numerical simulation

RESEARCH ARTICLE

Handling Editor: K.Zh. Seminsky

Received: April 20, 2018

Revised: August 9, 2018

Accepted: August 22, 2018

For citation: Makarov P.V., Khon Yu.A., Peryshkin A.Yu., 2018. Slow deformation fronts: model and features of distribution. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (3), 755–769. doi:10.5800/GT-2018-9-3-0370.

Для цитирования: Макаров П.В., Хон Ю.А., Перышкин А.Ю. Медленные деформационные фронты. Модель и особенности распространения // *Геодинамика и тектонофизика*. 2018. Т. 9. № 3. С. 755–769. doi:10.5800/GT-2018-9-3-0370.

МЕДЛЕННЫЕ ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ФРОНТЫ. МОДЕЛЬ И ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

П. В. Макаров^{1,2}, Ю. А. Хон¹, А. Ю. Перышкин¹

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

² Томский государственный университет, Томск, Россия

Аннотация: Цель работы заключалась в разработке модельных представлений о природе «медленных» движений в нагружаемых твердых телах и средах и в изучении их роли в формировании критических состояний – очагов разрушения в прочной среде. Методика исследований – численное моделирование эволюции напряженно-деформированного состояния и формирования в нагружаемой среде медленных волн деформации. Разработан и обоснован вариант математической модели описания процессов совместной генерации и распространения в нагружаемых упругопластических средах как обычных волн напряжений, распространяющихся со скоростями звука, так и медленных деформационных волн неупругой природы, скорости которых на 5–7 порядков ниже скоростей звука. Исследованы особенности распространения медленных деформационных волн в прочных средах. Показано, что медленные деформационные волны при определенных условиях взаимодействуют как солитоны, проникая друг через друга. Их свойства сходны со свойствами как солитонов, получаемых решениями нелинейного уравнения Кортевега – де-Фриза, так и кинков – решений уравнения \sin -Гордона. Показано, что медленные деформационные фронты активно участвуют в формировании очага разрушения, являясь эффективным механизмом переноса и перераспределения энергии в нагружаемой среде.

Ключевые слова: геосреда; медленные деформационные волны; солитоны; численное моделирование

1. ВВЕДЕНИЕ

Практические и социально значимые проблемы катастрофических разрушений различных объектов, включая проблемы прогноза землетрясений, а также прогноза опасных динамических явлений в горных массивах с выработками, связаны с решением фундаментальных задач по установлению механизмов формирования очага разрушения, установлению механизмов эффективного переноса энергии в нагружаемой среде, а также с решением проблемы миграции деформационной активности и сейсмическими активизациями, которые в совокупности образуют комплексную научную проблему развития деформационного процесса, завершающегося катастрофическим разрушением.

Успешное решение этих важных проблем механики деформируемого твердого тела (МДТТ), в частности геомеханики и геодинамики, связано с разработкой фундаментальной теории эволюции НДС в нагружаемой прочной среде, охватывающей спектр ключевых процессов деформации и разрушения, включая процессы генерации медленных деформационных возмущений, способных эффективно переносить и перераспределять в нагружаемой среде энергию.

До настоящего времени остаются невыясненными общие механизмы формирования очагов

крупномасштабных разрушений, в том числе землетрясений. Не вполне понятны триггерные механизмы возбуждения сейсмической активности. Неясны причины и конкретные механизмы пространственно-временной миграции деформационной активности, в том числе сейсмической. Нет общей фундаментальной теории, описывающей совместное развитие этих деформационных процессов.

Достигнуто понимание, что возможным общим фактором, объединяющим наблюдаемые деформационные явления, можно считать медленные волны деформации. Высказана гипотеза, что медленные деформационные возмущения могут распространяться как солитоны, а значит, способны наиболее эффективно переносить и перераспределять энергию в нагружаемой упругопластической среде [Lund, 1983; Ulomov, 1993; Nikolaevsky, 1995; Bykov, 2005, 2015; Kuz'min, 2012].

Однако гипотеза о солитоноподобном характере распространения медленных волн деформации пока никак не обоснована ни наблюдениями, ни теоретически. Разными авторами пока только предложены правдоподобные соображения, оправдывающие выдвинутые гипотезы.

Медленные деформационные волны непосредственно не регистрируются. Их существование устанавливается косвенно по регистрации вариаций геофизических полей, в частности по направле-

ным миграциям землетрясений. Привлечение к описанию деформационных волновых возмущений, например уравнений теплопроводности (диффузии) [Bott, Dean, 1973; Takahashi, 2005] или уравнений sin-Гордона в случае их представления как солитонов [Bykov, 2015], базируется только на априорной уверенности, что подобные волновые возмущения существуют и являются солитонами. Эти уравнения никак не связаны с эволюцией напряженно-деформированного состояния, а значит, их решения могут характеризовать только возможную качественную картину медленных деформационных возмущений.

Таким образом, одной из ключевых задач в развитии общей физико-математической теории геодинамических процессов является разработка непротиворечивой математической модели, способной описать совместную генерацию и распространение в упругопластической среде как обычных волн напряжений, так и медленных деформационных автоволновых и солитоноподобных возмущений. Только в этом случае возможно описать и понять сложные взаимодействия и обратные связи в развитии различных совместно протекающих деформационных процессов, включая катастрофические разрушения. Вариант такой модели представлен в настоящей работе. Основное внимание уделено возможной солитонной природе медленных деформационных волн.

Проблемы генерации, распространения и возможных свойств медленных деформационных волн широко дискутируются в научном сообществе. Заметный вклад в развитие взглядов на природу медленных волн деформаций внесли работы, выполненные в ИЗК СО РАН.

На протяжении нескольких десятилетий эта проблематика являлась одной из главных в научной деятельности Семена Иойновича Шермана. Он один из первых подробно описал особенности активизаций разломов в Байкальской рифтовой зоне, связав их с медленными деформационными возмущениями, которые рассматривал как триггеры сейсмической активности [Sherman, Gorbunova, 2008b; Sherman, 2013], и исследовал деформационные волны в областях динамического влияния разломов. На базе геоинформационных технологий под его руководством разработан алгоритм изучения закономерностей селективной активизации сейсмоактивных разломов [Sherman et al., 2005], который был протестирован на примерах Байкальской сейсмической зоны [Sherman, Gorbunova, 2008a, 2008b]. Опубликованный С.И. Шерманом большой обзор [Sherman, 2013] дает представление о современном состоянии проблемы медленных деформационных возмущений и их роли в сейсмических активизациях.

2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЬНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРИРОДЕ МЕДЛЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ СРЕДАХ, ВКЛЮЧАЯ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

2.1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИРОДЫ МЕДЛЕННЫХ ВОЛН ДЕФОРМАЦИИ

Несмотря на более чем полувековую историю, проблемы пространственно-временной миграции геодинамических процессов и медленных деформационных волн, которые рассматриваются как причина этих миграционных процессов, остаются одними из самых дискуссионных в современной геодинамике и геомеханике.

После открытия Ч. Рихтером в 1958 г. явления направленной миграции очагов землетрясений вдоль Северо-Анатолийского разлома в Турции [Richter, 1958] был выполнен большой объем работ, подтвердивший это явление как повсеместно распространенное [Allen, 1969; Kasahara, 1979; Kasahara et al., 1983; Kocharyan, 2012; Mogi, 1968, 1988; Nikolaevsky, 1986, 1991; Ruzhich, Levina, 2012; Sherman, Gorbunova, 2008b; Nishimura et al., 2001; Toksöz et al., 1979]. В последние 10–15 лет подобные исследования опираются на большой статистический материал [Ruzhich, Levina, 2012; Sherman, 2013; Bykov, Trofimenko, 2016; Borneyakov et al., 2017; Klyuchevskii, 2011; Klyuchevskii et al., 2010, 2017] и достаточно однозначно и достоверно устанавливают наличие миграции геодинамических процессов.

Подобные регистрации периодических изменений в геофизических полях трактуются как медленные деформационные волны или, по современным представлениям, должны сопровождать прохождение таких волн [Klyuchevskii, 2011; Klyuchevskii et al., 2017; Bykov, 2005, 2015; Kuz'min, 2012]. Скорости подобных деформационных возмущений лежат в диапазоне 1–100 км/год. Более того, утвердилось мнение, что многие сильные землетрясения связаны со смещениями, стимулированными волновыми процессами по крупным разломам [Sherman, 2013; Bykov, 2015; Kuz'min, 2012].

