

УДК 550.348

## ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

*С. В. Мишин, В. М. Шарафутдинов*

*Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН, г. Магадан  
E-mail: mishin@neisri.magadan.ru*

Процесс землетрясения рассматривается как удар при перемещении блока горных пород в поле тяготения. Основные параметры процесса – масса блока, импульс, переданный неподвижной среде при остановке, ньютоновские силы, действующие при распространении импульса (сейсмическое давление). Приводятся количественные оценки параметров.

**Ключевые слова:** землетрясение, удар, импульс, сейсмическое давление, сейсмическое событие.

Г. П. Горшков пожелал будущим сейсмологам «...разработать наиболее достоверную с точки зрения физики и геологии модель очага тектонического землетрясения. Следует оставить широко распространенную, но ложную концепцию “очаг – разрыв” и перейти к более правильной, логичной и перспективной модели “очаг – объем”» (Горшков, 1984. С. 64). В соответствии с этим пожеланием была разработана альтернативная концепция механики сейсмических процессов (Мишин, 1993, 2004), кардинально отличающаяся от широко распространенных в сейсмологии моделей. Основное содержание этой концепции сводится к следующему:

1) сейсмическое излучение представляет собой распространение в материальном пространстве механического импульса. В источнике излучения происходит переход потенциальной энергии (гравитационной, химической, электромагнитной, упругой) в кинетическую энергию движущихся масс. Массы приобретают импульс и передают его в пространстве по законам механики удара;

2) сотрясения материальных систем представляют собой механическое движение связанных масс, которое определяется действием ньютоновских сил, связанных с изменением импульса, принесенного сейсмическим излучением;

3) землетрясение – природный источник сейсмического излучения, связанный с перемещением блока горных пород;

4) сейсмическая активность участка территории сопровождается процессами преобразования рельефа территории, определяется наличием градиентов потенциальной энергии, количеством и размерами блоков, удерживаемых в покое прочностью контактовых зон.

В основе современных ортодоксальных исследований механики очага лежит предположение о том, что при подготовке землетрясений в процессе деформирования пород накапливаются упругие напряжения, которые со временем приводят к разрыву сплошности, подвижке среды вдоль некоторой поверхности и к генерации накопленной энергии (или ее части) в виде сейсмического излучения (Костров, 1975; Аки, Ричардс, 1983; Родкин, 2001). Эта идея представляется авторам не совсем корректной с точки зрения физики.

Мы считаем важнейшим соотношением между упругими и остаточными деформациями для тех условий, в которых находится среда в период подготовки землетрясения. Эмпирический материал теории упругости построен на результатах кратковременного нагружения небольших тел. Закон Гука справедлив при небольших нагрузках, действующих короткое время на небольшие тела. Ни одно из этих условий не выполняется во время подготовки землетрясения: огромные массивы горных пород подвергаются мощным нагрузкам в течение сотен лет. Единственная нагрузка, которая не релаксирует в течение этого времени, – это вес вышележащих масс.

Следующий важный вопрос: с какой мощностью возможна релаксация упругих напряжений в случае, если бы даже они накопились в земных недрах. Человечеству известны механизмы, действующие на основе упругой отдачи, – это лук, арбалет, наконец, рогатка, используемая малолетними хулиганами. Несмотря на применение современных материалов и изысканных форм этих орудий, мощность их всегда мала и не может быть увеличена в значительной мере. Упругость – свойство небольших тел, сродни поверхностному натяжению жидкостей, и переход к большим масштабам событий позволяет этим свойством пренебречь.

Еще одно удивительное обстоятельство характеризует современные модели очага. Описывая механический процесс, теоретики совершенно игнорируют понятия массы и импульса (например, на 880 страницах двухтомника К. Аки и П. Ричардса (1983) термин «количество движения» встречается 1 раз – ядро функции Грина, оказывается, имеет размерность количества движения). «Фундаментальная характеристика» очага землетрясения – сейсмический момент – измеряет, собственно говоря, сопротивление площадке перемещению невесомого предмета на расстояние  $U$ . Понятие кинетической энергии, которую должны приобретать смещающиеся массы, вообще не анализируется. Зато разрыв связей в среде, который, безусловно, потребляет энергию землетрясения, оказывается основной количественной характеристикой излучения в такого рода моделях. Поэтому описание процесса землетрясения делится на две несвязанные части – сначала анализируется процесс разрушения невесомой среды, а затем произвольно задается значение смещения, которое анализируется на основе волнового уравнения.

