



РАСТРОВОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЕКТОРНОЙ СЕЛЕКЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

В.Н. Разнатов

ЗАО "ПАНГЕЯ"

109004, Москва, ул. Александра Солженицына, 27, 5 этаж, Россия; e-mail: info@pangea.ru

При отражении сейсмических волн от границ слоев среды, где проводятся сейсморазведочные работы, сигналы, регистрируемые в точках приема, содержат информацию о направлении векторов движения волн. Применяя методы селекции сейсмических волн по вектору движения частиц среды в этих волнах, можно выделить волны, векторы движения частиц в которых незначительно (единицы градусов) различаются по положению в прямоугольной системе координат. Результаты такой селекции могут быть представлены в виде многоканальной (растровой) записи сигналов. При этом каждая линия записи сигналов будет соответствовать регистрации волн с определенной ориентацией проекций их векторов на радиальную или горизонтальную плоскости. Такая запись позволит анализировать тонкую волновую структуру регистрируемых сигналов, получить в точках их приема уникальные волновые характеристики места проведения сейсморазведочных работ.

Вектор волны, проекция вектора волны, селекция, плоскость проекции, сканирование, растр, угловая избирательность

RASTER REPRESENTATION OF THE RESULTS OF VECTOR SELECTION OF SEISMIC WAVES

V.N. Raznatov

PANGEA Inc.

109004, Moscow, Alexander Solzhenitsyn st., 27, 5 floor, Russia; e-mail: info@pangea.ru

Seismic signals reflected from the subsurface horizons and recorded at the receiver points contain information on the orientation of the vectors of wave motion. The methods of selection of seismic waves by the vector of particle motion allow for identification of the waves with vectors insignificantly different (by several degrees) in a rectangular coordinate system. The results of such selection could be represented in the form of multichannel (raster) signal recording. And each line of the raster image would correspond to recording of waves with certain angular orientation of the projections of their vectors on radial or horizontal plane. Such recording would allow for analysis of fine structure of recorded signals and obtain unique wavefield characteristics at the receiver points within the seismic acquisition area.

Wave vector, projection of the wave vector, selection, projection plane, scanning, raster, angular selectivity

ВВЕДЕНИЕ

При проведении сейсморазведочных работ с использованием в точках приема трехкомпонентных датчиков появляется возможность анализа тонкой волновой структуры регистрируемых сигналов, причем при селекции сейсмических волн по вектору движения частиц среды линейно-поляризованных продольных и поперечных волн, возбуждаемых импульсными и взрывными источниками. При отражении сейсмических волн от границ слоев среды, где проводятся сейсморазведочные работы, сигналы, регистрируемые в точках приема, содержат информацию о направлении векторов движения волн. Особенности состава, мощности и структуры слоев среды, а также формы их границ обуславливают появление множества волн (продольных, поперечных) при их отражении и распространении. Векторы движения частиц среды волн приобретают различную ориентацию в пространстве, отражая особенности среды проведения сейсморазведочных работ. Применяя методы селекции сейсмических волн по вектору движения частиц среды в этих волнах, можно выделить волны, в которых век-

торы движения частиц среды незначительно (единицы градусов) различаются по положению в прямоугольной системе координат. Результаты такой селекции могут быть представлены в виде многоканальной (растровой) записи сигналов. При этом каждая линия записи сигналов соответствует регистрации волн с определенной угловой ориентацией проекций их векторов на радиальную или горизонтальную плоскость. В настоящей статье описаны основы растрового представления результатов векторной селекции сейсмических волн, регистрируемых при проведении сейсморазведочных работ.

