

ОБ ОСНОВНЫХ МЕХАНИЗМАХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© Н.А. Якимчук, В.К. Демидов, В.А. Антошук, 2011

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

Principal causes and models of earthquakes are described. Possible reasons ("trigger mechanism") of tectonic movements are examined. Underlined in the paper is an importance of possible earthquake prediction, first of all, understanding of its nature. That will allow to estimate correctly the foreshocks and mechanisms of their appearance.

Keywords: Earthquake, model, seismology, lithosphere–ionosphere.

Введение. Катастрофические землетрясения привлекают всеобщее внимание к проблемам, связанным с ними. Прежде всего, это возможность предсказания места, времени и энергии сейсмического события, в частности, произошедшего 11 марта 2011 г. в Японии. Известны работы, в которых проведен расчет предсказываемых трех параметров. Так, относительно указанного землетрясения в Японии были сделаны подтвердившиеся прогнозы как японскими сейсмологами, так и сейсмологами других стран, однако время предсказания оказалось слишком неоднозначным. Выделяются успехи некоторых ученых, в частности А.А. Любушина, рассчитавшего землетрясение 11 марта 2011 г. в Японии за три года до этого события. Последний доклад исследователя доказывает в который раз принципиальную возможность прогноза сейсмического события [1].

Значительный урон, который наносится цивилизации землетрясениями, вынуждает многих ученых проводить многочисленные исследования с целью предупредить их разрушительные последствия. Выяснение причин землетрясений и объяснение их механизма — одна из важнейших задач сейсмологии. Известно, что разрушения, которые производят землетрясения, оцениваются в миллиарды долларов США. Разработано достаточно моделей механизма землетрясений, причем каждая из них основана на зафиксированных явлениях, которые вносят, по мнению разработчиков, наибольший вклад в развитие сейсмического события и, как следствие, дают возможность по возникающим признакам предсказать время и место будущего явления.

Несмотря на большой объем полученной на сегодня информации, следует признать, что главные проблемы физики землетрясений в настоящее время не решены. Это не позволяет однозначно определить время, координаты и энергию сейсмического события. Первые две проблемы

прогноза землетрясений (место и максимальная сила) решаются просто — путем районирования территории. Однако такой метод, не дает 100%-го результата, так как районирование проводится преимущественно по наблюдаемым землетрясениям; если же на какой-либо территории не регистрировались землетрясения в период наблюдений, то зону не относят к сейсмически опасным; пример — газлийское девятибалльное землетрясение 1976 г. Нет уверенности и в определении времени начала землетрясения. Наиболее распространенным подходом является прогноз по каталогам, позволяющий с определенной степенью уверенности говорить о повторяющихся толчках.

К главным нерешенным вопросам физики землетрясений следует отнести следующие:

- 1) как возникают условия накопления значительной упругой энергии трещиновато-пористой средой — толщей горных пород;
- 2) какова причина сброса громадного объема энергии, который может происходить как одновременно, так и отдельными импульсами (серия землетрясений);
- 3) что может служить триггирующим воздействием (сбросом упругой энергии), вызывающим и одиночные события, и их серию;
- 4) какова природа форшоковых и афтершоковых явлений, поскольку они не приводят к разрушению массива, как считалось до сих пор [3].

Современный подход к исследованию землетрясения как центрального, важного процесса в земной коре — односторонний: сейсмология стремится к построению единой модели землетрясений. А возможно ли это в принципе? Землетрясение нельзя рассматривать как отдельно взятый процесс, так как оно — следствие разных по природе процессов, что продемонстрировано в работах Г.А. Гамбурцева [4].

Основная причина невозможности предсказывать землетрясения по существующим методам заключается в том, что с помощью совре-

менной аппаратуры (сейсмографы и приборы, например, измеряющие уровень воды в скважинах при землетрясениях [5]) регистрируются сам процесс землетрясений, а не симптомы, им предшествующие. Многие исследователи стремятся найти самый функциональный триггер и предвестник, с ним связанный. Однако без понимания природы землетрясений действенный результат не будет получен.

Энергия, выделяющаяся при землетрясении, расходуется не только на возбуждение сейсмических волн. В очаге она затрачивается на проявление пластических деформаций, преодоление сил трения и другие процессы. Часть энергии превращается в тепло. Существует мнение, что оно в 100 раз и более превышает энергию сейсмических волн и способно значительно увеличивать тепловой поток. При очень сильном землетрясении в очаге могут перемещаться громадные объемы горных масс, что может привести к некоторым изменениям поля силы тяжести и электромагнитных полей (аялскинское землетрясение 1964 г.). Поскольку горные породы, слагающие земную кору, магнитоактивны и обладают электропроводностью, в процессе землетрясения в его эпицентре происходят изменения магнитного и электрического полей [6].

В результате тектонических движений в очаге возникают касательные напряжения, система которых, в свою очередь, определяет действующие в очаге скалывающие напряжения. Однако спрогнозировать время появления землетрясений так нельзя. Для этого нужно спроектировать модель тех процессов, которые происходят в недрах Земли [7].

Информацию о глубинных процессах, где рождаются землетрясения, можно получить лишь путем интерпретации наблюдений геофизических полей на поверхности Земли. Поэтому все задачи по изучению внутреннего строения нашей планеты принадлежат к так называемым обратным геофизическим задачам. В математическом аспекте это некорректные задачи, т.е. их решение неоднозначно, и надежную модель землетрясений построить весьма сложно. А если нет модели, то нельзя определить точное время возникновения землетрясения и его силу [7]. Поэтому нужны более глубокие и фундаментальные исследования в области модели землетрясений, чтобы уменьшить неоднозначность регистрируемых предвестников землетрясений.

Не вся накапливаемая энергия выходит на поверхность в виде сейсмических волн. Количество энергии, приходящееся на них, незначительно для энергетического баланса в целом. В виде землетрясений проявляется всего 0,5 % энергии подземных процессов, и для природы в целом они носят незначительный характер. Поэтому иногда

“предвестники” могут наблюдаться и при отсутствии землетрясения [8].

Корреляция с солнечной активностью и с литосферными приливами свидетельствует о том, что существуют по меньшей мере два базисных механизма, под влиянием которых происходят землетрясения: сброс накопленной механической энергии и термическое электроразрядное расширение. На самом деле процессов гораздо больше.

Процессы различной природы и порожденные разными причинами могут приводить к появлению сейсмических волн, например: сброс накопленной механической энергии; термическое расширение при подземном электроразряде; сдвиг литосферных плит и образование трещин в породах; подземные ядерные взрывы; выброс магмы через трещины в коре в районах вулканической активности [7]. При этом сложно выделить, какой процесс имел место и какой привел к появлению сейсмических волн, не произошло ли их несколько, спровоцировав цепную реакцию.

Для объяснения данных мониторинга необходимо предположить наличие дополнительного механизма накачки среды упругой энергией, делающей ее открытой диссипативной структурой. Необходимо представить свойства реальной геологической среды, а не лабораторного образца. Это дало бы основание для серьезного переосмысления лабораторных выводов о подготовке очага землетрясений и объяснений наблюдаемых “предвестников”. В то же время следует подчеркнуть, что процессы, известные из лабораторных данных, протекают и в условиях литосферы. Однако у них разный масштаб и различные условия проявления. Безусловно, эти процессы оказывают влияние на сейсотектонический режим. Вместе с тем, по данным мониторинга, существуют и другие процессы, оказывающие на среду значительно большее влияние, чем локализованные процессы в лабораторных условиях. Причем здесь очень важен масштабный эффект, не имеющий отражения в лабораторных представлениях [6].

Основные положения и теория. Общая картина землетрясения, согласно современным моделям, представляется следующей.

