

УДК 550.34

## О ФИЗИКЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Мишин С.В.

ФГБПН «Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт»  
(СВКНИИ ДВО РАН), Магадан, e-mail: mishin@neisri.ru

Рассматриваются процессы формирования и распространения сейсмического излучения на основе ньютоновской механики. В источниках излучения среда приобретает механический импульс, который распространяется в виде пакета, действующего на элементы среды с силой, равной производной импульса по времени передачи.

**Ключевые слова:** сейсмическое излучение, удар, ньютоновские силы, землетрясение, цунами

## ON THE PHYSICAL NATURE OF THE SEISMIC RADIATION

Mishin S.V.

NEISRI FEB RAS, Magadan, e-mail: mishin@neisri.ru

The processes of form and propagation of seismic radiation are discussed with Newton's mechanics. The environs takes a mechanical impulse (momentum & moment-of-momentum) at source of radiation. The packet of radiation acts to elements of environs with Newton's force.

**Keywords:** seismic radiation, blow, Newton's force, earthquake, tsunami

Сейсмические приборы, предназначенные для регистрации сотрясений от землетрясений и взрывов, позволяют фиксировать излучение, возбуждаемое самыми разнообразными источниками – движением транспорта, порывами ветра, шагами людей. Многие приборы, используемые в виброметрии для исследования сотрясений механизмов, полностью идентичны сейсмическим [2]. Те физические поля, которые формируются в источниках и воздействуют на сейсмические приборы, мы называем здесь сейсмическим излучением.

Движение связанных масс принято называть упругими волнами и описывать волновым уравнением [1]:

$$\rho \partial \mathbf{u} / \partial t = \mu \Delta \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \text{grad div } \mathbf{u}.$$

Здесь  $\rho$  – плотность среды, в которой распространяются волны;  $\mathbf{u}$  – смещение частиц среды;  $\lambda$  и  $\mu$  – коэффициенты Ламе, характеризующие модули упругости и сдвига среды. Решение такого уравнения при заданных граничных и начальных условиях описывает смещения частиц среды в продольных и поперечных волнах. Традиционно основными характеристиками волнового процесса считаются кинематические параметры – смещение, скорости частиц, их ускорения. Мы рассмотрим динамику процесса.

Наиболее простым источником сейсмического излучения является механический удар по системе связанных масс, в которой и генерируется излучение.

С точки зрения динамики удар характеризуется тем, что количества движения со-

ударяющихся тел приобретают конечные приращения в течение короткого времени. При ударе массивного тела о твердое полупространство, это тело останавливается, отдавая свой импульс тормозящим связям – среде, в которой импульс и распространяется в виде сейсмического излучения. (рис. 1). Приобретенный средой импульс распространяется в виде сферического слоя, увеличивающего радиус со скоростью сейсмических волн. Каждое изменение импульса массивного элемента есть ньютоновская сила, действующая на связи, удерживающие этот элемент в системе масс. Если массивное тело удерживается в системе масс достаточно сильными связями, элемент массы может приобретать и отдавать импульс, не изменяя своего положения в пространстве. Именно такая передача импульса лежит в основе распространения сейсмических волн.

Проведем мысленный эксперимент – разбивание камня молотком и зубилом. Очевидно, что разбивает камень не молоток – он даже не касается камня. Трещины в камне появляются вне зоны контакта зубила с образцом. Логично предположить, что камень разбивается сейсмическим излучением, сформированным при ударе молотка по обушку зубила. Пакет излучения распространяется по зубилу, как проводнику излучения, и действует в материале камня, разрывая связи между частями тела. Обломки камня часто приобретают скорость, т.е. обладают количеством движения – механическим импульсом.

