

С.В. Мишин

(Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт
им. Н.А.Шило; e-mail: mishin@neisri.ru)

О ПРОБЛЕМАХ СОВРЕМЕННОЙ СЕЙСМОЛОГИИ

Обсуждаются затруднения науки о сейсмических процессах, предлагаются пути их преодоления.

Ключевые слова: напряженное состояние, очаг землетрясения, передача возбуждения, интенсивность сотрясения.

S.V. Mishin

ON THE PROBLEMS OF MODERN SEISMOLOGY

The difficulties of modern science of seismic processes are discussed, the ways of overcome difficulties.

Key words: tension, focus, dissemination of action, tremor's intensity.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 11 марта 2015 г.

Сейсмологи в своих исследованиях анализируют главным образом два мощных потока информации – во-первых, это результаты обследований эпицентральных областей сильных землетрясений, во-вторых, это данные инструментальных наблюдений, проводящихся на сейсмических станциях. Работы по непосредственному наблюдению результатов землетрясений относятся к макросейсмике землетрясений, они составляют основу сейсмогеологии и инженерной сейсмологии. Инструментальные наблюдения за сейсмическими событиями лежат в основе теоретической сейсмологии – построения моделей очагов землетрясений, их прогноза, анализа природы распространения сейсмических волн, определения глубинных границ в земных недрах. Разумеется, резких границ между разделами сейсмологии не существует, и сейсмогеологи нередко обращаются к инструментальным данным, а теоретики сопоставляют макросейсмике с расчётными результатами.

Сейсмические процессы представлены в окружающем мире в разнообразных формах, сейсмическое излучение может конкурировать по распространённости с электромагнитным излучением. Однако анализ этих физических процессов заметно отстаёт от разработки основ природы электромагнетизма. Большой поток научных исследований по сейсмологии посвящается методикам и результатам наблюдений за природными сейсмическими процессами (в первую очередь, за землетрясениями разных географических зон), установлению эмпирических закономерностей пространственно-временных соотношений между событиями и др. [1]. В основе таких работ лежит статистический анализ непрерывно пополняемых материалов для практических целей оценки сейсмической опасности, угрожающей промышленным объектам, или для сопоставления современных геологических движений в разных районах.

Другое направление в современной сейсмологии, напротив, характеризуется применением аналитических методов количественного решения модельных задач, в первую очередь, физики очага землетрясения [2, 3]. В работах этого типа выбирается форма количественной связи между характеристиками процесса, проводится расчёт параметров моделей, после чего результаты сравниваются с измеренными значениями характеристик реальных процессов. В основе таких работ обыкновенно лежат представления о непрерывной напряженно-упругой среде, о линейной связи напряжений с деформациями, сейсмические волны описываются функциональными зависимостями смещений, скоростей или ускорений элементов среды от характера источника или от расстояния-времени. Среди множества монографий и популярных изложений результатов нет, однако, учебника сейсмологии, последовательно излагающего физические основы учения о землетрясениях. На наш взгляд, не решены важнейшие проблемы сейсмологии, как раздела наук о Земле: 1) что такое "напряжённое состояние" земных недр; 2) что происходит в очаге землетрясения; 3) как распространяется в пространстве действие источника; 4) почему разрушаются и перемещаются материальные структуры вдали от очага.

Напряжённое состояние земных недр

Одним из основных понятий современной сейсмологии является представление о напряженном состоянии земных недр, в которых протекают процессы подготовки землетрясений. Принято сообщать о полном или частичном снятии упругих напряжений в области очага, о "вспарывании сплошной среды" и пр. В основе множества современных публикаций лежит гипотеза упругой отдачи. Смысл этой гипотезы понятен из следующего рассуждения Рейда (цитируем по книге Б.В. Кострова [3]):

"Невозможно, чтобы горная порода разрушилась, не будучи предварительно подвергнута действию упругих напряжений, больших, чем она может выдержать; единственными мыслимыми способами быстрого приложения этих напряжений является взрыв или быстрое устранение или добавление материала под некоторой частью коры. Как взрыв, так и быстрое течение расплавленных пород связаны с вулканическими землетрясениями, которые здесь не рассматриваются; поскольку происходят землетрясения, не связанные с вулканической деятельностью, мы приходим к заключению, что кора во многих частях Земли медленно перемещается, и разности перемещений в соседних областях создают упругие деформации большие, чем порода может выдержать, затем возникает разрыв, и деформированные породы испытывают отдачу под действием их собственных упругих напряжений, пока эти деформации в значительной степени или почти полностью не будут сняты..." [3, с. 29].

