

Современные тенденции в области механики тектонических землетрясений

Пантелеев И.А., Наймарк О.Б.

Представлен обзор моделей подготовки тектонического землетрясения, базирующихся на подходах из различных отраслей знаний: механики деформируемого твердого тела, статистической физики, математической статистики, нелинейной физики. Особое внимание уделяется идеологии построения моделей в призме задачи прогноза землетрясений. Обсуждаются достоинства и недостатки существующих моделей и современные тенденции их развития.

Несмотря на современный технический и технологический прогресс, расширение сетей по регистрации сейсмической активности и огромный объем накопленных данных о феноменологических закономерностях землетрясений, это явление остается одним из наиболее катастрофических и недостаточно прогнозируемых природных катаклизмов. Значимость исследования природы землетрясений возрастает в связи с ростом заселенности в окрестности крупных активных разломов [63].

Исторически сложилось, что развитие подходов к описанию механизмов подготовки очага землетрясения происходило вследствие огромного желания человечества научиться прогнозировать это явление, влекущее за собой огромные человеческие и экономические потери. Наиболее интенсивное развитие этот раздел науки получил во второй половине прошлого века, что вызвано появлением и развитием комплексных сетей непрерывного сейсмического мониторинга. Непрерывное функционирование подобных сетей вкуче с геофизическими и геодезическими наблюдениями в ряде сейсмоопасных районов позволило начать получать на порядки больше информации о процессах, предшествующих землетрясениям и их сопровождающих.

В начале 80-х годов прошлого столетия в США начал осуществляться эксперимент по развитию методов прогноза. На Паркфилдском геодинамическом полигоне, оснащенном различной сейсмологической, геофизической и геодезической аппаратурой, на котором землетрясения с магнитудами, близкими к $M = 6$, происходили с регулярностью 20–25 лет, ученые из разных стран получили уникальную возможность изучать процессы подготовки землетрясения. Предполагалось, что наблюдения позволят выявить особенности деформационного режима и сопутствующих ему физических полей в различные периоды формирования очаговой области.

После нескольких несбывшихся прогнозов землетрясений, выданных учеными в десятилетний срок [52, 69], эксперимент был признан неудачным и закрыт. Через 16 лет после прогнозируемой даты произошло землетрясение $M = 6$ (28 сентября 2004 г.), когда его менее всего ждали. При этом оно не сопровождалось предваряющим крипом и форшоками [68], характерными для предыдущих землетрясений этого региона. Предварительный анализ данных геофизических полей, полученных перед его возникновением, также не позволил выявить каких-либо значимых аномалий, которые можно было бы трактовать как предвестники землетрясения [69].

В Японии, которая на рубеже XX–XXI веков имела одну из наиболее плотных сетей сейсмических и GPS-станций (расстояние между станциями 50–100 км), ученым-сейсмологам не удалось спрогнозировать сильное землетрясение Токачи-Оки, произошедшего в 2003 г. к юго-востоку от о. Хоккайдо. В Китае после успешного прогноза землетрясения в окрестности г. Хайченг 1975 г. ($M = 7,3$) последовало катастрофическое Таншаньское землетрясение 1976 г., не проявившееся в целом ряде предвестников, за которыми осуществлялось слежение.

В целом комплексное изучение сейсмического режима и деформаций выполнявшееся на различных геодинамических полигонах (Паркфилд, Гарм, Талгар) показало, что вероятны разные сценарии подготовки очага землетрясений и, по-видимому, невозможно выделить один или несколько прогностических признаков, которые бы достоверно регистрировались при подготовке землетрясений в различных районах нашей планеты. Замечаемые отдельными исследователями на примере нескольких землетрясений аномальные (предвестниковые) изменения какого-либо геофизического, геодезического или сейсмологического параметра при увеличении наблюдений и числа анализируемых землетрясений начинали проявляться нерегулярно [8].

На данный момент успешных прогнозов крупных землетрясений, выданных за последние 60–70 лет – единицы [19, 21, 22, 43], тогда как сильные землетрясения, способные вызвать обширные разрушения, случаются на планете примерно раз в две недели. Данное положение вещей привело к тому, что на рубеже веков оптимизм в поиске прогностических признаков в геофизических и сейсмологических полях сменился глубоким пессимизмом. Появились публикации, утверждающие, что землетрясения носят исключительно случайный характер и детерминированный подход бесперспективен [8], а как следствие, прогноз землетрясений принципиально невозможен [62]. С середины 90-х годов прошлого века в проблеме прогноза землетрясений на западе практически не появились новые идеи. Отрицательный результат относительно прогноза позволил прийти к пониманию того, что наши представления о механизме генерации землетрясений достаточно далеки от реального природного процесса и необходимо вернуться к переосмыслению первопричины появления землетрясения – механизмам деформирования больших массивов горных пород.

Структура исследований землетрясений

Согласно работе [13] землетрясения необходимо рассматривать как систему, которая является частью более крупной системы – геодинамических процессов. Изучение этого природного явления требует системного подхода для выявления наиболее важных причинно-следственных связей. На рис. 1 представлена структура комплексных исследований землетрясений по И.Г. Киссину.

Для получения знаний, достаточных для осуществления практического прогноза, требуются комплексные исследования по двум основным направлениям:

1) геосреда, ее структура, неоднородность и прочностные свойства, выделение участков, подверженных сейсмическим деформациям;

2) характер напряженно-деформированного состояния (НДС) геосреды, факторы на него влияющие, тектонические напряжения, их распределения и изменения по силе и параметрам.

Первое направление – исследование среды, ее свойств и топологии с позиции построения формализованных теорий подготовки землетрясения, позволит получить априорную информацию, необходимую для выделения объекта исследования из окружающей среды, а также информацию о структурном строении среды и объекта исследований – зоны формирования очага. Согласно концепции геофизической среды М.А. Садовского [39], которая в настоящее время является общепризнанной, геосреда имеет блоковое иерархическое самоподобное строение, которое и определяет

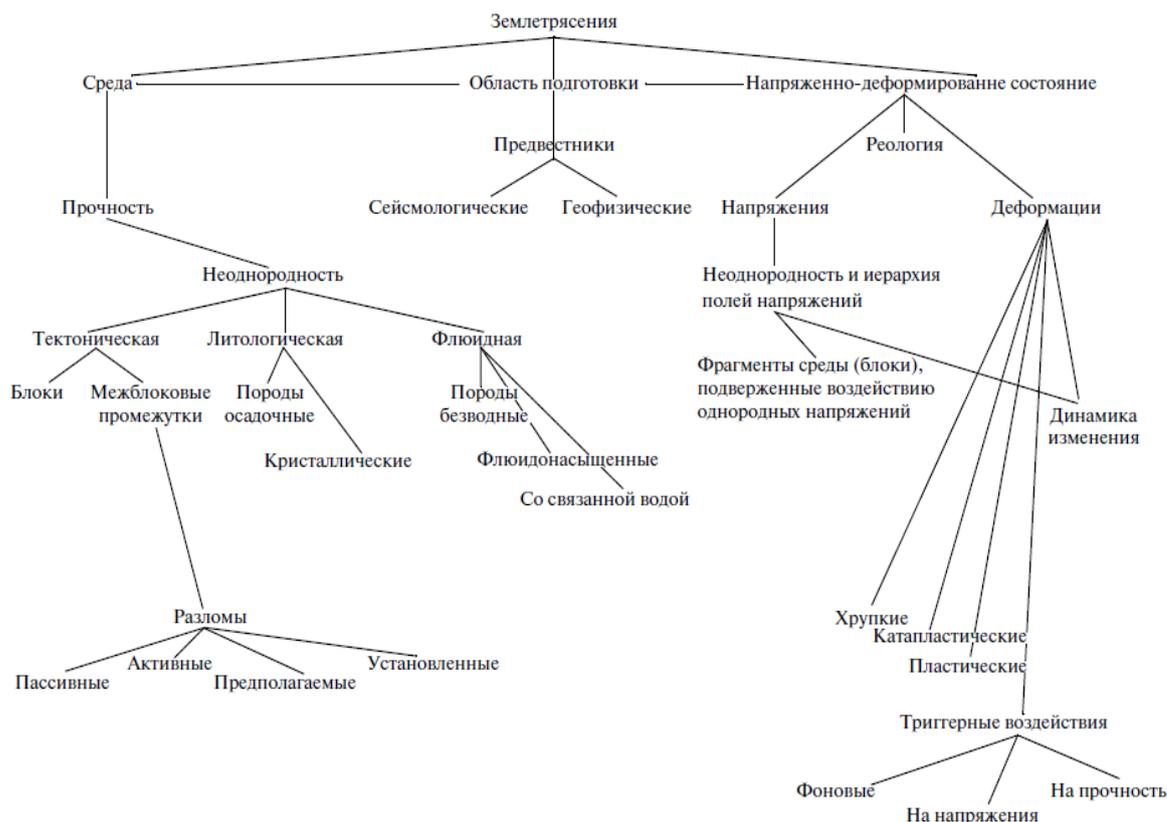


Рис. 1. Структура исследований землетрясений [13]

возможность среды накапливать, перераспределять, излучать и диссипировать энергию. Именно такие особенности строения среды определяют специфику сейсмических процессов [40].