Эти исследования позволили выявить как межразломные медленные деформационные волны, скорости которых лежат в диапазоне 20–30 км/год, так и внутриразломные, скорости которых оцениваются в диапазоне 10–100 км/год. Для некоторых внутриразломных волн скорости оценены в диапазоне 4–10 км/год [Kuz'min, 2012].

До настоящего времени точного определения медленных деформационных волн не существует. Большинство исследователей сходится в том, что в нагруженной геосреде, включая зоны разломов, генерируются возмущения, которые имеют волновую природу и, распространяясь, воздействуют на геосреду, геофизические поля и процессы. Их рас-

пространение в геосреде обычно воспроизводится имитационным моделированием на основе решений уравнения переноса параболического типа (теплопроводности), которое не связано с эволюцией напряженно-деформированного состояния (НДС) [Bott, Dean, 1973; Takahashi, Seno, 2005].

В физике пластичности и механике деформируемого твердого тела давно изучаются подобные автоволновые возмущения – фронты локализованной пластической деформации, которые распространяются с близкими малыми скоростями $(2-10) \cdot 10^{-5}$ м/с [Zuev et al., 2008]. Эти исследования крайне важны для тестирования математической модели по надежным и воспроизводимым в лабораторных условиях экспериментам [Makarov, Peryshkin, 2017a].

Современное 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 [Guberman, 1975, 1979; Zhadin, 1984; Androsov et al., 1989; Oparin et al., 2012; Kuz'min, 2012; Makarov, Peryshkin, 2017b].

В последнее время рассматриваются различные математические модели и дискутируется идея, что медленные деформационные волны суть солитоны. На основании этой гипотезы ряд авторов предлагает выполнить математическое моделирование динамики разломных зон и сопутствующих деформационных и сейсмических эффектов на применении как классического уравнения \sin -Гордона, так и различных вариантов возмущенного уравнения \sin -Гордона [Bykov, 2015; Nikolaevsky, 1995; Mikhailov, Nikolaevskii, 2000; Majewski, 2006]. Сама гипотеза, что медленные деформационные фронты могут обладать свойствами солитонов, чрезвычайно плодотворна и, по-видимому, верна [Bykov, 2015; Kuz'min, 2012; Nikolaevsky, 1995; Mikhailov, Nikolaevskii, 2000]. Она существенно продвинула нас, прежде всего, в понимании условий генерации медленных деформационных волн и их возможных свойств. Однако пока она не доказана ни теоретически, ни наблюдениями. Обычно скорость солитонов велика и на порядки выше наблюдаемых медленных деформационных возмущений. Скорее всего, подобные деформационные возмущения являются автосолитонами.

Усилия мирового сообщества на настоящем этапе в большей степени пока направлены на экспериментальное обоснование существования медленных деформационных волн и выяснение их возможной роли в процессах миграции геодинамических процессов и триггерных возбуждений сей-

смической активности на основе методов статической обработки данных сейсмических наблюдений. Известные попытки объяснения возможных свойств медленных волн в геосредах, как уже отмечалось, базируются на привлечении уравнений в частных производных переноса (диффузии) и уравнений \sin -Гордона для их моделирования. Эти уравнения не связаны с деформационными процессами и эволюцией НДС, по этой причине не могут прояснить физической сути этих сложных деформационных явлений нагружаемой прочной среды.

Так, хорошо изученные медленные деформационные фронты в металлах могут двигаться с разными скоростями в зависимости от уровня действующих напряжений, останавливаться, формируя полосы локализованного сдвига, взаимодействовать как солитоны. Мы полагаем, что медленные деформационные фронты в малых образцах имеют ту же физическую природу, что и в геосредах, в силу масштабной инвариантности и самоподобия процессов деформации и разрушения. По этой причине мы вправе ожидать сходных свойств, проявляемых автоволнами и в геосредах. По крайней мере, эксперименты с металлами крайне важны для тестирования разрабатываемых моделей.

В последние 5–10 лет усилия исследователей направлены на установление медленных возмущений геодинамических полей, которые являются квазипериодическими и могут трактоваться как медленные деформационные волны. Эти исследования проводятся как в России, так и за рубежом и основаны на современных методах статистического анализа больших объемов наблюдений пространственно-временных распределений сейсмических событий. Так, сотрудниками ИЗК СО РАН выявлены квазипериодические активизации сейсмической активности во многих регионах, например в Восточной Сибири (Байкальская рифтовая зона) [Ruzhich, Levina, 2012; Sherman, 2013; Bykov, Trofimenko, 2016; Klyuchevskii, 2011], в Монголии [Klyuchevskii et al., 2017; Klyuchevskii, 2011], которые связываются с прохождением медленных деформационных возмущений волновой природы. Многие авторы считают концепцию волновой природы миграции геодинамических процессов и квазипериодических сейсмических активизаций доказанной. Однако общей физико-математической теории этих явлений пока не создано.

2.2. Постановка задачи. Методология ее решения.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Предлагаемая методология решения задачи генерации и распространения медленных деформационных волн объединяет методы современной вычислительной механики деформируемого твер-

дого тела и идеи, методы и подходы теории нелинейных динамических систем, что позволило сформулировать проблему совместной генерации и распространения в среде волн напряжений и медленных деформационных волновых возмущений как задачу эволюции НДС в нагружаемой упруго-пластической среде. При такой постановке задачи деформирования и разрушения нагружаемой геосреды в ней в процессе эволюции НДС происходит также миграция деформационной активности, а также, при определенных условиях, генерация медленных волн деформации на сверхбыстрых стадиях эволюции НДС [Makarov, Peryshkin, 2017a].

Ранее было показано, что численные решения уравнений МДТТ демонстрируют типичные для нелинейных динамических систем характерные этапы эволюционного процесса, отраженные, например, во флуктуациях напряжений от общего тренда (фактически в расчетных сейсмограммах) [Makarov, Eremin, 2014]. В расчетах также воспроизводятся состояния динамического хаоса, самоорганизованной критичности (СОК), развитие разрушения на заключительной стадии в сверхбыстром катастрофическом режиме [Makarov, Eremin, 2014, 2018; Smolin et al., 2018]. Эта методология и разработанные программы численной реализации математической эволюционной модели [Makarov, 2008] были применены при решении поставленной задачи генерации в нагружаемой среде медленных деформационных возмущений волновой природы.

При описании таких медленных деформационных возмущений в тестовых расчетах был применен также комбинированный метод, объединяющий при численном решении динамических уравнений МДТТ подход механики деформируемого твердого тела и методика клеточных автоматов для описания перехода деформируемых частиц среды в неупругое состояние при условии достижения в соседних частицах накапливаемыми повреждениями и/или неупругими деформациями некоторых пороговых значений.

Все задачи были решены в скоростях, что позволяет задавать в качестве определяющих уравнений скорости накопления неупругих деформаций и/или повреждений через соответствующие кинетические уравнения. Все определяющие уравнения записываются в релаксационной форме, при которой скорости приращений напряжений пропорциональны скоростям приращений полных деформаций, а релаксируют напряжения по мере развития их неупругих составляющих, определяемых соответствующей кинетикой. Как было показано, этот процесс определяет скорости формирующихся медленных деформационных волн неупругой природы [Makarov, Peryshkin, 2017a].

Для совместного описания генерации и распространения как обычных волн напряжений, распространяющихся со скоростями звука, так и медленных деформационных фронтов, скорости которых по оценкам на 5–7 порядков ниже скоростей звука, также был применен метод сжатия реального времени, что позволило увеличить скорости медленных возмущений на несколько порядков (скорости звуковых возмущений остаются неизменными). Этот методический прием сжимает общее время эволюции, ускоряя медленные процессы. Необходимо только, чтобы звуковые волны напряжений не менее нескольких сотен раз (или тысяч при расчетах на многопроцессорном кластере) пробегали по всей расчетной области, обеспечивая в расчетах информационный обмен и приводя к соответствующим изменениям в НДС.

При численной реализации процессов совместной генерации и распространения как звуковых волн напряжений, так и медленных деформационных фронтов неупругой природы реализованы две математические модели: 1) комбинированный метод, объединяющий подходы механики деформируемого твердого тела и методика клеточных автоматов для описания процесса перехода среды из неупругого состояния в пластическое, и 2) методика, учитывающую релаксацию напряжений за порогом текучести при наличии площадки текучести и последующего деформационного упрочнения [Makarov, Peryshkin, 2017a].