Б. В. Костров вполне определенно пишет: «... Динамическое описание разрыва, вытекающее из механики разрушения, приводит к граничной задаче динамической теории упругости, неразрешимой в общем виде, и поэтому не позволяет изучить связь сейсмического излучения с процессом вспарывания разрыва с той общностью, которая необходима для постановки обратной задачи – извлечения информации об очаге из сейсмических наблюдений. Кинематическое описание, т. е. задание вектора смещения на разрыве как функции точки и времени, в этом отношении гораздо удобнее, т. к. при таком описании удается построить самое общее решение задачи об излучении» (Костров, 1975. С. 89). Говоря определеннее, можно сказать, что кинематическое описание процесса, игнорирующее законы динамики, позволяет свести концы с концами при пользовании физически несостоятельной моделью упругой отдачи. При этом даже качественное совпадение результатов анализа с наблюдениями удовлетворяет авторов кропотливых исследований.

### СЕЙСМИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ

Назовем сейсмическим событием кратковременный процесс, результатом которого являются сейсмические сигналы, регистрируемые сейсмографом. Очевидно, что таких событий в мире происходит множество, причины их разнообразны и большинство их не связаны с землетрясениями (понимаемыми как тектонический процесс). Работающий сейсмограф регистрирует шаги людей, порывы ветра, морской прибой, движение транспорта, взрывы зарядов пороха и тротила. На сейсмических станциях, оборудуемых для регистрации землетрясений, принимаются специальные

меры для уменьшения уровня помех (сейсмических сигналов, не связанных с землетрясениями), однако радикально избавиться от помех на сейсмограммах можно лишь избавившись заодно и от сигналов от землетрясений. Сейсмические события объединяет общее свойство – сейсмическое излучение – способность выводить инертную массу маятника из равновесия. Сейсмическое излучение представляет собой распространение механического импульса в системах связанных масс (Физика..., 1987; Мишин, 2004). Распространение поступательного импульса – количества движения – интерпретируется как продольные волны  $P$ , а распространение вращательного импульса – момента количества движения – описывается как поперечные волны  $S$ .

Наглядной моделью сейсмического события может служить разбивание камня с помощью молотка и зубила. Что разбивает камень? Молоток вообще не касается камня в процессе разбивания, зубило контактирует с камнем в узкой зоне, осколки отлетают от камня далеко от зоны контакта с зубилом. Немного логики, и становится ясно, что камень разрушался сейсмическим излучением, сформированным при ударе молотка об обушок зубила и распространившимся вдоль зубила как вдоль проводника сейсмического излучения. В результате удара молотка обушок зубила приобрел механический импульс (количество движения); этот импульс распространился со скоростью сейсмических волн вдоль металла и был передан камню в зоне его контакта с зубилом. Изменение количества движения по определению есть ньютоновская сила, и действует эта сила на поверхности волнового фронта, на границе, разделяющей в данный момент частицы камня, еще не приобретшие импульс от частиц, уже обладающих импульсом. Действие ньютоновских сил приводит к разрыву сплошности камня, а избыток импульса определяет движение массивных обломков.

Таким образом, сейсмическое событие можно характеризовать интенсивностью сейсмического излучения – значением переданного в среду импульса, а также распределением в пространстве и во времени ньютоновских сил – производных импульса по времени. Повторим, что любая помеха, действующая на работающий сейсмограф, может и должна характеризоваться этими величинами, так же как и процесс землетрясения.

Сейсмические события можно грубо классифицировать на три группы: удары, взрывы и землетрясения. Сотрясения от движущегося транспорта, работающей техники, ветра, морского прибоя представляются сериями ударов разного направления и интенсивности, последовательных во времени. Промышленный взрыв – обычно тоже серия последовательных взрывов зарядов ВВ, различающихся положением в пространстве и во времени. Физические измерения в очагах землетрясений пока не проводились, поэтому представления о характере движений в гипоцентрах форми-

руются умозрительным путем. Модные сегодня модели процесса землетрясения, описывающие процесс как разрушение материала земных недр и излучение упругой энергии, с нашей точки зрения, неверны. Современные модели сейсмических процессов игнорируют их важнейшую характеристику – механический импульс.