Превалирующим подходом к описанию процесса землетрясения является изучение физической составляющей этого процесса с дальнейшим математическим описанием закономерностей сейсмического процесса, например, в работах М.А. Садовского, С.В. Медведева, Н.В. Шебалина и др. Прежде всего изучаются физические свойства вещества, среды, где зарождаются землетрясения, без учета того, что эти качества определяются геологической обстановкой, составом, строением геологического субстрата, историей его геологического развития, процессами, протекающими в недрах [6].

Под влиянием геостатического (гидростатического) давления (P) горные породы накапливают упругую энергию и приобретают напряженное состояние. Накопление этой энергии ограничивается прочностью горных пород на скалывание (которая имеет порядок 10^{10} Па на глубинах до 20 км) и проявлением неупругих процессов при возрастании разности напряжений, в частности, релаксации напряжений, которые будут ограничивать накопление упругой энергии и по величине, и во времени. Как показали П.В. Бриджмен, В.К. Кучай, В.С. Пономарев [9–11], в условиях гидростатического сжатия увеличивается прочность горных пород, повышается пропорционально давлению предел упругости. Вследствие упругого деформирования объема – дилатации – может накапливаться теоретически неограниченное количество упругой энергии, которая в естественных условиях определяется величиной P и действием тектонических сил. При проявлении релаксации напряжений, связанной с упругим изменением объема (дисторсией), напряженное состояние уменьшается. А когда со временем дисторсия прекращается, при постоянном P горные породы могут сохранять часть накопленной упругой энергии теоретически неограниченно долго. Таким образом, вследствие дилатации горные породы накапливают значительные запасы потенциальной энергии. Образуются геодинамические поля, где напряжения превышают давление P [12]. Высвобождение этой энергии может происходить при нарушении гидростатически напряженного состояния под влиянием изменения нагрузки процессами денудации и аккумуляции и тектонических процессов, приводящих к нарушению сплошности горных пород – разрыву [6].

Большинство ученых-сейсмологов сходятся во мнении о том, что непосредственная причина землетрясений – деформация земной коры, вызывающая упругие напряжения в горных породах. Когда превышает предел прочности пород, происходит землетрясение. Какие силы вызывают эту деформацию?

А.Л. Чижевский обратил внимание на то, что изменение солнечной активности оказывает огромное влияние на сейсмические процессы. Было предположено, что это происходит через атмосферные процессы. Например за три дня до чилийского землетрясения 1960 г. давление начало резко расти в Западном и одновременно падать в Восточном полушарии. В день землетрясения 21 мая разность средних давлений между полушариями достигла максимума, а 24 мая давление в обоих полушариях выровнялось.

Некоторые исследователи, например С. Килсон, Л. Кнопоф и другие, связывают возникновение землетрясений с влиянием лунной актив-

ности, особенно приливной. Однако эта гипотеза не находит четкой взаимосвязи между фазами Луны и повторяемостью сейсмических толчков. Скорее всего, связь в данном случае не прямая, и механизм влияния Луны четко пока не установлен [2].

В настоящее время наибольшее распространение получила теория тектоники литосферных плит. В связи с этим первичной причиной деформаций горных пород рассматривается именно движение плит друг относительно друга.

Механизм сейсмических явлений очень сложен. В результате различных процессов в недрах Земли накапливается упругое напряжение. Среда, где происходят эти явления, называется очагом землетрясения. Механизм очага до настоящего времени остается не установленным. Очаг, генерирующий импульсные тектонические движения, рассматривается как часть пространства, внутри которого происходят: разрывы и интенсивные неупругие деформации, что приводит к землетрясениям; быстрые непрерывные движения среды – пластичные и другие, имеющие необратимый или медленно обратимый характер; различное распределение напряженного состояния, обусловленное разрывами, с участками повышенных и пониженных напряжений. Границы очага условны. Форма и размеры его различны и определяются особенностями поля напряжений. Касательные напряжения вокруг разрыва в одних случаях снижаются, в других – повышаются. На концах разрывов, по данным изучения на моделях, напряжения сильно повышаются. При образовании разрывов разнообразной формы распределение напряжений вокруг них оказывается особо сложным. За пределами объема очага пространство характеризуется накоплением упругой энергии. По размерам оно может быть намного больше очага землетрясения. Это подтверждается изменениями наклонов земной поверхности перед сильными землетрясениями на расстояниях в несколько сотен и тысяч километров от эпицентра, а также повторными нивелировками, которые выявляют деформации земной коры, предшествующие землетрясению [6].

Большая часть разработанных моделей очага землетрясений опирается на два представления – Х. Рейда и Ч. Рихтера. Согласно Х. Рейду, разломы – это ослабленные участки земной коры, вдоль которых происходит регулярный сброс накопленной упругой энергии. В области, окружающей будущий очаг, сброс внутренней механической энергии резко замедляется, происходит накопление энергии деформаций. Наиболее высокие напряжения концентрируются в местах пересечения или излома геологических разломов. После достижения предела напряжениями прочности горных пород или предельного значения плотности по-

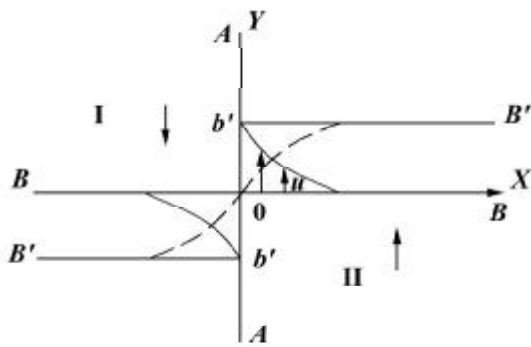


Рис. 1. Схема теории упругой отдачи

тенциальной энергии объем, накопивший высокий уровень упругой энергии, разрушается с образованием сдвигового разрыва, представляющего собой очаг землетрясения (рис. 1).

Суть теории Рейда заключается в следующем. Пусть AA – линия размежевания блоков коры I и II (рис. 1). В результате тектонических процессов эти блоки начинают смещаться в направлении, указанном стрелками. Пусть линия BB обозначает момент начала движения. Поскольку между блоками появляются сцепления, то в процессе их перемещения в пограничной зоне возникнут сдвиговые деформации, которые характеризуются деформацией линий BB и $B'OB'$. Сдвиговые деформации приведут к возникновению напряжения, которое уменьшается по мере отдаления от линии AA . Когда напряжения достигнут предела прочности пород на сдвиг или силы сцепления по шву AA , произойдет разрыв (нарушение) и пограничные части блоков распрямятся, так что OB займет положение $B'b'$ и $b'B'$. Сплошная линия $b'b'$ покажет величину векторов сдвига в процессе землетрясения (подобная схема справедлива и для вертикальных сдвигов).

Однако напряжения разрыва не могут меняться в очень широких пределах. Образующиеся же землетрясения имеют широкий диапазон выделяющейся энергии. Для Аляскинского землетрясения 1964 г. ($M=8,5$) выделившаяся энергия оказалась равной 10^{18} Дж, или эквивалентной энергии подземного взрыва 100 ядерных бомб до 100 Мт каждая. Энергия таких землетрясений в 10^{10} раз превосходит энергию слабых сейсмических толчков. Был сделан важный вывод, что энергия землетрясений в основном определяется не напряжением и накоплением деформаций, а размерами той области, внутри которой в результате землетрясений исчезают сдвиговые напряжения. Были выведены эмпирические соотношения между длиной разлома и амплитудой землетрясений. Установлено, что освобождающаяся энергия и магнитуда толчка определяются только объемом очага. Отсюда один из наиболее вероятных механизмов образования очага крупного землетрясения состоит во “вспарывании”

сейсмического шва. Разрыв, начавшийся в зоне концентрации напряжений, с огромной скоростью (до 3–4 км/с) распространяется на значительную часть или весь активизированный или вновь образовавшийся разрыв. Определение средних скоростей такого “вспарывания” сейсмическими методами показало, что они изменяются в довольно широких пределах для землетрясений разной силы. Например, для толчков с $M > 7$ среднее значение скоростей колеблется в диапазоне 1,9–4,9 км/с; для землетрясений меньшей силы ($M < 7$) – в диапазоне 3,1–7,8 км/с, что намного превосходит скорость распространения поперечных волн. Такие скорости возможны при разрушении среды в очагах землетрясений [6].