В основе гипотезы лежит удивительное событие: огромное деформированное геологическое тело вдруг упруго восстанавливает свою форму. Принять всерьез такое чудо могут люди либо наивные, либо весьма практичные. "Трудно искать черную кошку в темной комнате, особенно, когда её там нет".

А колоссальных запасов упругой энергии в земных недрах нет. Инженеры и даже отдельные дети знают, что упругая энергия не применяется в технических устройствах значительной мощности.

Мы полагаем [4, 5], что земные недра сложены множеством геологических тел разной формы и разного состава. Эти тела уложены в систему воздействием поля тяготения Земли. Каждое тело давит на свою опору, причем давление (вес вышележащих пород) с глубиной растёт. На глубинах, характерных для очагов землетрясений (более 3 км) напряжения, связанные с тепловыми потоками, с неравномерностью движения планеты и пр. оказываются пренебрежимо малыми, в сравнении с весом вышележащих тел. Подобно айсбергам в океане, в поверхностных зонах планеты "плавают" горные сооружения (изостазия). Средняя плотность горных сооружений меньше плотности субстрата, в который эти тела погружены, за счет трещин и полостей, занимающих в них определенный объём. Как и в айсбергах, большая часть этих сооружений располагается ниже дневной поверхности. Землетрясения происходят в результате перемещения крупных блоков горных пород подобно процессам разрушения строительных конструкций, остающихся без ремонта.

Очаг землетрясения

В литературе конкурируют три точки зрения на процессы в очагах землетрясений. Во-первых, это широко распространенная гипотеза упругой отдачи, сформулированная Г. Рейдом в начале XX века на основе анализа последствий землетрясения в Сан-Франциско в 1906 г. [3]. Согласно другой гипотезе, землетрясение – это "подземная молния", мощный электрический разряд накопленной электростатической энергии [6]. Мы разрабатываем представления Е. Зюсса и Б.Б. Голицына [7] о том, что землетрясение есть удар при перемещении крупного блока горных пород.

В 1980 г. опубликована в США и в 1983 г. переведена на русский язык двухтомная монография К. Аки и П. Ричардса "Количественная сейсмология" [2], которая содержит подробный математический анализ упругой модели очага землетрясения. Аки и Ричардс пишут совершенно определенно: *"...Используемые в сейсмологии модели по существу являются математическими. Физические предпосылки их обычно весьма просты и содержат в основном уравнения движения, закон Гука и несколько других уравнений"* [2, с. 526].

Уже в 2009 г. И.П. Добровольский так формулирует упругую модель процесса тектонического землетрясения: *"Тектоническое землетрясение состоит в превращении части высвобожденной упругой потенциальной энергии в кинетическую энергию сейсмических волн. Упругая потенциальная энергия может накопиться лишь в напряженной среде, обладающей упругими свойствами. Следовательно, тектоническое землетрясение может возникнуть только при наличии тектонических напряжений, которые, тем самым, играют ведущую роль в этом процессе, а динамически развивающийся разрыв*

разгружает среду. Отсюда следует, что очаг тектонического землетрясения является не источником энергии, а источником сейсмических волн, инициатором превращения потенциальной энергии в другие виды энергии, причиной импульсной разгрузки среды. Это обстоятельство радикально отличает очаг тектонического землетрясения от взрыва, при котором почти вся энергия будущих сейсмических волн концентрируется в очаге" [8, с. 24].

"Энергия подготовки – это приращение ΔW упругой потенциальной энергии среды, вызванное появлением неоднородности". [8, с. 46]

Мы полагаем, что рассматриваемая во множестве современных публикаций модель процесса землетрясения принципиально неверна. "Радикальное отличие" землетрясения от взрыва совершенно не отражается на сейсмограммах, регистрируемых в самых разных условиях.

По поводу гипотетической "подземной молнии" можно заметить, что землетрясения не сопровождаются мощными электрическими разрядами, которых следовало бы регистрировать в таких ситуациях. Впрочем, эта гипотеза пока слабо разрабатывается в литературе.

Мы полагаем [4, 5], что землетрясение – удар при перемещении крупного блока горных пород в земных недрах. Причиной землетрясения служит тяготение Земли, запасы потенциальной энергии определяются массой перемещаемого блока M и величиной подвижки массы по вертикали h . Энергия процесса $E = Mgh$, эта потенциальная энергия преобразуется в кинетическую, причем масса приобретает механический импульс, который по мере торможения движения отдается окружающей среде по законам удара в виде пакета сейсмического излучения. Известно, что любой удар массивного тела по жесткому основанию сопровождается сейсмическими сигналами, которые регистрируются современной аппаратурой.