Система уравнений для первого и второго подходов является общей и выражает законы сохранения массы и количества движения. Среда считается баротропной, т.е. напряжения зависят только от деформаций. По этой причине система соответствующих уравнений замкнута без привлечения закона сохранения энергии. Понятно, что в этом приближении мы ничего не знаем о термодинамическом состоянии нагружаемой среды, в частности о температуре, которая в таком приближении не меняется и равна исходной. Учитывая очень медленные скорости распространения деформационных автоволн, такое приближение можно считать оправданным.

Система уравнений вместе с определяющими уравнениями имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \rho_0 V_0 &= \rho V; \rho \frac{dv_i}{dt} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x^j}; \sigma_{ij} = -P \delta_{ij} + S_{ij}^e + S_{ij}^p; \\ -P &= \frac{1}{3} \sigma_{ii}; \dot{\sigma}_{ij} = \lambda (\dot{\theta}^T - \dot{\theta}^P) \delta_{ij} + 2\mu (\dot{\varepsilon}_{ij}^T - \dot{\varepsilon}_{ij}^P); \\ \dot{\varepsilon}_{ij}^T &= \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p; \dot{\theta}^T = \dot{\varepsilon}_{ii}^T; \dot{\varepsilon}_{ij}^T = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x^j} + \frac{\partial v_j}{\partial x^i} \right); \\ \dot{\varepsilon}_{ij}^P &= \frac{3}{2} \frac{\dot{\varepsilon}_{ef}^P}{\sigma_{ef}} S_{ij}; \\ \dot{\varepsilon}_{ij}^P &= \frac{\sqrt{2}}{3} [(\dot{\varepsilon}_1^P - \dot{\varepsilon}_2^P)^2 + (\dot{\varepsilon}_2^P - \dot{\varepsilon}_3^P)^2 + (\dot{\varepsilon}_3^P - \dot{\varepsilon}_1^P)^2]^{\frac{1}{2}}; \\ \sigma_{ef} &= \frac{1}{\sqrt{2}} [(S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2]^{\frac{1}{2}}, \end{aligned} \quad (1)$$

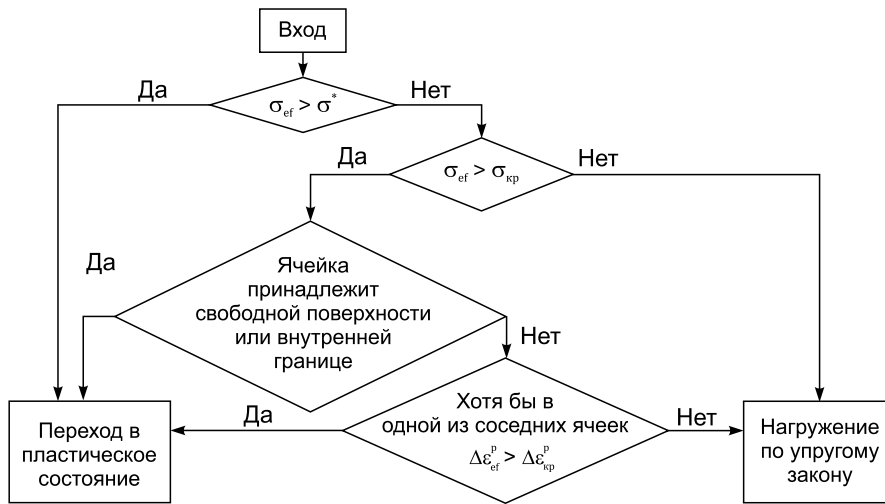


Рис. 1. Алгоритм перехода расчетной ячейки в пластическое состояние: $\sigma_{кр}$ – критическое напряжение зарождения пластической деформации, σ^* – теоретическая сдвиговая прочность, $\Delta\varepsilon_{кр}^p$ – критическое значение накопленной неупругой деформации.

Fig. 1. Algorithm for calculation cell transition to the plastic state: $\sigma_{кр}$ – critical stress for the occurrence of plastic deformation, σ^* – theoretical shear strength, $\Delta\varepsilon_{кр}^p$ – critical value of the accumulated inelastic strain.

где v_i – скорость, ρ – плотность, V – объем, σ_{ij} – тензор напряжений, P – давление, $\dot{\varepsilon}_{ij}^e$ и $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ – упругая и пластическая составляющая полной скорости деформации $\dot{\varepsilon}_{ij}^T$, S_{ij} – девиатор тензора напряжений.

В случае реализации первого подхода, когда каждая расчетная ячейка является бистабильным клеточным автоматом, находящимся либо в упругом, либо в пластическом состоянии, алгоритм решения подробно изложен в работах [Makarov et al., 2001; Makarov, Peryshkin, 2017a]. Кратко приведем только условия перехода нагружаемой частицы среды как клеточного автомата из одного состояния в другое, как показано на рис. 1.

При реализации второго подхода использовалась идея мгновенной релаксации и снесение напряжений на заданную σ - ε диаграмму по правилу Мизеса. Схема такой диаграммы приведена на рис. 2. В расчетах варьировались величины зуба текучести, площадки текучести и закон упрочнения за площадкой текучести, т.е. величины порогов $\Delta\sigma$, $\Delta\varepsilon$ и $\delta\varepsilon$ и параметр деформационного упрочнения. В зависимости от их комбинаций изменялась как интенсивность (амплитуда) медленной деформационной волны, так и ее скорость [Makarov, Peryshkin, 2017b].

2.3. СООТВЕТСТВИЕ СВОЙСТВ РАСЧЕТНЫХ МЕДЛЕННЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ФРОНТОВ СВОЙСТВАМ СОЛИТОНОВ

Распространение медленных волн деформации (положение волновых фронтов) определялось по величине скорости неупругой (пластической) де-

формации, которая во фронте распространяющейся волны во много раз больше средней фоновой в образце. Такая методика позволяет определять как лидирующие медленные деформационные фронты, так и множество вторичных возмущений, движущихся за лидирующими фронтами.

Таким образом, численные решения системы уравнений МДТТ вместе с определяющими кинетическими уравнениями (1) содержат как обычные волны напряжений, многократно пробегающие по образцу и формирующие в нем соответствующие

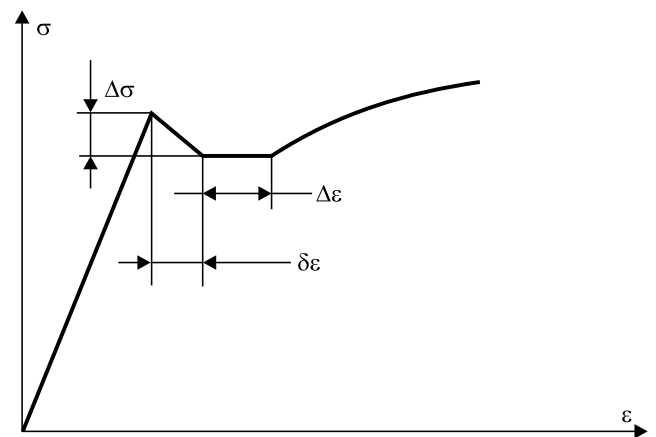


Рис. 2. Схема для σ - ε диаграммы с порогом $\Delta\sigma$ и деформационным упрочнением.

Fig. 2. Schematic σ - ε diagram with thresholds $\Delta\sigma$ and $\Delta\varepsilon$ and strain hardening.

распределения напряжений и деформаций, так и медленные автоволновые возмущения неупругой природы. Эти автоволновые возмущения первоначально формируются вблизи захватов и, распространяясь по образцу, переводят его из упругого состояния в пластическое, причем неупругая (пластическая) деформация распределена по образцу неоднородно. Формирующиеся области локализованной деформации, а также вторичные автоволновые фронты усиливают неоднородность распределения неупругой деформации и ее локализацию. Положения этих фронтов выявляются по повышенным скоростям неупругой деформации.

Ранее было показано, что при взаимодействии эти медленные автоволновые фронты неупругой деформации проявляют свойства солитонов, проникая друг через друга или отталкиваясь как упругие частицы [Makarov, Peryshkin, 2017a].

Таким образом, решения уравнений МДТТ могут содержать и возмущения, проявляющие свойства солитонов. Если это так, то подобные результаты являются чрезвычайно важными и требуют тщательного изучения. Также важно будет понять, каким свойствам известных солитонных решений отвечают полученные медленные автоволновые деформационные возмущения.

