

Сведения о выполненных работах в 2019 году
по проекту «**Механизмы генерации и распространения медленных волн деформации. Их роль в формировании очагов катастрофических разрушений, включая сейсмические активизации**»,
поддержанному Российским научным фондом
Соглашение № 19-17-00122

Руководитель д-р физ.-мат. наук Макаров Павел Васильевич

Выполнен литературный обзор по проблеме медленных деформационных возмущений в геосредах критически рассмотрена эволюция взглядов на физическую природу медленных деформационных возмущений, распространяющихся в геосредах со скоростями 1–100 км/год и более до 1–10 км/день. Показано, что миграции сейсмических активизаций и деформационных возмущений, распространяющиеся в геосредах со скоростями на 4–7 порядков ниже скоростей звука в геосреде, нельзя рассматривать как обычные волны и характеризовать их параметры как это принято в теории волн (длина волны, период). Также ошибочной является идея об их солитонной природе. Солитоны – это уединенные структурно устойчивые возмущения, которые генерируются и распространяются с большими скоростями в консервативных нелинейных средах с дисперсией, и их свойства определяются условиями их генерации, т.е. начальным импульсом, сгенерировавшим в нелинейной среде автосолитон.

Автосолитоны (АС), автоволны (АВ) и волны переключений, как простейший вид автосолитонов, генерируются в неконсервативных активных средах вследствие потери устойчивости в среде (нагруженная геосреда является активной средой). Свойства автосолитонов полностью определяются свойствами среды, в которой они сгенерировались и не зависят от начальных возмущений, приведших к локальной потере устойчивости в среде и, как следствие, к генерации автосолитонного возмущения.

Показано, что наблюдаемые медленные деформационные возмущения, а также механизмы их генерации проявляют все свойства автоволновых и автосолитонных возмущений. С позиций теории нелинейных динамических систем обоснована возможность генерации в упругопластической нагруженной геосреде автосолитонных возмущений всех типов: статических, бегущих и пульсирующих. Впервые получены примеры решений системы двух нелинейных уравнений Гинзбурга-Ландау для упругопластической среды в виде бегущих автосолитонных возмущений, возникающих в области упругопластических переходов вследствие потери в среде сдвиговой устойчивости. Эти возмущения распространяются в среде с малыми скоростями, полностью определяющимися свойствами среды.

Разработана математическая модель совместной генерации в упругопластических средах как обычных волн напряжений, распространяющихся со скоростями звука, так и медленных автосолитонных возмущений всех типов – бегущих, статических и

пульсирующих АС. Для совместного описания в упругопластических средах как обычной волновой динамики – волн напряжений, так и медленных автосолитонных возмущений, разработан и применен метод сжатия реального времени. Эта методика не влияет на скорости звуковых волн напряжений и напряженно-деформированное состояние нагружаемой среды, но увеличивает скорости медленных автосолитонных возмущений на несколько порядков, в зависимости от коэффициента сжатия времени, что и позволяет совместно описывать процессы, как обычной динамики, так и медленной автосолитонной динамики. Численными расчетами показано, что деформационные автосолитоны переносят скорость неупругой деформации. Скорость неупругой деформации во фронте автосолитонного возмущения на два порядка и более выше, чем перед фронтом и за фронтом. Так как неупругая деформация необратима, за фронтом деформационного автосолитонного возмущения остается след – неупруго продеформированная среда. При численной реализации математической модели рассмотрены две методики реализации в упругопластической среде локальной потери сдвиговой устойчивости и формирования автосолитонного возмущения: 1) комбинация подхода механики деформируемого твердого тела и метода клеточных автоматов, этот подход обеспечивает локальную упругую перегрузку прочной среды (несколько выше упругопластического перехода) с последующей релаксацией напряжений до равновесного состояния; 2) задание уравнения состояния среды с верхним пределом текучести (зубом текучести), что приводит среду в неустойчивое состояние, и с последующей релаксацией напряжений до нижнего равновесного предела текучести. На больших временах, геологических в том числе, медленная динамика начинает играть существенную роль как в перераспределении напряженно-деформированного состояния в нагруженной (активной) геосреде, так и в передаче деформационных возмущений от зон коллизии в глубь континентов, в том числе в процессах погружения океанической коры под континентальную.

Показано, что роль медленной автосолитонной динамики двояка. С одной стороны медленные деформационные автосолитонные возмущения на больших временах перераспределяя деформации и напряжения в геосреде возможно могут существенно снизить сейсмическую активность. С другой стороны, бегущие автосолитонные возмущения сливаясь со статическими автосолитонами – разломами наращивают в них степень локализации неупругой деформации и поврежденности, т.е. активно формируют область разлома как очага землетрясения, способствуют его эволюции к критическому состоянию.