Откуда же появляется импульс в источниках сейсмического излучения? Если физическое тело обладает запасом потенциальной энергии, то при определенных условиях эта энергия может перейти в кинетическую, т. е. в движение массы. Движение же массы непременно определяется скоростью и направлением, т. е. кинетическая энергия в отличие от других видов энергии непременно связана с механическим импульсом. Кинетическая энергия  $E$  представляет собой в общем виде следующее выражение:

$$E = P^2/2M + S^2/2J,$$

где  $P$  – количество движения, приобретенное массой  $M$ , а  $S$  – момент количества движения, приобретенный телом с моментом инерции  $J$ . Первая часть выражает энергию поступательного движения (продольной волны), а вторая – вращательного движения или поворота (поперечной волны). Кинетическая энергия возникает при преобразовании разных форм потенциальной энергии – гравитационной, химической, упругой, электромагнитной. Падающий камень приобретает кинетическую энергию, расходуя потенциальную энергию тяготения Земли. Сейсмическое событие наступит тогда, когда камень затормозится, отдавая по мере торможения приобретенный за время падения импульс. При взрывном превращении химическая потенциальная энергия ВВ переходит в кинетическую, причем масса продуктов реакции тормозится о стенки взрывной камеры, отдавая полученный импульс. Когда мальчик отпускает резинку, упругая энергия рогатки переходит в кинетическую энергию камня, который готов свершить сейсмическое событие. При попадании камня в мишень его импульс отдается тормозящей среде – сейсмограф регистрирует сейсмическое событие (вся премудрость публикаций современной сейсмологии – это ошибочное описание именно последнего процесса – упругой отдачи).

Таким образом, непременное условие сейсмического события – переход потенциальной энергии в кинетическую и последующее движение массы. Первой фазой сейсмического события является торможение движущейся массы. По мере торможения массы ее импульс передается тормозящим связям по законам удара. Первый этап события заканчивается остановкой массы – полной передачей импульса окружающей среде. Роль источника сейсмического излучения на этом заканчивается. Однако сейсмическое событие продолжается – импульс в виде сейсмических волн распространяется в материальной среде – системе

связанных масс. При этом сейсмический сигнал приобретает знакопеременную форму и характерную структуру. Длительность первоначального воздействия на среду сопоставима с половиной первого смещения, зарегистрированного на сейсмограмме (т. е. с четвертью периода, характерного для начала сотрясения). В сотрясении, следовательно, можно выделять первую фазу – выход системы из исходного равновесного состояния под действием внешнего воздействия (удара или взрыва) – и релаксацию – восстановление равновесного состояния системы связанных масс. Характер релаксации определяется собственными характеристиками сотрясающейся системы; нередко продолжительность релаксации превосходит время возбуждения на несколько порядков (Мишин, 1993).

Распространение механического импульса в материальной среде происходит со скоростью сейсмических волн, импульс сохраняется в сферическом слое, радиус которого увеличивается со временем. Все эти явления составляют суть любого сейсмического события; различаются лишь интенсивности воздействий, их длительности и, соответственно, силы, действующие на связи, объединяющие элементы материальной системы, в которой событие происходит.

### ПРОЦЕСС ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Наиболее общим определением процесса землетрясения авторы считают простой процесс – и перемещение блока горных пород, и удар при его торможении. В отличие от авторов современных моделей очага мы пренебрежем теорией упругости, представлением о напряженно-упругой среде, полагая, что массы горных пород, складывающиеся в недрах, находятся в самом значительном силовом поле – поле веса вышележащих пород. Поле веса, в общем, довольно неоднородно распределено в верхних горизонтах планеты – внутри Земли вес быстро уменьшается с глубиной; рельеф дневной поверхности определяет давление, которому подвергается выбранный элемент массы земных недр. Для больших промежутков времени (геологического времени) материал земных недр может быть уподоблен жидкости – времени для релаксации упругих напряжений в истории Земли больше, чем возможностей для их накопления. Однако сам процесс землетрясения кратковременный, поэтому элементы массы горных пород в этом процессе следует считать жесткими.