ФУНКЦИЯ СЕЛЕКЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Положение векторов сейсмических волн в точке приема определяется их проекциями на плоскости прямоугольной системы координат XY , ZX , ZY или проекциями на горизонтальную XY и радиальную ZR плоскости. Угловое положение проекций векторов продольных и поперечных сейсмических волн в прямоугольной системе координат можно определить для

радиальной плоскости (рис. 1, а) относительно оси Z (углы β_1, β_2) и для горизонтальной плоскости (б) относительно оси X (углы α_1, α_2), используя выходные сигналы трехкомпонентных датчиков. Значения углов α_{12}, β_{12} определяются с использованием формул

$$\alpha_{12} = \arctg U_y / U_x$$

$$\beta_{12} = \arctg U_r / U_z, U_r = \sqrt{U_x^2 + U_y^2}, \quad (1)$$

где U_x, U_y, U_z – компоненты проекций вектора выходных сигналов датчиков, U_r – модуль проекции вектора выходных сигналов на плоскость XY .

На рис. 1 представлены взаимные положения векторов выходных сигналов датчиков продольных P и вторичных поперечных волн SV, SH на плоскостях ZR и XY . Положение проекций векторов продольных P и поперечных волн SV, SH различается на 90° соответственно на плоскостях ZR (а), XY (б). Положение проекций векторов продольных и поперечных волн на плоскостях ZR и XY изображено исходя из условий совпадения лучей продольной и поперечной волн. Реально вследствие различия скоростей распространения продольных и поперечных волн, влияния особенностей среды и конфигурации границ ее слоев на положение векторов волн сейсмические лучи продольных и поперечных волн могут не совпадать. Это может привести к изменению взаимного положения проекций векторов продольных и поперечных волн на заданные плоскости. Однако различие углового положения проекций векторов продольных и поперечных волн будет оставаться существенным, что позволит провести эффективную раздельную селекцию продольных и поперечных сейсмических волн с использованием функции селекции сейсмических волн по угловому положению проекций векторов на плоскости XY и ZR .

Из соотношений (1) определяются значения азимута положения проекций векторов на горизонтальной плоскости α_1 (для продольной волны P), α_2 (для поперечной волны SH), а также угол выхода β_1 сейсмического луча (сейсмической радиации) в радиальной плоскости для продольной волны относительно вертикали (ось Z). Для поперечных волн SV положение вектора определяется углом β_2 также в радиальной плоскости относительно вертикали (ось Z). При этом $\beta_1 + \beta_2 = \pi/2$. Для продольной волны P и

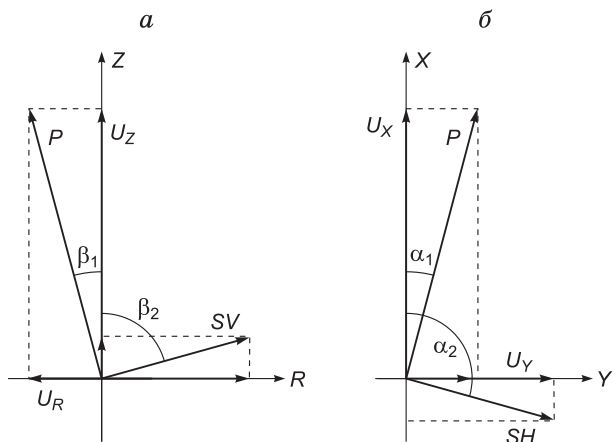


Рис. 1. Взаимное положение векторов продольных P и поперечных волн SV и SH на радиальной плоскости ZR (а), на горизонтальной плоскости XY (б).

поперечной волны SH положение их проекций векторов на горизонтальную плоскость определяется углами соответственно α_1 и α_2 относительно оси X , $\alpha_2 = \alpha_1 + \pi/2$. При этом ось X системы координат ориентируется в направлении на С–Ю.

