

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ

УДК 550.34

А.Б. БЕКЛЕМИШЕВ

РОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ТЕХНОЛОГИИ ПАССИВНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

По временным рядам соотношения коэффициентов плоской и линейной поляризации оценены распределения (гистограммы) и корреляционные функции этого параметра для продолжительных трехкомпонентных реализаций микросейсмического движения в шовных зонах известных разломов земной коры и в пределах окружающих консолидированных геологических формаций.

В последнее время возрос интерес к пассивным подходам в исследованиях структуры и динамики неоднородной геологической среды, особенно вблизи зон разломов и деструктуризации. Естественное волновое поле (микросейсмы) на земной поверхности и связи такого поля с геометрическими и сейсмоакустическими свойствами погребенных объектов давно используются в Японии [6, 8]. Однако отношение к постановке и результатам таких исследований в России и в развитых западных странах до 1985 г., т. е. до момента опубликования [7] и признания геологических и геофизических данных по землетрясению в Гуереро (Guerrero-Michoacan), оставалось неоднозначным. Сегодня ситуация изменилась. Для того чтобы эффективно установить причины локально ярких откликов среды на возмущающее воздействие; доминирующие механизмы естественных движений (упругие и/или вязкие); позиции и геометрию очаговых зон и зон, где отклик аномально интенсивен и опасен (site-effect); структуру и состояние геологической формации, степень их устойчивости; направление и скорость текущей структурной эволюции среды (деструктуризации или упрочнения), изучаются продолжительные представительные временные ряды в форме трехкомпонентных 3С выборок ускорений и производных параметров (естественного нагружения, скорости нагружения-релаксации, соотношения коэффициентов поляризации, отношения спектров горизонтального- H и вертикального- V движений — $HVSR$ и др.). Особенности процессов естественного нагружения — релаксации рассмотрены в предыдущих публикациях [3, 4]. Ниже автором проанализированы ряды поляризационных оценок, их соотношение с другими рядами произ-

водных параметров из микросейсмических выборок и роль в интерпретации эмпирических данных скрининга (МБГС) и/или прерывистого мониторинга (TLM).

Приложение индустриальной сейсморазведки, наиболее широко представленной на рынке геофизических услуг, ограничено здесь в силу следующих обстоятельств.

1. Концептуально индустриальные технологии базируются на упругих волновых механизмах, ограниченно пригодных в случаях заметного участия вязкой механики и совершенно неоправданных при доминировании вязких механизмов.

2. Используемые приемники обладают обычно вертикальной направленностью, адаптированной исключительно к линейно-поляризованным одноосным движениям.

3. Возможность эффективного согласования спектральных и динамических диапазонов естественных движений поверхности среды в векторной форме и стандартных аппаратных трактов сегодня отсутствует.

4. Оценки интенсивности (кинетической энергии), как правило, сложно поляризованного волнового движения ненадежны и часто в различной степени ошибочно занижены.

5. Использование в стандартных подходах мощных зондирующих импульсов способно изменить исходную структуру среды, ее проницаемость и гидрогеологический режим, а также прочность встроенных конструкций, т. е. необратимо модифицирует сам объект исследования [1].

6. Стандартные программно-алгоритмические пакеты обработки и интерпретации инструмен-

тальных данных слабо или вовсе не учитывают динамики поляризационных параметров и т. п.

Таким образом, ощущаемая потребность в «продвинутых» технологиях формализована в перечнях качественных характеристик и требований к направленной модификации программно-аппаратных и методических средств изучения динамики сред, помимо сейсмоопасных зон особенно актуальной для территорий городов, промышленных зон и освоенных месторождений.

Благодаря продолжительным ЗС измерениям, пассивная сейсморазведка позволяет идентифицировать чередующиеся фрагменты временных рядов с преимущественно линейно поляризованным или с преимущественно плоско поляризованным движением. Такие фрагменты соответственно должны быть связаны с объемными волнами глубинного генезиса (продольными P - и отчасти S -, SV -, SH -волнами) или с микросейсмями (волны Релея, псевдорелеевские, Лява), вызванными главным образом поверхностными источниками.

