

О верхней границе частотного диапазона электродинамических сейсмоприемников при изучении микросейсмического шума

Гик Л.Д., институт геофизики СО РАН, г. Новосибирск

Микросейсмический шум (сейсмическая эмиссия) возникает вследствие действия в геоакустической среде силовых источников $F_i(t)$. Поэтому экспериментальное исследование сейсмической эмиссии в некоторой точке пространства P_j фактически означает измерение колебательного движения среды в этой точке: смещения u , скорости u' или ускорения u'' . Схема измерения при этом может быть представлена рисунком 1, на котором изображены источник $F_i(t)$ и также приемник P_j , способный измерять колебательное смещение u . Связь между этими величинами для упругой среды может быть выражена [1] соотношением:

$$u(t) = F(t) \cos(\varphi) / LZ_m \quad (1)$$

Здесь $Z_m = 4\pi\rho(V)^2$ - акустический импеданс среды, ρ - плотность, V - сейсмическая скорость и L - удаление.

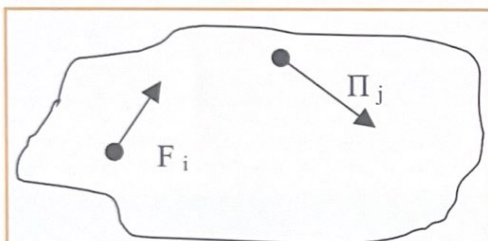


Рис. 1. Общий случай расположения источников и приемников в геоакустической среде.

Из (1) видно, что во времени форма колебательного смещения сейсмической эмиссии u повторяет форму возмущающей силы F . Выражение (1) можно обобщить на неупругую геоакустическую среду, обладающую поглощением Q^{-1} . Используя спектральное представление, с учетом [2] можем записать:

$$u(\omega) = F(\omega) \cos(\varphi) / LZ_m \times \exp(-Q^{-1}L/\lambda). \quad (2)$$

Как видно, ослабление эмиссионного сигнала u начинает проявляться на удалениях L , порядок величины которых составляет $L \sim \lambda/Q^{-1}$. При значительно больших удалениях $L \gg \lambda/Q^{-1}$ сигнал u оказывается пренебрежимо малым. Поскольку для большинства горных пород добротность Q составляет величину $Q = 20 \div 200$, соотношение (2) позволяет разделить частотный спектр измеряемых сигналов на зоны, в которых либо допустимо, либо не допустимо использование условий упругости горных пород: частотная граница раздела составляет $f > / < V_p Q^{-1} / \lambda$.

Рассмотрим вопрос о выборе принципа действия сейсмоприемника, с помощью которого можно оптимальным образом выполнить измерение сигнала сейсмической эмиссии. Для этого необходимо уточнить требуемые его характеристики и, прежде всего, амплитудный и частотный диапазоны. Согласно известным нам априорным

данным частотный диапазон сигналов сейсмической эмиссии составляет $f = 30 \div 300$ Гц. На более низких частотах мощность излучающих источников обычно существенно падает, а на более высоких частотах в соответствии с (2) происходит сильное ослабление сигнала из-за поглощения.

Амплитудный диапазон целесообразно предусмотреть в пределах, начиная от среднеакустических величин микросейсмического шума и кончая величинами, соответствующими несильным ударам, имеющим ускорение $u'' \sim 20 \div 30$ м/с². Более мощные эмиссионные сигналы встречаются редко. Кроме того, информация о точной их величине во многих случаях не является существенной, достаточным является сам факт обнаружения таких сигналов. Нижний предел, равный микросейсмическому шуму, гарантирует возможность регистрации минимально различных сейсмических сигналов.

Каких-либо особенных специфических требований, в том числе существенных ограничений датчиков по габаритам, весу, устойчивости к электромагнитным помехам и др. - при изучении сейсмической эмиссии обычно не предъявляется.

Учет всех вышеизложенных условий однозначно приводит к выбору в качестве оптимального первичного измерительного прибора - электродинамического сейсморазведочного датчика. Действительно, данный вид измерительного механизма практически во всех возможных модификациях имеет собственную частоту порядка 30 Гц и по этой причине удовлетворяет условиям требуемого амплитудного диапазона и нижней границы частотного диапазона [3]. Данный вид сейсмоприемников обладает преимуществами перед параметрическими датчиками, т.к. не требует источников питания, а также перед пьезоэлектрическими датчиками, т.к. обладает значительно более высокой выходной мощностью, что позволяет обойтись без усилителя, обладающего высокоомным входом.