Геосреда обладает ярко выраженной неоднородностью, которая определяется тремя факторами: литологическим, тектоническим и флюидным [65]. Литологическая неоднородность среды обуславливает резкое различие в механических и прочностных свойствах пород, расположенных в области формирующегося очага, которое может достигать до 2–3 порядков по величине (например, для модуля Юнга). Поэтому сейсмический процесс и его подготовка будет иметь свои особенности для очагов, расположенных в глубоких частях мощного осадочного покрова по сравнению с очагами, расположенными в консолидированной коре, представленной кристаллическими породами.

Тектоническая неоднородность среды определяет ее блоковое строение. Сейсмические деформации локализуются на ослабленных участках среды, к которым относятся межблоковые границы и системы разломов различного ранга. Блоковое строение геосреды влияет на характер ее деформирования в поле тектонических напряжений и особенности аномального изменения параметров геофизических полей, вызванного формированием очага землетрясения. Влияние флюида на сейсмический режим подтверждено многочисленными экспериментальными и натурными данными [14]. Это влияние определяется рядом факторов и процессов: эффектом Ребиндера, зависимостью критического касательного напряжения на плоскости разрыва от давления флюида, повышения напряжения за счет восходящего движения флюидов и расширения фильтрационных путей. По степени флюидонасыщенности земной коры выделяют осадочную и кристаллическую толщи [13]. В осадочной толще сейсмическая активность в основном сконцентрирована в нижней части, где порово-трещинные воды находятся под сверхгидростатическим давлением. В кристаллической

толще по характеру порово-трещинного пространства и проницаемости выделяют три типа пород: с повышенными значениями проницаемости, емкости пор и трещин; со сравнительно малой емкостью связанных каналов (порядка десятых долей процента); с очень низкой пористостью и трещиноватостью, почти нулевой проницаемостью. К первому типу относятся зоны разломов, ко второму – блоки и слои флюидонасыщенных пород, к третьему – массивы плотных пород.

Подобная градация четко выделяется на геофизических разрезах по скоростным и электрическим характеристикам. В соответствии с этой градацией места концентрации очагов землетрясений классифицируются по местоположению относительно флюидных систем консолидированной коры [13]: I – в пределах флюидных резервуаров или по соседству с ними; II – множественные очаги на субвертикальных путях миграции глубинных флюидов; III – с притоком воды при метаморфической дегидратации пород в зоне разрыва; IV – с притоком воды по путям фильтрации при подготовке очага; V – очаги в безводных породах (рис. 2).

Комплексное исследование структуры геосреды в сейсмоопасных районах с учетом тектонической, литологической и флюидной неоднородности ее строения позволит получить необходимую информацию для понимания процессов формирования и развития областей подготовки землетрясений, включая их пространственно-временную локализацию.

Второе направление исследований – исследование характера напряженно-деформированного состояния геосреды и физико-механических факторов, на него влияющих, с учетом существующих знаний о ее строении и структуре. Именно современные знания о структуре среды должны лежать в основе любого подхода к описанию эволюции напряженно-деформированного состояния среды в поле тектонических напряжений. Применительно к задаче прогноза землетрясений это направление исследований можно сформулировать более узко: изучение условий реализации того или иного способа релаксации напряжений массивами горных пород (в виде крупномасштабного хрупкого разрушения, катакластической или пластической деформации) в конкретной тектонической обстановке.

Современные знания, полученные в рамках обозначенных направлений, позволяют сформулировать новую модель подготовки землетрясения, которая согласно И.Г. Кисину, в настоящее время отсутствует, и необходимость в ней очевидна [13].

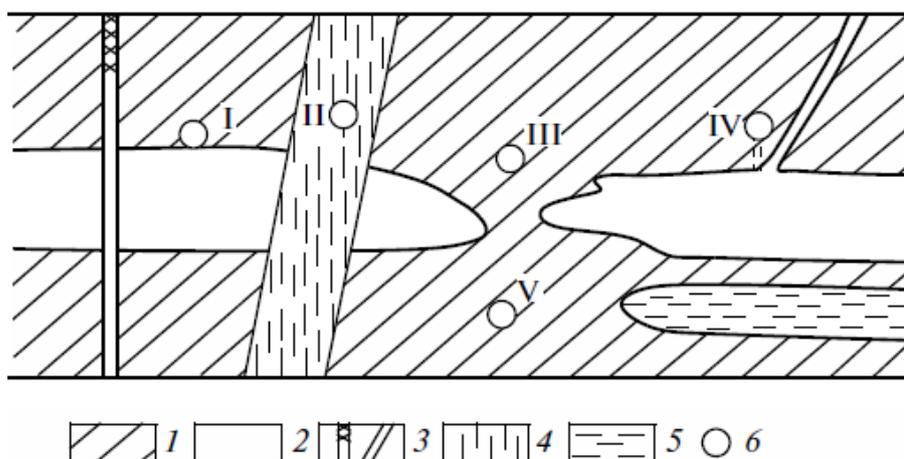


Рис. 2. Положение очагов землетрясений в фильтрационном поле консолидированной коры [13]: 1 – массивы слабопроницаемые, практически сухие; 2–5 – флюидонасыщенные тела: 2 – субгоризонтальные зоны; 3 – субвертикальные и наклонные разломы (крестики – участки с изменением проницаемости); 4 – субвертикальные зоны концентрации очагов; 5 – зоны рассеянных скоплений флюидов; 6 – очаги землетрясений

Модели подготовки тектонического землетрясения

Большинство существующих моделей очага землетрясения являются развитием двух противоположных представлений о процессе формирования очага землетрясений, которые берут свое начало от работ Г.Ф. Рейда и Ч.Ф. Рихтера. Согласно Г.Ф. Рейду [79], земная кора находится в непрерывном перемещении и подготовка землетрясения начинается с возникновения некоторого препятствия этому перемещению. Препятствие, как правило, представляет собой зону жесткого зацепления на берегах разлома, вызывающую резкий рост напряжений в локальной пространственной области (накопление упругой энергии). В некоторый момент времени, когда уровень напряжений достигает предела прочности [53] или плотность запасенной потенциальной энергии достигает критического значения [5], происходит разрушение препятствия с образованием сдвигового разлома, представляющего собой очаг землетрясения [46].

Таким образом, потенциальными очагами землетрясения по Рейду являются локализованные в пространстве области повышенных напряжений, близких к пределу прочности породы. Согласно же Рихтеру [37], до землетрясения распределение деформаций и напряжений по пространству является однородным, а появление землетрясения связывается с возникновением, по тем или иным причинам, локализованной зоны пониженной прочности, которое также характеризуется пониженным уровнем девиаторных напряжений.

По И.П. Добровольскому [11] модели очага землетрясения, базирующиеся на подходах Рейда или Рихтера, можно разделить на две качественно различающиеся группы – по механизмам консолидации и деструкции. Наиболее известными и общепризнанными представителями этих групп являются две модели, которые появились в середине второй половины XX века, в период наиболее активных исследований в области физики и механики землетрясений – дилатантно-диффузионная модель (ДД-модель) и модель лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ-модель).

Согласно ДД-модели, предложенной в 1972 году учеными из США [2, 51], процесс подготовки землетрясения имеет следующие характерные стадии:

1-я стадия – упругая. Происходит рост упругих напряжений, растет разность главных напряжений, т.е. девиаторная часть тензора напряжений. Физическое состояние среды фактически не меняется.

2-я стадия – дилатантная. При достаточно большой разности главных напряжений образуются трещины отрыва, и поэтому возникает общее увеличение объема породы – дилатансия. Поровое давление падает, прочность пород возрастает.

3-я стадия – диффузионная. Осушение пород вызывает диффузию воды в зоне подготовки, поровое давление растет, прочность пород снижается, и процесс заканчивается магистральным разрывом.