Рассмотрим кратко особенности отклика на упомянутые типы волн. Допущение доминирования S - (SV -, SH -) волн с различными направлениями прихода и источниками в составе микросейсмического движения поверхности представляется вполне оправданным. Реакция свободной плоской поверхности среды на субвертикальный приход S -волны подобна эффекту отражения на свободном конце стержня [7]. Частицы среды под воздействием S -волны смещаются в плоскости, перпендикулярной лучу, т. е. к направлению распространения возмущения. В общем случае эти переменные во времени смещения, убывающие с расстоянием от источника (по лучу), как r^{-1} , характеризуют плоско поляризованное движение. В частных случаях последнее имеет форму эллиптической, круговой или линейной поляризации. При этом всегда возможно разложение S -волны на две ортогональные линейно поляризованные компоненты. Отражение и прохождение через границу плоской S -волны создают волны: поляризованную в плоскости падения, обычно вертикальную, $(SV)_1$, и поляризованную перпендикулярно к плоскости падения, обычно горизонтально, $(SH)_1$.

Для плоской SH -волны, приходящей под произвольным углом, всегда наблюдается удвоение амплитуды смещения, в то время как для SV -волны локальное движение весьма сложное. Вблизи критического угла падения ($\arcsin V_s/V_p$, где V_s и V_p — скорости соответственно S - и P -волны) из-за равных горизонтальных замедлений P - и S -волн вдоль поверхности пробегает экстремально усиленная конвертированная SP -волна. Ее H -компонента в узком ($\approx 1^\circ$) диапазоне вблизи критического угла достигает многократного усиления. Расчеты для других моделей: топографии, глубинного строения, волновых типов (например, поверхностных волн Релея, Лява), азимутов, импедансных контрастов и особенно водонасыщения в некоторых случаях показывают рост пиковых смещений на поря-

док. Зависимость усиления синфазных амплитуд V - и H -компонента смещения поверхности от угла падения SV -волны и коэффициента Пуассона (σ) показывается следующее. Усиленная H -компонента вблизи критического угла почти линейно поляризована. Линейная поляризация наблюдается также при нормальном и скользящем падениях. При падении на границу $(SH)_1$ -волны существуют только монотипные вторичные отраженная и проходящая волны, соответственно $(SH)_{11}$ и $(SH)_{12}$, линейно поляризованные в направлении, перпендикулярном к плоскости падения.

В [6] показано, что в движении поверхности значительное участие принимают поверхностные волны, и, основываясь на этом выводе, предложил использовать в качестве эффективного параметра отношение спектров H - и V -компонент: $HVSR$. В волновом поле микросейсм, например, над погруженным фрагментом геологической формации поверхностные волны доминируют. Поверхностные волны существуют только вблизи поверхности или границ раздела. Вблизи свободной поверхности упругой среды распространяется, например, поверхностная волна Релея со скоростью $V_r = f(V_p/V_s) \approx 0,9V_s$, независимой от периода. Коэффициенты затухания продольной и поперечной составляющих волны Релея обратно пропорциональны квадрату длины волны. Амплитуда смещения быстро убывает с глубиной, но глубина проникновения волны Релея в среду зависит от частоты: чем больше длина волны L , тем глубже проникновение. Расчеты в рамках $2D$ -задачи поведения H - и V -компоненты вектора смещения в функции глубины проникновения показывают, что абсолютные максимумы в разной степени смещены вглубь среды. Начиная примерно с полуволновой глубины, отмечается экспоненциальное для синфазных H - и V -компоненты затухание волнового движения. На определенной, и малой по сравнению с L , глубине H -компонента обращается в нуль. Переход через эту точку соответствует изменению направления движения частиц вдоль эллиптических орбит на обратное. С увеличением глубины изменяется эллиптичность (H/V) орбит. На дневной поверхности при $\sigma = 0,25$ V -компонента смещения превосходит H -компоненту почти в 1,5 раза. Для сравнения: у вышеописанной SV -волны близкое соотношение наблюдается только в закритическом диапазоне углов падения, а в докритическом H -компонента всегда доминирует. Эллиптичность также зависит от частоты: кривые H/V в функции частоты волны Релея для первых мод, включая фундаментальную показывают, что положительные экстремумы соответствуют исчезновению (в идеале) V -компоненты, отрицательные — исчезновению H -компоненты. При этом самый низкочастотный максимум обнаруживается на так называемой фундаментальной резонансной частоте. Понятно, что в реальных условиях, когда в движении поверхности участвуют также SV - и P -волны, величина и частотная привязка пика зависят от относительной интенсивности SV - и P -волн. Плотность энергии волны Релея по мере расхождения убывает

