

ЧАСТОТНО-ИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Рассмотрены частотно-избирательные свойства стратифицированной геологической среды при распространении упругих возмущений. Предложены два способа оценки положения спектральных максимумов амплитудно-частотной характеристики такой среды. На примере сводного геологического разреза РТ показано, что спектр собственных частот многослойной среды крайне неравномерный и отражает строение разреза. Приведенные результаты подтверждают принципиальную возможность изучения геологического разреза осадочно-го чехла по спектрам микросейсмических шумов, в частности, для поисков нефти.

Ключевые слова: спектр микросейсмических шумов, стратифицированная геологическая среда, амплитудно-частотная характеристика, упругая среда распространения.

Экспериментальные исследования сейсмических шумов – микросейсм – имеют почти вековую историю. Изучаемыми параметрами микросейсмических волновых процессов являлись амплитудно-частотные и фазовые характеристики, соотношение амплитуд на различных частотах, а также изменения этих параметров во времени. При этом решаются два класса задач: связь параметров микросейсмического излучения с параметрами возможных первичных источников излучения упругой энергии (Капустян, 2001) и связь параметров сейсмических шумов со структурой, литологией и свойствами геологической среды (Надежка и др., 2003).

По первому классу задач следует отметить, что источники микросейсмического излучения делятся на эндогенные (глубинные) и экзогенные (поверхностные). Вторые, в свою очередь, подразделяются на природные и антропогенные. Каждый тип источников порождает свой тип микросейсм, существенно отличающихся по амплитудно-частотным характеристикам.

Ко второму классу относятся задачи определения по параметрам микросейсмического излучения мощности и свойств осадочного чехла, литологического расчленения верхней части разреза земной коры, выделения аномальных зон на глубинах до 10 км и связь этих зон с тектоническим строением.

В последние годы растет интерес к исследованию параметров микросейсмического фона в нефтегазоносных районах в связи с гипотезой о том, что нефтегазовые залежи вносят возмущения в амплитудно-частотные свойства микросейсмических волновых процессов в диапазоне 1 – 12 Гц (технология АНЧАР (Графов и др., 1996), низкочастотное сейсмическое зондирование (Биряльцев и др., 2005)).

Здесь следует отметить, что нефтегазоносные районы имеют достаточно высокую степень изученности геологического строения осадочного чехла и его упругих свойств: в этих районах широко используются методы сейсморазведки, вертикального сейсмопрофилирования (ВСП) и других сейсмокаротажных исследований глубоких скважин.

В связи с этим повышается актуальность задач о связи параметров геологической среды, полученных при сейсмокаротажных исследованиях глубоких скважин, и параметров микросейсмических волновых процессов.

В данной работе рассмотрены частотно-избирательные свойства стратифицированной геологической среды,

которые могут быть оценены по данным сейсмокаротажных исследований скважин, например, ВСП. Численные оценки получены на примере сводного геологического разреза для Республики Татарстан.

Физическая модель осадочного чехла представляет собой многослойную упругую среду, каждый слой которой характеризуется известной скоростью продольных волн (v), плотностью и толщиной. Верхняя граница осадочного чехла – дневная поверхность, нижняя граница – поверхность кристаллического фундамента. Как известно, коэффициент отражения упругих волн от границы упругих слоев определяется отношением волновых сопротивлений этих слоев (волновое сопротивление z – произведение скорости на плотность).

Наиболее контрастные границы для геологических условий РТ – это границы между терригенными и карбонатными толщами. Терригенные отложения характеризуются скоростями продольных волн от 3000 до 4000 м/сек (для глин – 3000 м/сек, для алевролитов – 3500 м/сек, для плотных песчаников – до 4000 м/сек). В карбонатных отложениях v лежит в пределах 5500 – 6000 м/сек. Для пород кристаллического фундамента v доходит до 7000 м/сек. Толщина осадочного чехла меняется от 1600 до 2000 м.

В сводном геологическом разрезе РТ можно выделить четыре региональные терригенные толщи: верхнепермская, верейская, тульско-бобриковская и девонская, лежащая непосредственно на кристаллическом фундаменте. Территориально мощности терригенных отложений в геологическом разрезе меняются в больших пределах, поэтому для решения конкретных задач необходимо воспользоваться скважинной информацией. Типичный скоростной разрез для условий РТ представлен на Рис. 1.