Главный вопрос, требующий специального анализа при измерении сейсмической эмиссии, это - обеспечение сравнительно высокой верхней границы частотного диапазона - порядка $f_v \gtrsim 300$ Гц. Выполним анализ этого вопроса, опираясь на теорию работы жесткого штампа, помещенного на упругой полупверхности. Будем использовать

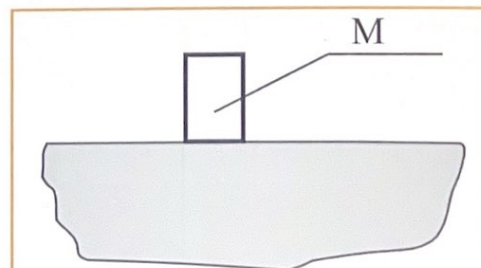
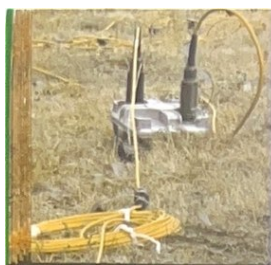


Рис. 2. Резонатор, образуемый массой сейсмоприемника и упругостью его механической связи с объектом.

ТЕЛЕМЕТРИЯ СЕГОДНЯ: ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ СЕЙСМОПРИЕМНИКИ



метод, изложенный в [4]. Рассмотрим частотную характеристику механического резонатора, образованного массой M , жестко связанной с упругим полупространством - рис. 2. В качестве массы M примем сам сейсμοприемник или контейнер, в котором он помещен. В качестве упругого полупространства будем рассматривать геоакустическую среду, в которой распространяется изучаемая эмиссия.

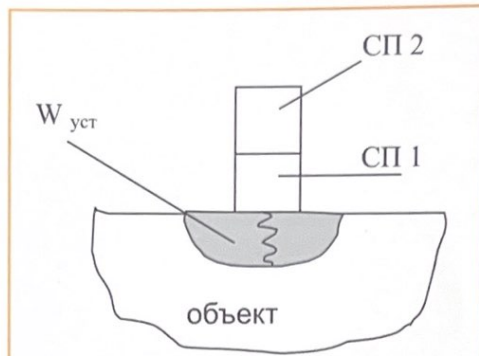


Рис. 3. Жестко связанные измеряемый сейсμοприемник СП1 и обращенный (возбуждающий) сейсμοприемник СП2, расположенные на исследуемом объекте.

Действие исследуемого упругого полупространства проявляется в эффекте пружинной связи, обладающей эквивалентной жесткостью геоакустической среды $w_{...}$ (рис. 3.). При таком рассмотрении масса M и пружина $w_{...}$ образуют механический резонатор, имеющий свойства фильтра нижних частот второго порядка [3] с собственной частотой

$$f_{..} = (2\pi)^{-1} \sqrt{w_{...}/M}.$$

Это означает, что обеспечение условия $f_{..} \geq 300$ Гц требует сравнительно высокой жесткости пружины: $w_{...} > 2\pi^2 f_{..}^2 M$.

Согласно современным представлениям жесткость механической связи некоторого тела, находящегося на поверхности полупространства, с этим полупространством определяется устойчивостью поверхности полупространства к изгибу его поверхности и количественно выражается соотношением

$$w_{...} = GL_..$$

Здесь G - модуль сдвига, а $L_..$ - периметр площадки соприкосновения тела и поверхности полупространства. При практических оценках величины резонансной частоты модуль сдвига G удобно выражать через соответствующую ему скорость поперечных волн $G = (V_..)^2 \rho$. С учетом этого получаем $w_{...} = (V_..)^2 L_..$ и

$$f_{..} = (2\pi)^{-1} \sqrt{(V_..)^2 \rho L_../M}. \quad (3)$$

При использовании для измерения эмиссии сейсморазведочных сейсμοприемников ряд параметров в выражении (3) может изменяться в весьма узких пределах. Так, практически всегда $\rho \sim 2,5 \cdot 10^3$ кг/м³, $L_.. \sim 3 \cdot 10^{-1}$ м и $M \sim 0,15$ кг. Поэтому на практике $f_{..} \sim 3,56 \cdot V_..$. Диапазон возможных изменений скоростей поперечных волн на

практике может быть очень широким, изменяясь от 40-50 м/с у рыхлых слоев верхней части разреза до 3-4 км/с у высокоскоростных консолидированных пород. Поэтому диапазон частот установочного резонанса может начинаться менее чем от 100 Гц и превышать величину более, чем 10 кГц. Необходимо также учесть возможность размещения сейсμοприемника внутри сравнительно массивного контейнера, что обычно приводит к дополнительному снижению частоты установочного резонанса ввиду значительной величины массы контейнера M .