Хорошо известно, что существуют определенные классы уравнений, решения которых содержат солитоны. Эти уравнения хорошо изучены. Солитоны содержат решения уравнения Кортевега – де-Фриза (КдФ), в котором в первом приближении учтены дисперсия и нелинейность. Оно имеет следующий вид:

$$U_t + 6UU_x + U_{xxx} = 0. \quad (2)$$

В этом уравнении $U(x, t)$ – отклонение (смещение) от положения равновесия поверхности воды, определяющее форму волны. Введение в уравнение члена с третьей производной имеет смысл введения дисперсии, а не диссипации. Решение уравнения КдФ является бегущей волной. При выводе этого уравнения на основе уравнений гидродинамики были использованы малые параметры $\varepsilon = \frac{a}{h} \ll 1$ и $\delta = \frac{h}{l} \ll 1$, где a – амплитуда волны, h – глубина бассейна, l – длина волны. Следовательно, Кортевег и де-Фриз рассматривали длинные волны сравнительно малой амплитуды. Для таких волн из решений уравнения КдФ следует, что скорость их движения тем больше, чем больше их амплитуда, а ширина пика уменьшается с ростом амплитуды.

Свойства полученных решений для медленных деформационных возмущений в прочной среде в какой-то мере сходны со свойствами солитонов, отвечающими решениям уравнения КдФ. Уравнение КдФ справедливо для случая, когда дисперсия и

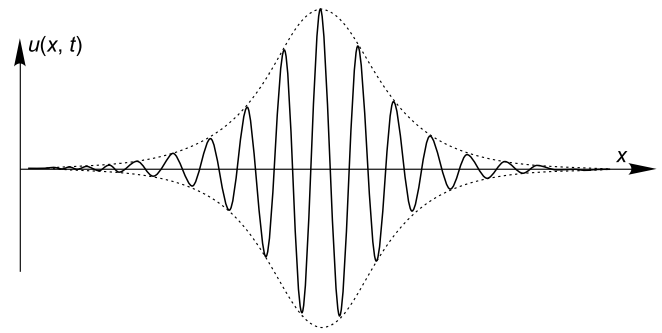


Рис. 3. Групповой солитон, отвечающий решениям нелинейного уравнения Шрёдингера.

Fig. 3. Group soliton satisfying the solutions of the nonlinear Schrödinger equation.

нелинейность малы. В области упругопластических переходов, т.е. в области малых деформаций, нелинейность и дисперсия также малы, а полученные численные решения приводят к волновым возмущениям, свойства которых близки к свойствам солитонов, следующим из решения уравнения Кортевега – де-Фриза.

Если дисперсия велика, а нелинейность слабая, то к солитонам «огигающей» или групповым солитонам приводит нелинейное уравнение Шрёдингера. Солитоны, полученные при решении этого уравнения, соответствуют форме огигающей группы волн (рис. 3). Нелинейное или кубическое уравнение Шрёдингера имеет вид:

$$i \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + v|U|^2 U = 0, \quad (3)$$

где $U(x, t)$ – комплекснозначная функция, v – параметр.

Пока нет достаточных оснований утверждать, что полученные нами солитоноподобные решения могут представлять и групповой солитон, однако цуги медленных деформационных волн, стекающих в область локализованной деформации, очень напоминают групповые солитоны.

Особый класс солитонов составляют так называемые топологические солитоны, которые появляются в решениях уравнения sin-Гордона и различных его модификаций. Данное уравнение в силу особых свойств его решений стали привлекать для описания гипотетических деформационных солитонов в геосредах [Bykov, 2015; Nikolaevsky, 1995]. Это уравнение имеет следующий вид:

$$U_{xt} = \sin U \quad (4)$$

и, как известно, приводит к нескольким качественно отличающимся решениям в виде бризеров, кинков, уединенных волн.

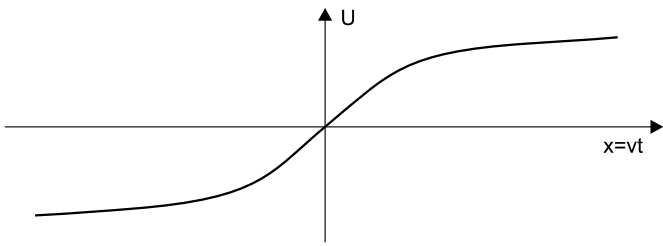


Рис. 4. Вид решения уравнения sin-Гордона в виде кинка.

Fig. 4. Kink satisfying the solution of the sin-Gordon equation.

Полученные решения этого уравнения представляют собой уединенные возмущения и похожи на решение уравнения Бюргера в форме ударной волны, но являются солитоном – при встрече двух кинков, подобных кинку на рис. 4, они проходят друг сквозь друга без изменения скорости и формы.

Одной из главных причин привлечения уравнения sin-Гордона к анализу медленных деформационных волн в геосредах являются уникальные свойства его решений. Если нелинейность такого типа, что система имеет два (или больше) равновесных состояния, например упругое и пластическое, то уравнение sin-Гордона как раз и описывает динамику в таких нелинейных системах — переход из одного состояния (например упругого) в другое (например пластичное) в виде медленного фронта, т.е. кинка, как на рис. 4, переводящего упругое состояние в пластическое.

Крайне интересны и другие свойства решений уравнения sin-Гордона и его модификаций. В силу разных причин солитоны могут менять скорость по мере распространения в среде, останавливаться, не меняя своей топологии, и возобновлять движение. Именно эти свойства мы наблюдаем для полученных в расчетах медленных деформационных возмущений (рис. 5–7).

2.4. АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ РЕШЕНИЙ ПО ГЕНЕРАЦИИ И РАСПРОСТРАНЕНИЮ МЕДЛЕННЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ФРОНТОВ НЕУПРУГОЙ ПРИРОДЫ

Расчеты генерации и распространения медленных волн деформации были выполнены по двум представленным выше моделям как для условий растяжения металлических образцов, так и для сжатия геоматериалов (в качестве модельного материала был выбран песчаник). Солитонный характер взаимодействия таких волн наиболее ярко выражен в случае комплексной модели с клеточными автоматами для описания упругопластичес-

кого перехода. На рис. 5 показано взаимодействие двух медленных деформационных фронтов неупругой природы, подобных двум кинкам. Эти фронты взаимодействуют как солитоны, проходя друг через друга. Автоволновое деформационное возмущение, подобное кинку, можно видеть и из рис. 6, на котором приведены два медленных деформационных возмущения, сгенерированных на противоположных концах образца и движущихся навстречу друг другу. На первоначальном этапе их

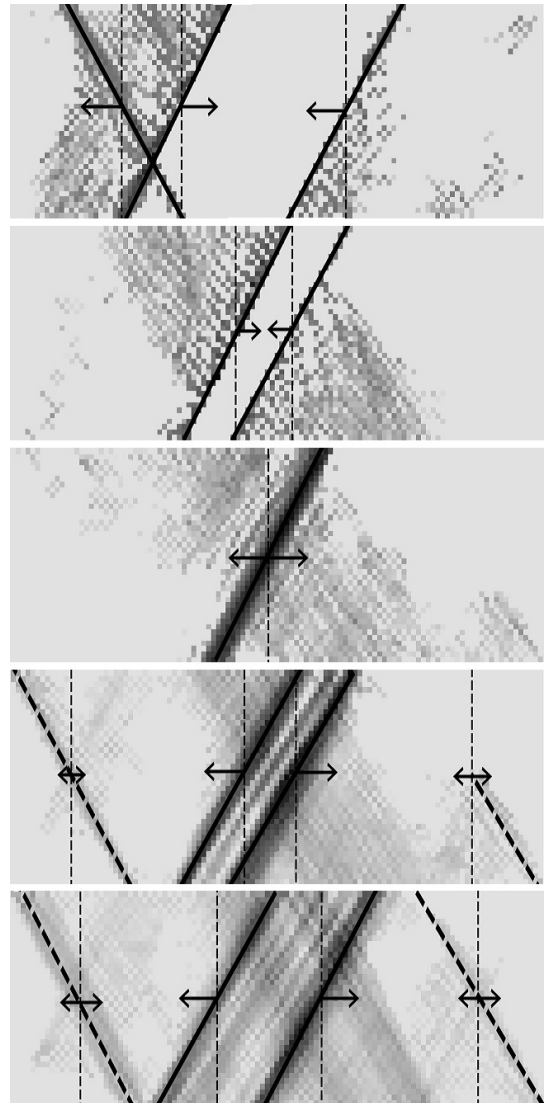


Рис. 5. Взаимодействие двух медленных деформационных фронтов, движущихся навстречу друг другу. Фронты проникают друг через друга подобно солитонам. Двойные стрелки отражают колебательный режим фронта (фактически формирующуюся область локализации неупругой деформации).