Функция селекции сейсмических волн с использованием угловых координат α и β проекций их векторов представляется в виде

$$F(q - kg) = \frac{[1 + \cos(q - kg)]^2}{[1 + \cos(q - kg)]^2 + 4K^2 \sin^2(q - kg)},$$

где $q = \alpha, \beta$ – в зависимости от того, на какой плоскости (XY или ZR) производится определение углового положения проекции вектора волны; $k = 0 \dots n$ – номер дискретного смещения угла при селекции волны; $n = Q/g$; Q – диапазон селекции волны по угловому положению проекции ее вектора, $Q = 0 \dots 90^\circ$ для плоскости ZR , $Q = 0 \dots 180^\circ$ для плоскости XY ; g – шаг углового смещения функции селекции; $K = 10 \dots 300$ – коэффициент, определяющий избирательность функции селекции по направлению ориентации вектора сейсмической волны.

Результат селекции волн представляется в виде

$$S = M_m [U_x, U_y, U_z] F(q - kg),$$

где $M_m [U_x, U_y, U_z]$ – модуль вектора сейсмического сигнала, m – номер цифрового отсчета модуля вектора сигнала.

Для линейно-поляризованной сейсмической волны каждому дискретному отсчету компонент вектора сигнала соответствует одно и то же значение углового положения проекции вектора сигнала на плоскостях XY, ZR , т. е. $\alpha = \text{const}$, $\beta = \text{const}$. При значении $q - kg = 0$ функция селекции $F(q - kg) = 1$. При этом результат селекции S соответствует значению модуля M_m для линейно-поляризованной волны. Значение kg , при котором $S = M_m$, определяет угловую ориентацию проекции вектора на плоскость XY или ZR .

Диапазоны углового положения проекций векторов волн при их селекции могут выбираться в виде полос, перекрывающих возможное изменение углового положения проекций вектора продольной или поперечной волн, например $20 \dots 30^\circ$ для продольной волны, $110 \dots 120^\circ$ для поперечной волны. Использование таких диапазонов при малых значениях шага углового смещения функции селекции g позволит определять с большей точностью угловое положение проекции вектора на плоскости при прохождении сейсмическими волнами границ различных слоев среды, повысить угловую разрешающую способность положения векторов волн.

На рис. 2 представлена зависимость выходного сигнала селектора $U_{\text{вых}}$ от разности $(q - kg)$ в функции селекции $F(q - kg)$.

$$U_{\text{вых}} = U F(q - kg),$$

где $U = U_r$ или $U = U_{xy} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}$.

Функция селекции характеризуется высокой избирательностью к угловому положению проекции вектора сейсмической волны. Ширина диаграммы избирательности селектора при значении $K = 100$ может составлять доли градуса (уровень 0.7 характеристики). При значении $q - kg = 1^\circ$ ослабление $U_{\text{вых}}$ достигает

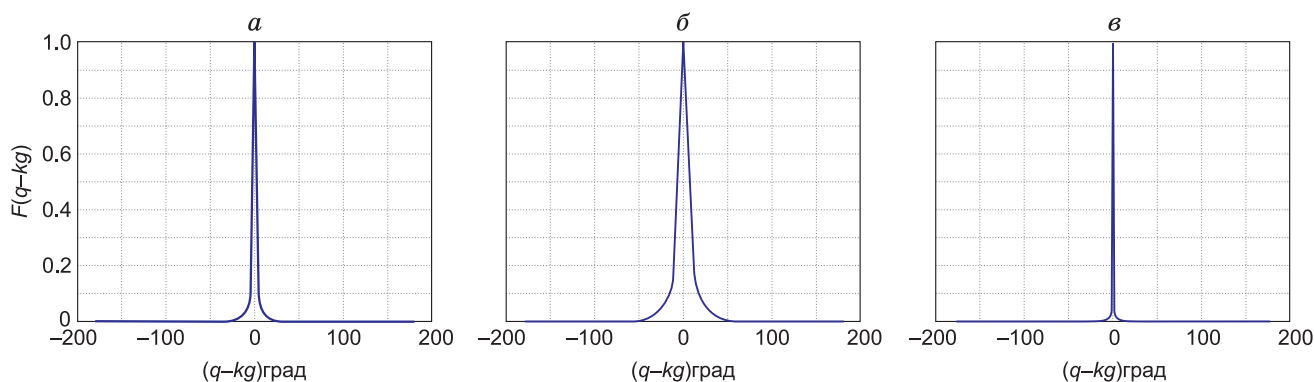


Рис. 2. Зависимость выходного сигнала селектора от разности углового положения проекции вектора сейсмической волны q и углов kg при значении масштабного коэффициента в формуле функции селекции: $K = 30$ (а), $K = 10$ (б), $K = 100$ (в).

