



С. А. Терехов
А. М. Воронцов
В. К. Рерих

ООО "НЕЙРОК ТЕХСОФТ", ТРОИЦК
ООО "НЕЙРОК ТЕХСОФТ", ТРОИЦК
ООО "НЕЙРОК ТЕХСОФТ", ТРОИЦК

ОЦЕНКА ВКЛАДА РЕЗОНАНСНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ЭНЕРГИЮ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ФОНА НАД И ВНЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ УВ

АННОТАЦИЯ. В работе сделана оценка части энергии микросейсмического фона, связанной с возможными резонансными эффектами, наблюдаемыми над месторождением углеводородов. Показано, что в рамках предложенной модели гипотеза о наличии частотного резонанса над месторождением одновременного для всех точек наблюдений надёжно не подтверждается.

ВВЕДЕНИЕ. Одним из проявлений эффекта АНЧАР, как известно, является превышение спектральной мощности инфразвуковых микросейсм над месторождением углеводородов (УВ) в сравнении с той же величиной вне месторождения. Наблюдаемое свойство может быть связано с различными проявлениями резонанса [1, 3, 5], который, в частности, может иметь стохастическую природу с возбуждением от внешнего сейсмического поля. Подобные механизмы возникают в различных областях физики [4].

Данная статья адресована вопросу разработки надёжных методов выявления особенностей сигнала низкой частоты, возникающего в присутствии пластовых залежей углеводородов. При этом основной целью является статистическое обоснование критериев, позволяющих указать на высокую вероятность наличия УВ в исследуемой области.

Фактически, резонансная компонента сигнала может быть отнесена к детерминированным (неслучайным) явлениям, хотя благоприятные условия для его возникновения вызываются совокупностью окружающих случайных условий. Будем предполагать, что сигнал принимается некоторой совокупностью сенсоров (каналов), распределённых в пространстве. При рассмотрении данной гипотезы фазовые соотношения между каналами не важны, интерес представляют только частоты возможных согласованных колебаний.

Объёмные резонаторы (как закрытые, так и полуоткрытые) характеризуются линейчатым спектром колебаний, при этом частоты отдельных (расширенных вследствие низкой добротности) линий образуют арифметическую прогрессию с разностью и началом отсчёта, равными некоторой частоте основного тона. Данная

частота в реальных условиях неизвестна, и, кроме того, она может меняться во времени в зависимости от того, какая пространственная область над месторождением¹ в данный момент вовлечена в резонанс.

Для поиска детерминированной резонансной составляющей может использоваться оригинальный вариационный метод, ранее применявшийся для анализа резонансных гармонических структур музыкальных и акустических сигналов [6].

ПОИСК ВКЛАДА РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТИ СИГНАЛА

Рассмотрим задачу в её дискретной постановке, допускающей проведение практических вычислений. Рассмотрим некоторую подробную сетку частот $\{v_k\}_{k=1}^K$ в диапазоне 1 - 5 Гц и предположим, что набор исходных сигналов $\{u_n = u_n(t)\}_{n=1}^N$, где N - число каналов измерений, определён на временном отрезке $[0, T]$. Далее рассмотрим равномерное разбиение этого отрезка набором точек $\{t_j\}_{j=0}^J$, где положено $t_0 = 0, t_j = T$, а натуральное число J имеет смысл полного числа интервалов экспериментального сигнала, предварительно очищенного от внешних помех.

Введём понятие пробной вариационной функции $v = v(t), t \in [0, T]$ - зависимости частоты основного тона от времени. Пусть для каждого $j \in \{1, \dots, J\}$ функция $v(t_j)$ принимает одно из возможных значений из сетки частот $\{v_k\}_{k=1}^K$. В промежуточные моменты времени исполь-

¹ Месторождение имеет сложную трёхмерную пространственную структуру с потенциально большим разнообразием локальных условий для резонанса.

зуется линейная интерполяция. Таким образом, пробная функция является кусочно-линейной и непрерывной, т. е. определен класс рассматриваемых пробных функций.

Основное предположение состоит в том, что на каждом временном интервале (t_{j-1}, t_j) , $j \in \{1, \dots, J\}$ частоты основного тона приближенно равны во всех каналах измерений.

Для удобства изложения обозначим значения частоты основного тона в соседние моменты времени через $v(t_{j-1}) = p$ и $v(t_j) = q$. Также, для краткости, будем говорить, что резонансная система в момент времени $j - 1$ “находится в состоянии” p . В следующий момент времени система “совершает переход” из состояния p в состояние q .