Fig. 5. Interaction between two slow deformation fronts moving towards each other. The fronts penetrate each other similar to solitons. Double arrows mark the oscillatory mode of the front and the emerging area of inelastic strain.

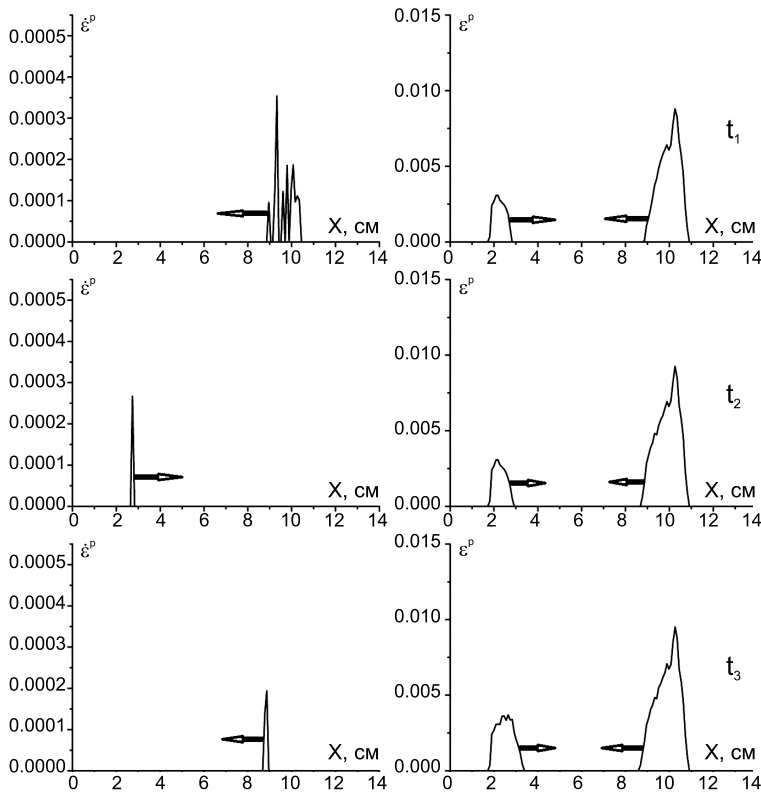


Рис. 6а. Распространение навстречу друг другу двух медленных деформационных фронтов в виде волны переключения для нескольких последовательных времен – t_1 , t_2 и t_3 . Слева показана скорость неупругой деформации, справа – накопленная неупругая деформация.

Fig. 6a. Propagation of two slow deformation fronts towards each other in the form of a switching wave in time sequences t_1 , t_2 and t_3 . Left – inelastic strain rate; right – accumulated inelastic strain.

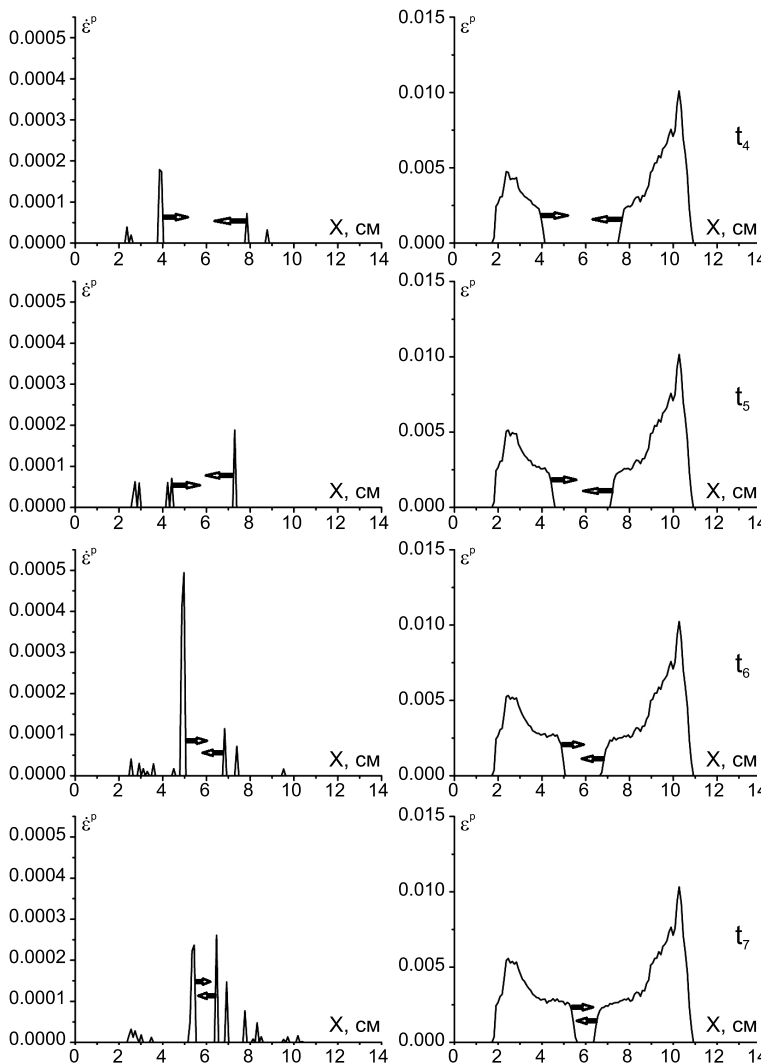


Рис. 6б. Дальнейшее распространение навстречу друг другу двух медленных фронтов неупругой деформации для последовательных времен t_4 , t_5 , t_6 и t_7 .

Fig. 6b. Further propagation of two slow inelastic deformation fronts towards each other in time sequences t_4 , t_5 , t_6 , and t_7 .