обратно пропорционально r , а амплитуда смещения — обратно пропорционально \sqrt{r} , т. е. существенно меньше, чем для объемных волн. Таким образом, по мере удаления от источника относительная роль волны Релея растет. Более того, такая волна способна доминировать в движении поверхности и оказывать мощное разрушительное воздействие при землетрясениях.

Плоско поляризованное движение частиц, связанное с псевдорелеевской волной, происходит по эллиптическим орбитам в вертикальной плоскости, параллельной направлению распространения.

Для волны Лява или поперечной поверхностной волны, существующей только при условии $V_{s2} > V_{s1}$, смещения частиц поверхности направлены горизонтально и параллельно фронту. Присутствие волны Лява (не имеющей V -компоненты) в суммарном волновом поле не искажает картины пиков $HVSR$.

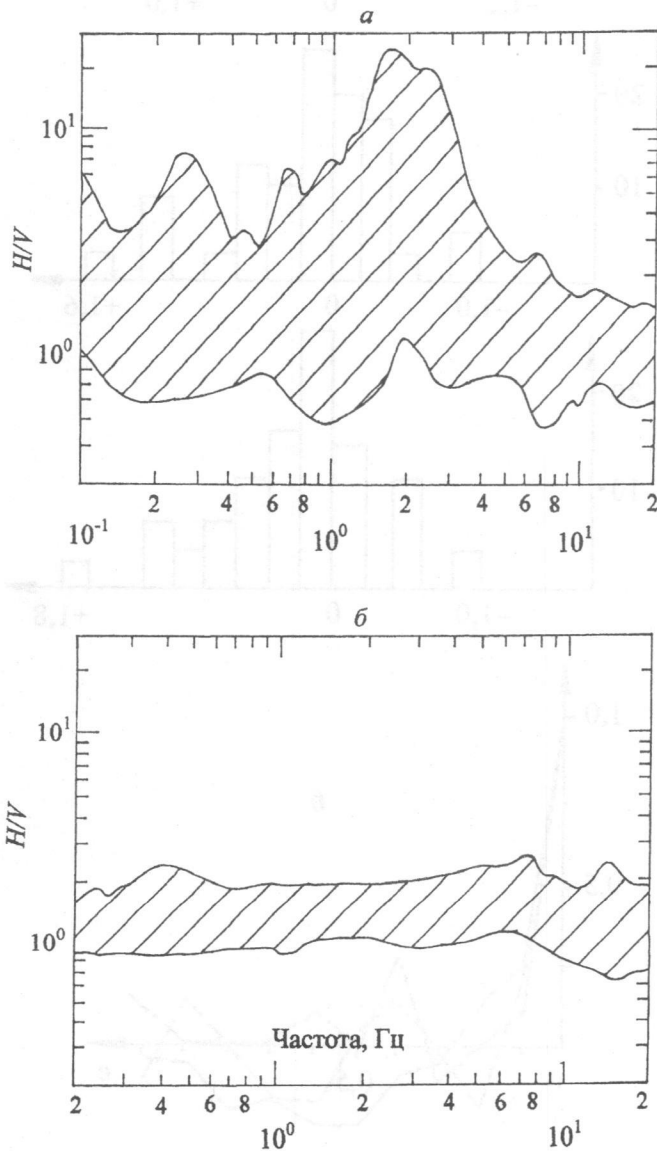


Рис. 1. Область рассеяния оценок эллиптичности (H/V) в функции частоты для акустически мягких (а) и жестких (б) геологических формаций (обобщение данных из [7]).