Землетрясение можно рассматривать как естественный кратковременный процесс возбуждения сейсмического излучения в сплошной среде земных недр. Измерения в источниках излучения, в очагах землетрясений никогда не проводились, поэтому заключения о характере процессов в очагах носят умозрительный характер. Вся информация о процессе землетрясения складывается из наблюдений за сотрясениями поверхности Земли.

Поэтому неизбежно сосуществование разных представлений о процессах в очагах, нередко противоречивых и антагонистичных.

Перемещение масс горных пород вдоль склонов в виде обвалов и оползней наблюдается повсеместно и составляет часть нисходящей ветви литодинамического потока, понятие о котором введено Н. А. Флоренсовым (Флоренсов, 1978; Мишин, Смирнов, 1988). Существенно, что каждое перемещение массивного тела сопровождается порцией сейсмического излучения: сейсмограф, установленный у подножия крутой горы, будет регистрировать эту информацию. Катящийся по склону камень обеспечит генерацию сейсмических сигналов определенной формы, горному обвалу будет соответствовать сейсмограмма несколько отличного вида, движение оползня также будет сопровождаться своеобразными сейсмическими сигналами.

Разрушение гор и перемещение крупных блоков в условиях горных стран неизбежно, а каждый акт перемещения горных масс неизменно сопровождается порцией сейсмического излучения, при больших масштабах воспринимаемого как землетрясение.

Землетрясение – это удар при торможении сместившегося в поле силы тяжести блока горных пород. Если **масса** блока  $M$  переместится вниз 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 очаг 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

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

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

$$N = dG/dt, \text{ Н/м}^2.$$

Именно давление волнового фронта вызывает 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 значения сейсмического давления  $N$  мы считаем возможным использовать время нарастания амплитуды первого вступления на сейсмограмме (четверть первого периода колебаний) в качестве **средней продолжительности действия** фронта  $\tau$ . Тогда среднее значение давления фронта на окружающую среду на расстоянии  $R$  от очага составит

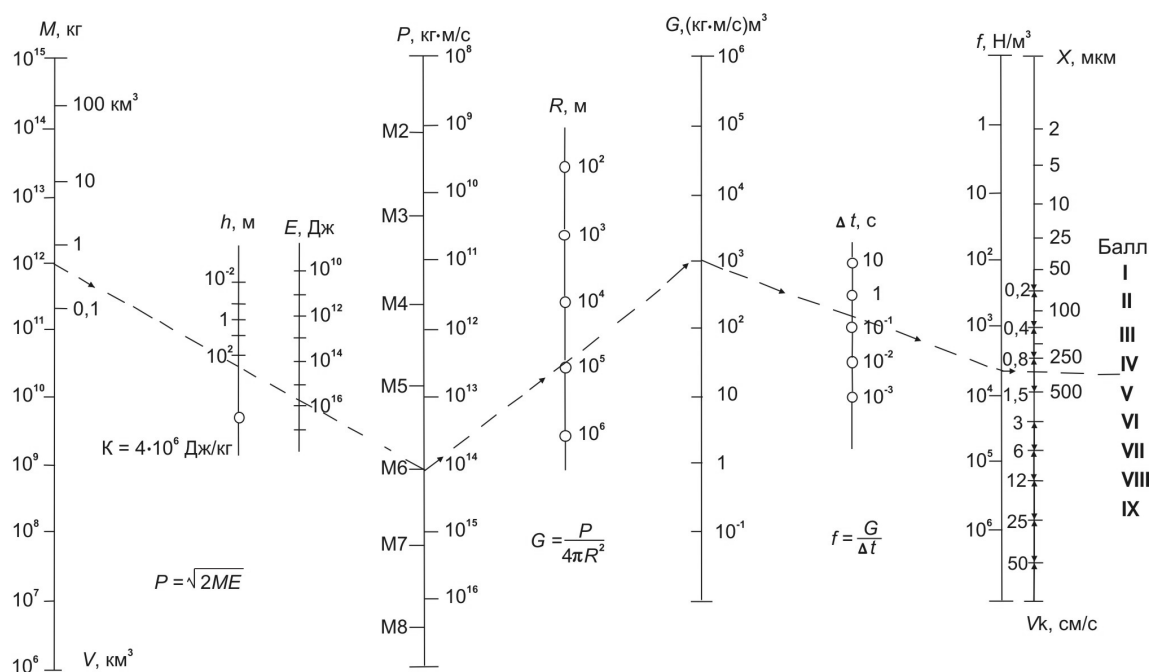
$$f = G/\tau.$$

Эти простые соотношения позволяют грубо оценивать основные параметры процесса землетрясения.