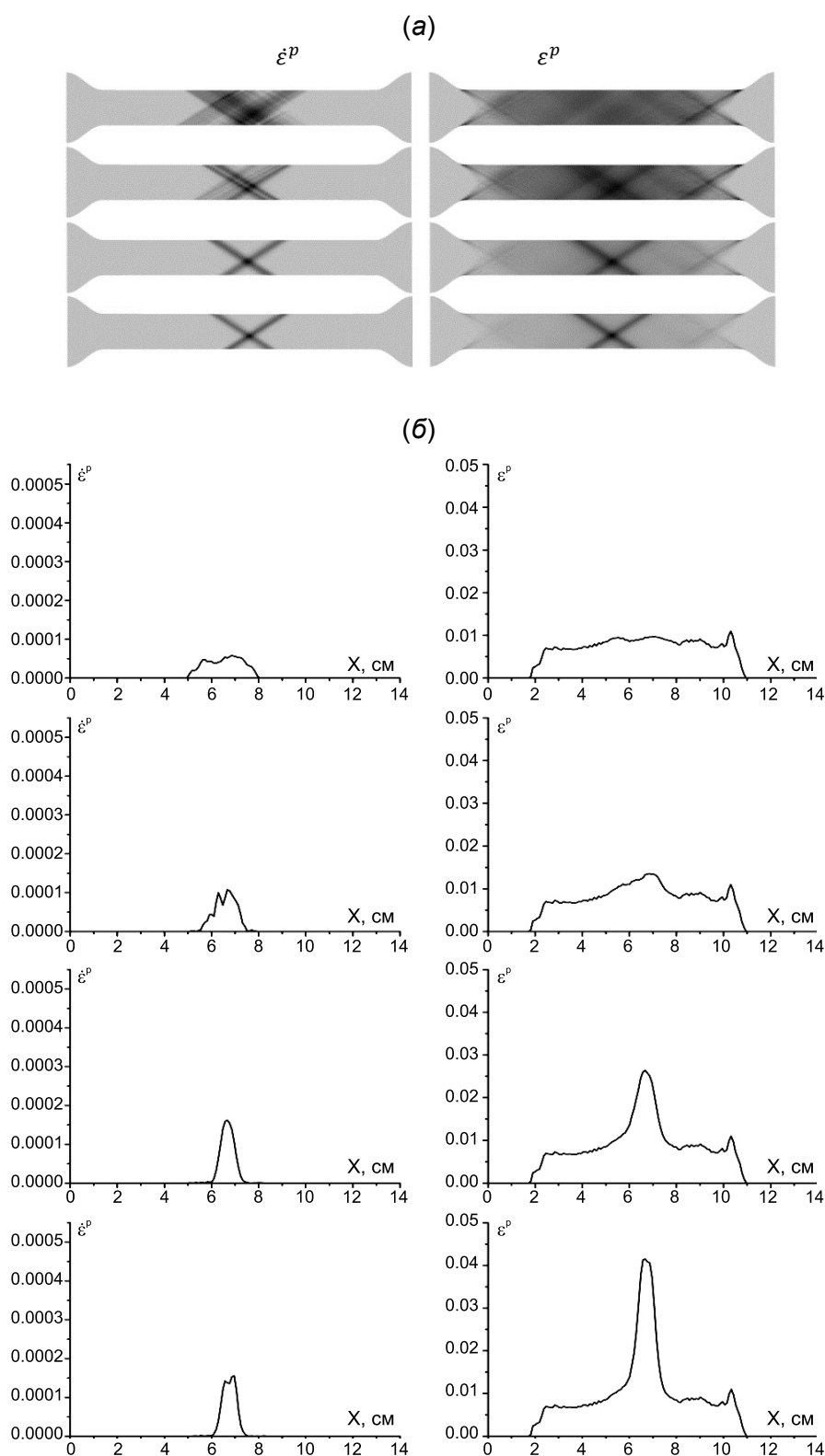


Рис. 7. Формирование очага разрушения (локализованной неупругой деформации) медленными деформационными фронтами. Картины распределения в образце скоростей неупругой деформации $\dot{\varepsilon}^P$ – слева и накопленной неупругой деформации ε^P – справа (а). Последовательные картины нарастания неупругой деформации в формирующемся очаге разрушения (слева – скорость деформации $\dot{\varepsilon}^P$, справа – накопленная неупругая деформация – ε^P). Видно, что по мере накопления деформации ее максимум медленно смещается (б).

Fig. 7. (a) – formation of a source of destruction (localized inelastic strain) by slow deformation fronts. Left – distribution patterns of inelastic strain rate $\dot{\varepsilon}^P$ in the specimen. Right – distribution patterns of accumulated inelastic strain ε^P . Consecutive increase of inelastic strain in the emerging source of destruction (left – strain rate $\dot{\varepsilon}^P$; right – accumulated inelastic strain ε^P). (b) – strain accumulation continues, and the strain maximum is slowly shifting.

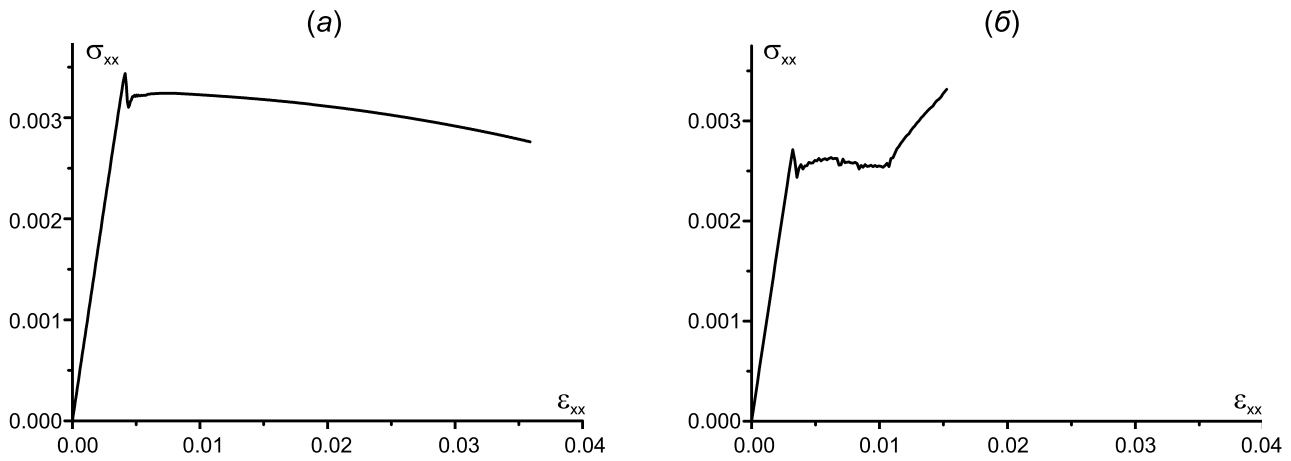


Рис. 8. Средние по образцу расчетные $\sigma - \varepsilon$ диаграммы по модели с клеточными автоматами (а) и расчет по модели Мизеса с учетом релаксации и деформационного упрочнения (б).

Fig. 8. Average specimen $\sigma - \varepsilon$ diagrams calculated from the cellular automata model (a) and calculation based on the Mises model with account of relaxation and strain hardening (b).

формирования они распространяются как типичные волны переключения. Поочередно активизируется то левое то правое возмущение, что хорошо видно из левого графика для скорости деформации: когда на левом конце скорость деформации значительна, на правом она близка к нулю и наоборот (см. рис. 6а), на котором показана динамика волновых фронтов для трех последовательных времен – t_1-t_3 . Дальнейшее их распространение может заметно измениться – одновременно активны процессы деформации как для левого возмущения, так и для правого, однако их амплитуды периодически изменяются: то более активно левое возмущение, амплитуда которого значительно выше, то правое (рис. 6б (t_4-t_7)). Вслед за лидирующими фронтами движутся вторичные менее интенсивные возмущения, которые в дальнейшем примут активное участие в формировании очага разрушения, наращивая в нем величину неупругой деформации (рис. 7).

В данном варианте расчетов можно подробно отследить механизм формирования очага разрушения. Видно, как деформационные фронты стекаются в будущий очаг (рис. 7, а), ширина области локализованной неупругой деформации уменьшается, а ее величина растет (рис. 7, б). На рис. 7, б, слева показана скорость неупругой деформации, а справа – накопленная неупругая деформация. Усредненная по образцу $\sigma - \varepsilon$ диаграмма приведена на рис. 8. Неоднородность развития неупругой деформации, ее локализация привели к заметным флуктуациям напряжений от среднего тренда на расчетной усредненной $\sigma - \varepsilon$ диаграмме (рис. 9). На этом же рисунке показан образец на стадии формирования шейки.

Был выполнен статистический анализ флуктуаций напряжений от среднего тренда с целью выявления локализации деформационного процесса во времени и его перехода на ускоренную стадию эволюции, предшествующую катастрофическому разрушению. На этой стадии наблюдается ускоренный рост неупругой деформации в области формирующегося очага разрушения (см. рис. 7). Этот процесс показан на рис. 9. На рис. 9, а, приведена средняя по образцу $\sigma - \varepsilon$ диаграмма, а также показан образец с наметившимся макроскопическим разрушением. График PDF (плотности распределения флуктуаций) на рис. 9, б, дает распределение с тяжелыми хвостами, что свидетельствует о состоянии самоорганизованной критичности и степенном распределении флуктуаций по величине. Расчетный график повторяемости флуктуаций напряжений от среднего тренда — своеобразная расчетная сейсмограмма при неупругом деформировании образца – хорошо отвечает закону Гутенберга-Рихтера (рис. 9, в). В расчетах энергия соответствующей флуктуации бралась равной работе неупругих деформаций на соответствующих напряжениях, N – число событий одного класса.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практически важные проблемы прогноза катастрофических разрушений различных масштабов, в том числе землетрясений, связаны с решением фундаментальных задач по установлению механизмов формирования очагов разрушения, механизмов эффективного переноса энергии в нагружаемой среде в формирующийся очаг разрушения,

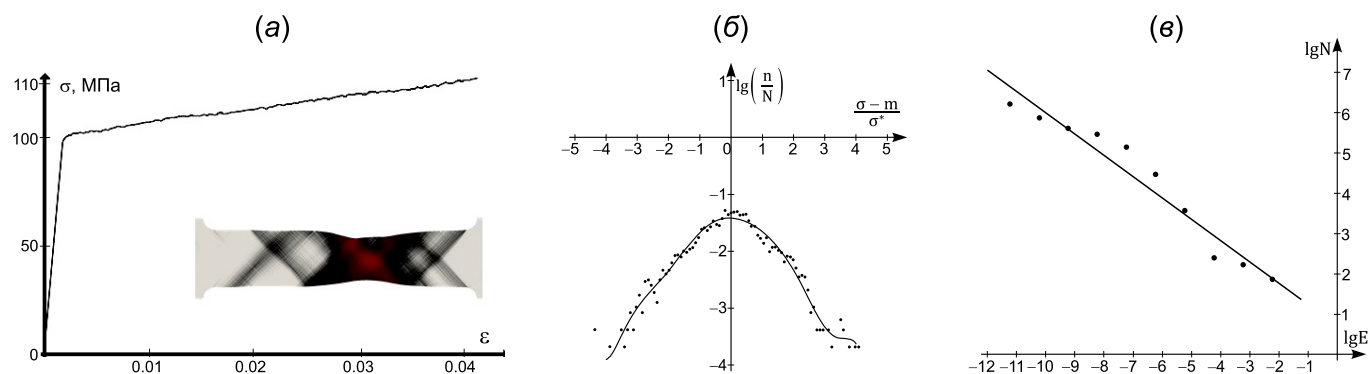


Рис. 9. Расчет макроскопической $\sigma\sim\varepsilon$ диаграммы (а); соответствующего ей PDF графика (б) и расчетный график повторяемости флуктуаций напряжений от среднего тренда $\sigma\sim\varepsilon$ диаграммы (в).