Схема Рихтера отличается от схемы Рейда предположением об относительной равномерности распределения деформаций и напряжений в пространстве до землетрясения. Для объяснения возникновения землетрясения фактически вводится гипотеза о локальном снижении прочности на участке разлома, что определяет возможность пониженного уровня напряжений в области будущего очага [13].

В очаге происходят разрывы и интенсивные неупругие деформации среды, приводящие к землетрясению. Деформации в самом очаге носят необратимый характер, а в области, внешней к очагу, являются сплошными, упругими и преимущественно обратимыми. Именно в этой области распространяются сейсмические волны. Очаг может либо выходить на поверхность – при сильных землетрясениях, либо находиться под ней – в случаях слабых землетрясений.

Современные модели подготовки землетрясений построены на основании сопоставления опыта лабораторного моделирования и результатов полевых наблюдений сейсмичности. Теоретическую основу составляют представления механики и физики разрушения материалов и горных пород. Сам процесс землетрясения рассматривается как итог долговременной эволюции трещинообразования в Земле. В разных моделях уделяется различное внимание масштабу рассматриваемых геологических разрывов – трещин, их расположению в пространстве, дополнительным физикомеханическим факторам, влияющим на процесс трещинообразования [14].

Н.В. Шебалин предложил несколько дополнений для модели очага землетрясения, которые объясняют короткопериодные колебания с большими ускорениями, особенно разрушительными для инженерных сооружений. По его представлениям, за излучение разрушающих колебаний несет ответственность не очаг в целом, а совокупность осложнений вдоль главного разрыва. При этом различные кинематические типы разломов (сдвиг, сброс, надвиг) порождают разную интен-

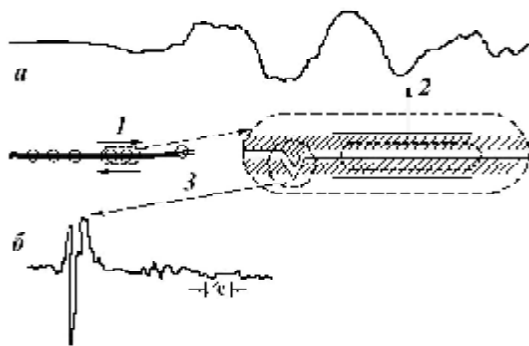


Рис. 2. Часть очага землетрясения с афтершоками на относительно гладком участке и в зоне зацепа. По Н.В. Шебалину: 1 – главная трещина и очаги афтершоков, 2 – медленное проскальзывание, 3 – срыв зацепа [6]. Запись (с) очень “мягкого” (а) и очень “жесткого” (б) афтершоков Кумдагского землетрясения 14.03.1983 г. (а – $M = 5,3$, $R = 18$ км, б – $M = 4,4$, $R = 10$ км)

сивность короткопериодного излучения (при горизонтальном растяжении она меньше, чем при сжатии). Гладкие участки очага вдоль главного разрыва чередуются с “зацепами”, мешающими полусвободному сползанию крыльев разрыва (крипу). По данным сейсмограмм хорошо выявляются шероховатости – зацепы и гладкие участки. При этом афтершоки с очагами выявляются как в местах почти свободного скольжения, так и в местах зацепов (рис. 2).

Срыв зацепа, как указывает Н.В. Шебалин, – процесс необратимый. Однако развитие поперечных структур может нарушить выработанную поверхность разлома и создать новый зацеп. Наибольшие катастрофические последствия возникают у землетрясений с очагами, лежащими в непосредственной близости от земной поверхности (рис. 2) [6].

Основные модели землетрясений. Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ) [14–17]. Модель создана в Институте физики Земли РАН. Изменение скоростей распространения сейсмических волн можно объяснить развитием ориентированной системы трещин, которые взаимодействуют между собой и по мере роста нагрузок начинают сливаться. Процесс приобретает лавинный характер. На этой стадии материал неустойчив, происходит локализация растущих трещин в узких зонах, вне которых трещины закрываются. Эффективная жесткость среды возрастает, что приводит к увеличению сейсмических скоростей. Изучение явления показало, что отношение скоростей распространения продольных и поперечных волн перед землетрясением сначала уменьшается, а затем возрастает, и эта зависимость может быть одним из предвестников землетрясений.

Подобную ситуацию проверил Г.А. Соболев [14] в лаборатории на простой модели землетря-

сения, развивающегося в условиях длительного сейсмического затишья. Даже в упрощенной модели удалось выделить периоды повышения сейсмической активности и затишья, аналогичные наблюдающимся перед реальными землетрясениями.

Модель переносит процессы подготовки разрушения лабораторных монолитных образцов на условия литосферы. Если в литосфере вследствие каких-либо процессов формируется крупномасштабный “образец” (конгломерат отдельностей), то по мере его нагружения могут развиваться описанные стадии эволюции трещин. Без учета влагонасыщенности модель не может объяснить наблюдаемые значительные (до 10 %) колебания свойств среды (проводимость, отношение скоростей V_p/V_s и др.).

На объяснение природы долгосрочных предвестников претендует и гипотеза подготовки землетрясения в результате уплотнения вещества, предложенная И.П. Добровольским [18]. Последняя стадия процесса подготовки объясняется лавинно-неустойчивым трещинообразованием.

Дилатантно-диффузионная (ДД) модель [19, 20]. Развитие очага землетрясения объясняется дилатансией, в основе которой лежит зависимость объемных деформаций от касательных усилий. В водонасыщенной пористой породе, как показали опыты, это явление наблюдается при напряжениях выше предела упругости. Возрастание дилатансии приводит к уменьшению скоростей распространения сейсмических волн и подъему земной поверхности в окрестности эпицентра. Затем в результате диффузии воды в очаговую зону происходит увеличение сейсмических скоростей.

Модель ДД, разработанная американскими учеными, дополнена количественными оценками. Рассматривая вариант так называемого мягкого включения, Дж. Райс [19] показал, что состояние динамической (сейсмической) неустойчивости в реальном массиве пород должно наступать с запаздыванием, так как изменяется внутривещное давление и начинается фильтрация жидкости. Если исходить из предполагаемой скорости увеличения механических напряжений в сейсмоопасном районе, равной 1 кг/см^2 в год, то расчетное время “запаздывания” землетрясения по сравнению с началом фильтрации воды в очаговую зону должно составлять несколько месяцев, т. е. этот эффект приложим только к долгосрочным и среднесрочным предвестникам. Вопрос о природе краткосрочных предвестников в рамках данной модели остается открытым [14].

Полагают, что главный действующий фактор развития очага землетрясения – не тектонические напряжения, а изменяющиеся свойства среды, величина внутривещного давления; тектоническая обстановка при этом играет второстепенную роль.

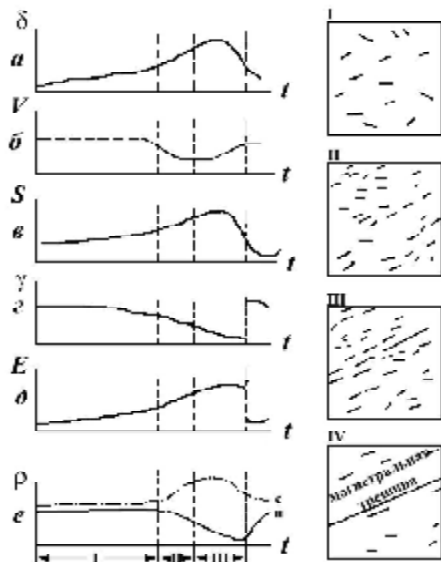


Рис. 3. Изменение физических параметров по модели ЛНТ [6]: I–IV – стадии развития разрушения: a – деформация; b – скорости распространения сейсмических волн; S – среднее значение общей площади поверхности трещин; γ – наклон графика зависимости частота–магнитуда; δ – пористость, радоновая эмиссия; ρ – электросопротивление; с – сухие породы, н – насыщенные породы

По двум описанным моделям происходит изменение физических свойств среды, образующей очаг будущего землетрясения. Этим объясняют изменение отношений скоростей V_p/V_s во времени, флуктуации геофизических полей, измеряемые приборами, деформации и наклоны земной поверхности в очаговой зоне, устанавливаемые геодезическими, геофизическими методами, изменениями эмиссии радона, электрического сопротивления горных пород и др. Все эти явления получили название предвестников землетрясений. С помощью обеих моделей можно объяснить поведение предвестников, почти одинаковое в рамках моделей, совпадающее с данными наблюдений, если проводить измерения непосредственно в зоне подготовки землетрясения (рис. 3, 4) [6].