Разработанная модель верифицирована как по данным экспериментов с малыми металлическими образцами, в которых методом спекл-интерферометрии фиксировались медленные деформационные возмущения, так и по наблюдениям за процессами миграции сейсмических активизаций. Показано, что скорости расчетных автоволновых и автосолитонных деформационных возмущений, как и в эксперименте пропорциональны скорости нагружения, коэффициент пропорциональности лежит в пределах 5–500 в зависимости от параметров уравнения состояния нагружаемой среды.

Разработана релаксационная модель с дислокационной кинетикой пластических сдвигов, для металлических образцов. Расчеты медленных деформационных возмущений, выполненные по этой модели, показали хорошее согласие расчетных скоростей сгенерированных в металлических образцах автосолитонных возмущений с наблюдениями.

Построены определяющие уравнения для реальной геосреды, учитывающие эффекты внутреннего трения и дилатансии. Показано, что в такой среде возможна генерация автосолитонных возмущений различного типа: бегущих, статических и пульсирующих автосолитонов. Как и в металлических образцах скорости автосолитонных возмущений полностью определяются параметрами модели и пропорциональны скорости внешнего нагружения.

Построены структурные модели блочных сред, в том числе для реальной геосреды по данным для профилей «Батолит-1982» и «Шпат-1983», находящихся на территории Енисейского кряжа. Эти структурные модели позволили численно изучить особенности генерации и распространения как внутриразломных, так и межразломных медленных деформационных возмущения, в том числе с учетом действия силы тяжести.

Показано, что в большинстве случаев медленные автосолитонные возмущения зарождаются на интерфейсах блочной геологической среды в областях концентраторов напряжений. При быстрых локальных во времени смещениях бортов разлома происходит локальная перегрузка нагруженной среды, что приводит к генерации автосолитонных возмущений, распространяющихся как по разломам, так и в блочной среде между разломами.

Численное изучение генерации деформационных автоволновых и автосолитонных возмущений, как результата локальной потери устойчивости нагружаемой упругопластической среды, показало, что автосолитонные возмущения генерируются в бистабильной среде вблизи упругопластического перехода. Упругая перегрузка локальных участков такой бистабильной среды приводит ее в неустойчивое состояние с генерацией автосолитонного возмущения, за фронтом которого наблюдается релаксация напряжений до устойчивого состояния.

Также показано, что сгенерированное автосолитонное возмущение может распространяться только в активной нагруженной упругопластической среде, состояние которой близко к упругопластическому переходу, т.е. упругопластическая среда должна находиться в метастабильном состоянии. В этом случае малые динамические возмущения могут вызвать в среде фазовый переход и генерацию автосолитонных деформационных возмущений. Показано, что амплитуды и скорости таких возмущений полностью определяются реологическими свойствами упругопластической среды, в частности наличием зуба текучести, величинами верхнего и нижнего пределов текучести.

Выполнены расчеты генерации внутриразломных автосолиitonных возмущений. Показано, что внутриразломные автосолиitonные возмущения носят пульсационный характер и моделируют процесс миграции сейсмических активизаций вдоль тела разлома.

Тестовые расчеты межразломных деформационных возмущений показали, что такие деформационные возмущения генерируются в областях максимальной концентрации напряжений и распространяются в прилегающую к разлому среду в направлениях максимальных касательных напряжений. Генеральное направление движения таких межразломных деформационных фронтов направлено в область более высоких напряжений, где наиболее вероятен упругопластический переход. Часто наблюдается зигзагообразное движение фронтов автосолиitonных возмущений. После релаксации напряжений до равновесного значения за фронтом возмущения, направление движения фронта меняется на 90° в сторону максимальных касательных напряжений.

Таким образом, показано, что медленные деформационные возмущения, так называемые медленные волны или медленные движения являются по своей физической природе типичными автоволновыми и автосолиitonными возмущениями. В геосредах наблюдаются как статические автосолиитоны, скорости которых равны нулю, это разломы разных масштабов, так и бегущие автосолиитоны и автоволны, к которым следует отнести все наблюдаемые медленные деформационные возмущения или по сложившейся терминологии «медленные волны». Автосолиitonная модель медленных деформационных возмущений в геосредах сформулирована в рамках настоящего проекта и на наш взгляд является физически обоснованной и наиболее перспективной моделью как медленных деформационных возмущений в геосредах, так и сейсмического процесса в целом.

Выявление физической природы и параметров медленных деформационных возмущений как типичных АС и АВ, распространяющихся в элементах земной коры, позволит в дальнейшем реально оценить их вклад как в формирование разломов и в сейсмический процесс, так и в процессы формирования рельефа земной поверхности и в механизмы передачи деформационных возмущений от границ плит в глубь континентов.