> 30 дБ. При разности 3° ослабление сигнала составит более 66 дБ. При значении $q - kg = 0$ выходной сигнал селектора соответствует значению модуля вектора сейсмической волны или модуля проекции вектора волны на ту или иную плоскость прямоугольной системы координат. Это позволяет производить селекцию типов сейсмических волн. Выбор значения модуля вектора или модуля проекции вектора сейсмической волны на плоскость XU может определяться особенностями ориентации вектора сейсмической волны при прохождении ею среды проведения сейсморазведочных работ, характеризующейся сложной структурой. Слоистая структура среды может привести при распространении сейсмических волн в прямом направлении от источника и отражении от границ раздела сред к изменению положения их векторов относительно границ слоев, в общем случае различающихся по своей конфигурации.

Максимуму функции селекции S соответствуют совпадения угловых координат q проекции вектора той или иной сейсмической волны в прямоугольной системе координат и значений угла селекции kg . Проводя селекцию сейсмических волн от начала записи результатов регистрации сейсмических сигналов трехкомпонентными датчиками до ее окончания путем последовательного изменения k , можно выделить сигналы, соответствующие векторам всех волн, отраженных от границ слоев среды проведения сейсморазведочных работ. При суперпозиции волн будут выделяться только части сигналов, соответствующие моментам времени, свободным от наложения волн одной на другую.

РАСТРОВОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЕКТОРНОЙ СЕЛЕКЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Эффективность векторного анализа результатов регистрации сейсмических волн при проведении сейсморазведочных работ в значительной мере будет зависеть от формы их представления. Одним из вариантов формы представления результатов векторного анализа является вариант растрового представления результатов селекции сейсмических волн по вектору их ориентации (подобие телевизионного строчного изображения картины одного кадра), при котором на соответствующей строке растра последовательно изображаются модули векторов с ориентацией в одном из направлений $0, g, 2g, 3g, \dots, kg$.

При растровом представлении результатов селекции сейсмических волн первоначально осуществляется выбор плоскости, на которую проецируются векторы сейсмических волн. Такой плоскостью может быть одна из двух плоскостей – XU или ZR . Для выбранной нами плоскости XU для каждого отсчета компонент проекции вектора $U_x(n\Delta t)$ и $U_y(n\Delta t)$ определяются угловые координаты $\alpha(n\Delta t)$ и значение модуля проекции вектора $U_{xy}(n\Delta t)$:

$$\alpha(n\Delta t) = \arctg[U_y(n\Delta t) / U_x(n\Delta t)];$$

$$U_{xy}(n\Delta t) = \sqrt{U_x^2(n\Delta t) + U_y^2(n\Delta t)} + d, d = L / k;$$

$$U_{\text{вых}} = U_{xy}(n\Delta t) F[\alpha(n\Delta t) - kg],$$

$$k = 0 \dots N, g = 1 \dots 3^\circ, N = Q / g,$$

где n – номер отсчета выходных сигналов геофонов; d – смещение линий растра по вертикали (в мм); k – номер линии растра; L – размер растра по вертикали (в мм); N – общее число линий растра; Q – диапазон углов селекции волн по их вектору.