На рис. 3 представлены характерные вариации физических параметров на каждой из трех стадий по ДД-модели [31]. Третья стадия, непосредственно предшествующая реализации землетрясения, характеризуется резким уменьшением скорости деформации в области готовящегося очага и резким увеличением электропроводности пород, что является прогностическим признаком, согласно данной модели.

Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования предложена советскими учеными в 1971 году [2, 26] и основана на результатах лабораторных исследований процессов разрушения горных пород. Согласно ЛНТ-модели, формирование очага землетрясения является результатом развития и взаимодействия большого количества сдвиговых трещин в гипоцентральной области и осуществляется в три стадии:

1-я стадия – однородное растрескивание. Под действием сдвиговых тектонических напряжений происходит медленный рост числа и размеров существующих трещин и образование новых. Трещины располагаются относительно далеко друг от

друга и практически не взаимодействуют. В статистически однородной среде при равномерном нагружении трещинообразование также статистически однородно, и это соответствует докритической стадии разрушения, обнаруженной в лабораторных экспериментах.

2-я стадия – лавинное взаимодействие трещин. При достижении во всем объеме или большей его части некоторой критической плотности трещин происходит их взаимодействие с удлинением тех из них, которые наиболее выгодно ориентированы по отношению к полю напряжений.

3-я стадия – стадия неустойчивости. Дальнейшее увеличение деформации приводит к локализации процесса деформирования в узкой пространственной области, характеризующейся повышенной концентрацией разрывов и являющейся прообразом будущего магистрального разрыва. Падение напряжения в этой зоне может привести к падению напряжения в рассматриваемом объеме геосреды. Среда разделяется на две зоны: А и В, с различными свойствами (рис. 4). В то время как в зоне локализуемой неустойчивой деформации продолжается ускоренное трещинообразование, существующие в окружающем объеме трещины вследствие частичной разгрузки перестают развиваться и становятся неактивными.

Начало процесса лавинного взаимодействия трещин определяется согласно кинетической концепции прочности [12] достижением концентрационным параметром критического значения, равного трем. При этом концентрационный параметр представляет собой отношение двух характерных пространственных масштабов в среде с трещинами: размера трещин L и среднего расстояния между ними l :

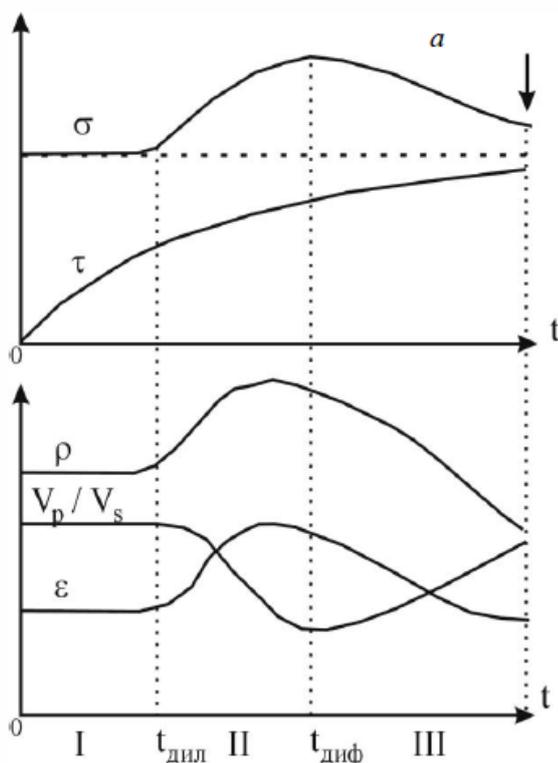


Рис. 3. Схема изменения физических параметров для ДД-модели подготовки очага землетрясения: σ – напряжения, τ – прочность, ρ – электросопротивление, $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации, V_p/V_s – отношение скоростей продольных и поперечных волн, $t_{дил}$ – время начала дилатансии, $t_{диф}$ – время, когда скорость диффузии флюида превышает скорость дилатансии

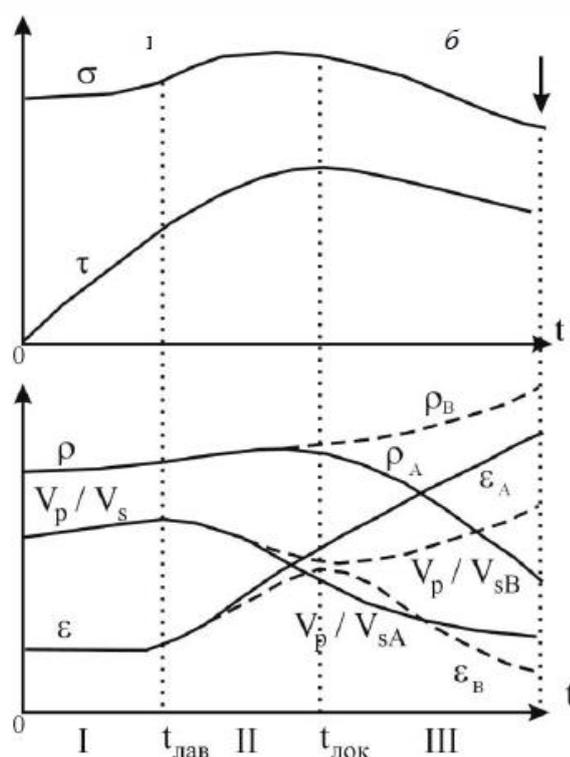


Рис. 4. Схема изменения физических параметров для ЛНТ-модели подготовки очага землетрясения: σ – напряжения, τ – прочность, ρ – электросопротивление, $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации, V_p/V_s – отношение скоростей продольных и поперечных волн, $t_{лав}$ – начало лавинного нарастания трещин, $t_{лок}$ – начало локализации трещин в области будущего разрыва. А – зона локализации трещинообразования, В – зона, лежащая за пределами области локализации

$$K = \frac{L}{l}. \quad (1)$$

Согласно ЛНТ-модели, в отличие от ДД-модели, на завершающей стадии формирования очага землетрясений происходит резкое увеличение скорости деформации в области готовящегося очага и постепенное уменьшение отношения скоростей продольных и поперечных упругих волн (см. рис. 4).

Несмотря на распространенность, обе модели являются качественными и не позволяют описать краткосрочные предвестники, объяснение же средне- и долгосрочных предвестников с позиций данных моделей не выдерживает никакой критики под натиском новых фактов наблюдений.

В отличие от ЛНТ и ДД-модели, которые являются описательными, существует большое количество формализованных моделей подготовки тектонического землетрясения, которые также по механизму реализации накопленной упругой энергии можно разделить на модели по механизму деструкции и механизму консолидации. С другой стороны, в зависимости от используемых методов и подходов эти модели можно разделить на три класса:

1. Динамические модели, описывающие перенос импульса (напряжений, массовых скоростей) на разломах на основе детерминистического представления.
2. Статистические модели, описывающие вероятность сдвиговых нарушений на основе статистических данных о сейсмических событиях.
3. Модели механики деформируемого твердого тела.

К первому классу относятся модели распространения сдвиговых трещин в поле приложенных напряжений [67], скольжения по гладкому разлому с различными соотношениями для силы трения [54, 80], ряд моделей, являющихся развитием идеи «прерывистого скольжения» (stick-slip), высказанной Брайсом и Баерли [55]. Наиболее известной формализованной stick-slip-моделью является модель Барриджа–Кнопва, согласно которой подвижная плита движется по неподвижной благодаря скольжению блоков, связанных между собой и с плитой посредством пружин (рис. 5). Подобный подход позволил описать ряд статистических закономерностей развития сейсмических событий и получил развитие в работах ряда исследователей [50, 56–58, 66, 72, 76].

Одним из ярких представителей класса статистических моделей является статистическая механика сейсмических явлений, развиваемая J.B. Rundle [82–84]. Рассматривается система локализованных сдвигов $s(x, t)$ по нарушениям сплошности в земной коре с заданной реологией последней, находящейся в поле приложенного напряжения. Статическое равновесие такой системы определяется соотношением

$$\sigma_e [x, t, s(x', t'), p] = \sigma_f [x, t, s(x, t)], \quad (2)$$

где $\sigma_e(x, t)$ – упругие напряжения, определяемые смещением основания исходного нарушения земной коры, а также напряжениями, возникающими от сдвигов на нарушениях с координатами (x', t') ; $\sigma_f(x, t)$ – напряжения трения на нарушениях земной коры, ассоциированные со сдвигами $s(x, t)$.