Дифрагированные волны по мере удаления, например, от латеральной неоднородности, теряют интенсивность из-за затухания и особенно быстро изменяющейся геометрии фронта, а доминируют многократные отражения, распространяющиеся вдоль поверхности, как волны Лява.

Простые волновые типы: S -, SV -, SH -волны, волны Релея и Лява, псевдорелеевские волны способны доминировать по интенсивности, однако суммарные, резонансные и интерференционные типы должны быть признаны основными в продолжительных выборках естественных движений поверхности и особенно устойчивыми при условии, когда мощность приповерхностного слоя $H = n\Lambda \ll r$. Очевидно необходим переход от исключительно кинематического рассмотрения, при котором все многочисленные волновые типы равновозможны, к динамическому, учитывающему доминирование, сравнительную интенсивность и устойчивость отличающихся волн в разных позициях наблюдения.

Поведение параметра $HVSR$ зависит от частоты. При наличии в лучевой траектории существенной части, связанной с акустически мягкими отложениями, распределения $HVSR = f(\omega)$ охватывают широкий диапазон значений: 0,4–12. Пиковые уровни $HVSR = f(\omega)$ занимают область от 6 до 12 и сконцентрированы в диапазоне периодов 0,7–7 с (0,15–1,5 Гц). Средняя ширина пика (на уровне 3 db) составляет около 3 с (0,3 Гц). В отсутствии или при незначительной мощности мягких отложений распределения $HVSR = f(\omega)$ не содержат выраженных пиков и охватывают сравнительно узкий диапазон уровней: 0,7–3, т. е. являются практически частотно независимыми (рис. 1, а, б). Ранее подобное представление о характеристиках микросейсм предполагалось универсальным.

Идентифицировать фрагменты выборок с доминированием объемных волн глубинного происхождения или фрагменты с доминированием диспергирующих поверхностных волн практически невозможно без применения поляризационного анализа, особенно в обычных условиях интерференции. Интегральная характеристика поляризации использует распределение энергии в пространстве по трем ортогональным направлениям [5]. Компонента (проекция) по направлению, определенному ортом \vec{n} , описывается функцией $u_n = \vec{n}^T \vec{u}(t) = \sum_{i=1}^3 n_i u_i$, а энергия этой компоненты — функционалом:

$$E_n = \int_T \left(\sum_{i=1}^3 u_i(t) n_i \right)^2 dt = \sum_{i,k} n_i n_k \int_T u_i(t) u_k(t) dt = \sum_{i,k} n_i n_k (u_i, u_k) = \vec{n}^T B \vec{n}, \quad (1)$$

где B — ковариационная матрица из элементов вида:

$$B_{i,k} = (u_i, u_k) = \int_T u_i(t) u_k(t) dt, \quad (2)$$

т. е. скалярных произведений l и k компонент. Поскольку матрица B симметрическая, она приводима к диагональной форме

$$B' = \text{diag}(E_1, E_2, E_3),$$

где элементы главной диагонали $E_k > 0$, $k = 1, 2, 3$, посредством ортогонального преобразования: $B' = N^T B N$, где N — ортогональная матрица, столбцы которой — собственные вектора матрицы B , $E_1 \geq E_2 \geq E_3$ — ее собственные значения. Трехосный эллипсоид, соответствующий квадратичной форме (1), с длинами осей $E_1 \geq E_2 \geq E_3$ и направлениями осей вдоль попарно ортогональных собственных векторов $\bar{n}_1, \bar{n}_2, \bar{n}_3$ — столбцов матрицы N , дает представление о пространственном распределении энергии. Проекция на направление \bar{n}_1 характеризуется максимальной энергией E_1 , а на \bar{n}_3 — минимальной E_3 . Для линейно поляризованной волны ранг матрицы B равен 1, $E_2 = E_3 = 0$, и эллипсоид вырождается в отрезок прямой на направлении \bar{n}_1 . Для плоско поляризованных, например, поверхностных волн, ранг матрицы B равен 2, $E_3 = 0$, и эллипсоид вырождается в плоский эллипс. При наличии помех полного вырождения не происходит, но эллипсоид в той или иной степени приближается к названным фигурам: либо вытягивается подобно веретену, либо сплющивается подобно диску. Таким образом, вид поляризации исчерпывающе описан параметрами: собственными векторами $\bar{n}_1, \bar{n}_2, \bar{n}_3$ ковариационной матрицы B и соответствующими собственными значениями $E_1 \geq E_2 \geq E_3$ этой матрицы. Для оценки степени вытянутости и сплюсненности поляризационного эллипсоида использованы соответственно следующие два коэффициента:

$$K_l = 1 - E_2 / E_1, \quad (3)$$

$$K_p = 1 - E_3 / E_2. \quad (4)$$

В отсутствии помех

$$B\bar{n}_l = E_l \bar{n}_l, \quad \text{где } l = 1, 2, 3.$$

В результате воздействия помех вместо последнего выражения получим:

$$(B + \delta B)(\bar{n}_l + \delta \bar{n}_l) = (E_l + \delta E_l)(\bar{n}_l + \delta \bar{n}_l), \quad (5)$$

где $\delta B, \delta E_l, \delta \bar{n}_l$ — возмущения матрицы B , собственных значений E_l и собственных векторов \bar{n}_l .

Фактически при анализе одноточечных ЗС микросейсмических выборок неизбежна возмущенная ситуация (5). Причем возмущения являются переменными в пространстве и во времени. Как следствие этого оценки K_l и K_p или K_l/K_p столь же переменны. Статистические распределения K_l и K_p , моменты распределений (средние значения, дисперсии, функции корреляции) и степень их пространственно-временной стабильности должны давать значительно более полную, надежную и содержательную картину доминирующих и относительно устойчивых (в рамках МБГС) или, возможно, эволюционирующих (в рамках ТЛМ) поляризационных характеристик. По известным свидетельствам [2], параметры поляризации высоко чувствительны к неоднородностям в среде при малой кри-

стичности к нестабильности источника волнового возмущения. В частности, именно временные ряды значений двух поляризационных параметров: $\lg(K_l/K_p)$ и $\Delta[\lg(K_l/K_p)]/\Delta t$ неожиданно оказались высоко (с уровнями около 0,67) взаимно коррелированными при МБГС поперек известных региональных разломов Наруя (Naruja-Negrilesti-Soveja) и Топешти (Topesti-Prisaca TP) на юго-восточной