Fig. 9. Calculation of the macroscopic $\sigma\sim\varepsilon$ diagram (a), corresponding PDF curve (б), and calculated curve of the repeatability of stress fluctuations from the average trend of the $\sigma\sim\varepsilon$ diagram (в).

а также с решением проблемы миграции деформационной активности и сейсмических активизаций.

Разработан и обоснован вариант физико-математической модели совместной генерации и распространения в упругопластической среде как обычных звуковых волн напряжений, так и медленных автоволновых возмущений, скорости которых на 5–7 порядков ниже скорости звука. Исследованы особенности распространения медленных деформационных волн в прочных средах. Численно изучены особенности взаимодействия друг с другом медленных деформационных автоволн неупругой природы.

Показано, что медленные деформационные волны взаимодействуют как солитоны, проникая друг через друга. Свойства таких деформационных возмущений подобны как свойствам солитонов, получаемых решениями нелинейного уравнения Кортевега – де-Фриза, так и свойствам кинков – по решениям уравнения \sin -Гордона. Показано, что медленные деформационные фронты активно участ-

вуют в формировании очага разрушения, являясь эффективным механизмом переноса и перераспределения энергии в нагружаемой среде.

Принципиально новой является разработанная математическая модель совместной генерации и распространения в нагружаемой среде волн напряжений и медленных деформационных фронтов неупругой природы.

Впервые авторами работы получены решения уравнений МДТТ, содержащие медленные деформационные возмущения, обладающие свойствами солитонов при их взаимодействиях. Выявлена их существенная роль в формировании в среде очагов разрушения.

4. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы, направление III.23.

5. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Allen C.R., 1969. Active faulting in Northern Turkey. Contribution No. 1577. Division of Geological Sciences of California Institute of Technology, Pasadena, p. 32-34.
- Androsov I.V., Zhadin V.V., Potashnikov I.A., 1989. Spatial-temporal structure of earthquake migration and seismic belts. *Doklady AN SSSR* 306 (6), 1339–1342 (in Russian) [Андросов И.В., Жадин В.В., Поташиков И.А. Пространственно-временная структура миграции землетрясений и сейсмические пояса // Доклады АН СССР. 1989. Т. 306. № 6. С. 1339–1342].
- Bornyakov S.A., Salko D.V., Seminsky K.Zh., Demberel S., Ganzorig D., Batsaihan T., Togtohbayar S., 2017. Instrumental recording of slow deformation waves in the South Baikal geodynamic study site. *Doklady Earth Sciences* 473 (1), 371–374. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17030229>.
- Bott M.H.P., Dean D.S., 1973. Stress diffusion from plate boundaries. *Nature* 243 (5406), 339–341. <https://doi.org/10.1038/243339a0>.
- Bykov V.G., 2005. Strain waves in the Earth: theory, field data, and models. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 46 (11), 1158–1170.

- Bykov V.G., 2015. Nonlinear waves and solitons in models of fault block geological media. *Russian Geology and Geophysics* 56 (5), 793–803. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.04.010>.
- Bykov V.G., Trofimenko S.V., 2016. V Slow strain waves in blocky geological media from GPS and seismological observations on the Amurian plate. *Nonlinear Processes in Geophysics* 23 (6), 467–475. <https://doi.org/10.5194/npg-23-467-2016>.
- Guberman Sh.A., 1975. On some regularities in the occurrence of earthquakes. *Doklady AN SSSR* 224 (3), 573–576 (in Russian) [Губерман Ш.А. О некоторых закономерностях возникновения землетрясений // Доклады АН СССР. 1975. Т. 224. № 3. С. 573–576].
- Guberman Sh.A., 1979. D-waves and earthquakes. In: V.I. Keilis-Borok (Ed.), Theory and analysis of seismological observations. Computational seismology, vol. 12. Nauka, Moscow, p. 158–188 (in Russian) [Губерман Ш.А. D-волны и землетрясения // Теория и анализ сейсмологических наблюдений / Ред. В.И. Кейлис-Борок. Вычислительная сейсмология. Вып. 12. М.: Наука, 1979. С. 158–188].
- Kasahara K., 1979. Migration of crustal deformation. *Tectonophysics* 52 (1–4), 329–341. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(79\)90240-3](https://doi.org/10.1016/0040-1951(79)90240-3).
- Kasahara M., Shichi R., Okada Y., 1983. On the cause of the long period crustal movement. *Tectonophysics* 97 (1–4), 327–336. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(83\)90161-0](https://doi.org/10.1016/0040-1951(83)90161-0).
- Klyuchevskii A.V., 2011. Episodes of high correlation between annual rates of earthquakes: the Baikal Rift zone. *Journal of Volcanology and Seismology* 5 (1), 53–59. <https://doi.org/10.1134/S0742046311010039>.
- Klyuchevskii A.V., Bayar G., Bum-Ochir S., 2010. Synchronization episodes in annual numbers of earthquakes in the Mongolian-Baikal Region. *Doklady Earth Sciences* 431 (1), 339–344. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10030165>.
- Klyuchevskii A.V., Demberel S., Dem'yanovich V.M., Bayaraa G., 2017. Diagnostics of the stress state of the lithosphere in Mongolia based on seismic source data. *Doklady Earth Sciences* 473 (2), 433–437. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17040018>.
- Kocharyan G.G., 2012. Triggering of natural disasters and technogeneus emergencies by low amplitude seismic waves. *Geoecology, Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology* (6), 483–496 (in Russian) [Кочарян Г.Г. Иницирование природных катастроф и техногенных аварий сейсмическими колебаниями малой амплитуды // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2012. № 6. С. 483–496].
- Kuz'min Y.O., 2012. Deformation autowaves in fault zones. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 48 (1), 1–16. <https://doi.org/10.1134/S1069351312010089>.
- Lund P., 1983. Interpretation of the precursor to 1960 Great Chilean earthquake as a seismic solitary wave. *Pure and Applied Geophysics* 121 (1), 17–26. <https://doi.org/10.1007/BF02590117>.
- Majewski E., 2006. Rotational energy and angular momentum of earthquakes. In: R. Teisseyre, E. Majewski, M. Takeo (Eds.), Earthquake source asymmetry, structural media and rotation effects. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 217–225. https://doi.org/10.1007/3-540-31337-0_16.
- Makarov P.V., 2008. Mathematical theory of the evolution of loaded solid bodies and media. *Fizicheskaya Mezomekhanika (Physical Mesomechanics)* 11 (3), 19–35 (in Russian) [Макаров П.В. Математическая теория эволюции нагружаемых твердых тел и сред // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11. № 3. С. 19–35].
- Makarov P.V., Eremin M.O., 2014. Jerky flow model as a basis for research in deformation instabilities. *Physical Mesomechanics* 17 (1), 62–80. <https://doi.org/10.1134/S1029959914010081>.
- Makarov P.V., Eremin M.O., 2018. Rock mass as a nonlinear dynamic system. Mathematical modeling of stress-strain state evolution in the rock mass around a mine opening. *Physical Mesomechanics* 21 (4), 283–296. <https://doi.org/10.1134/S1029959918040021>.
- Makarov P.V., Peryshkin A.Y., 2017a. Slow motions as inelastic strain autowaves in ductile and brittle media. *Physical Mesomechanics* 20 (2), 209–221. <https://doi.org/10.1134/S1029959917020114>.
- Makarov P.V., Peryshkin A.Y., 2017b. Soliton-like character of slow deformation waves in the loaded medium. In: Deformation and destruction of materials with defects and dynamic phenomena in rocks and excavations. Proceedings of the XXVII International scientific school named after academician S.A. Khristianovich. Tavrichesky National University, Simferopol, p. 153–157 (in Russian) [Макаров П.В., Перишкин А.Ю. Солитоноподобный характер медленных волн деформации в нагруженной среде // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Материалы XXVII Международной научной школы им. академика С.А. Христиановича. Симферополь: Таврический национальный университет, 2017. С. 153–157].
- Makarov P.V., Romanova V.A., Balokhonov R.R., 2001. Modeling of inhomogeneous plastic deformation taking into account the occurrence of localized plastic shear faults at the interfaces. *Fizicheskaya Mezomekhanika (Physical Mesomechanics)* 4 (5), 29–39 (in Russian) [Макаров П.В., Романова В.А., Балохонов Р.Р. Моделирование неоднородной пластической деформации с учетом зарождения локализованных пластических сдвигов на границах раздела // Физическая мезомеханика. 2001. Т. 4. № 5. С. 29–39].
- Mikhailov D.N., Nikolaevskii V.N., 2000. Tectonic waves of the rotational type generating seismic signals. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 36 (11), 895–902.

