

Сведения о выполненных работах в 2021 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 Макаров Павел Васильевич, д-р физ.-мат. наук

Выполнены работы по дальнейшему развитию автосолитонной концепции медленной деформационной динамики применительно к сейсмическим процессам в геосредах с разломами:

1) смоделирован процесс зарождения и эволюции к критическому состоянию области разлома, как области локализации деформации и/или повреждений; эти области локализации деформационных процессов являются статическими автосолитонами;

2) изучен процесс эволюции области разлома к критическому состоянию, когда скорость деформации нарастает в сверхбыстром режиме (в режиме с обострением), увеличиваясь на многие порядки (5–7) на очень малых временах; с точки зрения автосолитонной концепции для процессов медленной деформационной динамики это процесс эволюции статического автосолитона в пульсирующий автосолитон;

3) смоделированы процессы распространения медленных деформационных возмущений,двигающихся как по разломам, так и по межразломному пространству – бегущие деформационные автосолитоны.

Применение подхода нелинейной динамики к описанию медленных деформационных процессов в земной коре привело к пониманию того, что кажущееся квазистатическое состояние на самом деле есть стадия медленной динамики – подготовки катастрофического события. На этой стадии происходит медленное накопление критических напряжений в области разломов, по достижению которых происходит сверхбыстрая релаксация напряжений и срыв берегов разломов.

Выявлена существенная роль медленных деформационных фронтов на медленной стадии деформационного процесса, которые служат механизмом перераспределения напряжений и накопления неупругой деформации и повреждений в разломах. Переносимой фронтами величиной является скорость неупругой деформации. Блоки земной коры находятся в стеснённых условиях, которые обусловлены как силой тяжести, так и тектоническими напряжениями и взаимодействиями с другими блоками. Необходимость совместного движения блоков приводит к накоплению напряжений на разломах, а аккомодация их формоизменения приводит к зарождению и движению межразломных и внутриразломных деформационных фронтов. Накопление напряжений в блоках и на разломах в итоге приводит к быстрым подвижкам блоков и, как результат, к землетрясению.

Таким образом, можно говорить о физической причине генерации медленных деформационных фронтов в земной коре, как о способе релаксации напряжений,

накопленных на неподвижных разломах. Их зарождение и движение связано не с непрерывным растяжением или сжатием блоков и тектонических плит, а с накоплением критических напряжений на разломах и их релаксацией. Тот факт, что они являются предвестниками землетрясений, указывает на то, что зарождение этих медленных возмущений связано с некоторой величиной накопленных повреждений, ещё не достигшей критического значения, приводящей к срыву разлома.

В численных экспериментах определены закономерности зарождения и распространения очагов локализованной деформационной активности в геосреде под действием сил тяжести. Области, в которых наблюдается пространственно-временная локализация деформационной активности, зарождаются вблизи поверхности приложения нагрузки, в то время как в остальном объёме деформационная активность не проявляет признаков самоорганизации. По мере сжатия геосреды, деформационная активность не только захватывает более глубокие слои, но и проявляется на большом удалении от места приложения нагрузки в виде самоорганизации фронтов локализованной неупругой деформации. По мере формирования сложной деформационной структуры, пробег деформационных фронтов убывает. Показано, что возмущения в первоначально «однородной» среде могут формироваться случайным образом, как из-за наличия неустойчивостей, так и за счет неоднородности, наведенной множественными пробегами звуковых волн напряжений.

Установлена возможность генерации внутренних деформационных автосолитонных возмущений. Они распространяются на глубине 5–15 км, например, вдоль границы осадочного чехла и кристаллического фундамента. Эти возмущения не проявляются на дневной поверхности. Можно провести аналогию с внутренними волнами в океанах, когда вследствие разницы плотностей слоев воды возмущается граница слоев воды разной плотности. Этот процесс также не проявляется на поверхности океана. С ним связывают гибель американской подводной лодки «Трешер», которая с гребня внутренней волны провалилась на недопустимую глубину во впадину.

Особенности генерации и распространения медленных деформационных возмущений – деформационных автосолитонов – были прослежены при моделировании процессов медленной динамики, включая сейсмический процесс, как для модельных участков геосреды, так и для реальных геосред с разломами в Байкальской рифтовой зоне, для фрагмента земной коры в области Енисейского кряжа (по геологическому профилю «Батолит–1982»), для области Чуйского землетрясения, которая включает Чуйскую и Курайскую горные впадины с более прочным Чаган-Узунским блоком, расположенным между этими впадинами.