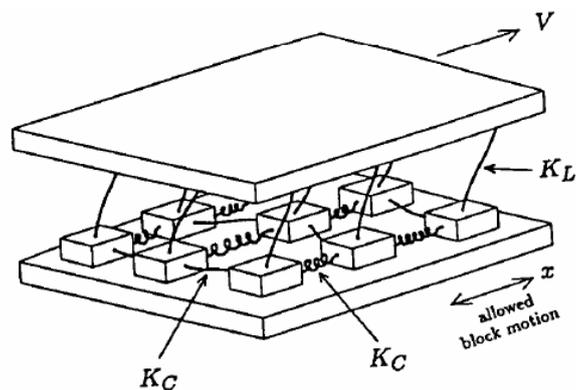


Рис. 5. Модель сейсмичности Барриджа–Кнопва (V – скорость движения плиты, K_L – коэффициент трения, K_C – жесткость пружин)

Перенос напряжений в земной коре обусловлен как динамическими эффектами, возникающими при распространении сейсмических волн, так и статическими – после их прохождения. Вопрос о природе фрикционных эффектов является одним из центральных и интенсивно обсуждается применительно к различным модельным представлениям. К основным из них можно отнести:

– Модели клеточных автоматов [85], основанные на введении статистических порогов разрушения, при которых реализуется скачкообразный сдвиг, уменьшающий значения напряжений до некоторого остаточного уровня. Различные сценарии эволюции нарушений связываются с условиями синхронного и асинхронного скачков для различных пространственно-распределенных нарушений, в том числе при различных масштабах временного запаздывания. Для рассматриваемых моделей установлено проявление длинно-корреляционных взаимодействий (модели «среднего поля») и наличие флуктуаций больцмановского типа.

– Модели сдвигового, скоростного разупрочнения, а также модели, учитывающие чувствительность фрикционного закона к скорости деформации, которые являются феноменологическим приближением к описанию физических механизмов, лежащих в основе явлений сдвига на нарушениях земной коры [59, 60, 81]. Кинетические особенности формирования сдвига отражены в представлениях о «бегущей волне плотности», отражающие результаты наблюдений о волновых закономерностях переноса импульса в системах с трением.

– Иерархические статистические модели [86, 87, 91], отражающие увеличение вероятности разрушения при росте внешних напряжений, позволяющие развить описание автомодельных закономерностей как основных сейсмических событий (майншоков), так и сопутствующих явлений (пре- и автершоков). Принципиально важной проблемой для данного подхода является выбор и обоснование закона для вероятности разрушения.

В рамках статистической механики сейсмических явлений удалось установить переходы между состояниями системы, характеризующимися глобальным минимумом энергии, к метастабильному состоянию при вариации безразмерного параметра, определяющего баланс соотношения энергий упругих возмущений в окрестности области сдвига, локализованного на нарушении земной коры, и длинно-коррелированными возмущениями «эффективного сдвигового поля», инициирующего, наряду с упругой составляющей поля, локальный сдвиг на выделенном нарушении.

Другими статистическими моделями, позволяющими описать автомодельные закономерности развития сейсмических событий, являются «модель нарастающих последовательностей» (ETAS-model – epidemic type aftershock sequence model) [74] и ее модификации [64, 73, 75, 78, 90, 94], а также модель сейсмического режима как совокупности эпизодов лавинообразной релаксации, возникающих на множестве метастабильных систем [38].

Класс моделей подготовки очага землетрясения, базирующихся на подходах механики деформируемого твердого тела, является наиболее малочисленным. Это связано с недостатком знаний о физико-механических процессах, протекающих в массивах горных пород на километровых глубинах, невозможностью проведения «натурных» экспериментов, полноценного верифицирования и идентифицирования разрабатываемых моделей. Поэтому базой для построения подобных моделей являются результаты лабораторных исследований широкого спектра горных пород при различных видах нагружения, без или в присутствии флюида (так же, как в случае создания качественных описательных моделей). Несмотря на все существующие сложности, необходимость создания моделей подобного рода очевидна, и связана она с необходимостью объяснения причинно-следственных связей между наблюдаемыми аномалиями в физических полях и процессами деформирования локальных объемов горных пород, вызывающих появление землетрясения. Именно понимание этих причинно-следственных связей и механизмов, за ними стоящих, позволит совершенно на другом уровне подойти к вопросу прогноза.

В рамках данного класса моделей особое внимание хотелось бы обратить на две различные по логике построения модели: модель консолидации И.П. Добровольского [11] и реологическую модель В.П. Мясникова, В.А. Ляховского [70, 71]. В модели консолидации процесс подготовки землетрясения состоит из двух стадий (рис. 6): подготовки землетрясения и стадии следования афтершоков.



Рис. 6. Процесс подготовки очага землетрясения по модели консолидации (стрелка – момент землетрясения)

Согласно И.П. Добровольскому, стадия асейсмического состояния сменяется фазой консолидации, на которой два блока (отдельности) входят в относительно прочное зацепление, образуя консолидированную область или неоднородность, осредненные свойства которой отличаются от аналогичных ее свойств до зацепления. Неоднородность (консолидированная область) развивается, к ней могут присоединяться соседние блоки, изменяется ее физическое состояние, происходит сложное перераспределение напряжений внутри и вне неоднородности. Наконец, начинается распад неоднородности путем быстрых пластических подвижек, форшоков, магистрального разрыва и афтершоков, которые приводят среду вновь в асейсмичное состояние.

Модель консолидации полностью опирается на идею Рейда о процессе подготовки землетрясения, но в отличие от других моделей имеет развитый механико-математический аппарат, который позволил провести численные расчеты различных предвестников (деформационных, гидродинамических, электромагнитных) [9–11]. В рамках приближения дальнего поля рассматривается статическая задача о возмущении НДС нагруженной на бесконечности касательными напряжениями упругой полуплоскости шаровой неоднородностью упругих свойств. Область подготовки будущего очага (неоднородность) отличается от вмещающих ее пород только модулем сдвига. На основе известного решения задачи Эшелби о шаровой неоднородности в упругом полупространстве [49] в рамках модели консолидации получены аналитические выражения для компонент вектора перемещений и тензора деформаций. Далее полученные решения используются для прямых расчетов предвестниковых возмущений.

Реологическая модель В.П. Мясникова и В.А. Ляховского является вариантом формализованного представления ЛНТ-модели, согласно которой процесс подготовки состоит из трех последовательных стадий эволюции ансамбля трещин в геосреде на некотором пространственном масштабе. Согласно этой модели плотность свободной энергии может быть записана в виде

$$F_e = F_0 + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\lambda(\alpha)}{2} I_1^2 + \mu(\alpha) I_2 - \gamma(\alpha) I_1 \sqrt{I_2} \right), \quad (3)$$

где $I_1 = \sum_i \varepsilon_{ii}$, $I_2 = \sum_{ij} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij}$ – первый и второй инварианты тензора деформации, ρ – плотность материала, $\lambda(\alpha) = \lambda_0 - \alpha \lambda_r$, $\mu(\alpha) = \mu_0 - \alpha \mu_r$, $\gamma(\alpha) = \alpha \gamma_r$, λ_0, μ_0 – константы Ляме неповрежденного материала, $\lambda_r, \mu_r, \gamma_r$ – параметры, характеризующие вклад повреждений в упругие свойства, $F_0 = F_0(T)$ – константа в изотермическом случае. Безразмерная переменная α ($0 < \alpha \leq 1$) определяет степень поврежденности среды.

Выражение для плотности свободной энергии получено в предположении об отсутствии взаимодействия между трещинами. В рамках данной модели может быть описана первая стадия развития формирования источника землетрясения – стадия однородного растрескивания. Для описания перехода от диффузного накопления трещин к состоянию самоорганизованного растрескивания в работе [70] вводится дополнительная переменная $\varphi \geq 0$, определяющая степень взаимодействия между разрывами. По аналогии с фазовыми переходами параметр порядка α имеет смысл обратной температуры. В этом случае плотность свободной энергии с учетом степени взаимодействия между разрывами может быть представлена в виде

$$F(\varepsilon_{ij}, \alpha, \varphi, \nabla\alpha, \nabla\varphi) = F_e(\varepsilon_{ij}, \alpha) + F_i(\varepsilon_{ij}, \alpha, \varphi, \nabla\alpha, \nabla\varphi), \quad (4)$$

где $F_e(\varepsilon_{ij}, \alpha)$ задается соотношением (3). При этом кинетическое уравнение для параметра поврежденности α представляется в виде уравнения Гинзбурга–Ландау:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \begin{cases} -K_\alpha \frac{\partial F(\varepsilon, \alpha, \varphi)}{\partial \alpha}, & \frac{\partial F(\varepsilon, \alpha, \varphi)}{\partial \alpha} \leq 0, \\ 0, & \frac{\partial F(\varepsilon, \alpha, \varphi)}{\partial \alpha} > 0. \end{cases} \quad (5)$$

В случае учета пространственной неоднородности параметра поврежденности в выражении для компонент тензора напряжения появляется слагаемое, отражающее эффекты нелокальности в терминах параметра φ .