Фиксируем натуральное число M рассматриваемых резонансных линий (в расчётах M варьировалось от 2 до 4). Тогда энергия резонансных колебаний в канале с номером $n \in \{1, \dots, N\}$ в пределах шага $t = t_j - t_{j-1}$, $j \in \{1, \dots, J\}$ может быть определена выражением

$$r_{jn}^{p \rightarrow q}[v] = \sum_{m=1}^M \left(a_{jnm}[v] \right)^2 + \left(b_{jnm}[v] \right)^2,$$

где введены обозначения:

$$b_{jnm}[v] = C \int_{t_{j-1}}^{t_j} u_n(t) \sin(2\pi m v(t_j) t) dt,$$

$$a_{jnm}[v] = C \int_{t_{j-1}}^{t_j} u_n(t) \cos(2\pi m v(t_j) t) dt,$$

а нормировочная константа C оценивается в предположении плавного изменения частоты, как $C = \sqrt{2\tau}$.

Вариационная постановка задачи состоит в отыскании на описанном выше классе пробных функций некоторой функции $v^*(t)$, доставляющей максимум функционалу полной резонансной энергии во всех каналах наблюдений:

$$R[v] = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J r_{jn}^{p \rightarrow q}[v].$$

Функционал аддитивен, что позволяет для его оптимизации использовать метод динамического программирования Беллмана [2]. Обозначим

$$Q_i[v^i](p) = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^i r_{jn}^{p \rightarrow q}[v]$$

значение частичной суммы функционала, полученной для пробной функции v с условием $v(t_{j-1}) = p$. Далее, пусть функция v^i является оптимальной для функционала $R[v]$ - $Q_i[v^i](p)$. Тогда ясно, что функция состояния $Q_i[v^i](p)$ удовлетворяет рекуррентному уравнению Беллмана:

$$Q_i[v^i](p) = \max_q \left\{ \sum_{n=1}^N r_{in}^{p \rightarrow q}[v^i] + Q_{i+1}[v^{i+1}](q) \right\}$$

с граничным условием на правой границе $Q_J[v^J](p) = 0$ для всех p . Значения $Q_i[v^i](p)$ (для всех состояний p) далее получаются последовательным применением формулы от последнего момента времени к первому. Максимум $Q_1[v^1](p)$ в первый момент времени, достигающийся на значении $\arg \max_q \left\{ Q_1[v^1](q) \right\}$, определяет глобальный максимум v^0 всего функционала.

В практической реализации описанного алгоритма учитывается возможная кратковременность резонанса. Если текущий вклад энергии резонанса в некоторый момент времени становится ниже критического (в сравнении с полной энергией сигнала в данном временном интервале), процесс прерывается, и возобновляется, начиная с соседнего интервала (рестарт). Это позволяет выделить отдельные “цепочки” резонансных состояний.

С использованием приведённого выше алгоритма были проанализированы экспериментальные сигналы², полученные в точках вне месторождений и над месторождениями. Ожидаемый характер результатов заключался в том, что в области над месторождениями выявленные резонансные “цепочки” будут обладать большей длительностью и большей относительной энергией, вовлеченной в резонанс.

На рис. 1 приведено распределение длин непрерывных участков (“цепочек”), вовлеченных в резонанс (суммарная по компонентам доля энергии в резонансе выше 30%), и аналогичная гистограмма для искусственной четверки сигналов, полученных путём моделирования траекторий случайного стационарного гауссовского процесса, имеющего сходные корреляционные характеристики, что и реальные сигналы.

Такие псевдослучайные траектории в среднем сохраняют спектр сигнала, однако по построению не содержат возможные временные корреляции между отдельными компонентами. Следовательно, наличие “цепочек” согласованного поведения в компонентах для искусственных моделей заведомо является случайным.

Из приведённой статистики видно, что и в случайных данных вполне вероятны цепочки до 5 - 6 окон (7 - 9 с), хотя в реальных данных наблюдается определённое статистическое превышение числа цепочек длительностью 2 - 3 окна (3 - 4 с). Наличие таких цепочек указывает на присутствие некоторых резонансных явлений в исследуемом сигнале, однако построение прямого решающего критерия на этой основе на данном этапе исследований остаётся затруднительным (т. е. наблюдаемое превышение вероятности статистически незначимо).

На рис. 2 приведена зависимость доли энергии в резонансе от частоты основного тона для цепочек длин более 2 с.

² Авторы приносят благодарность компании НТК АНЧАР за предоставленные полевые материалы.