На первой стадии под действием равномерно усиливающегося напряжения количество и размеры трещин в горных породах медленно нарастают (по ЛНТ). Перед катастрофическим землетрясением эта стадия длится сотни и тысячи лет, в то время как в последующую стадию – всего около 10 лет. На второй стадии поведение предвестников естественно, так как объясняется одним и тем же эффектом – резким ростом количества трещин. На третьей стадии отношение V_p/V_s как бы восстанавливается, деформация почти не изменяется. По модели ЛНТ это можно объяснить закрытием трещин в большей части объема, по модели ДД – заполнением пустот водой. Существенные различия этих моделей выявляются в поведении слабых толчков, поступающих из области подготовки сильного землетрясения. Согласно модели ДД, на

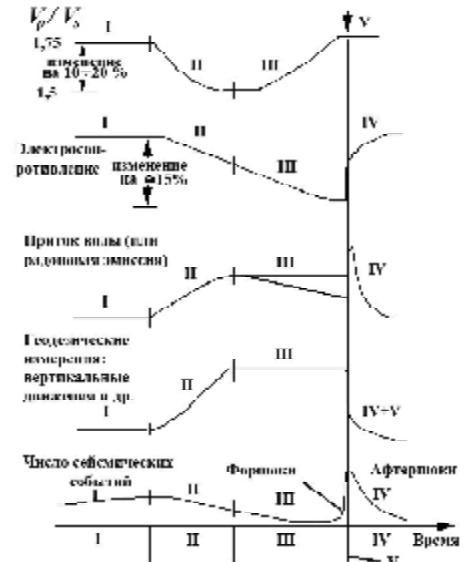


Рис. 4. Изменение физических параметров по модели ДД [6]. Стадии развития цикла: I – нарастание упругой деформации, II – преобладание дилатансии, III – преобладание притока воды, IV – афтаршоки, V – землетрясения и внезапный сброс напряжения

второй и третьей стадиях должно наблюдаться затишье – уменьшение количества толчков, и лишь непосредственно перед главным землетрясением появляются форшоки (толчки, происходящие до главного землетрясения). С точки зрения модели ЛНТ, на этих же стадиях суммарная энергия слабых толчков и суммарная площадь разрывов, образующихся при толчках, увеличиваются и лишь затем наступает относительное затишье. В основе такого несовпадения лежит, по В.И. Мячкину [17], различный подход к процессу трещинообразования. По модели ЛНТ, землетрясение – сдвиговый динамический разрыв, и готовится он подобными разрывами-трещинами, но меньшего размера; согласно модели ДД, сдвиговые разрывы при землетрясениях готовятся отрывными трещинами, а слабые толчки, как и сильные, – следствие этих трещин.

Описанные предвестники землетрясения обнаруживаются на протяжении месяцев и лет, и данный период тем больше, чем сильнее готовится землетрясение. В большинстве случаев предвестники представляют собой реакцию среды на вспарывание перемычек между разрывами в узкой зоне. Это тот же процесс, который предваряет крупные форшоки при объединении двух или нескольких больших трещин.

Криповая модель. В разных странах широко развивается гипотеза возникновения землетрясения вследствие крипа – постепенно ускоряющегося движения бортов уже существующего разлома. Классические лабораторные эксперименты в рамках этой гипотезы выполнил в США Дж. Дит-

рих [21]. Перед подвижкой, рассматриваемой как аналог землетрясения, на лабораторной модели землетрясения последовательно наблюдались два явления. Вначале регистрировался медленный (несколько сантиметров в секунду) крип. Затем вдоль разлома или его части он экспоненциально ускорялся (до десятков и сотен метров в секунду), завершаясь динамической подвижкой и излучением сейсмических волн. Несмотря на привлекательность модели, при объяснении природы краткосрочных предвестников землетрясений она также наталкивается на ряд трудностей. Во-первых, остаются непонятными большой ареал распространения таких предвестников и обширность области их генерации. Во-вторых, даже в районе разлома Сан-Андрес в Калифорнии, где данная модель работает наилучшим образом, перед большинством землетрясений зарегистрировать краткосрочные предвестники не удалось. Вероятно, это объясняется малой областью развития крипа, предшествующего неустойчивому распространению разрыва. В таком случае обнаружить предвзвешенную миграцию крипа как краткосрочный предвестник принципиально возможно, но практически трудно выполнимо [22].

Модели консолидации [23] и неустойчивого скольжения [20, 24]. В этих моделях учтена одна из основных особенностей поведения реальной горной среды: постоянное деформирование среды по границам блоков и разломам, торможение их движений, связанных с механическими зацеплениями в граничных структурах. Причем появление механических зацеплений обуславливается действием сил тектонической природы.

В первой модели рассматривается дополнительное деформирование среды при механическом зацеплении двух или более блоков, которые образуют в дальнейшем зону консолидации. Со временем в этой зоне накапливается упругая энергия по аналогии с нагружением лабораторного образца. Восстановление деформирования блоков происходит после “магистрального разрыва” – сдвига. В рамках модели консолидации рассчитывались деформации в среде и обусловленные ими аномалии различных геофизических полей (уровень воды, наклоны, геомагнитное поле и др. [18]). Однако достоверность таких оценок невысокая, так как среда в крупномасштабных структурах предполагалась упругой и однородной.

Во второй модели область механических зацеплений ограничена контактной зоной скольжения. Этот эффект известен из лабораторных работ как явление “stick-slip”, т. е. неустойчивая подвижка по контакту, сопровождающаяся частичным сбросом нагрузки. Однако модель не может объяснить ни одной из описанных аномалий геофизических полей перед землетрясением.

Обе модели землетрясений – наиболее распространенные и базируются в той или иной мере на лабораторных исследованиях образцов. Теоретической основой их построения служили представления физики и механики разрушения материалов. Поэтому подготовку землетрясения связывали с долговременной эволюцией процессов трещинообразования на разных масштабных уровнях [22].

Результаты лабораторных исследований и современные физические представления механики материалов придавали моделям физическую достоверность и убедительность, но остались открытыми многие вопросы. Прежде всего, состояние горной среды в реальных условиях и многообразные процессы в ней существенно отличаются от таковых в монолитных образцах в лабораторных условиях, в том числе процессы деформирования. В лабораторных условиях разрушается готовый образец, а природа должна “подготовить” образец и “машину” нагружения. Кроме того, часто перенос лабораторных результатов на геологическую среду оправдывают соображением о подобии разрушения на разных масштабных уровнях. Это было бы верно при совпадении свойств лабораторных образцов и горных пород и соответствующих условий. Вместе с тем сейсмологические наблюдения показывают, что сильные землетрясения протекают не так, как слабые [25]. Современные физические представления позволяют с разных позиций объяснить аномалии геофизических полей перед землетрясениями. Однако серьезных попыток (за исключением И.П. Добровольского [18]) провести количественные оценки для предвестников практически не было. Возможно, это связано с необходимостью учета реальных свойств земной коры – непреодолимого препятствия перед авторами, в моделях которых не приняты во внимание указанные особенности [26].