Из всего сказанного следует, что естественная величина верхней границы частотного диапазона сейсμοприемного устройства может оказаться недостаточной. Данный факт является причиной постановки двух задач: поиска путей увеличения частоты установочного резонанса и поиска рациональных путей контроля частоты установочного резонанса.

Если есть возможность увеличения модуля сдвига поверхности исследуемого объекта, то, естественно, такой возможностью следует воспользоваться. Некоторый опыт нашей работы с исследованием эмиссии «сыпучих» объектов, имеющих песчаную и гравийную поверхность, показал приемлемость способа изготовления «жесткой корки» (например, из цемента) на поверхности песка. Прямым же путем повышения частоты установочного резонанса является увеличение периметра $L_..$ контактной поверхности. Естественно, что данный путь может быть реализован лишь в тех случаях, когда это допускают геометрические формы поверхности исследуемого объекта.

Рассмотрим вопрос о способах измерения частоты установочного резонанса. Нами был успешно опробован такой путь. С сейсμοприемником-измерителем СП₁, установленным на исследуемом объекте, жестко скреплялся дополнительный электродинамический сейсμοприемник СП₂ рис. 3. Последний использовался в «обращенном» режиме - включался генератором. Через его рабочую катушку пропусклся электрический ток I , частота которого Ω варьировалась в пределах испытательного диапазона $I \sin(\Omega t)$. В соответствии с законами электротехники это приводило к возникновению силы $F = s_{..} I \sin(\Omega t)$. Здесь $s_{..}$ - чувствительность сейсμοприемника СП₂.

Под влиянием этой силы возникает колебательное смещение с амплитудой u

$$u = F / \{w_{...} + i\Omega h + (i\Omega)^2 (m_{..} + m_{...})\}.$$

Здесь $w_{...}$ - жесткость механической связи сейсμοприемников с объектом («установочная» жесткость), h - коэффициент демпфирования, $m_{..}$ и $m_{...}$ - массы первого и второго сейсμοприемников соответственно. Данное колебательное движение вызывает в первом электродинамическом сейсμοприемнике электрический сигнал

$$U_{..} = du/dt \times s_{..} = i\Omega s_{..} \times s_{..} F / \{w_{...} + i\Omega h + (i\Omega)^2 (m_{..} + m_{...})\}.$$

Вводя обозначение частоты установочного резонанса $\Omega_{...} = \sqrt{w_{...}/(m_{..} + m_{...})}$ и коэффициента демпфирования $\beta_{...} = h/\Omega_{...}$, получаем:

$$U_{..} / (s_{..} s_{..} \times I \sin(\Omega t)) / w_{...} =$$

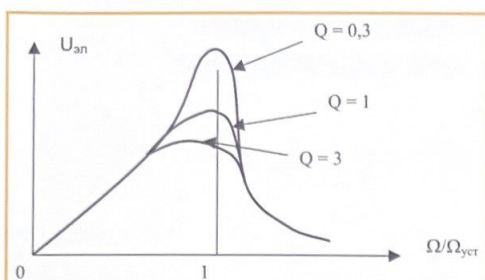


Рис. 4. Частотная характеристика объекта вблизи частоты установочного резонанса.

$$= (i\Omega) / \{1 - (\Omega/\Omega_{уст})^2 - i\beta_{уст}(\Omega/\Omega_{уст})\}. \quad (4)$$

Это выражение, представленное графически на рис. 4, наглядно показывает, что вблизи частоты установочного резонанса $\Omega \rightarrow \Omega_{уст}$ выходной сигнал сейсмоприемника СП, имеет ярко выраженный резонансный пик, который и может быть использован в качестве индикатора верхней границы частотного диапазона измерительной системы.