Частотно-избирательные свойства стратифицированной геологической среды будут определяться отражениями от наиболее контрастных границ и интерференцией упругих волн. В общем случае, спектр измеряемого сигнала при активной или пассивной сейсморазведке $I(f)$ можно представить в виде:

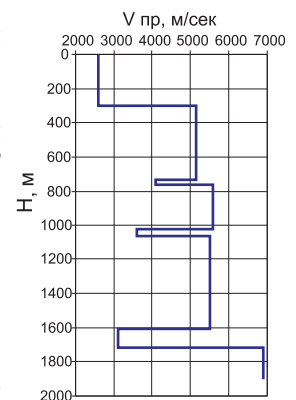


Рис. 1. Типичный скоростной разрез осадочного чехла РТ.

$$I(f) = S(f) \cdot F(f),$$

где $S(f)$ – обобщенный спектр источников сигналов, $F(f)$ – передаточная функция (амплитудно-частотная характеристика) геологической среды, f – частота.

Здесь рассматривается задача оценки положения максимумов амплитудно-частотной характеристики слоистой упругой геологической среды.

В первом приближении поставленную задачу можно решить следующим образом.

Коэффициент отражения (по амплитуде) от границы двух упругих сред с известными волновыми сопротивлениями $z_1 - z_2$ определяется выражением:

$$R = (z_1 - z_2) / (z_1 + z_2).$$

Из этого выражения следует, что при $z_2 > z_1$ отражение происходит в противофазе. В противном случае отраженная волна совпадает по фазе с падающей. (При $z_2 = z_1$ отражение отсутствует, при $z_1 \gg z_2$ имеет место полное отражение при сохранении фазы, что соответствует свободной границе, а при $z_1 \ll z_2$ происходит полное отражение в противофазе, что соответствует жестко закрепленной границе). Дневную поверхность при падении волны из осадочного чехла можно считать свободной границей, а поверхность кристаллического фундамента – жесткой (z фундамента всегда больше чем z пород осадочного чехла, и отражение происходит в противофазе с падающей волной). Промежуточные поверхности разделов геологических толщ можно представить либо свободной, либо жесткой границей, что зависит от соотношения волновых сопротивлений (собственно здесь представляет интерес только фазовый сдвиг между падающей и отраженной волнами на данной границе).

Частотно-избирательные свойства ограниченной среды будут определяться фазовыми соотношениями для нормальной составляющей волнового процесса, ограниченной верхней и нижней границами. Если рассматривать продольную волну, распространяющуюся по вертикали между дневной поверхностью и фундаментом (или другой жесткой границей), то для проявления резонансных свойств среды следует потребовать совпадения фаз прямой и обратной волн на дневной поверхности с учетом того, что отражение от фундамента происходит в противофазе. Для однородной упругой среды, лежащей на жестком фундаменте, это условие дает соотношение для частоты n -ой моды:

$$f_n = (2n - 1)v / 4 \cdot h = (2n - 1) / 4 \cdot t, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

где v – скорость распространения волны, h – толщина упругой полосы (глубина залегания отражающей границы), t – время распространения упругого возмущения от дневной поверхности до отражающей границы.

Если отражение происходит в фазе (отражающая граница «свободная»), то для однородной упругой среды условие совпадения фаз прямой и обратной волн на дневной поверхности дает соотношение для частоты n -ой моды:

$$f_n = n \cdot v / 2 \cdot h = n / 2 \cdot t, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

Если рассматриваемая среда неоднородна, то приведенные соотношения являются достаточно грубой оценкой частоты мод, поскольку не учитывают фазовые соотношения на промежуточных границах. Тем не менее, они дают вид связи между интегральными параметрами процесса (полагая, что v – средняя скорость распространения

волны в слоистой среде) и могут быть использованы для первых оценок частотно-избирательных свойств среды. Время распространения упругого возмущения t есть результат прямого измерения ВСП или сейсморазведки.

Для оценки частот мод, порождаемых конкретной границей, полагаем, что вид границы («свободная» или «жесткая») определяется соотношением волновых сопротивлений вышележащего и подстилающего слоев, а нижележащие слои не влияют на оценки.

Уточнить полученные оценки можно, используя более корректную модель для определения собственных колебаний многослойной упругой среды, характеризуемой мощностью h_n , скоростью продольных волн v_n и плотностью ρ_n . Упругие колебания в одномерном случае для каждого слоя описываются гиперболическим (волновым) уравнением:

$$\frac{\partial^2 U_n}{\partial t^2} = v_n^2 \cdot \frac{\partial^2 U_n}{\partial x^2}. \quad (3)$$

Будем предполагать, что зависимость перемещения U_n от времени гармоническая:

$$U_n(x, t) = u_n(x) \cdot e^{i\omega t},$$

где ω – круговая частота гармонических колебаний. Тогда уравнение в частных производных (3) преобразуется к обыкновенному дифференциальному уравнению:

$$v_n^2 \cdot u_n''(x) + \omega^2 \cdot u_n(x) = 0. \quad (4)$$

Если скорость v_n – постоянная величина, то общее решение уравнения (4) в каждом слое представимо в виде:

$$u_n(x) = A_n \cdot \cos(\omega x / v_n) + B_n \cdot \sin(\omega x / v_n),$$

где A_n, B_n – некоторые константы.