В то же время известно немало взглядов на процесс подготовки землетрясений, в той или иной мере использующих отдельные элементы приведенных моделей.

В действительности свойства реальной геологической среды, а не лабораторного образца дают основание для серьезной критики лабораторных моделей подготовки очага землетрясений. В начале 1990-х годов были предложены две новые модели [27, 28], но они не привлекли широкого внимания, хотя в них содержались вопросы геофизического содержания. Несколько позднее были развиты флюидометаморфогенные модели сейсмотектогенеза [26, 29–31].

Так, В.И. Шаров [27] считал, что попытка изучить и понять очаг землетрясения лишь по записям сейсмических волн не имеет перспективы. Он сравнивал эту ситуацию с попыткой разобраться в природе молнии по регистрации звуковых волн

атмосферных гроз. Очаг тектонического землетрясения представлялся им как термодинамическая система, которая не только передает различные типы механических движений среды, но и сама производит эти движения. Геологическая среда рассматривалась в виде сильно неравновесной системы, в которой в определенный момент рост внутренней энергии очага превышает его энергетические потери. При этом, по мнению автора, развивается новый режим разрушения со скоростью, превышающей скорость распространения упругих звуковых волн. В конечном итоге разрушение завершается взрывным процессом, имеющим химическую природу [26].

В другой модели [26, 28] рассматривался теплогазодинамический фактор в земной коре. Обсуждалось превращение тепла и потенциальной энергии флюида (преимущественно водяного пара) в работу. Очаг представлялся пористым котлом, заполненным надкритическим водяным паром при давлении больше критического. Накопление потенциальной энергии происходит при герметизации пористой системы в результате процессов минерализации. Автор оценивает плотность упругой энергии около 10^9 Дж/м³, что близко к теплоте плавления.

И.Г. Киссин [26, 29] полагает определяющим влияние флюида и реакции дегидратации горных пород на процесс подготовки очага сильного землетрясения. Реакция дегидратации вызывает увеличение общего объема продуктов, что сопровождается увеличением трещинно-порового пространства и объема флюида. Повышение в одном из блоков порового давления, близкого к литостатическому, приводит к гидроразрывам и впрыскиванию высоконапорного флюида в разломную зону. Этот процесс является спусковым механизмом для возникновения сильного землетрясения.

В представлениях М.В. Родкина [26, 31] – флюидометаморфогенная (ФМГ) модель – метаморфические реакции дегидратации, вызывающие твердотельные превращения, сопровождаются изменением физических свойств пород, понижением их прочности и увеличением трещинно-порового пространства. Повышение порового давления в процессе превращений рассматривается как один из факторов, предвещающих разрушение среды. В этой модели также предполагается, что область очага содержит мягкие включения, в которых произошли метаморфические реакции твердотельных превращений с образованием ультрамелкозернистых пород (милонитов), и жесткие включения, где указанные реакции не имели места. В рамках данной модели нарушение термодинамического равновесия связывается с изменением напряженного состояния в зоне будущего очага. Сброс энергии осуществляется при разрушении жесткого включе-

ния, что дает максимальный вклад в выделившуюся энергию, а наибольшие сдвиговые напряжения реализуются в пределах мягких включений.

Представления М.В. Родкина развил Ю.Л. Ребецкий [30] на основе анализа прочностных и деформационных характеристик трещиноватых и хрупких горных материалов, по данным лабораторных экспериментов и реконструкции полей напряжений в геологической среде. Образцы горных пород и геологическая среда рассматриваются как кулоновская среда, т. е. хрупкая среда с внутренними границами, где учитывается также поровое давление. Анализ данных реконструкции природных напряжений в сейсмоактивных регионах подтверждает положения, вытекающие из самых общих представлений о поведении трещиноватых кулоновских сред: критическое состояние может быть достигнуто не только путем повышения девиаторных напряжений, но и при понижении всестороннего давления. Вторым фактором, способствующим переходу к критическому состоянию, является повышение порового давления флюида, которое также приводит к снижению эффективного давления.

В моделях ДД и И.Г. Кисина [29] флюид появляется не в зонах будущего очага, а в приконтактных участках. Именно в зоне рождения флюида его давление будет большим и именно там скорее произойдет уменьшение сил трения и будут достигнуты критические условия. В ФМГ-модели рассматривается рождение флюида непосредственно в зоне очага. В то же время известно, что процессы дегидратации, обеспечивающие приток флюида в поровое пространство, имеют низкую скорость в силу эндотермического характера процесса, поэтому ФМГ-модель может объяснять лишь локализацию деформации в области метаморфизма и медленную деформацию. В связи с этим рассматривается роль автодиспергации горных пород в областях локализации сдвиговых деформаций [26].

В работе [7] отмечается, что существуют несоответствие и рассогласование во многих случаях GPS-измерений с геологическими построениями и сейсмологическими данными. Количественная величина и природа этого рассогласования не вполне ясны. Возможно, это связано с тем, что измерения производятся на поверхности, в то время как очаги землетрясений располагаются на глубинах от нескольких до десятков и сотен километров от нее. Для прогнозирования землетрясений предлагается регистрация так называемых форшочков – относительно слабых толчков, упреждающих катастрофические землетрясения [7]. В качестве примера приводится землетрясение 1857 г. в Калифорнии, когда за 2 ч до разрушительного толчка с магнитудой $M = 7,9$ произошел форшок с $M = 6,0$. Однако данная теория не отличается

определенной надежностью, так как форшоки не всегда имеют место. Научиться распознавать записи форшоков, как считают некоторые ученые, необходимо, “поскольку похоже, что большинству землетрясений ... предшествуют форшоки” [16]. Однако отдельные специалисты полагают, “что микросейсмическая активность связана скорее с крупными землетрясениями, происшедшими десятью годами ранее, чем с будущими землетрясениями” [32].

В работе [33] отмечается, что под действием ротационных и гравитационных сил происходит движение континентов с востока на запад, островов – с запада на восток. В Северном полушарии массы движутся навстречу друг к другу в силу принципов сепарации и вследствие космического гравитационного воздействия на Землю, вызывающего движение масс от полюса на юг. В передовых зонах движущих масс возникают напряженные участки в результате трения. Для землетрясений предполагается, что в очаге при накоплении предкритической энергии (давление, температура, масса) и попытке ее выхода происходит “раскачка” очага с увеличением его объема и усилением трещиноватости окружающего очаг пространства. При этом давление внутри очага падает, наступает затишье, отражающееся в записях дисперсий предвестников. Но уже сформировалась ослабленная зона вследствие повышенной трещиноватости, в основном, вертикальной направленности. На следующем этапе накапливается критическая энергия и происходит землетрясение.

Развитием этого рода идеи занимались и другие исследователи, в том числе В.Е. Хаин. По его мнению, в глубинных слоях Земли (возможно, в слое *D*) с определенной квазипериодической циклическостью возникает короткопериодический энергетический всплеск. Этот всплеск может спровоцировать образование области повышенного давления, температуры, пониженной плотности, подпитывающей плюм, которая создает дополнительный импульс в конвективных течениях в мантии. Данный импульс через определенное время приводит к ускорению конвекционных потоков в астеносфере, что вызывает активацию движения литосферных плит, в зависимости от того, в какой части слоя *D* происходит всплеск энергии. С момента всплеска до сейсмической активации проходит 8–20 дней, что наблюдается в вариациях силы тяжести перед сейсмическим событием [34].

В работе [35] отмечается, что нередко такие предвестники землетрясений, как свечение воздуха и отключение люминесцентных ламп, коронирование острий, а также регистрируемые приборами аномально сильные электрические и магнитные поля, свидетельствуют о том, что сейсмичность и вулканизм каким-то образом связаны

с геоэлектричеством. Предлагается модель, согласно которой, источником энергии землетрясений и извержений вулканов является джоулево тепло, выделяющееся в местах концентрации теллурических токов [35].