- Mogi K., 1968. Migration of seismic activity. *Bulletin of the Earthquake Research Institute Tokyo University* 46, 53–74.
- Mogi K., 1988. Downward migration of seismic activity prior to some great shallow earthquakes in Japanese subduction zones – a possible intermediate-term precursor. *Pure and Applied Geophysics* 126 (2–4), 447–463. <https://doi.org/10.1007/BF00879006>.
- Nikolaevsky V.N., 1986. Dilatational rheology of the lithosphere and tectonic stress waves. In: Yu.K. Shchukin (Ed.), Basic problems of seismotectonics. Nauka, Moscow, p. 51–68 (in Russian) [Николаевский В.Н. Дилатационная реология литосферы и волны тектонических напряжений // Основные проблемы сейсмотектоники / Ред. Ю.К. Щукин. М.: Наука, 1986. С. 51–68].
- Nikolaevsky V.N., 1991. Tectonic waves of the Earth. *Priroda (Nature)* (8), 17–23 (in Russian) [Николаевский В.Н. Тектонические волны Земли // Природа. 1991. № 8. С. 17–23].
- Nikolaevsky V.N., 1995. Mathematical modeling of isolated deformation and seismic waves. *Doklady AN* 341 (3), 403–405 (in Russian) [Николаевский В.Н. Математическое моделирование уединенных деформационных и сейсмических волн // Доклады АН. 1995. Т. 341. № 3. С. 403–405].
- Nishimura T., Ozawa S., Murakami M., Sagiya T., Tada T., Kaidzu M., Ukawa M., 2001. Crustal deformation caused by magma migration in the northern Izu Islands, Japan. *Geophysical Research Letters* 28 (19), 3745–3748. <https://doi.org/10.1029/2001GL013051>.
- Oparin V.N., Sashurin A.D., Leontiev A.V., 2012. Destruction of the Crust and Self-Organization Processes in the Field of Strong Technogenic Impact. SB RAS Publishing House, Novosibirsk, 632 p. (in Russian) [Опарин В.Н., Сашурин А.Д., Леонтьев А.В. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в области сильного техногенного воздействия. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 632 с.].
- Richter C.F., 1958. New dimensions in seismology: earthquakes are characterized by geographical position, instant of occurrence, depth, and magnitude. *Science* 128 (3317), 175–182. <https://doi.org/10.1126/science.128.3317.175>.
- Ruzhich V.V., Levina E.A., 2012. Seismomigrational processes as the reflection of internal dynamics in zones of intraplate and interplate faults. In: Recent geodynamics of Central Asia and hazardous natural processes: results of quantitative studies. Proceedings of the All-Russia Meeting and Youth School on Recent Geodynamics (23–29 September 2012, Irkutsk). Vol. 2. Institute of the Earth's Crust of SB RAS, Irkutsk, p. 71–74 (in Russian) [Ружич В.В., Левина Е.А. Сейсмомиграционные процессы как отражение внутренней динамики в зонах внутриплитных и межплитных разломов // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе: Материалы Всероссийского совещания и молодежной школы по современной геодинамике (г. Иркутск, 23–29 сентября 2012 г.). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. Т. 2. С. 71–74].
- Sherman S.I., 2013. Deformation waves as a trigger mechanism of seismic activity in seismic zones of the continental lithosphere. *Geodynamics & Tectonophysics* 4 (2), 83–117 (in Russian) [Шерман С.И. Деформационные волны как триггерный механизм сейсмической активности в сейсмических зонах континентальной литосферы // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4. № 2. С. 83–117]. <https://doi.org/10.5800/GT-2013-4-2-0093>.
- Sherman S.I., Gorbunova E.A., 2008a. Variation and origin of fault activity of the Baikal rift system and adjacent territories in real time. *Earth Science Frontiers* 15 (3), 337–347. [https://doi.org/10.1016/S1872-5791\(08\)60069-X](https://doi.org/10.1016/S1872-5791(08)60069-X).
- Sherman S.I., Gorbunova E.A., 2008b. Wave nature of fault activation in Central Asia on the basis of seismic monitoring. *Fizicheskaya Mezomekhanika (Physical Mesomechanics)* 11 (1), 115–122 (in Russian) [Шерман С.И., Горбунова Е.А. Волновая природа активизации разломов Центральной Азии на базе сейсмического мониторинга // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11. № 1. С. 115–122].
- Sherman S.I., Savitskii V.A., Sorokin A.P., 2005. New methods for the classification of seismoactive lithospheric faults based on the index of seismicity. *Doklady Earth Sciences* 401 (3), 413–416.
- Smolin I.Y., Makarov P.V., Kulkov A.S., Eremin M.O., Bakeev R.A., 2018. Blow-up modes in fracture of rock samples and Earth's crust elements. *Physical Mesomechanics* 21 (4), 297–304. <https://doi.org/10.1134/S1029959918040033>.
- Takahashi K., Seno T., 2005. Diffusion of crustal deformation from disturbances arising at plate boundaries – a case of the detachment beneath the Izu Peninsula, central Honshu, Japan. *Earth, Planets and Space* 57 (10), 935–941. <https://doi.org/10.1186/BF03351873>.
- Toksöz M.N., Shakal A.F., Michael A.J., 1979. Space-time migration of earthquakes along the North Anatolian fault zone and seismic gaps. *Pure and Applied Geophysics* 117 (6), 1258–1270. <https://doi.org/10.1007/BF00876218>.
- Ulomov V.I., 1993. Waves of seismogeodynamic activation and long-term forecast of earthquakes. *Fizika Zemli* (4), 43–53 (in Russian) [Уломов В.И. Волны сейсмогеодинамической активизации и долгосрочный прогноз землетрясений // Физика Земли. 1993. № 4. С. 43–53].
- Zhadin V.V., 1984. Spatial-temporal relationships of strong earthquakes. *Izvestiya AN SSSR, Seriya Fizika Zemli* (1), 34–38 (in Russian) [Жадин В.В. Пространственно-временные связи сильных землетрясений // Известия АН СССР, серия Физика Земли. 1984. № 1. С. 34–38].
- Zuev L.B., Danilov V.I., Barannikova S.A., 2008. Physics of Macrolocalization of Plastic Flow. Nauka, Novosibirsk, 328 p. (in Russian) [Зуев Л.Б., Данилов В.И., Бараникова С.А. Физика макролокализации пластического течения. Новосибирск: Наука, 2008. 328 с.].



Павел Васильевич Макаров, докт. физ.-мат. наук, зав. лабораторией
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
634055, Томск, проспект Академический, 2/4, Россия
Томский государственный университет
634050, Томск, просп. Ленина, 50, Россия

✉ e-mail: pvm@ispms.ru

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0003-0541-5128>

Pavel V. Makarov, Doctor of Physics and Mathematics, Head of Laboratory
Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of RAS
2/4 Akademicheskii ave., Tomsk 634055, Russia
Tomsk State University
50 Lenin ave., Tomsk 634050, Russia



Юрий Андреевич Хон, докт. физ.-мат. наук, зав. лабораторией
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
634055, Томск, проспект Академический, 2/4, Россия

e-mail: Khon@ispms.ru

Yuri A. Khon, Doctor of Physics and Mathematics, Head of Laboratory
Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of RAS
2/4 Akademicheskii ave., Tomsk 634055, Russia



Алексей Юрьевич Перышкин, инженер
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
634055, Томск, проспект Академический, 2/4, Россия

e-mail: alexb700@yandex.ru

Aleksei Yu. Peryshkin, Engineer
Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of RAS
2/4 Akademicheskii ave., Tomsk 634055, Russia