Изучена динамика разлома как типичного статического автосолитона и выполнено моделирование предкритических состояний в разломах для изучения особенностей перехода деформационного процесса в разломе в катастрофический режим. Установлены закономерности движения фронтов деформационных возмущений по разлому. Движение фронтов является неравномерным и может сопровождаться остановками одного из фронтов и их попеременным движением.

Выполнены расчеты тектонических течений и сопровождающих их землетрясений для обширного региона Центральной и Юго-Восточной Азии, включающего и Байкальскую рифтовую зону. Анализ распределения неупругой деформации в исследуемом регионе показал, что основная деформационная активность сосредоточена в зонах разломов и ослабленной Байкальской рифтовой зоне, что отвечает наблюдениям. Единичный акт локализованной сейсмической активности моделируется как стадия деформирования в режиме с обострением, когда сдвиговая прочность падает практически до нуля в результате накопления повреждений в локальном участке геосреды. За энергию одного расчетного сейсмического события принималась работа, совершенная упругими напряжениями на неупругих деформациях на закритической стадии эволюции геосреды. Анализ пространственной структуры расчетных сейсмических событий показал, что крупнейшие события произошли на южном окончании Байкальской рифтовой зоны.

Смоделирована динамика локализации деформации в Чуйско-Курайском регионе. Выявлено, что с самого начала деформационного процесса формируется узкая область локализации неупругих деформаций, внутри которой наблюдаются зародыши будущих структур локализации вблизи основания в районе Северо-Чуйского хребта и Чаган-Узунского блока. Приповерхностные слои на границе между хребтами и впадинами также демонстрируют зачатки развития неупругих деформаций в виде отдельных очагов. Следующий этап характеризуется увеличением степени локализации деформации в приповерхностных слоях, сопровождающейся образованием нескольких отчетливых линеаментов. Структуры локализации в гранитном слое прорастают через весь гранитный слой. Другие зародыши структур локализации растут, образуя протяженный эшелон поверхностей локализации вдоль границы Чаган-Узунского блока и Курайской впадины с Южно-Чуйским и Северо-Чуйским хребтами. Завершающие этапы формирования разломной зоны связаны с объединением структур локализации, сформировавшихся на поверхности, со структурами в гранитном основании. Участок в окрестностях Южно-Чуйского хребта к юго-востоку от Чаган-Узунского блока оказался не полностью охваченным неупругой деформацией из-за особенностей сформировавшегося поля скоростей, что согласуется с сейсмологическими данными о минимальной сейсмической активности этого сегмента Чуйско-Курайского региона. Выполнено также моделирование сейсмического процесса в окрестностях Чуйской и Курайской межгорных впадин. Анализ пространственно-временной структуры смоделированного сейсмического процесса показал, что в первую очередь происходит активизация сегмента разломной зоны, прилегающего к Чаган-Узунскому блоку. Далее происходит миграции деформационной активности в направлении Северо-Чуйского и Южно-Чуйского хребтов.

Изучена динамика деформационной активности в разломах в результате триггерного воздействия медленными деформационными автосолитонными возмущениями. В результате моделирования участка среды с разломом, ориентированным под разными углами к оси приложения сжимающей нагрузки, показано, что когда распространяющийся фронт медленного деформационного

возмущения достигает вершины разлома, там образуются необратимые деформации и вдоль разлома распространяется медленное деформационное возмущение неупругой природы со скоростью в 10 раз выше скорости фронта активирующего разлом.

Проведенные эксперименты по изучению процесса перехода деформации в сверхбыстрый катастрофический режим для малых образцов горных пород при их сжатии и трехточечном изгибе с использованием лазерной доплеровской интерферометрии показали, что скорость боковой поверхности нагруженных образцов стремительно увеличивалась на несколько порядков перед катастрофическим разрушением. При изгибе образцов отмечаются одиночные динамические возмущения, соответствующие образованию и распространению трещины. При этом для образцов, нагруженных сжатием, встречаются многочисленные динамические возмущения, которые приводят не к катастрофическому разрушению, а к образованию одиночных трещин при сохранении несущей способности образцов.