#### НОМОГРАММА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧЕСКОГО СОБЫТИЯ

Основные параметры сейсмического события, о которых мы упоминали, – массы, смещающиеся в процессе землетрясения, импульс, который отдается при ударе, энергия процесса, сейсмическое давление – измеряются сейчас с большими погрешностями, поэтому количественные оценки не могут быть точными. Для наглядных грубых оценок параметров процесса нами предложена номограмма, связывающая эти величины для сейсмического события – удара, взрыва или землетрясения (Мишин, 1993; Мишин, Шарафутдинова, 1999) (см. рисунок).

Левая часть номограммы позволяет анализировать источник излучения – связь излученного импульса с массой сместившегося тела, с энергией процесса. Соотношение между этими величинами нами уже рассматривалось:  $P = \sqrt{2ME}$  или  $P = M\sqrt{2gh}$ . Масса, энергия и импульс являются важнейшими понятиями механики, для которых известны законы сохранения, поэтому равенства выполняются при любых масштабах событий. Левая часть номограммы построена в соответствии с этим соотношением: проводя отрезок прямой через точки, выбранные на шкале  $M$  и на шкале  $E$  (или  $h$ ), получим на шкале  $P$  значение импульса, излученного при ударе массы  $M$  с кинетической энергией  $E$  (сместившейся с высоты  $h$ ). Массы  $M$  приобретают кинетическую энергию за счет преобразования потенциальной энергии,



Номограмма для оценки параметров сейсмического события (пояснения в тексте)

A nomograph of seismic event characteristics (explanations are given in the text)

которая к моменту начала процесса могла быть представленной гравитационной, химической, упругой или электромагнитной формой.

На номограмме построена дополнительная шкала  $h$ , использующая соотношение  $E = Mgh$ , где  $E$  – энергия,  $M$  – масса,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $h$  – высота падения массы. Пользуясь этой шкалой, можно определять значение отданного импульса, исходя из значений массы ударяющего тела и высоты его падения. Используя тот факт, что энергетический эквивалент взрывчатки можно сопоставлять с величиной  $gh$  для любого тела (1 кг любой массы, свободно падающий с высоты 400 км, приобретает кинетическую энергию, равную химической энергии 1 кг тротила), на шкале  $h$  отмечены значения энергетических эквивалентов взрывчатых веществ. Это позволяет оценивать излучение импульса при взрыве массы заряда  $M$ .

Ось  $P$  мы градуируем также в значениях магнитуды, или энергетического класса; как указывалось, фундаментальная характеристика сейсмического события – величина импульса, излученного из источника.

Следующая часть номограммы – характеристика сферического расхождения сейсмического излучения. Плотность импульса на единицу площади волнового фронта уменьшается пропорционально квадрату расстояния от источника:  $G = P/4\pi R^2$ . Это соотношение, вероятно, хорошо описывает распространение сейсмического излучения в изотропной среде. В случае удара неизбежно существование некоторой преимущественной направленности излучения, схемы изосейст землетрясений также редко бывают круговыми. Будем надеяться, что наше представление о сфе-

рическом расхождении сигналов не внесет слишком больших ошибок в грубую схему процесса. Для того чтобы получить значение плотности импульса на фронте излучения на расстоянии  $R$  от источника, проведем прямую через соответствующие значения на осях  $P$  и  $R$ : прямая отсечет на шкале  $G$  значение, соответствующее плотности импульса на фронте излучения на расстоянии  $R$  от источника.