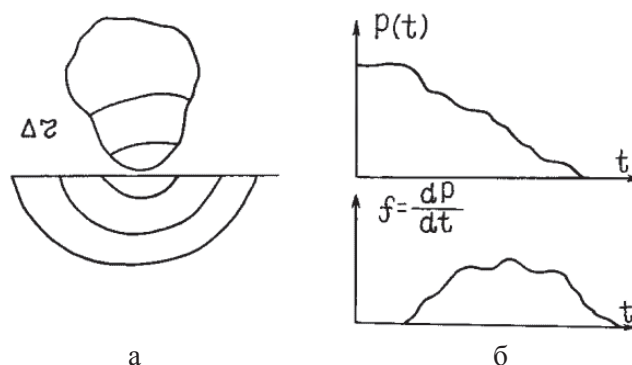


Рис. 1. Схема удара массивного тела по жесткому основанию:  
а – формирование излучения; б – изменение импульса тела; в – ньютоновские силы

### Результаты экспериментов

Легко убедиться, что сейсмические сигналы при ударах пропорциональны не их энергии, а количеству движения, переданному в источнике излучения. Будем проводить удары по жесткому основанию, регистрируя сейсмические сигналы инструментально. Возьмем два шара разной массы и будем ронять их на основание с такой высоты, чтобы кинетическая энергия масс при ударах была бы одинаковой. Сейсмические сигналы, регистрируемые прибором, окажутся разными – удары большей массы вызывают сейсмическое излучение большей интенсивности, чем удары меньшей массы, несмотря на равенство энергий ударов [6]. Теперь видоизменим опыт. Будем ронять эти тела с таких высот, чтобы одинаковыми были количества движения тел при ударах. При свободном падении тел количество движения в момент удара можно оценить значением  $P = Msqrt(2gh)$ , т.к.  $E = Mgh = P^2/2M$ , где  $P$  – количество движения (механический импульс);  $M$  масса падающего тела;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $h$  – высота падения. При таком выборе высоты падения тел регистрируются сигналы равные для обоих тел в пределах точности наблюдений.

Проведены эксперименты по регистрации сейсмических сигналов от взрывов [6, 7, 8]. Задачей экспериментов явилось получение эквивалентных сейсмограмм от ударов и взрывов. Масса продуктов реакции, равная массе заряда, приобретает количество движения, которое можно вычислить из соотношения  $E = P^2/2M$ , где  $E$  – энергия заряда, а  $M$  – его масса. Приобретая импульс  $P$ , частицы движутся с очень большими скоростями – фотометрические определения скорости кумулятивной струи оценивают ее 15–20 км/с. Ударяя о стенки взрывной камеры, частицы отдают свою кинетическую

энергию и импульс, возбуждая в неподвижной среде сейсмическое излучение.

Для сопоставления сейсмических сигналов, генерируемых ударами и взрывами, мы проводили следующий опыт. Зарегистрировав сигнал от взрыва 1 г дымного пороха, пытаемся определить, какой удар по болванке приведет к эквивалентному взрыву сотрясению системы. Подсчитав импульс, переданный при взрыве, приходим к выводу, что такой импульс передает системе удар массы 0,5 кг, падающей с высоты 1 м. Выполняем такой удар и регистрируем тем же сейсмоприемником сейсмограмму. Сейсмические сигналы на сейсмограммах удара и взрыва оказываются очень близкими по своим параметрам, хотя энергии процессов в источниках излучения различаются в 500 раз (во столько же раз различались массы).

### Сейсмическое событие

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 из них 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. Мы покажем, что сейсмическое излучение представляет собой распространение механического импульса в системах связанных масс. Распространение поступательного импульса – количества движения – интерпретируется как продольные волны  $P$ , а распространение вращательного импульса – момента количества движения – описывается как поперечные волны  $S$ .

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. Именно 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 таинственный 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, следующих во времени. Промышленный взрыв также обычно представляется серией 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 формируются умозрительным путем. 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. При подаче электрического сигнала на обмотку электродвигателя, его ротор поворачивается, вырабатывая кинетическую энергию – стоящий неподалеку сейсмоприемник регистрирует сейсмические сигналы. 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.

Таким образом, непременным условием сейсмического события является 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 закону 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. На рис. 2 приведены сейсмограммы разных сейсмических событий – механического удара массивного тела, свободно падающего с некоторой высоты, промышленного взрыва и землетрясения. Из рисунка видно, что характер процесса во всех случаях оказался похожим – внезапное начало, доволь-

но однородный частотный состав, постепенное убывание интенсивности сигналов. Мы полагаем, что единовременное воздействие на среду приводит именно к таким сотрясениям, какие представлены на рис. 2. Следует обратить внимание, конечно, на то обстоятельство, что сейсмограммы сопоставлены в разном масштабе времени (с разной временной разверткой) и с разными увеличениями.