Согласно модели, предложенной В.И. Уткиным, А.К. Юрковым, следует изначально определить превалирующую модель основных движений литосферных блоков, что, в свою очередь, является следствием процессов, происходящих во внутренних частях Земли (рис. 5). Общий процесс для всех моделей – торможение, в результате чего блоки испытывают изгибные деформации. Этот вид деформации – естественный, он может накопить упругую энергию без разрушения трещиновато-пористой среды, т. е. литосферных блоков. Накопление упругой энергии блоком будет происходить практически без видимых его перемещений. Для такого подхода естественными предвестниками могут быть изменения электрического сопротивления массива деформирующихся пород и состояния подземных вод, интенсивность выхода радона. Также предполагается, что не менее важный процесс подготовки землетрясения – внутреннее трение литосферных плит, которое стимулирует деформационные процессы и может либо замедлять, либо ускорять крипт (движение плит). В проблеме триггирования (сброса упругой энергии) главная роль отводится такому внешнему фактору, как скорость барических изменений, которые, в свою очередь, вызывают разрядку накопленных напряжений. Роль “малого толчка”, который выводит подготовленную к землетрясению структуру из состояния неустойчивого равновесия, выполняют атмосферные явления, жестко связанные с процессами в ионосфере [3].

Таким образом, до настоящего нет общепринятой модели возникновения и развития землетрясений, как и их прогнозирования.

М.А. Садовский и соавт. [36, 37] предложили пересмотреть взгляды на геологическую среду. К фундаментальным свойствам среды относится ее строение. Это система блоков, которые взаимодействуют друг с другом и обмениваются энергией в процессе деформирования. Основная особенность такой среды – иерархическое распределение по размерам ее элементов. При этом среда сохраняет свои свойства, и сильные землетрясения вно-

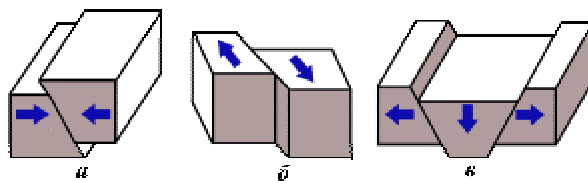


Рис. 5. Модели основных движений литосферных блоков, предшествующих землетрясению [3]: *a* – надвиг-сброс; *b* – трансферный сдвиг; *v* – сброс-рифт

сят небольшой вклад в изменение ее свойств. Накапливаемая в объемных структурах среды потенциальная энергия диссипируется в основном по системам геологических разломов (границ). Сейсмический режим является результатом развития неустойчивых процессов в сложной дискретной среде, и ему приписывается такой важнейший фактор, как случайность, — существенный элемент развития деформационных процессов в геологической среде. Ввиду изложенного вопрос об изучении и прогнозировании сейсмического режима необходимо ставить по-новому. Поэтому точный долгосрочный прогноз для подобных явлений, по мнению авторов [36, 37], в принципе невозможен. Вместе с тем в нелинейных и неустойчивых системах допустимо и обратное явление, а именно формирование упорядоченных структур, поведение которых уже поддается прогнозированию.

Следует также отдельно выделить модели прямой или опосредованной связи между тектоникой, сейсмическими и электромагнитными явлениями [38].

Необходимость изучения электромагнитных явлений сейсмической природы была уже очевидной в середине XX в. В 1954 г. А.Г. Калашников писал [39]: “Разработка теории землетрясений, по-видимому, невозможна, если оставаться в области рассмотрения чисто механических процессов, протекающих в очагах землетрясений. В этих случаях происходят также тепловые и электромагнитные процессы... Очень может быть, что причиной механических процессов, относящихся к землетрясениям и наблюдаемых на поверхности Земли, являются протекающие в глубине коры тепловые и связанные с ними электромагнитные процессы, которые предваряют механику сейсмоявлений. Эти немеханические процессы, при возможности их наблюдения на поверхности Земли, могут явиться подлинными предвестниками землетрясений” [с. 162–163].

В постановке проблемы прогноза сейсмических событий в СССР можно выделить такие этапы исследований: 1) формулировка задачи сейсмологии и определение путей ее решения (инструментальное изучение самих землетрясений и поиск предвестников); этап связан с именами А.П. Орлова, И.В. Мушкетова, Б.Б. Голицына [40, 41]; 2) постановка комплексных работ по прогнозу землетрясений под руководством Г.А. Гамбурцева [4]; 3) создание специальных полигонов, разработка физических основ и моделей процессов разрушения больших горных масс (М.А. Садовский) [37]. Недостаточная комплексность сейсмопрогнозных наблюдений по детальному совокупному анализу различных сейсмочувствительных параметров естественных полей снизила эффективность этих исследований. Отмечалось,

что разработку методов прогноза времени землетрясений следует осуществлять в первую очередь в направлении поисков механических предвестников землетрясений. Оставались неясными природа и процессы возбуждения источников электромагнитных явлений. Следует подчеркнуть, что цель лабораторных исследований не была связана с проблемой прогноза землетрясений [38].

В последние 10–15 лет в разных странах большое внимание уделяется электромагнитным методам мониторинга различных оболочек Земли (литосферы, атмосферы и ионосферы). Эти методы позволяют контролировать процессы в локальных зонах литосферы и атмосферы, а также интегральные параметры ионосферы.

В указанных методах есть много неопределенностей, однако развитие данного направления может привести к интересным результатам. В.А. Липеровский [42] в своих работах отмечает явную связь в системе атмосфера–литосфера–атмосфера. Наблюдаются “аномальные” всплески электромагнитного излучения в диапазоне от единиц до десятков герц, “аномальные” возмущения в ионосфере. Ионосферные возмущения над областью подготовки землетрясения проявляются как неоднородности со специфической динамикой развития, что обуславливается дискретной структурой земной коры. К сожалению, единой гипотезы в этой связи нет, однако приводится ряд гипотез, в том числе “резонансная”, “акустико-гравитационная”, “акустико-электрическая” и др.

В “акустико-гравитационных” моделях предполагается, что за несколько дней до землетрясения вблизи поверхности Земли в области подготовки землетрясений генерируются атмосферные акустико-гравитационные волны (АГВ), которые распространяются вверх через атмосферу под углом к горизонтали и доходят до ионосферных высот. Угол распространения АГВ зависит от периода волны. Далее возмущения нейтральной компоненты ионосферной плазмы могут вызвать возмущения плотности заряженных частиц в ионосфере в результате столкновения ионов с нейтралами [43–45].

При сейсмогравитационных колебаниях поверхность Земли может действовать на атмосферу как поршень, вызывать вариации температуры, проводимости и давления, обуславливая генерацию АГВ в атмосфере. Кроме того, эти колебания могут приводить к выбросу в атмосферу радона и других газов. Аномальные вариации атмосферного давления, относительной влажности, температуры воздуха и скорости ветра могут наблюдаться за несколько часов — суток перед сильным землетрясением [42].

Передача возмущений в область ионосферы многоступенчатая. АГВ создают лишь начальное возмущение плазмы, а дальше развивается неус-

тойчивость Рэлея–Тейлора, которая может вызывать возникновение ионосферных плазменных пузырей. Последние при пролете спутника проявляются как вариации плотности плазмы с характерными размерами 1–100 км по горизонтали.