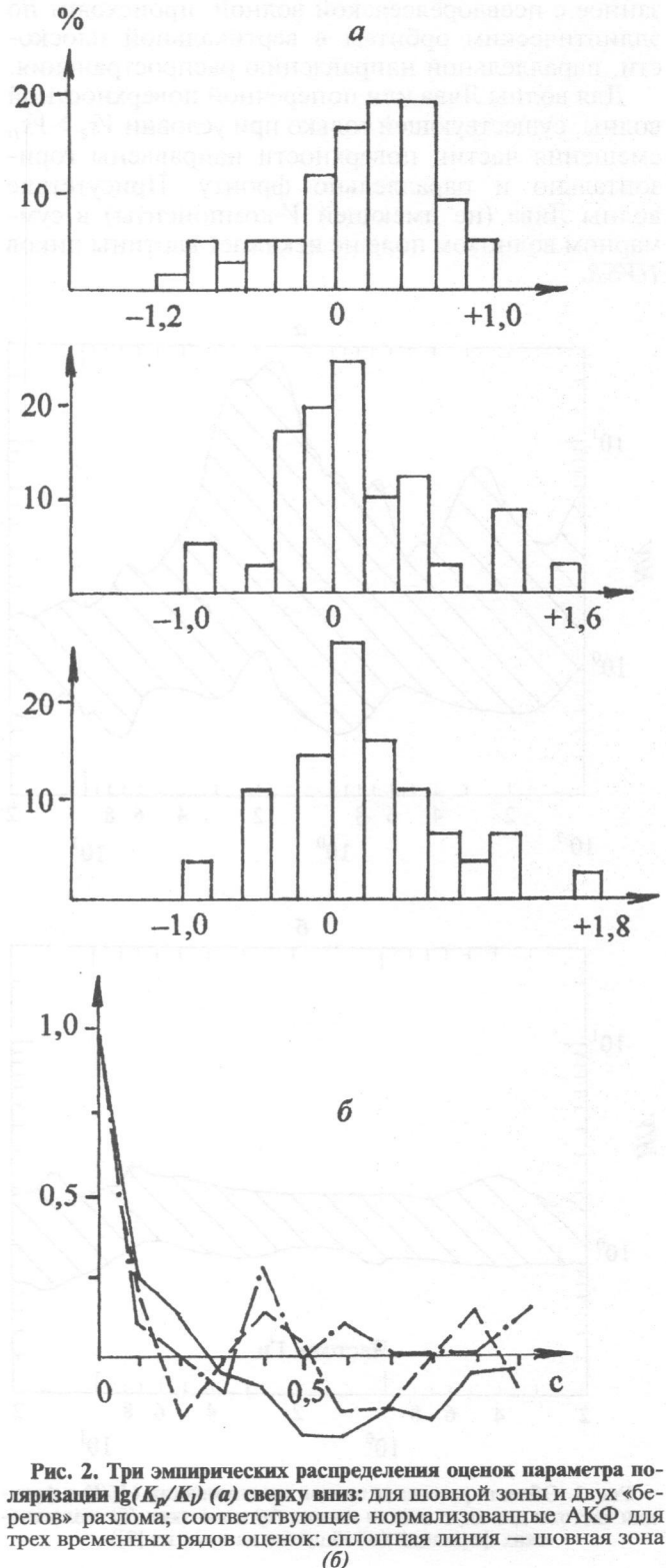


Рис. 2. Три эмпирических распределения оценок параметра поляризации $\lg(K_p/K_l)$ (а) сверху вниз: для шовной зоны и двух «берегов» разлома; соответствующие нормализованные АКФ для трех временных рядов оценок: сплошная линия — шовная зона (б)

периферии Карпатского орогена [4]. Здесь, но только в пределах приосевой (шовной) зоны, по временным рядам значений параметров $\lg(K_I/K_p)$ и энергий нагружения-релаксации обнаружена высокая (с уровнем $-0,43$) взаимная контркорреляция.

На рис. 2, а можно видеть распределения оценок параметра $\lg(K_p/K_I)$, полученные для шовной фактурной зоны (вверху) и для двух противоположных «берегов» ТР-разлома, представленных консолидированными породами олигоцен-миоценовой осадочной формации. Общее число оценок 42, каждая оценка является средней для односекундного интервала внутри ЗС выборки. На рис. 2, б приведены автокорреляционные функции (АКФ)

соответствующих временных рядов оценок параметра.

Во всех случаях максимумы распределений локализованы в области положительных значений параметра: для шовной зоны это $+0,42$, для «берегов» $+0,07$ и $+0,12$. Другими словами, поверхностные волны, главным образом определяющие положительный прирост параметра, особенно значимы там, где поверхность коренных пород отсутствует (разрушена) или погружена, т. е. над шовной зоной разлома. На «берегах» значения параметра много ниже, а распределения компактнее, острее.

Аналогичен (согласно теореме Винера-Хинчина) подход с использованием спектральной матрицы (3×3) , где последняя определена как