Несмотря на однократный характер воздействия, сотрясение среды выражено множеством смещений разной амплитуды и знака. Формы сигналов могут быть изысканными. 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. Распространение механического импульса в материальной среде происходит со скоростью сейсмических волн, импульс сохраняется в сферическом слое, радиус которого увеличивается. 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.

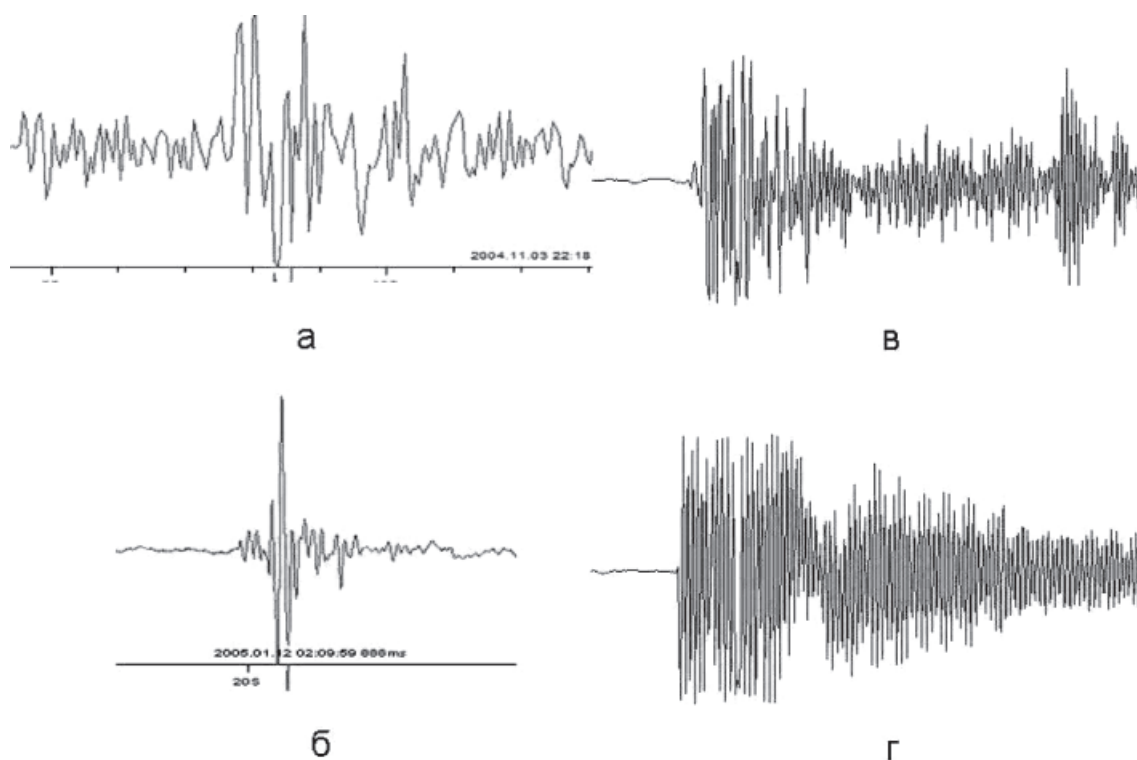


Рис. 2. Сейсмограммы сейсмических событий:  
а – землетрясение; б – промышленный взрыв;  
в – взрыв 1 г дымного пороха; г – удар стального шара

### Анализ процесса

Сейсмическое излучение возбуждается только при торможении движущихся масс. Непременным условием сейсмического события является переход потенциальной энергии в кинетическую. Сейсмическое излучение есть передача механического движения в сплошной среде. Механическое движение существует в природе в двух формах – поступательного и вращательного. В соответствии с этими формами сейс-

мологи выделяют два типа объемных сейсмических волн – продольные и поперечные. Продольные волны несут поступательный импульс – количество движения. Поперечные волны переносят в сплошной среде механическое движение во вращательной форме. Это движение описывается вращательным импульсом (моментом количества движения). Поступательная и вращательная формы механического движения взаимобратимы поэтому возможен обмен – вза-



имное превращение продольных волн в поперечные и наоборот.