Третья часть номограммы оценивает значение среднего сейсмического давления  $f$  фронта излучения как функцию продолжительности сейсмического сигнала, передающего импульс в сплошной среде. Зависимость сейсмического давления от продолжительности сигнала  $\Delta t$  построена в номограмме в виде  $f = G/\Delta t$ . Разумеется, реальные процессы могут вызывать другие давления, и такое приближение может оказаться неточным. Давление  $f$ , определенное по номограмме, соответствует среднему значению ньютоновской силы, действующей на  $1 \text{ м}^2$  поверхности среды, удаленной на расстояние  $R$  от источника. Значение давления определяется пересечением со шкалой  $f$  прямой, проведенной из значения  $G$  на соответствующей шкале через значение  $\Delta t$ , выбранное на шкале продолжительности сигнала.

Таким образом, проводя три отрезка прямых, мы количественно оцениваем основные параметры сейсмического события: излученный импульс, плотность импульса на поверхности фронта излучения на выбранном расстоянии, сейсмическое давление фронта, если заданы другие параметры процесса: значение массы, тормозящейся в источнике, энергии, которой обладала ударяющая масса, продолжительность процесса возбуждения.

Эти части номограммы отражают физические соотношения между параметрами процесса.

Последние вертикальные оси номограммы позволяют оценить эмпирические характеристики сотрясения «среднего грунта», вызванные возбужденным излучением. Для установления связи между шкалой сейсмического давления и нормативной шкалой сейсмической интенсивности MSK-64 были использованы оценки колебательной скорости при промышленных взрывах (Цейтлин, Смолий, 1981).

Рассмотрим пример использования номограммы. На территории Магаданской области Б. П. Важенин идентифицировал два обвальных тела объемом не менее 300 млн м<sup>3</sup> каждое (Важенин и др., 1997). Предполагается, что масса горных пород некогда сорвалась с высоты несколько сотен метров. Значение сместившейся массы примем равным  $M = 10^{12}$  кг, высоту перемещения  $h = 200$  м. Отметим на шкале  $M$  значение  $10^{12}$ , на шкале  $h - 200$  м, через эти точки проведем прямую. Прямая отсечет на шкале  $E$  значение потенциальной энергии  $2 \times 10^{15}$  Дж, а с осью импульса  $P$  отрезок пересечется в точке  $P = 6 \times 10^{13}$  кгм/с. Такой удар соответствует магнитуде 6.

Какое сотрясение вызвал этот удар на расстоянии 100 км от места падения блока? Проводим прямую из точки на оси  $P$  через значение  $10^5$  на шкале расстояний ( $R$ ). Пересечение ее с осью  $G$  указывает значение плотности импульса на поверхности фронта излучения на таком расстоянии – примерно  $600$  (кгм/с)/м<sup>2</sup>.

Самый деликатный вопрос: какова продолжительность сейсмического сигнала? Если удар жесткий, т. е. среда и тело практически не деформируются в процессе удара, то продолжительность удара можно оценить временем остановки блока. Тело остановится только тогда, когда сигнал о начале торможения достигнет его заднего фронта со скоростью продольных волн. Тогда  $\Delta t = L/v_p$ , где  $\Delta t$  – минимальная продолжительность торможения массы,  $L$  – размер блока (примем  $L = 500$  м),  $v_p$  – скорость продольных волн (5000 м/с). В нашем случае время торможения не меньше 0,1 с. Примем продолжительность сигнала вдвое большей и на оси  $\Delta t$  отложим 0,2 с. Через эту точку проведем прямую из значения на шкале  $G$ . Прямая пересечется с осью сейсмического давления  $f$  в точке  $f \approx 2 \times 10^3$  Н/м<sup>2</sup>. Такое давление соответствует по номограмме колебательной скорости 0,7 см/с или сотрясению 3 балла нормативной шкалы.

Таким образом, падение блока горных пород массой  $10^{12}$  кг с высоты 200 м возбуждает сейсмическое излучение энергией  $10^{15}$  Дж, причем излучается импульс  $2 \times 10^{13}$  кгм/с. На расстоянии 100 км от места падения это излучение создает сейсмическое давление  $2000$  Н/м<sup>2</sup> (человек, не двигаясь, действует на опору с силой 700 Н). Такое сейсмическое давление приводит к движению элементов грунта с колебательной скоростью

0,7 см/с, что соответствует 3-балльному сотрясению грунта по шкале MSK-64.