Данный подход позволил описать такие эффекты, как ускорение сейсмического энерговыделения [42, 93] и рост корреляционной длины слабой сейсмичности перед большим землетрясением [92, 95]. В квазистатическом приближении он позволяет описать две из трех стадий подготовки источника землетрясения, введенных в ЛНТ-модели.

Каждая из моделей построена с большим количеством гипотез относительно строения и свойств геосреды, в которой формируется очаг землетрясения, однако между ними есть отличие принципиального характера. Если в модели консолидации причиной формирования неоднородности – прообраза очага землетрясения, является зацепление берегов двух блоков (отдельностей, разломов и т.д.), имеющее один характерный пространственный масштаб (радиус неоднородности), то в случае второй модели очаг землетрясения является следствием развития ансамбля взаимодействующих трещин. При этом, хотя явно это не вводится, такая система содержит уже два характерных масштаба: размер трещин и среднее расстояние между ними, которые и определяют нелинейный характер развития трещиноватой среды в поле приложенного напряжения.

Обсуждение

Существенным недостатком моделей подготовки тектонического землетрясения, использующих подходы механики деформируемого твердого тела, является игнорирование ряда современных представлений о процессе разрушения, основанных на лабораторных и полевых наблюдениях. Осознание этой проблемы пришло в начале XXI века, когда остро стал вопрос о пересмотре существующих представлений о механизме генерации землетрясений. В качестве примера приводим ряд цитат из работ различных российских ученых:

Гольдин С.В. Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика Земли. 2004. № 10. С. 37: «Если рассмотрим наиболее известные концепции подготовки и развития отдельно взятого крупного землетрясения, то наличие фрагментации материала коры далеко не всегда играет в них важную роль».

Киссин И.Г. О системном подходе в проблеме прогноза землетрясений // Физика

Земли. 2013. № 4. С. 147: «Современная модель, учитывающая условия деформирования блоковой среды, влияние флюидов, нелинейность сейсмических процессов и другие факторы, отсутствует, и необходимость в ней очевидна».

Макаров П.В. Самоорганизованная критичность деформационных процессов и перспективы прогноза разрушения // Физическая мезомеханика. 2010. Т. 13. № 5. С. 97–112: «Понять и изучить механизмы разрушения, а тем более научиться их предсказывать, фиксируя внимание только на макроскопическом масштабе усредненного описания, невозможно в принципе».

Ребецкий Ю.Л. Современное состояние теорий прогноза землетрясений. Результаты оценки природных напряжений и новая модель очага землетрясений // Проблемы тектонофизики. М., 2008. С. 364: «Отрицательный результат в проблеме прогноза показывает, что наши представления о механизме генерации землетрясений достаточно далеки от реального природного процесса. <...> Многие представления о процессе подготовки землетрясения перекочевали из механики прочности конструкционных материалов и не учитывают особенности строения сейсмогенных участков земной коры – разломных зон».

Гольдин С.В. Макро- и мезоструктуры очаговой области землетрясения // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. № 1. С. 6: «В существующих концепциях землетрясения структура очаговой области никак не декларируется (самое большое – указывается появление области локализации деформации, в которой и развивается сам разрыв), либо же рассматривается достаточно простая геометрия поверхности, вдоль которой происходит прерывистое скольжение одной плиты относительно другой».

Эти цитаты подчеркивают тот факт, что в существующих моделях, использующих подходы механики деформируемого твердого тела и направленных на описание процесса подготовки тектонического землетрясения, в полной мере не учитывается ни структура разломных зон, ни нелинейный характер их поведения в поле приложенных напряжений. Только в последние несколько лет для описания процесса формирования очага землетрясения стали использоваться подходы, основанные на концепции геосреды как неравновесной критической системы [23, 44, 45, 89]. Согласно этой концепции, с приближением момента сильного землетрясения характеристики индивидуального поведения структурных элементов геосреды становятся менее существенными, в отличие от коллективных эффектов, охватывающих все пространственно-временные масштабы системы. Под структурными элементами понимаются дефекты геосреды того или иного масштабного уровня – поверхности механического нарушения сплошности, образующиеся в геосреде как в деформируемом твердом теле под действием внешних сил (трещины, разломы, границы блоков и т.д.). Наличие пространственно-иерархической структуры дефектов литосферы определяет существенную неоднородность полей напряжения того или иного масштаба, а как следствие, влияет и на способ диссипации накопленной горными массивами упругой энергии (хрупкое крупномасштабное разрушение, катакластическое течение или локализованное пластическое течение). Следствием иерархического (блочно-иерархического) строения геосреды является самоподобный (автомодельный) характер развития процессов деформирования и разрушения на каждом из пространственных масштабов, проявляющийся в виде ряда масштабно-инвариантных закономерностей:

- закона Гуттенберга–Рихтера и Омори для сейсмических событий и сигналов акустической эмисии;
- универсального принципа фрактальной делимости твердых тел и сред [25];
- разломо-блоковой делимости литосферы [48, 88];
- степенного распределения трещин в деформируемом материале по размерам [1].

Впервые гипотеза о единстве природы развития несплошностей на широком спектре пространственных масштабов была высказана во второй половине прошлого века М.В. Гзовским [5].

Необходимым фундаментом для построения формализованных теорий эволюции геосреды под действием внешних напряжений (в частном случае – моделей подготовки тектонического землетрясения) должно являться понимание иерархического строения геосреды с дефектами, а также самоподобного (автомодельного) характера развития процессов деформирования и разрушения такой среды на каждом из пространственных масштабов. Особенность современного этапа развития формализованных теорий подготовки очага землетрясения заключается в том, что существующие теории формально ни на одном этапе своего построения не используют свойство статистической автомодельности или самоподобия развития процесса деформирования и разрушения геосреды. Также из логики построения теорий, как правило, не следует автоматическое выполнение обозначенных авторами следствий, что вызвано «искусственностью» связи между выдвинутой гипотезой самоподобия (если она вообще принимается) и используемым математическим аппаратом. К исключению, с точки зрения авторов, можно отнести статистическую механику землетрясений [84] и статистическую модель геосреды с дефектами [28], разрабатываемую в лаборатории физических основ прочности Института механики сплошных сред Уро РАН (г. Пермь).

При построении статистической модели геосреды с дефектами, в отличие от модели J. Rundle [84], используются подходы как статистической физики, так и механики деформируемого твердого тела. Вводятся тензорные структурные переменные, ассоциированные с двумя характерными типами дефектов: трещинами и локализованными сдвигами (рис. 7).

Процедура осреднения структурных переменных по статистическому ансамблю дефектов с учетом гипотезы статистической автомодельности позволила получить уравнение самосогласования, определяющее зависимость макроскопического тензора деформации, индуцированной дефектами, от величины внешних напряжений, исходной структуры и взаимодействия дефектов, которое в безразмерном случае содержит только один параметр – параметр структурного скейлинга. Параметр структурного скейлинга является аналогом концентрационного параметра [12] и определяется отношением характерных структурных масштабов: размером дефектов и средним расстоянием между дефектами.

В результате решения уравнения самосогласования в рамках статистической модели геосреды с дефектами получено три характерных реакции геосреды с дефектами на рост внешнего напряжения (рис. 8), которые определяются величиной параметра структурного скейлинга. Формулировка неравновесной свободной энергии для среды с дефектами в форме, аналогичной разложению Гинзбурга–Ландау, позволила записать эволюционные уравнения для введенных параметров порядка (деформации, обусловленной дефектами, и параметра структурного скейлинга) и исследовать их собственные решения (рис. 9).

При $\delta > \delta_*$ имеет место устойчивое квазипластическое деформирование среды, локализованное в регулярно расположенных пространственных областях, характеризующееся отсутствием коллективных ориентационных эффектов. Примерами таких областей, по мнению авторов, могут служить внутриплитные зоны концентрированной деформации [20] и зоны регулярности в нарушенности разрывами субстрата разломных зон [41] активно исследуемые в настоящее время.