Нами предпринималась попытка описать сейсмическое излучение с помощью уравнения, связывающего динамические характеристики процесса. В системе взаимодействующих частиц выполняются уравнения Ньютона [4]:

$$m_a dV_a/dt = -\partial U/\partial r_a,$$

т.е. изменение импульса частицы  $a$  (левая часть равенства) определяется градиентом энергии остальных частиц системы.

В случае удара или взрыва очевидно, что энергия  $U$ , записанная в правой части уравнения есть кинетическая энергия, переданная в систему при ударе (или взрыве)  $U = P^2/2M$ . Тогда уравнения Ньютона можно представить в виде:

$$dP_a/dt = -\partial(P^2/2m)/\partial r_a = -P/m \partial P/\partial r_a$$

или

$$m dP_a/dt + P \partial P/\partial r_a = 0.$$

В однородном бесконечном стержне импульс, приобретенный при ударе, будет изменяться в соответствии с выражением

$$AP_t + P P_x = 0.$$

Это нелинейное уравнение связывает импульс (количество движения) с ньютоновской силой  $P_t$  и с градиентом импульса  $P_x$ .

### Роль сейсмического излучения в природе

Важнейшая особенность сейсмического излучения заключается в его свойстве перемещать массы и вызывать разрушения материальных систем. Сейсмическое излучение распространено в природе едва ли не столько же, как и электромагнитное (звук также может быть отнесен к высокочастотным механическим сигналам). Сейсмическое излучение при землетрясениях нередко приводит к катастрофическим последствиям на значительных расстояниях от источников – очагов. Обратимся к известному спутнику землетрясений – цунами [5, 9]. В соответствии с распространенной поршневой моделью предполагается, что в результате землетрясения форма дна акватории может существенно измениться, вода, опирающаяся на этот участок дна, либо провалится, либо будет вытолкнута вверх. Восстановление равновесия приведет к появлению волн, которые и формируют в удаленных гаванях волну цунами. Известно также, что скорость

распространения таких волн близка к скорости звука в воде. Трудно представить себе волну, перемещающуюся со скоростью реактивного самолета. Но с такой скоростью распространяется сейсмическая волна – механический импульс. Т.е. в гавани появляется не та вода, которая формировала волну в источнике – на берег обрушивается вода, которая получила механический импульс, принесенный сейсмическим излучением. Вероятно, так же формируются и поверхностные волны в твердой среде.

### Заключение

Природные сейсмические процессы описываются сейчас на основе представлений упругой отдачи – предполагается, что землетрясения есть результат разрядки упругих напряжений, накопленных в земных недрах [3]. Мы полагаем, что упругость – плохой аккумулятор больших энергий. Мощность известных устройств, действующих на упругой основе (лук, арбалет, рогатка), не может быть значительно увеличена за счет увеличения объемов. В источниках природного сейсмического излучения действует удар – торможение движущихся масс. Согласившись с этим положением, логически следуют очередные формулировки: сотрясение есть движение связанных масс под действием ньютоновских сил, формирующихся при передаче импульса, принесенного сейсмическим излучением; землетрясение есть удар при перемещении крупного блока горных пород; сейсмическая активность – процесс, сопровождающий преобразование строения земных недр.

### Список литературы

1. Бреховских Л.М., Гончаров В.В. Введение в механику сплошных сред (в приложении к теории волн). – М.: Наука, 1982. – 336 с.
2. Вибрации в технике. Справочник в 6 томах. Т.5. Измерения и испытания. – М.: Машиностроение, 1981. – 496 с.
3. Добровольский И.П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 240 с.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. – М.: ГИФМЛ, 1958. – 206 с.
5. Линьков Е.М. Сейсмические явления. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. – 248 с.
6. Мишин С.В. Сейсмические процессы и сохранение импульса. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2004. – 115 с.
7. Мишин С.В., Шарафутдинов В.М. Параметры процесса землетрясения // Вестник СВКНИИ ДВО РАН. – 2007. – № 1. – С. 64–70.
8. Физика сейсмического излучения: гипотезы и эксперименты /авт. Л.И. Измайлов, С.В. Мишин, В.Н. Силантьев и др. – Магадан, 1987. – Деп. в ВИНТИ N8482-B87. – 156 с.
9. Щетников Н.А. Цунами. – М.: Наука, 1981. – 88 с.