Выводы:

1) Обобщение сейсмологических данных показывает, что амплитудный диапазон сигналов сейсмической эмиссии должен простирается от уровня микросейсмического шума до сигналов, характеризующихся ускорением порядка $u \sim 20-30 \text{ м/с}^2$, а частотный диапазон приблизительно от 30 до 300 Гц.

2) Оптимальным решением задачи измерения сигнала сейсмической эмиссии является построе-

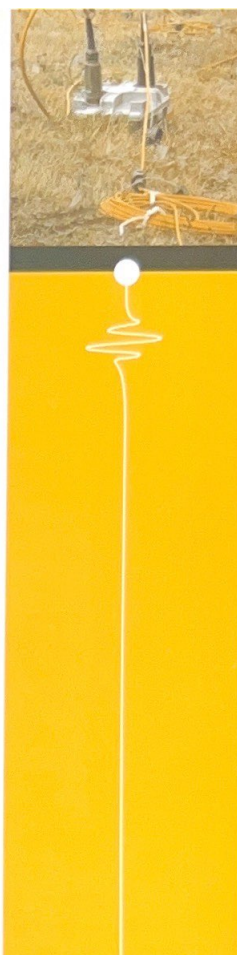
ние измерительного прибора на основе серийного электродинамического сейсмоприемника, имеющего собственную частоту 20-30 Гц. При таком решении амплитудный диапазон и нижняя граница частотного диапазона удовлетворяются автоматически.

3) Верхняя граница частотного диапазона ограничивается частотой установочного резонанса, определяемой, в первую очередь скоростью поперечных волн исследуемого объекта, которая может быть вычислена по приведенным в работе соотношениям. Предложен удобный способ экспериментального определения частоты установочного резонанса и указаны возможные пути увеличения этой частоты.

Данная работа, а также статьи Л.Д. Гика "Применение обращенных электродинамических сейсмоприемников" и "Измерение предельно малых сейсмических сигналов" в № 4 журнала "Приборы и системы разведочной геофизики" выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 04-05-64219.

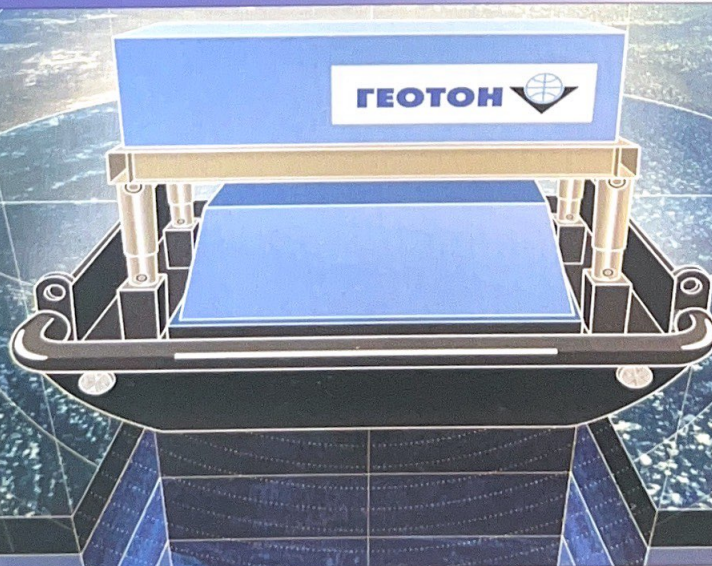
Литература

1. Возбуждение поперечных сейсмических волн импульсными источниками. Пузырев Н.Н., Тригубов А.В., Куликов В.А. и др. Новосибирск, Изд. геол. и геоф. 1981.
2. Исакович М.А. Общая акустика. Наука. М. 1973.
3. Гик Л.Д. Измерение вибраций, Изд. СО АН СССР, Новосибирск, 1972.
4. Программно-аппаратурный комплекс «Эхо-1» для ультразвукового сейсмического моделирования. Методические рекомендации. Сост. Б.А. Бобров, Л.Д. Гик, Н.М. Держи и др. Изд. Ин-та геологии и геофизики СО АН СССР, Новосибирск, 1984.



Электромагнитный источник Геотон

Проектирование и изготовление импульсных сейсмических источников различной мощности на транспортной базе в зависимости от условий применения. Гибкая система оплаты, обучение персонала, сопровождение.



Тел./факс: (095) 202-32-17, 202-32-27 Тел.: (3452) 32-13-07, 74-69-95
e-mail: geoton@geoton.ru geoseis@col.ru <http://www.geoton.ru/>