Распространение возбуждения

Передача возбуждения из источника во внешнюю среду описывается обычно при помощи волнового уравнения, позволяющего определять значения смещений, скоростей и ускорений движения частиц в выбранной области пространства. Упругие волны описываются следующим уравнением [9]:

$$\rho \partial^2 U / \partial t^2 = \mu \Delta U + (\lambda + \mu) \text{grad div} U + f_{\text{об}} = 0,$$

где U – вектор смещения;

ρ – плотность среды;

λ, μ – постоянные Ламе;

$f_{\text{об}}$ – объёмные силы.

Уравнение справедливо для однородной упругой среды. Если среда неоднородна, то есть вдоль трассы распространения волны меняются ρ , λ или μ , то решение уравнения становится необычайно сложным, а точное решение – практически невозможным.

Мы рассмотрели сейсмические сигналы, регистрируемые при механических ударах и небольших взрывов [4, 5], и пришли к выводу, что сейсмическое излучение представляет собой распространение механического импульса из источника в невозбужденные области среды. Проведём мысленный эксперимент – разобьем кирпич с помощью молотка и зубила. Молоток не касается кирпича, то есть разбивает кирпич не молоток. Молоток отдает зубилу механический импульс (количество движения), этот импульс распространяется в материале зубила со скоростью сейсмической волны и отдается телу. На фронте волны действует ньютоновская сила (изменение импульса), которая вызывает отрыв отдельностей. Избыток импульса можно наблюдать при разлете обломков.

Отвлекаясь от математических сложностей решения дифференциальных уравнений, можно предположить с точки зрения физики, что удар в источнике отдает механический импульс (количество движения и момент количества движения) среде, тормозящей перемещение ударяющего тела. Этот импульс передается соседним телам по законам удара. Количество движения – поступательный импульс – распространяется в среде в виде продольной волны, а момент количества движения – вращательный импульс – формирует поперечную волну. Поступательное и вращательное движение взаимнообратимы, поэтому наблюдаются обменные волны. Таким образом, мы полагаем, что сейсмическое излучение представляет собой распространение механического импульса в сплошной среде. В однородной среде пакет излучения распространяется в виде сферического слоя, радиус которого увеличивается со скоростью сейсмических волн. Фронт волны создает давление на невозбужденную среду – давление пропорционально производной плотности импульса по времени.

Действие сейсмического излучения на материальные тела

Интенсивность сейсмических воздействий оценивается ныне в баллах на основе макросейсмических шкал, например, на основе шкалы *MSK-64* [10]. Шкала представляет набор эмпирических сведений о результатах наблюдений за последствиями землетрясений прошлого, не связанных с физикой явлений; установлены количественные связи баллов со значениями смещений, скоростей движения частиц и их ускорениями, регистрируемыми инструментально. Однако не вполне ясно, почему строения разрушаются при таких кинематических параметрах – все тела на Земле обладают огромными скоростями и ускорениями при движении планеты, оставаясь при этом в относительном покое! Физический смысл понятия балла в сейсмологии не раскрывается.

Мы полагаем [4, 5], что причиной разрушений материальных структур при землетрясениях является давление фронта сейсмического излучения, распространяющегося из источника. Балл таким образом определяется действием ньютоновских сил при передаче механического импульса от возбужденных частиц среды к невозбужденным. Сила по определению Ньютона – изменение импульса массивной частицы.

Альтернатива современной сейсмологии

Землетрясение можно рассматривать как естественный кратковременный процесс возбуждения сейсмического излучения в сплошной среде земных недр. Наша концепция сейсмических процессов [4, 5] кратко может быть выражена следующими положениями:

1. Сейсмическое излучение представляет собой распространение механического импульса в материальной среде. При преобразовании потенциальной энергии разных форм в кинетическую массы приобретают механический импульс; при торможении движущихся масс импульс отдается тормозящим связям и распространяется в сплошной среде в виде сейсмического излучения.

2. Сотрясения связанных масс суть движения элементов массы среды под действием ньютоновских сил, действующих при передаче импульса от возбужденных элементов соседним частицам – элементы связанной системы обмениваются импульсом в соответствии с механикой удара.