Интервал $\delta_c < \delta < \delta_*$ значений параметра структурного скейлинга характеризуется появлением области метастабильности в поведении среды с дефектами, когда при некотором критическом напряжении $\sigma_m(p_m)$ происходит ориентационный переход в ансамбле взаимодействующих дефектов, сопровождающийся резким скачком деформации. При этом на масштабе наблюдения (осреднения) этот переход проявляется в виде локализованной катакластической деформации [35], мигрирующей по пространству со скоростью на порядки меньшей скорости звука – «медленной» де-

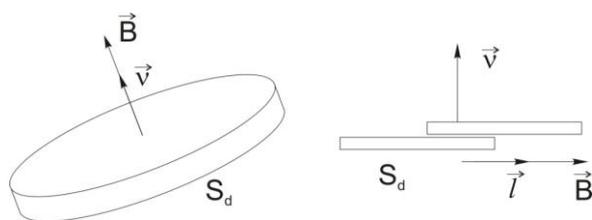


Рис. 7. Характерные типы дефектов: дискообразная трещина и локализованный сдвиг (\vec{n} – единичный вектор нормали к основанию площадки сдвига или основанию микротрещины, \vec{l} – единичный вектор в направлении сдвига)

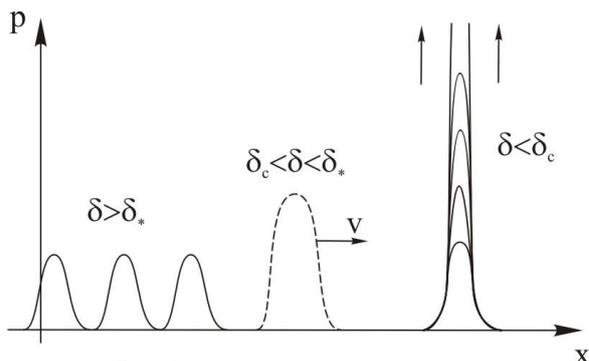


Рис. 9. Автомодельные решения кинетического уравнения для деформации, обусловленной дефектами: периодические пространственные структуры (при $\delta > \delta_*$), автосолитонные волны (при $\delta_c < \delta < \delta_*$) и локализованные диссипативные структуры обострения ($\delta < \delta_c$)

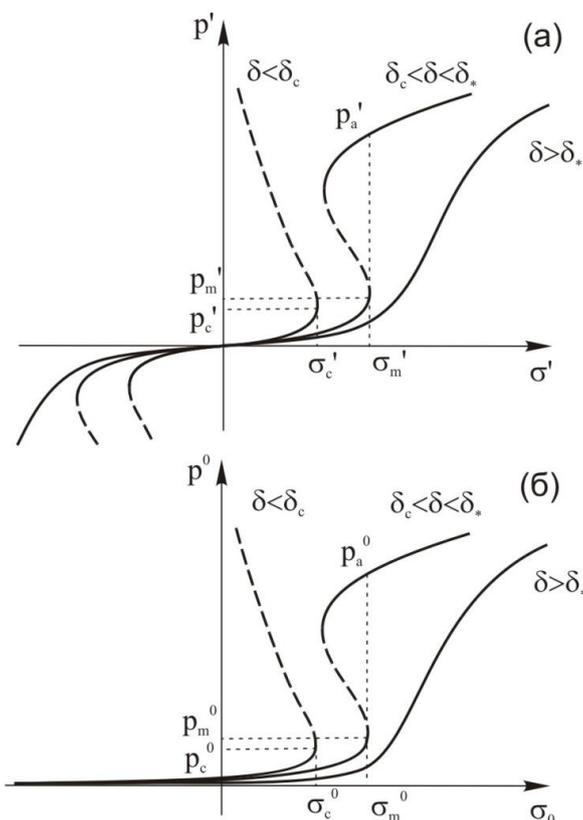


Рис. 8. Характерные зависимости девиаторной (а) и шаровой (б) частей деформации обусловленной дефектами от приложенного напряжения для различных значений параметра структурного скейлинга

формационной волны, являющейся неотъемлемым фундаментальным свойством самоорганизации деформируемой среды (см. рис. 9).

В работах [7, 23, 24] подчеркивается особая роль «медленных движений» в процессах деструкции твердого тела (от лабораторного образца до масштаба литосферы) как одного из основных способов переноса энергии.

Дальнейшее уменьшение среднего расстояния между дефектами ($\delta < \delta_c$) приводит к вырождению ориентационной метастабильности и формированию в среде локализованных диссипативных дефектных структур, которые при достижении критического напряжения $\sigma_c(p_c)$ развиваются в режиме с обострением – режиме лавинно-неустойчивого роста дефектов в локализованной пространственной области, уменьшающейся с течением времени.

На масштабе наблюдения этот процесс проявляется в виде хрупкого разрушения с формированием зоны разрушения соизмеримой с самим масштабом наблюдения. Таким образом, эволюция дефектной подсистемы в режиме с обострением является заключительной стадией перед переходом процесса деформирования и разрушения на следующий пространственный масштаб, что, согласно работам [23, 24], является общим свойством всех деформируемых твердых тел и сред.

Теоретические предположения о появлении обостряющихся локализованных диссипативных структур при локализации разрушения впервые были высказаны в работе [27] и получили свое развитие в работах [28–30, 77]. Фундаментальным свойством реализации режима с обострением [17, 18] является «замораживание» развития процесса деструкции на всем рассматриваемом пространственном масштабе, кроме локальной области, на которой это обострение будет происходить. Физически это проявляется в виде зон затишья, которые имеют место перед землетрясениями

[6, 47, 84–86]. Особое внимание хотелось бы обратить на важное следствие из полученных результатов: предельное напряжение, требуемое для начала формирования очага макроскопического хрупкого разрушения, меньше, нежели для реализации локализованного катакластического течения. Поэтому высокий уровень локальных напряжений не является индикатором и необходимым условием начала хрупкого разрушения. Этот вывод согласуется с последними результатами по тектонофизической реконструкции природных напряжений в ряде районов крупных землетрясений, выполненными методом катакластического анализа разрывных смещений, активно развивающегося коллективом Ю.Л. Ребецкого [32–34, 36].

По итогам реконструкции обнаружено, что очаги крупных землетрясений не совпадают с областями максимального уровня напряжений, а располагаются в области среднего уровня девиаторных и изотропных напряжений, соседствующих с участком большого градиента этих напряжений.

Таким образом, статистическая модель поведения геосреды с дефектами в поле внешних напряжений позволяет описать основные способы релаксации напряжений массивами горных пород: хрупкое крупномасштабное разрушение и катакластическое деформирование, которые являются следствиями коллективного поведения дефектов, определяемого величиной параметра структурного скейлинга.

Обобщая все вышесказанное, можно заключить, что пессимизм относительно возможности прогноза крупного тектонического землетрясения, имевший место на рубеже XX и XXI веков в научной среде, сменяется оптимистичным взглядом в будущее благодаря новым достижениям в ряде областей науки: геомеханике, тектонофизике, геофизике, механике горных пород и др. Современными направлениями исследований, результаты которых, по мнению авторов, предоставляют новую уникальную информацию для понимания процессов подготовки крупных землетрясений и разработки формализованных моделей, использующих подходы механики деформируемого твердого тела, являются:

- разработка и развитие методов реконструкции тектонических напряжений сейсмоактивных участков земной коры [32, 34];
- определение строения, степени активности и механизмов активизации разломных зон земной коры [41, 48];
- лабораторные и натурные исследования строения и механизмов деформирования межблоковых контактов, разломов с учетом свойств их заполнителя [15, 16];
- разработка и развитие методов комплексных геофизических непрерывных скважинных измерений, позволяющих отслеживать изменения характера НДС геосреды в зоне наблюдений [3, 4, 61].

Библиографический список

1. Ботвина Л.Р., Баренблатт Г.И. Автомодельность накопления повреждаемости // Проблемы прочности. – 1985. – № 12. – С. 17–24.
2. Брейс В.Ф., Мячкин В.И., Дитрих Дж.Х., Соболев Г.А. Две модели объяснения предвестников землетрясений // Сборник советско-американских работ по прогнозу землетрясений. – Душанбе – М.: 1976. – Т. 1. – Кн. 2. – С. 9–15.
3. Гаврилов В.А. Физические причины суточных вариаций уровня геоакустической эмиссии // ДАН. – 2007. – Т. 414. – № 3. – С. 389–392.
4. Гаврилов В.А., Пантелеев И.А., Рябинин Г.В. Физическая основа эффектов электромагнитного воздействия на интенсивность геоакустических процессов // Физика Земли. – 2014. – № 1. – С. 89–103.
5. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975. – 535 с.
6. Гольдин С.В. Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика Земли. – 2004. – № 10. – С. 37–54.