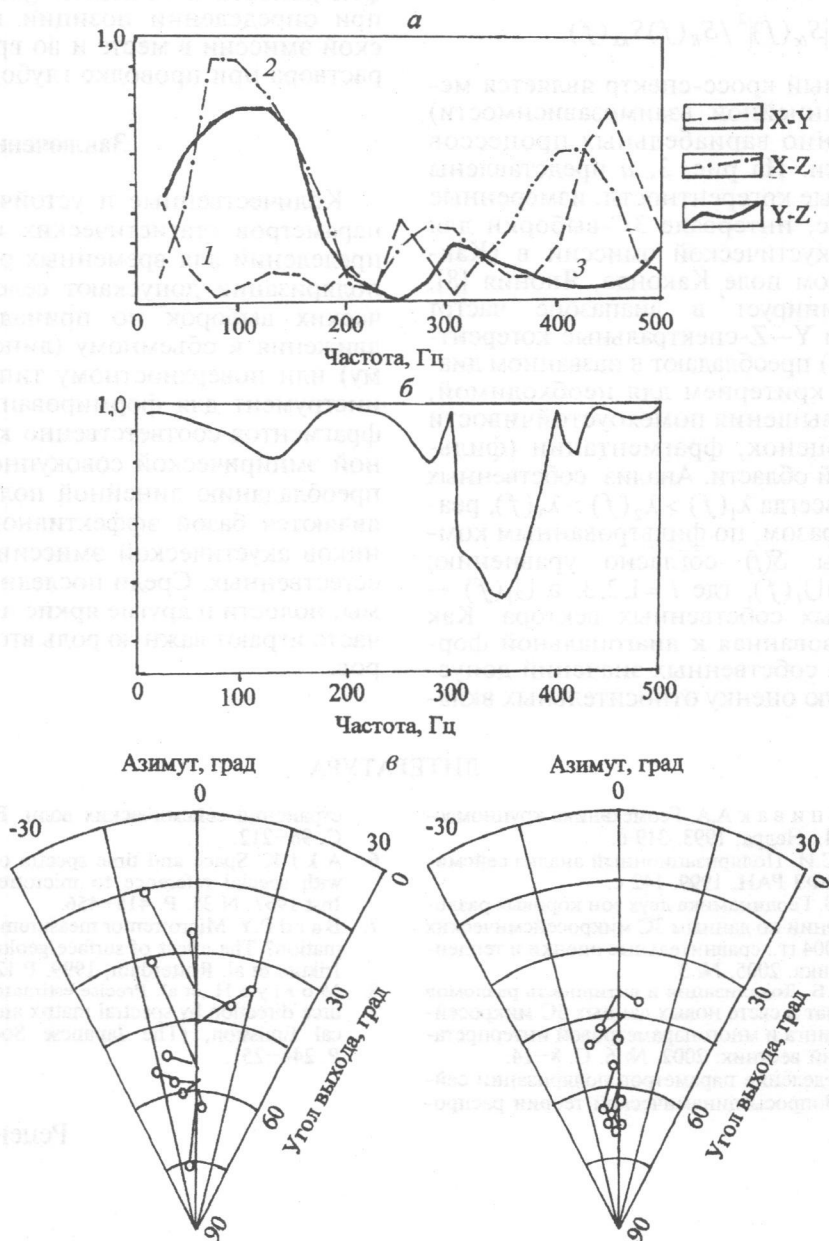


Рис. 3. Эмпирические «спектральная когерентность» (а) и «вклад» (б), а также рассеяние и прирост точности оценок азимута источника и угла выхода акустической эмиссии (справа) по сравнению с обычным (слева) подходом (ε) по 11 оценкам; истинный азимут близок к -5° , истинный угол выхода — к 60°

$$S(f) = \begin{vmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{vmatrix}, \text{ а элементы главной диагона-}$$

ли $S_{ll}(f)$ при $l = x, y, z$ — это спектры мощности каждой компоненты 3С вектора, $S_{lk}(f)$ при $l, k = x, y, z$ и $l \neq k$ — это кросс-спектры [8] или взаимные спектры мощности. $S(f)$ предполагается эрмитовой матрицей, в частотной области рассматривается как ковариационная, т. е. содержит всю необходимую информацию для качественной (по типу) и количественной характеристик поляризации. В случае линейной поляризации в общем комплексные кросс-спектры являются действительными из-за отсутствия межкомпонентных фазовых сдвигов. Спектральная когерентность:

$$Coh^2(f) = |S_{lk}(f)|^2 / S_{ll}(f)S_{kk}(f)$$

или нормализованный кросс-спектр является мерой линейности (линейной взаимозависимости) двух пространственно переменных процессов в частотной области. На рис. 3, а представлены парные спектральные когерентности, измеренные в начальном, 20 мс, интервале 3С-выборки для высокочастотной акустической эмиссии в (Каконда) геотермальном поле, Каконда, Япония [8], где Р-волна доминирует в диапазоне частот 50—100 Гц. Х—Z- и Y—Z-спектральные когерентности (кривые 2 и 3) преобладают в названном диапазоне, что служит критерием для необходимой, хотя бы в целях повышения помехоустойчивости и достоверности оценок, фрагментации (фильтрации) в частотной области. Анализ собственных значений $\lambda_l(f)$, где всегда $\lambda_1(f) > \lambda_2(f) > \lambda_3(f)$, реализуется, таким образом, по фильтрованным компонентам матрицы $S(f)$ согласно уравнению: $S(f)U_l(f) = \lambda_l(f)U_l(f)$, где $l = 1, 2, 3$, а $U_l(f)$ — три соответствующих собственных вектора. Как результат, преобразованная к диагональной форме матрица из трех собственных значений допускает количественную оценку относительных вкла-

дов последних (Cr) в форму поляризационного эллипсоида. На рис. 3, б отражена частотнозависимая функция $Cr(f) = \lambda_l(f) / \sum_{l=1}^3 \lambda_l(f)$, т. е. спектральный аналог эллиптичности H/V . Направлением главной составляющей вектора $U_l(f)$, связанной с главным собственным значением $\lambda_l(f)$ и с его высоким вкладом $Cr(f) \approx 0,9$, в случае преимущественно одноосной поляризации надежно определены направление выхода сейсмической радиации, азимут и наклон или, другими словами, направление на источник линейно поляризованного излучения (Р-волн). Практическая пеленгация и локация таких естественных источников привела к заключению о более высоких (сравнительно со стандартными подходами) эффективности и точности (рис. 3, в), в том числе при определении позиции источника акустической эмиссии в месте и во время потерь бурового раствора при проводке глубоких скважин.

Заключение

Количественные и устойчивые оценки вида и параметров статистических и спектральных распределений для временных рядов коэффициентов поляризации допускают селекцию микросейсмических выборок по принадлежности волнового движения к объемному (линейно поляризованному) или поверхностному типу. Это эффективный инструмент для формирования представительных фрагментов соответственно каждому типу из полной эмпирической совокупности. Отобранные по преобладанию линейной поляризации фрагменты являются базой эффективной пеленгации источников акустической эмиссии — искусственных и естественных. Среди последних «активные» разломы, полости и другие яркие неоднородности среды часто играют важную роль вторичных ретрансляторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А д у ш к и н В.В., С п и в а к А.А. Геомеханика крупномасштабных взрывов, М.: Недра, 1993. 319 с.
2. А л е к с а н д р о в С.И. Поляризационный анализ сейсмических волн, М.: ОИФЗ РАН, 1999. 142 с.
3. Б е к л е м и ш е в А.Б. Геодинамика двух зон коровых разломов Восточной Румынии по данным 3С микросейсмических скринингов 1999 и 2004 гг.: сравнительные оценки и тенденции // Геоинформатика. 2005. № 3.
4. Б е к л е м и ш е в А.Б. Локализация и активность разломов юго-восточных Карпат в свете новых данных 3С микросейсмического мониторинга и многопараметровой интерпретации // Геофизический вестник. 2002. № 6. С. 8—14.
5. Б ы к о в И.А. Определение параметров поляризации сейсмических волн // Вопросы динамической теории распро-
6. A k i K. Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors // Bull. Earthq. Res. Inst. 1957. N 35. P. 415—456.
7. B a r d P.Y. Microtremor measurements: a tool for site effect estimation? The effect of surface geology on seismic motion / Eds: Irikura et al. Rotterdam, 1999. P.1251—1279.
8. M o r i y a H. et al. Precise estimation of acoustical emission source direction by spectral matrix analysis // Progress in Acoustical Emission, (The Japanese Soc. for NDI), 1990, No.V. P. 244—251.

ВНИИГЕОФИЗИКА
Рецензент — Г.Н. Боганик