В “резонансной модели” предполагалось, что перед землетрясениями вблизи эпицентров происходят процессы кратковременного разделения зарядов на поверхности Земли с характерным временем порядка тысячных долей секунды. Такие процессы должны вызывать соответствующие токи, всплески электрических полей, разделение зарядов в ионосфере и дальнейшие колебательные процессы в системе литосфера–ионосфера на резонансной частоте, подобно процессам в обычном колебательном контуре, имеющем емкость, индуктивность и сопротивление [46]. Далее должны происходить передача электромагнитной энергии из литосферы в ионосферу, нагрев и его следствия в E -области, в частности резкое уменьшение плотности спорадических слоев, регистрируемое при вертикальном зондировании. К настоящему времени, однако, пока нет достаточных экспериментальных подтверждений данной модели, хотя для ряда землетрясений был проведен анализ электромагнитных эффектов в диапазоне ОНЧ [47]. Не исключая принципиальной возможности проявления резонансных ионосферных эффектов при подготовке некоторых землетрясений, некоторые авторы полагают [48], что резонансные эффекты возможны, но не являются определяющими в литосферно-ионосферной связи.

“Акустико-электрическая” модель [49] возбуждения генераторов и минитоковых систем в ночной области ионосферы под действием акустических импульсов, идущих от Земли, пока еще не подтверждена наблюдениями. В модели предполагается наличие акустических возмущений – импульсов нейтрального ветра с характерными временами порядка нескольких минут, возникающих в атмосфере над областью подготовки землетрясений радиусом несколько сотен километров и распространяющихся вверх до ионосферы. При воздействии порыва нейтрального ветра, вызванного акустическим возмущением в приповерхностной атмосфере, на ночной спорадический слой конечных размеров на высотах 95–130 км возникает локальный нестационарный генератор электрического поля и тока. Далее образуется трехмерная система электрических полей и токов, которые при выполнении некоторых условий могут быть причиной неустойчивостей и плазменной турбулентности. При этом учитывалось, что спорадические слои расположены в окружающей плазме меньшей плотности. Заметим, что распространяющиеся вверх от поверхности Земли возмущения нейтрального атмосферного газа могут достигать

ионосферы и приводить к эффектам в ней, только если их периоды лежат в интервале от долей минуты до нескольких минут [50].

Л.И. Уруцкоев [51] предполагает связь между сейсмическими и электромагнитными волнами. Исследователь отмечает, по крайней мере, три труднообъяснимых факта: каким образом энергия электромагнитных колебаний (или электромагнитного импульса) преобразуется в энергию механических (сейсмических) колебаний; чем обусловлена задержка в 5–6 сут между электромагнитным триггером и активизацией сейсмического события; откуда берется высокий коэффициент усиления энергии $K \sim 10^6$. Возможное предположение – по-видимому, эта энергия была накоплена заранее в коре, а зондирующий импульс только инициировал выделение. Но тогда возвращаемся к первому вопросу: каков механизм инициации? Для объяснения этого механизма вполне логично попытаться привлечь обратный сейсмологический эффект второго рода, который напрямую устанавливает связь между величиной переменного электрического поля в среде и сейсмическими колебаниями среды [52].

Вместе с тем некоторые гипотезы рассматривают инициирование землетрясений “подземными грозами”. Автор одной из них А.А. Воробьев отмечает [53], что условия подготовки землетрясений подобны грозовым процессам в атмосфере. С одной стороны, данный подход может объяснить появление некоторых предвестников землетрясений, в частности, при изменении всех магнитных элементов, а особенно склонения во всей обширной области сотрясения, и магнитные бури за 2 дня до землетрясения. С другой стороны, гипотеза вызывает много вопросов. Так, в работах [38, 54] указывается, что А.А. Воробьев перенес лабораторный опыт в природные условия, и в этом случае нельзя объяснить световые эффекты перед землетрясением. При разрушении лабораторных образцов световые эффекты приурочены к бортам развивающихся трещин, а перед землетрясением световые эффекты наблюдаются в атмосфере. Сегодня механоэлектрические преобразования в земной коре находят все больше подтверждений.

Наиболее оптимистичный подход к прогнозу – комплексный, учитывающий характерные черты многих моделей. В этом направлении проводится достаточный объем работ. Например, В.Г. Сибгатулин [55] предполагает, что очаг формируется как в глубине, так и с выходом на поверхность, откуда наблюдаются некоторые внешние предвестники землетрясения, в том числе атмосферные явления. Исследования структуры в очаговых зонах свидетельствуют, по мнению автора, об адекватности природы сейсмических процессов модели “детерминированного” хаоса. “В частности,

в сейсмических процессах выявлены энергетические уровни, стрелы времени, устойчивые центры энергетических аттракторов, что позволяет прогнозировать направление и характерные точки развития процессов” [55, с. 8].

Выводы. В целом можно отметить недостаточное внимание ко многим факторам, вносящим свой вклад в природу землетрясений. Особенно это касается природы и механизма электромагнитно-механических превращений, которые не следует разделять.

Справедливо, что геосреда – динамическая и нелинейная. Приходится констатировать факт, что наше понимание не только природы землетрясений, но и геологической среды недостаточно, а следовательно, строить прогноз без надежной модели представляется недостоверным.

Необходимы не просто накопление разнородной информации о землетрясении, а построение целостной новой модели, разработка методики ее качественного анализа и создание природных лабораторий для количественных оценок этой модели. Есть острая необходимость изучения не только механистической стороны землетрясения, но и электромагнитно-механической в целом. Следует углубить исследования для изучения связи литосфера–ионосфера.

Тем не менее, несмотря на преобладающий пессимистический взгляд на проблему прогноза землетрясений, авторы видят возможность прогноза сейсмических событий при условии построения комплексной модели землетрясений.

1. Сидорин А.Я. Выдающееся достижение Российской академии наук: успешный прогноз землетрясения в Японии 11 марта 2011 г. // Геофиз. процессы и биосфера. – 2011. – 10, № 1. – С. 5–8.
2. Литинецкий И.Б. Предвестники подземных бурь. – М.: Просвещение, 1988. – 191 с.
3. Уткин В.И., Юрков А.К. Прогноз землетрясений. Есть ли выход из тупика? // Геофиз. вестн. – 2010. – № 3. – С. 10–15.
4. Гамбурцев Г.А. Избранные труды. В 3 т. Т. 1. Работы по геофизике и физике. – М.: Наука, 2003. – 528 с.
5. Копылова Г.Н. О возможности оценок косейсмической деформации по данным уровнемерных наблюдений в скважине // Физика Земли. – 2010. – № 1. – С. 51–61.
6. Николаев Н.И. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. – М.: Недра, 1988. – 491 с.
7. Лыков В.И., Мострюков А.О. Особенности процесса подготовки очага землетрясения в зоне перманентно крипующего глубинного разлома // Физика Земли. – 2008. – № 10. – С. 93–100.
8. Приходовский М.А. О возможной зависимости сейсмичности от производной ускорения // Материалы междунар. конф. “Сопряженные задачи механики, информатики и экологии”, г. Горно-Алтайск, 5–7 июля 2004. – Томск.: Изд-во Томск. гос. ун-та, 2004. – С. 180–183.
9. Бриджмен П.В. Исследования больших пластических деформаций и разрыва. Влияние высокого гидроста-

тического давления на механические свойства материалов. – М.: Либрокон, 2010. – 448 с.