3. Землетрясение представляет собой сейсмическое событие – его результатом является сейсмическое излучение, регистрируемое сейсмическими приборами. Процесс землетрясения – удар при торможении перемещающегося блока горных пород.

4. Сейсмическая активность участка земных недр – дискретный геологический процесс, сопровождающий преобразование рельефа участка земных недр. Интенсивность сейсмической активности определяется частотой перемещений элементов рельефа и величиной блоков, смещающихся в процессе его трансформации.

Итак, землетрясение – это удар при торможении сместившегося в поле силы тяжести блока горных пород. Если *масса* блока M упадет с *высоты* h , то блок приобретет кинетическую *энергию*, равную потенциальной $E = Mgh$. При этом масса M приобретет *импульс*

$$P = M \sqrt{2gh} \text{ (так как } E = P^2/2M = Mgh\text{)}.$$

Импульс – важнейшая характеристика сейсмического события, поэтому характеризовать интенсивность землетрясения следует именно в единицах импульса ($кгм/с$). Величины "магнитуды" и/или "энергетического класса" должны иметь размерность импульса.

Сформированный в процессе удара блока пакет сейсмического излучения (механического импульса) распространяется в окружающей среде в виде сферического слоя со скоростью сейсмических волн (из-за неоднородности среды поверхность фронта излучения, разумеется, отличается от правильной сферы, но мы говорим об упрощенной модели). Значение импульса остается постоянным, а поверхность сферического слоя непрерывно увеличивается, отчего плотность импульса на поверхности фронта излучения непрерывно падает. **Плотность импульса** на единицу площади фронта на расстоянии R от места удара (очага землетрясения) можно оценить значением:

$$G = P/4\pi R^2 \text{ (кгм/с/м}^2\text{)}.$$

При передаче импульса от одних частиц среды другим действуют ньютоновские силы $F = dP/dt$, поэтому фронт излучения создает **давление** на окружающую среду

$$F = dG/dt \text{ (Н/м}^2\text{)}.$$

Именно давление волнового фронта создает известные сейсмические эффекты – движение массивных тел, разрушение строений и пр. Величина давления зависит от плотности импульса на поверхности фронта излучения и от длины волны излучения (времени нарастания импульса в процессе удара). В очаге продолжительность удара можно оценить временем распространения продольной волны в теле блока:

$$\Delta t = L/v_p$$

где L – длина блока;

v_p – скорость продольных волн.

В процессе распространения импульса в неоднородной среде, возможно, волновой пакет изменяется, становится положе, поэтому при оценках величины сейсмического давления N мы считаем возможным использовать время нарастания амплитуды первого вступления на сейсмограмме (четверть первого периода колебаний) в качестве средней **продолжительности действия** фронта τ . Тогда средняя величина давления фронта на окружающую среду на расстоянии R от очага составит: $f = G/\tau$.

Сильные землетрясения характеризуются огромной мощностью. Например, Артыкское землетрясение в 1971 году на границе Якутии и Магаданской области, при котором за секунды выделилось столько же энергии, сколько Колымская ГЭС производит за 5 лет. Мощность процесса землетрясения N можно определить как отношение кинетической энергии E к продолжительности удара Δt : $N = E/\Delta t$.

Эти простые соотношения позволяют приблизительно оценивать основные параметры процесса землетрясения.

Литература

1. **Горшков Г.П.** Региональная сейсмоструктура территории юга СССР. Альпийский пояс. М.: Наука, 1984. 272 с.
2. **Аки К., Ричардс П.** Количественная сейсмология. М.: Мир, 1983. 364 с.
3. **Костров Б.В.** Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 172 с.
4. **Мишин С.В.** Сейсмические процессы и сохранение импульса. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2004. 115 с.
5. **Мишин С.В.** О физике сейсмических процессов. Эксперименты и модели. Lambert Academic Publishing, 2013. 196 с.
6. **Воробьев А.А.** Физические условия залегания глубинного вещества и сейсмические явления. В 2 ч. Томск: ТГУ, 1974.
7. **Голицын Б.Б.** О землетрясении 18 февраля 1911 года // Избранные труды. Т. 2. М.: изд-во АН СССР, 1960. С. 365-370.
8. **Добровольский И.П.** Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 240 с.
9. **Бреховских Л.М., Гончаров В.В.** Введение в механику сплошных сред (в приложении к теории волн). М: Наука, 1982. 336 с.
10. **Инструкция** о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях ЕССН СССР. М.: Наука, 1981. 270 с.