В каждом слое общее решение уравнения (4) удобно представить в виде:

$$u_n(x) = C_1^{(n)} \cdot \cos(\omega(x - a_n) / v_n) + C_2^{(n)} \cdot \sin(\omega(x - a_n) / v_n), \quad (5)$$

где a_n – координата верхней границы слоя, $C_1^{(n)}, C_2^{(n)}$ – некоторые константы.

Из физических соображений (неразрывность среды распространения и равенство силы воздействия и реакции – третий закон Ньютона) на границе раздела сред должны быть непрерывны перемещения и напряжения, которые связаны с перемещением законом Гука: $\sigma(x) = \rho v^2 u'(x)$, где производная u по x имеет вид:

$$u_n'(x) = -(\omega / v_n) \cdot C_1^{(n)} \cdot \sin(\omega(x - a_n) / v_n) + (\omega / v_n) \cdot C_2^{(n)} \cdot \cos(\omega(x - a_n) / v_n), \quad (6)$$

Таким образом, получены условия сопряжения искомых функций $u_n(x)$, которые дают систему линейных уравнений, из которой определяются неизвестные константы $C_1^{(n)}, C_2^{(n)}$ для каждого слоя:

$$u_n(a_n) = u_{n-1}(a_n), \quad \rho_n \cdot v_n^2 \cdot u_n'(a_n) = \rho_{n-1} \cdot v_{n-1}^2 \cdot u_{n-1}'(a_n). \quad (7)$$

Нашу модель (4), (7) необходимо дополнить однородными граничными условиями. Будем предполагать, что верхняя граница свободная ($u_1'(a_1) = 0$). Отсюда следует, что $C_2^{(1)} = 0$, а $C_1^{(1)}$ – произвольная постоянная (например, $C_1^{(1)} = 1$), то есть все константы в (7) определены.

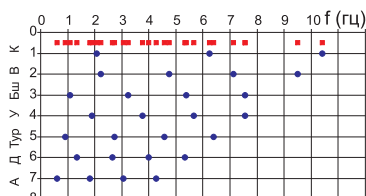


Рис. 2. Распределение мод собственных колебаний по отражающим границам (грубая оценка).

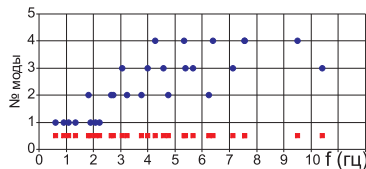


Рис. 3. Распределение мод собственных колебаний по номерам (грубая оценка).

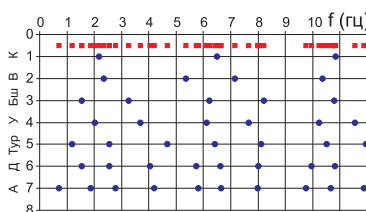


Рис. 4. Распределение мод собственных колебаний по отражающим границам (точная оценка).

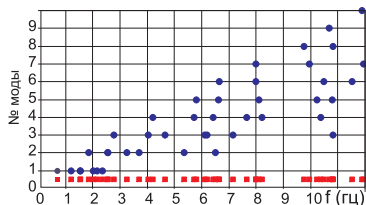


Рис. 5. Распределение мод собственных колебаний по номерам (точная оценка).

Нижняя граница по предположению либо свободная ($u'_N(h_N) = 0$), либо жестко закрепленная ($u_N(h_N) = 0$). Это условие, поскольку все константы определены, приводит к характеристическому уравнению относительно ω . Таким образом, граничные условия уравнения (4) удовлетворяются только при определенных частотах ω , которые удовлетворяют характеристическому уравнению и являются собственными частотами многослойной упругой среды.

Далее, используя описанный подход для определения вида конкретной отражающей границы («свободная» или «жесткая») и решая характеристическое уравнение, получим оценки частот мод, порождаемых данной границей.