7. Гольдин С.В., Юшин В.И., Ружич В.В., Смекалкин О.П. Медленные движения – миф или реальность // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: материалы 9-й междунар. школы-семинара. – Красноярск, 2002. – С. 213–220.
8. Дещеревский А.В., Лукк А.А., Сидорин А.Я. Флуктуация геофизических полей и прогноз землетрясений // Физика Земли. – 2003. – № 4. – С. 3–20.
9. Добровольский И.П. Гидродинамические явления // Физика Земли. – 2005. – № 1. – С. 89–96.
10. Добровольский И.П. Гравитационные предвестники тектонического землетрясения // Физика Земли. – 2005. – № 4. – С. 23–28.
11. Добровольский И.П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 240 с.
12. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестник АН СССР. – 1968. – Вып. 3. – С. 46–52.
13. Киссин И.Г. О системном подходе к проблеме прогноза землетрясений // Физика Земли. – 2013. – № 4. – С. 145–160.
14. Киссин И.Г. Флюиды в земной коре: геофизические и тектонофизические аспекты. – М.: Наука, 2009. – 328 с.
15. Кочарян Г.Г. Разломная зона как нелинейная механическая система // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т. 13. Спец. выпуск. – С. 5–17.
16. Кочарян Г.Г., Марков В.К., Марков Д.В., Перник Л.М. Экспериментальное исследование закономерностей деформирования малопрочных тонких слоев геоматериалов // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14. – № 6. – С. 63–70.
17. Курдюмов С.П. Режимы с обострением. Эволюция идеи / под ред. Г.Г. Малинецкого. 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 312 с.
18. Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика – теория самоорганизации. Идеи, методы, перспективы. – М.: Знание, 1983. – 64 с.
19. Левин Б.В., Сасорова Е.В., Ким Ч.У., Коровин М.Е., Малашенко А.Е., Савочкин П.В., Тихонов И.Н. Землетрясение 17(18) августа 2006 г. на Сахалине и первая реализация комплексного прогноза // ДАН. – 2007. – Т. 412. – № 3. – С. 396–400.
20. Леонов М.Г. Зоны концентрированной деформации и внутриплитная делимость земной коры и литосферы // Тез. докл. Пятого Междунар. симпозиума «Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов», Бишкек, 19–24 июня 2011. – Бишкек, 2011. – С. 214.
21. Любушин А.А. Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 г.: долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсам // Геофизические приборы и биосфера. – 2011. – Т. 10. – № 1. – С. 9–35.
22. Любушин А.А. Анализ микросейсмического шума дал возможность оценить магнитуду, время и место сейсмической катастрофы в Японии 11 марта 2011 г. // Наука и технологические разработки. – 2011. – Т. 90. – № 1. – С. 3–12.
23. Макаров П.В. Математическая теория эволюции нагружаемых твердых тел и сред // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11. – №3. – С. 19–35.
24. Макаров П.В. Нагружаемый материал как нелинейная динамическая система. Проблема моделирования // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8. – №6. – С. 39–56.
25. Макаров П.В. Эволюционная природа блочной организации геоматериалов и геосред. Универсальный критерий фрактальной делимости // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48. – № 7. – С. 724–746.
26. Мячкин В.И. Процессы подготовки землетрясений. – М.: Наука, 1978. – 232 с.
27. Наймарк О.Б. О деформационных свойствах и кинетике разрушения твердых тел с микротрещинами // Преп. О термодинамике деформирования и разрушения твердых тел с микротрещинами. – Свердловск, 1982. – С. 3–34.
28. Пантелеев И.А., Плехов О.А., Наймарк О.Б. Нелинейная динамика структур обострения в ансамблях дефектов как механизм формирования очагов землетрясения // Физика Земли. – 2012. – № 6. – С. 43–55.

-
29. *Пантелеев И.А.* Коллективные эффекты поведения дефектов геосреды при формировании потенциального источника землетрясения // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – №4 (2). – С. 508–510.
 30. *Пантелеев И.А., Плехов О.А., Наймарк О.Б.* Некоторые автомодельные закономерности развития поврежденности при квазихрупком разрушении твердых тел // Вычислительная механика сплошных сред. – 2011. – Т. 4 – № 1. – С. 90–100.
 31. *Ребецкий Ю.Л.* Современное состояние теорий прогноза землетрясений. Результаты оценки природных напряжений и новая модель очага землетрясений // Проблемы тектонофизики. К сорокалетию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. – М.: ИФЗ РАН, 2008. – С. 359–395.
 32. *Ребецкий Ю.Л.* Новые данные о природных напряжениях в области подготовки сильного землетрясения. Модель очага землетрясения // Геофизический журнал. – 2007. – Т. 29. – № 6. – С. 96–115.
 33. *Ребецкий Ю.Л.* Оценка величин напряжений в методе катакластического анализа разрывов // ДАН. – 2009. – Т. 428 – № 3. – С. 397–402.
 34. *Ребецкий Ю.Л.* Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // Доклады РАН. – 2003. – Т. 3. – № 2. – С. 237–241.
 35. *Ребецкий Ю.Л.* Состояние и проблемы теории прогноза землетрясений. Анализ основ с позиции детерминированного подхода // Геофизический журнал. – 2007. – Т. 29. – № 4. – С. 92–110.
 36. *Ребецкий Ю.Л.* Третий и четвертый этапы реконструкции напряжений в методе катакластического анализа сдвиговых разрывов // Геофизический журнал. – 2009. – Т. 31. – № 2. – С. 93–106.
 37. *Рихтер Ч.Ф.* Элементарная сейсмология. – М.: Иностран. лит., 1963. – 670 с.
 38. *Родкин М.В.* Модель сейсмического режима как совокупности эпизодов лавинообразной релаксации, возникающих на множестве метастабильных подсистем // Физика Земли. – 2011. – № 11. – С. 18–26.
 39. *Садовский М.А.* Автомодельность геодинамических процессов // Вестн. АН СССР. – 1986. – № 8. – С. 3–11.
 40. *Садовский М.А., Писаренко В.Ф.* Сейсмический процесс в блоковой среде. – М.: Наука, 1991. – 96 с.
 41. *Семинский К.Ж.* Тектонофизический анализ внутренней структуры разломных зон // Современная тектонофизика. Методы и результаты: Материалы первой молодежной школы семинара. – М., 2009. – С. 258–276.
 42. *Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С.* Анализ процесса выделения энергии при формировании магистрального разрыва в лабораторных исследованиях по разрушению горных пород и перед сильными землетрясениями // Физика Земли. – 2000. – № 2. – С. 44–55.
 43. *Тихонов И.Н., Ким Ч.У.* Успешный прогноз Невельского землетрясения 2 августа 2007 г. (MLH=6,2) на юге о-ва Сахалин // ДАН. – 2008. – Т. 420. – № 4. – С. 532–536.
 44. *Тюпкин Ю.С.* Динамика формирования потенциального очага землетрясения // Физика Земли. – 2004. – № 3. – С. 26–33.
 45. *Тюпкин Ю.С.* Формирование потенциального очага землетрясения: аналогия с фазовым переходом // Вычислительная сейсмология. – 2004. – № 35. – С. 296–311.
 46. *Уломов В.И., Мавашев Б.З.* О предвестниках сильного тектонического землетрясения // ДАН СССР. – 1967. – Т. 176. – № 2. – С. 319–323.
 47. *Федотов С.А.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги – М.: Наука, 2005. – 301 с.
 48. *Шерман С.И., Семинский К.Ж., Черемных А.В.* Деструктивные зоны и разломно-блоковые структуры Центральной Азии // Тихоокеанская геология. – 1999. – Т. 18. – № 2. – С. 41–53.