Рассмотренный в приведенном примере обвал по своим параметрам очень напоминает Сарезский обвал, описанный Б. Б. Голицыным (1960). По данным В. Н. Вебера, масса сместившихся там пород составила  $M = (7-10) \times 10^{12}$  кг, а высота падения  $h$  от 300 до 600 м. Поэтому рассмотренный пример может служить реконструкцией знаменитого землетрясения 1911 г.

В связи с обследованием эпицентральной зоны Гоби-Алтайского землетрясения 1957 г. Н. А. Флоренсов писал: «Родилось предположение, что при землетрясении весь горный массив Их-Богдо с его примерным объемом (относительно уровня подошвы) 1000 куб. км и весом  $2,7 \cdot 10^{12}$  тонн ( в книге ошибочно  $2,7 \cdot 10^9$  тонн. – С. М.) сдвинулся с запада на восток, в сторону Бага-Богдо, которым и был, возможно, удержан. Величина неравномерного горизонтального смещения, замеренная на той же перемычке, в одном месте составила более 9 м. Трудно вообразить, хотя и легко подсчитать, сколько энергии было при этом затрачено!» (Флоренсов, 1984. С. 88). Используя нашу модель, можно грубо оценить параметры этого сейсмического события.

Допустим, что вертикальное смещение массива составило  $h = 10$  м. Тогда энергия процесса  $E = Mgh = 3 \times 10^{15} \times 10 \times 10 = 3 \times 10^{17}$  Дж. Среде был передан импульс  $P = M\sqrt{gh} = 3 \times 10^{15} \times 4 \approx 10^{16}$  кгм/с. На расстоянии 100 км от очага плотность импульса можно оценить значением  $G = P/4\pi R^2 \approx 10^5$  (кгм/с)/м<sup>2</sup>, и если период колебаний при сотрясении был около 1 с ( $\Delta t \approx 0,25$  с), то сейсмическое давление достигало  $10^6$  Н/м<sup>2</sup>. Такое давление соответствует сотрясению 9 баллов нормативной шкалы. На расстоянии 1000 км давления не превосходили  $10^4$  Н/м<sup>2</sup>, т. е. достигали 5 баллов шкалы MSK-64. По-видимому, расчетные оценки соответствуют реальным макросейсмическим эффектам Гоби-Алтайского землетрясения.

С точки зрения рассмотренной модели можно представить себе процессы в очагах землетрясений разной интенсивности, регистрируемых сейсмическими станциями.

Землетрясения 9-го энергетического класса, согласно номограмме Раутиан (Инструкция..., 1982), вызывают на расстоянии 100 км от очага смещения грунта около 1 мкм. Характерный спектр сотрясений при близких землетрясениях составляет 3–5 Гц, так что длительность воздействия как четверть периода сотрясения можно оценить значением  $\Delta t = 0,1$  с. Смещение элементов среднего грунта на 1 мкм по нашей номограмме соответствует сейсмическому давлению около 1 Н/м<sup>2</sup>; при  $R = 100$  км и  $\Delta t = 0,1$  с это вызвано излучением из источника импульса  $P = 10^{10}$  кгм/с. Такое излучение может вызываться ударом при падении массы  $M = 10^{10}$  кг с высоты 1 см (падает блок объемом  $4 \times 10^6$  м<sup>3</sup>). Энергия уда-

ра  $E = 10^9$  Дж. Такая же интенсивность сотрясения вызывается взрывом аммонита массой 100–150 т (энергия взрыва  $10^{13}$  Дж).

Землетрясения 10-го энергетического класса на расстоянии 100 км вызывают смещения среднего грунта около 5 мкм с частотой 3–5 Гц ( $\Delta t \approx 0,1$  с). Такие смещения, согласно нашей номограмме, соответствуют сейсмическому давлению  $f \approx 8$  Н/м<sup>2</sup>, в источнике при этом генерируется импульс  $P \approx 10^{11}$  кгм/с. Такой импульс излучается при падении массы  $M = 10^{10}$  кг с высоты 1 м или в 10 раз большего блока с высоты 1 см. Увеличение интенсивности сейсмического излучения связано с увеличением либо объема перемещающейся массы горных пород, либо высоты перемещения части горного сооружения.

Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 г. вызвало в г. Ленинакане на расстоянии 20 км от эпицентра 9-балльные сотрясения. Такие сотрясения соответствуют сейсмическому давлению  $10^6$  Н/м<sup>2</sup>. Сотрясение было представлено высокочастотными колебаниями, поэтому примем  $\Delta t \approx 0,1$  с; тогда плотность импульса в Ленинакане  $G = 10^5$  (кгм/с)/м<sup>2</sup>. Импульс, излученный из источника, составлял  $5 \times 10^{14}$  кгм/с. Такой импульс мог быть генерирован при перемещении в очаге массы  $10^{14}$  кг с высоты 1 м. Спитакское землетрясение, таким образом, можно интерпретировать как удар при перемещении блока объемом 40 км<sup>3</sup> на 1 м в поле тяготения. Такого же эффекта можно было ожидать от взрыва  $10^{11}$  кг тротила.

В начале 2005 г. телевидение транслировало фиксированный из космоса процесс, иллюстрирующий нашу схему землетрясения. С ледника Антарктиды съехал айсберг, размерами подобный о. Лонг-Айленд вблизи Нью-Йорка. Этот айсберг проплыл в море и ударил в коренной берег Антарктиды, отчего сейсмические станции зарегистрировали землетрясение.

Рассмотренный подход к анализу процесса землетрясения не противоречив с точки зрения физики и геоморфологии. Ясный физический смысл приобретают связи между различными параметрами процессов, понятно разнообразие форм землетрясений, которые соответствуют разнообразию гор-

ных сооружений, складывающих эти сооружения блоков, возможных траекторий их перемещения. Точность измерения параметров процессов пока настолько невелика, что графические построения вполне соответствуют погрешностям измерений.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. – М.: Мир, 1983. – 364 с.
- Важенин Б. П., Мишин С. В., Шарафутдинова Л. В. Землетрясения Магаданской области: препринт. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1997. – 44 с.
- Голицын Б. Б. О землетрясении 18 февраля 1911 года // Избр. тр. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – Т. 2. – С. 365–370.
- Горшков Г. П. Региональная сейсмоструктура территории юга СССР. Альпийский пояс. – М.: Наука, 1984. – 272 с.
- Инструкция о порядке наблюдений на сейсмических станциях ЕССН. – М.: Наука; ИФЗ им. О. Ю. Шмидта, 1982. – 166 с.
- Костров Б. В. Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 172 с.
- Мишин С. В. Элементы сейсмологии. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1993. – 166 с.
- Мишин С. В. Сейсмические процессы и сохранение импульса. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2004. – 115 с.
- Мишин С. В., Смирнов В. Н. Литодинамический поток и сейсмическая активность // Природа геофизических полей Северо-Востока СССР. – Магадан: СВКНИИ ДВО АН СССР, 1988. – С. 26–38.
- Мишин С. В., Шарафутдинова Л. В. О механике сейсмических процессов // Наука на Северо-Востоке России. – Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 1999. – С. 86–100.
- Родкин М. В. Статистика кажущихся напряжений и проблема природы очага землетрясения // Физика Земли. – 2001. – № 8. – С. 53–63.
- Физика сейсмического излучения: гипотезы и эксперименты / Л. И. Измайлов, С. В. Мишин, В. Н. Силантьев и др. – Магадан, 1987. – Деп. в ВИНТИ № 8482-В87. – 156 с.
- Флоренсов Н. А. Очерки структурной геоморфологии. – М.: Наука, 1978. – 238 с.
- Флоренсов Н. А. Загадки земной коры. – Иркутск: Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1984. – 176 с.
- Цейтлин Я. И., Смолий Н. И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. – М.: Недра, 1981. – 190 с.

Поступила в редакцию 23.01.2006 г.

## THE EARTHQUAKE PROCESS CHARACTERISTICS

S. V. Mishin, V. M. Sharafutdinov

An earthquake process is understood as an impact associated with displacement of a block of rocks within the gravity field. The basic characteristics of the above-mentioned process include the block mass, an impulse transferred to the stationary medium, the Newton forces, which come into effect when the impulse is propagating (seismic pressure). The earthquake characteristics are assessed quantitatively.

**Key words:** earthquake, impact, impulse, seismic pressure, seismic event.