На рисунке 4 приведены результаты расчетов частоты мод с использованием соотношений уточненной модели для скоростного разреза, показанного на Рис. 1. На рис. 5 те же результаты перекомпонованы по номерам мод. Основное отличие от более грубых оценок (Рис. 2, 3) заключается в том, что интервалы между соседними модами для данной отражающей границы не постоянны, и чем глубже залегает отражающая граница, тем более сложной становится закономерность в последовательности мод. Это связано с тем, что форма собственных колебаний слоистой среды терпит разрывы гладкости (фазы) на границах слоев (Рис. б). Полученные оценки подтверждают вывод, что спектр собственных частот многослойной среды крайне неравномерный. Наиболее выра-

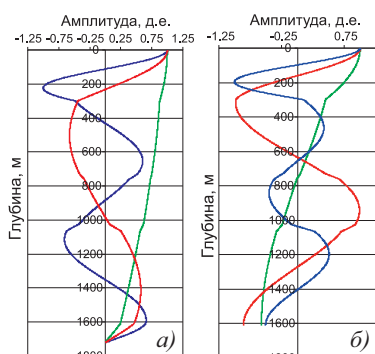


Рис. 6. Формы собственных колебаний многослойной геологической среды: а) отражения от «жесткой» границы, б) отражения от «свободной» границы.

становится закономерность в последовательности мод. Это связано с тем, что форма собственных колебаний слоистой среды терпит разрывы гладкости (фазы) на границах слоев (Рис. б). Полученные оценки подтверждают вывод, что спектр собственных частот многослойной среды крайне неравномерный. Наиболее выра-

женные группировки максимумов находятся в районе частот 2,2 Гц, 4 Гц, 6,2 Гц, 8 Гц и 10,5 Гц, причем кластер в районе 2.2 Гц содержит первые моды от всех рассмотренных отражающих границ геологического разреза РТ за исключением кристаллического фундамента и кровли турнейских отложений. В районе этой частоты должен потенциально находиться основной интегральный максимум спектра микросейсмического шума.

Приведенные результаты показывают принципиальную возможность изучения геологического разреза осадочного чехла по спектрам регистрируемых микросейсмических шумов в диапазоне частот 0,5 – 12 Гц. При этом объектом анализа могут быть любые параметры геологической среды, влияющие на упругие свойства отдельных слоев, включая зоны разуплотнения и насыщение пластами флюидами.

Литература

Биряльцев Е.В., Рыжов В.А., Шабалин Н.Я. Особенности интерпретации спектральных характеристик природных микросейсм для локального прогноза нефтеносности в условиях республики Татарстан. Прием и обработка информации в сложных информационных системах. Выпуск № 22. Казань. 2005. 113-120.
Графов Б.М. и др. Анализ геоакустического излучения низкочастотной залежи при использовании технологии АНЧАР. Геофизика. № 5. 1996. 24-28.
Капустян Н.К. Техногенные механические вибрации: параметры воздействий и наведенные процессы в земной коре. Электронный научно-информ. журнал «Вестник ОГГТН РАН». № 4(19). 2001.
Надежка Л.И., Орлов Р.А., Пивоваров С.П. и др. О связи параметров сейсмического шума с геологическими и геодинамическими особенностями Воронежского кристаллического массива. Вестн. Воронеж. ун-та. Геология. № 2. 2003. 179-185.

Kipot V. L., Tumakov D. N. Frequency-selective properties of the stratified geological space.

This paper is concerned with frequency-selective properties of stratified geological space at propagation of elastic perturbations. Two ways to value the location of spectrum peaks of gain-frequency characteristic in such medium are suggested. On the sample of the geological column of the Republic of Tatarstan it is shown that a spectrum of the eigenmodes is extremely irregular and reflects the structure of a geological column. Given results confirm the fundamental possibility to study a geological column of a sedimentary cover by analysis of the microseismic noise spectrum, in particular for oil prospecting.

Key words: microseismic noise spectrum, stratified geological space, gain-frequency characteristic, elastic propagation medium.

Виктор Леонидович Кипоть

вед. науч. сотрудник НИИ ММ им. Н.Г. Чеботарева, к.т.н. Область научных интересов – моделирование геолого-геофизических систем и процессов.
420008, Казань, ул. Проф. Нужина, д. 1.
Тел./Факс: (843) 238-22-61.



Дмитрий Николаевич Тумаков

ст. науч. сотрудник НИИММ им. Н.Г. Чеботарева, к.ф.-м.н. Область научных интересов – распространение и дифракция упругих и электромагнитных волн.
420008, Казань, ул. Проф. Нужина, д. 1.
Тел./Факс: (843) 238-22-61.