10. Кучай В.К. Зонный орогенез и сейсмичность. – М.: Наука, 1981. – 164 с.
11. Пономарев В.С. Структуры самопроизвольного разрушения горных пород // Изучение тектонических деформаций – М.: Геол. ин-т АН СССР. – 1987. – С. 117–133.
12. Кропоткин П.Н. Напряженное состояние земной коры // Разломы земной коры. – М.: Наука, 1977. – С. 20–29.
13. Ребецкий Ю.Л. Состояние и проблемы теории прогноза землетрясений. Анализ основ с позиции детерминированного подхода // Геофиз. журн. – 2007. – № 4. – С. 102–120.
14. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. – М.: Наука, 1993. – 313 с.
15. Сидорин А.Я. Предвестники землетрясения. – М.: Наука, 1992. – 192 с.
16. Касахара К. Механика землетрясений. – М.: Мир, 1985. – 264 с.
17. Мячкин В.И. Процессы подготовки землетрясений. – М.: Наука, 1978. – 232 с.
18. Добровольский И.П. Теория подготовки сильного тектонического землетрясения // Изв. РАН. Физика Земли. – 1992. – № 6. – С. 31–47.
19. Райс Дж. Механика очага землетрясения. – М.: Мир, 1982. – 215 с.
20. Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as a mechanism for earthquakes // Science. – 1966. – 153. – P. 990–992.
21. Брейс В.Ф., Мячкин В.И., Думрих Дж.Х., Соболев Г.А. Две модели объяснения предвестников землетрясений // Сборник советско-американских работ по прогнозу землетрясений. Т.1. Кн.2. – Душанбе; Москва: ИФЗ АН СССР, 1976. – С. 90–124.
22. Соболев Г.А. Проблема прогноза землетрясений // Природа. – 1989. – № 12. – С. 47–55.
23. Добровольский И.П. Механика подготовки тектонического землетрясения. – М.: ИФЗ АН СССР, 1984. – 188 с.
24. Scholz C.H. The mechanism of and faulting. – Cambridge etc.: Cambridge Univ.Press., 1990. – 439 p.
25. Запольский К.К., Нерсесов И.Л., Раутиан Т.Г., Халтурин В.И. Физические основы магнитудной классификации землетрясений // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. – М.: Наука, 1974. – Т. 1. – С. 79–133.
26. <http://injzashita.com/modeli-podgotovki-silnix-zemletryaseniie.html>.
27. Шаров В.И. Тектоническое землетрясение как неравновесный термодинамический процесс разрушения горных пород. К проблеме смены парадигмы сейсмологии // Физика Земли. – 1992. – № 2. – С. 122–127.
28. Пономарев А.С. Теплогазодинамическая модель коровых землетрясений // Там же. – 1990. – № 10. – С. 100–112.
29. Киссин И.Г. Современный флюидный режим земной коры и геодинамические процессы // Флюиды и геодинамика. Материалы Всерос. симпоз., 2003 г. – М.: Наука, 2006. – С. 85–104.
30. Ребецкий Ю.Л. Дилатансия, поровое давление флюида и новые данные о прочности горных массивов в есте-

- ственном залегании // Флюиды и геодинамика. Материалы Всерос. симпозиума, 2003 г. – М.: Наука, 2006. – С. 120–146.
31. Родкин М.В. О различиях сейсмотектонического процесса при разных термодинамических условиях // Физика Земли. – 2006. – № 9. – С. 29–39.
 32. Шейдеггер А.Е. Физические аспекты природных катастроф. – М.: Недра, 1981. – 232 с.
 33. Михайлов И.Н. Кратковременный прогноз катастрофических землетрясений // Геофизика. – 2006. – № 2. – С. 64–69.
 34. Хаин В.Е., Халилов Э.Н. Гравитационные эффекты перед сильными удаленными землетрясениями // Вестн. Междунар. академии наук. Рус. секция. – 2007. – № 2. – С. 45–52.
 35. Гришаев А.А. Теллурические токи, как одна из главных причин сейсмичности и вулканизма. – <http://newfiz.narod.ru> – 2002.
 36. Садовский М.А., Авсюк Ю.Н. Глобальные изменения природной среды и варианты объяснения наблюдаемых аномалий в рамках современных геодинамических моделей // Глобальные изменения природной среды и климата. – М.: Наука, 1997. – С. 52–79.
 37. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. – М.: Наука, 1991. – 95 с.
 38. Токтосопиев А.М. Электромагнитные предвестники землетрясений: Учеб. пособие. – Каракол, 2007. – 312 с.
 39. Калашиников А.Г. Возможности магнитометрических методов в решении вопроса о предвестниках землетрясений // Тр. Геофиз. ин-та. – 1954. – № 25. – С. 162–180.
 40. Мушкетов И.В., Орлов А.П. Каталог землетрясений Российской империи // Зап. Русск. Геогр. об-ва. – СПб.: Императорская академия наук, 1893. – Т. 26. – 582 с.
 41. Голицын Б.Б. Избранные труды. Т.2. Сейсмология. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 490 с.
 42. Липеровский В.А. Физические модели в системе литосфера–атмосфера–ионосфера // Лекции БШФФ. – 2006. – С. 58–65. – <http://bsfp.iszf.irk.ru/bsfp2006/proceed2006/58–65.pdf>.
 43. Mareev E.A., Ludin D.L., Molchanov O.A. Mosaic source of internal gravity waves associated with seismic activity // Seismo-Electromagnetics: Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling. – Tokyo: TERRAPUB, 2002. – P. 335–342.
 44. Shalimov S.L., Gokhberg M.B. Lithosphere ionosphere coupling mechanism and its application in the case of the June 20, 1990 Earthquake in Iran. Interpretation of its ionospheric effects // J. Earth. Pred. Res. – 1998. – № 7. – P. 98–111.
 45. Гохберг М.Б., Шалимов С.Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. – М.: ИФЗ РАН, 2004. – 222 с.
 46. Гохберг М.Б., Булошников А.М., Гуфельд И.Л., Липеровский В.А. Резонансные явления при сейсмоионосферном взаимодействии // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1985. – № 6. – С. 5–8.
 47. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмо-электромагнитные явления. – М.: Наука, 1988. – 173 с.
 48. Tate J.B. Radio-Earth: The Radio-seismic connection // Whole Earth Rev. – 1990. – № 68. – P. 101–104.
 49. Liperovsky V.A., Meister C.V., Schlegel K., Haldoupis Ch. Currents and turbulence in and near mid-latitude sporadic E-layers caused by strong acoustic impulses // Ann. Geophys. – 1997. – 15. – P. 767–773.
 50. Blanc E. Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources. A summary // Ibid. – 1985. – 3. – P. 673–679.
 51. Уруцкоев Л.И. О возможном механизме землетрясений // Приклад. физика. – 2000. – № 4. – С. 55–61.
 52. Пархоменко Э.И., Гаскаров И.В. Скважные и лабораторные исследования сейсмoeлектрического эффекта второго рода в горных породах // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1971. – № 9.
 53. Воробьев А.А. К вопросу об иницировании землетрясений подземными грозовыми явлениями // Электрическая аппаратура и электрическая изоляция. – М.: Энергия, 1970. – С. 494–501.
 54. Авагимов А.А., Жуков В.С., Логутинская Л.Н., Милькис М.Р. Связь электротеллурических потенциалов с движением подземных вод // Прогноз землетрясений. – Душанбе; Москва: Дониш, 1986. – № 7. – С. 169–175.
 55. Сибгатулин В.Г., Хлебонрос Р.Г., Перетокин С.А., Кабанов А.А. Синергия процессов в сейсмических очагах и краткосрочный прогноз землетрясений. – <http://www.tcpdf.org> \16–5. pdf.

Поступила в редакцию 15.09.2011 г.

Н.А. Якимчук, В.К. Демидов, В.А. Антощук

ОБ ОСНОВНЫХ МЕХАНИЗМАХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Описываются основные механизмы и модели землетрясений. Рассматриваются возможные причины (“спусковой механизм”) возникновения тектонических подвижек. Подчеркивается важность возможности прогноза землетрясений, прежде всего необходимость понимания природы этих катастроф, что позволит правильно оценить возникающие предвестники и закономерности их появления.

Ключевые слова: землетрясения, модель, сейсмология, литосфера–ионосфера.

М.А. Якимчук, В.К. Демидов, В.О. Антощук

ПРО ОСНОВНІ МЕХАНІЗМИ ВИНИКНЕННЯ ЗЕМЛЕТРУСІВ

Описано основні механізми і моделі землетрусів. Розглянуто можливі причини (“спусковий механізм”) виникнення тектонічних переміщень. Підкреслено важливість можливості прогнозу землетрусів, передусім необхідність розуміння природи цих катастроф, що дасть змогу правильно оцінити передвісники, що виникають, і закономірності їхньої появи.

Ключові слова: землетруси, модель, сейсмологія, літосфера—іоносфера.