49. Эшелби Дж. Континуальная теория дислокаций. – М.: ИЛ, 1963. – 248 с.
50. Akishin P.G., Altaisky M.V., Antoniou I., Budnik A.D., Ivanov V.V. Burridge-Knopoff model and self-similarity // *Chaos, Solitons and Fractals*. – 2000. – Vol. 11. – P. 207–222.
51. Anderson D.L., Witcomb J.H. The Dilatancy-diffusion model of earthquake prediction // *Proc. Conf. of tectonic problems of the San Andreas fault systems*. – Stanf. Univ. Publ., 1973. – XIII. – P. 417.
52. Bakun W.H., et al. Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield earthquake // *Nature*. – 2005. – Vol. 437. – № 13. – P. 969–974.
53. Benioff H. Earthquakes and rock creep. Т. 1; Creep characteristics of rocks and the origin of aftershocks // *Bull. Seismol. Soc. America*. – 1951. – Vol. 41. – № 1. – P. 31–40.
54. Ben-Zion Y., Rice J.R. Dynamic simulations of slip on a smooth fault in a elastic solid // *Journal of geophysical research*. – 1997. – Vol. 102. – № B8. – P. 17771–17784.
55. Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as a mechanism for earthquake // *Science*. – 1966. – Vol. 153. – P. 990–992.
56. Burridge R., Knopoff L. Model and theoretical seismicity // *Bull. Seism. Soc. Am.* – 1967. – Vol. 57. – № 3. – P. 341–372.
57. Carlson J.M., Langer J.S., Shaw B.E., Tang C. Intrinsic properties of a Burridge-Knopoff model of an earthquake fault // *Phys. Rev. A*. – 1991. – Vol. 44. – P. 884–897.
58. Clancy I., Corcoran D. Criticality in the Burridge-Knopoff model // *Phys. Rev. E*. – 2005. – V. 71. – P. 046124.
59. Dieterich J.H. Time dependent friction in rocks // *J. Geophys. Res.* – 1972. – Vol. 77. – P. 790–806.
60. Fisher D. Sliding charge density waves as a dynamic critical phenomenon // *Phys. Rev.* – 1985. – B31. – P. 1396–1427.
61. Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Ryabinin G.V., Morozova Yu.V. Modulating impact of electromagnetic radiation on geoacoustic emission of rocks // *Russian Journal of Earth Science*. – 2013. – Vol. 13. – ES100.
62. Geller R. Earthquake prediction: critical review // *Geophys. J. Int.* – 1997. – Vol. 131. – P. 425–450.
63. Kagan Y.Y. Observational evidence for earthquakes as nonlinear dynamic process // *Physica D*. – 1994. – Vol. 77. – № 4. – P. 160–192.
64. Kagan Y. Likelihood analysis of earthquake catalogues // *Journal of Geophysical Research*. – 1991. – Vol. 106. – Ser. B7. – P. 135–148.
65. Kissin I.G. Middle- and short-term precursors of earthquakes and their factors determining reliability // *Journal of earthquake prediction research*. – 1997. – Vol. 6. – № 3. – P. 367–386.
66. Knopoff L., Landoni J.A., Abinante M.S. Dynamical model of an earthquake fault with localization // *Phys. Rev. A*. – 1992. – Vol. 46. – P. 7445.
67. Kostrov B.V. Self-similar problems of propagation of shear cracks // *J. Appl. Mech.* – 1964. – Vol. 28. – P. 1077–1087.
68. Langbein J., et al. Preliminary report on the 28 September 2004 M 6.0 Parkfield, California earthquake // *Seism. R. Let.* – 2005. – Vol. 76. – № 1. – P. 10–26.
69. Lindh A.G. Success and failure at Parkfield // *Seism. R. Let.* – 2005. – Vol. 76. – № 1. – P. 3–6.
70. Lyakhovskiy V.A., Ben-Zion Y., Agnon A. Distributed damage, faulting, and friction // *J. Geophys. Res.* – 1997. – Vol. 102. – P. 27635–27649.
71. Lyakhovskiy V.A., Myasnikov V.P. On behavior of viscoelastic cracked solid // *Phys. Solid Earth*. – 1985. – Vol. 4. – P. 28–35.
72. Muratov C.B. Traveling wave solutions in the Burridge-Knopoff model // *Phys. Rev. E*. – 1999. – Vol. 59. – P. 3847.
73. Musmeci, F., Vere-Jones D. A variable-grid algorithm for smoothing clustered data // *Biometrics*. – 1986. – Vol. 42. – P. 483–494.
74. Ogata Y. Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point

-
- processes // Journal of the American Statistical Association. – 1988. – Vol. 83. – P. 9–27.
75. *Ogata Y., Zhuang J.* Space-time ETAS models and an improved extension // Tectonophysics. – 2006. – Vol. 413. – № 1–2. – P. 13–23.
76. *Olami Z., Feder S., Christensen K.* Self-Organized Criticality in a Continuous, Nonconservative Cellular Automaton Modeling Earthquakes // Physical Review letters. – 1992. – Vol. 68. – № 8. – P. 1244–1247.
77. *Panteleev I.A., Plekhov O.A., Naimark O.B.* Model of geomedia containing defects: collective effects of defects evolution during formation of potential earthquake foci // Geodynamics & Tectonophysics. – 2013. – Vol. 4. – № 1. – P. 37–51.
78. *Rathbun S.L.* Modeling marked spatio-temporal point patterns // Bulletin of the International Statistical Institute. – 1993. – Vol. 55. Book 2. – P. 379–396.
79. *Reid H.F.* The California Earthquake of April 16 1906 // Vol. 2. The Mechanics of the Earthquakes. The Carnegie Inst. – Washington, 1910.
80. *Rice J.R.* Spatio-temporal complexity of slip on a fault // J. Geophys. Res. – 1993. – Vol. 98. – P. 9885–9907.
81. *Ruina A.L.* Slip instability and state variable friction laws // J. Geophys. Res. – 1983. – Vol. 88. – P. 10359–10370.
82. *Rundle J.B.* A physical model for earthquakes, 1. Fluctuation and interactions // J. Geophys. Res. – 1988. – Vol. 93. – P. 6237–6254.
83. *Rundle J.B.* A physical model for earthquakes. 3. Thermodynamic approach and its relation to nonclassical theories of nucleation // J. Geophys. Res. – 1989. – Vol. 94. – P. 2839–2855.
84. *Rundle J.B., Gross S., Klein W., Ferguson C., Turcotte D.L.* The statistical mechanics of earthquakes // Tectonophysics. – 1997. – Vol. 277. – P. 147–164.
85. *Rundle J.B., Klein W.* Scaling and critical phenomena in a cellular automaton slider block model for earthquakes // J. Stat. Sol. – 1993. – Vol. 72. – P. 405–412.
86. *Saichev A., Sornette D.* Distribution of the Largest Aftershocks in Branching Models of Triggered Seismicity: Theory of the Universal Bath's law // Phys. Rev. E – 2005. – Vol. 71. – P. 056127.
87. *Saichev A., Sornette D.* Power law distribution of seismic rates: theory and data // Eur. J. Phys. B. – 2006. – Vol. 49. – P. 377–401.
88. *Sherman S.I.* Destruction of the lithosphere: Fault-block divisibility and its tectonophysical regularities // Geodynamics & Tectonophysics. – 2012. – Vol. 3. – № 4. – P. 315–344.
89. *Sornette D.* Critical phenomena in natural sciences. Chaos, Fractals, Self-Organization and Disorder: Concepts and Tools // Springer Ser. Synerg. Springer-Verlag. Heidelberg, 2000. – 423 p.
90. *Sornette D., Werner M.J.* Constraints on the size of the smallest triggering earthquake from the ETAS model, Bath's law and observed aftershock sequences // J. Geophys. Res. – 2005. – Vol. 110. – P. B08304.
91. *Turcotte D.L., Newman W.I., Shcherbakov R.* Micro and macroscopic models of rock fracture // Geophys. J. Int. – 2003. – Vol. 152. – № 3. – P. 718–728.
92. *Tyupkin Yu.S., Di Giovambattista R.* Correlation length as an indicator of critical point behavior prior to a large earthquake // EPSL. – 2005. – Vol. 230. – P. 85–96.
93. *Varnes D.J.* Predicting earthquakes by analyzing accelerating precursory seismic activity // PAGEOPH. – 1989. – Vol. 130. – № 4. – P. 661–68669.
94. *Zhuang J., Ogata Y., Vere-Jones D.* Stochastic declustering of space-time earthquake occurrences // Journal of the American Statistical Association. – 2002. – Vol. 97. – № 3. – P. 369–380.
95. *Zöller G., Hainzl S., Kurths J.* Observation of growing correlation length as an indicator for critical point behavior prior to large earthquakes // J. Geophys. Res. – 2001. – Vol. 106. – P. 2167–2176.