На рис. 3 представлен пример растрового изображения результата селекции сейсмических волн по вектору выходных сигналов трехкомпонентных датчиков с использованием метода сканирования углового положения проекции вектора сигналов на плоскости ZR и XU . Результаты сканирования представляются линиями записи $U_{\text{вых}}$, длительность которых соответствует длительности времени регистрации сигналов, зарегистрированных трехкомпонентным датчиком от однократного возбуждения сейсмических волн взрывного или импульсного источника. При этом метод сканирования углового положения проекций векторов состоит в следующем. На первой линии растра выделяются все волны с ориентацией проекций векторов в горизонтальной плоскости по азимуту, соответствующему 0° ($k = 0$). На последующих линиях выделяются волны с ориентацией проекций векторов в направлениях $g, 2g, \dots, kg$. Линии результатов селекции смещаются по вертикали одна относительно другой на величину d . В итоге вся векторная картина зарегистрированных сейсмических волн будет отображена на растре плоскости XU или ZR в виде модулей векторов (или их частей при суперпозиции волн), совпадающих по ориентации в соответствующей плоскости с значением углов селекции (сканирования) волн g .

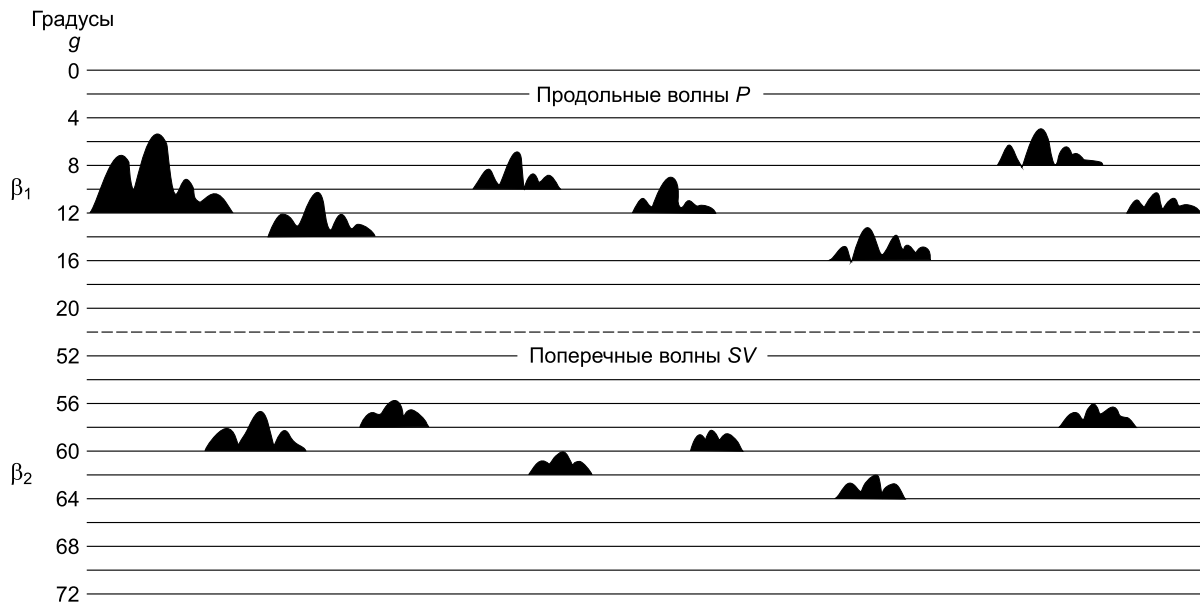


Рис. 3. Пример растрового изображения результатов векторной селекции продольных волн P и поперечных волн SV (плоскость ZR), шаг смещения функции селекции по углу $g = 2^\circ$.

Начальный угол шага сканирования g проекций векторов сейсмических волн может быть выбран, исходя из условия более точного совпадения q и kg . При этом значение шага векторной селекции сейсмических волн может быть $< 1^\circ$. Диапазон углового сканирования проекций векторов сейсмических волн может быть установлен, например, в пределах $Q = 10\text{--}40^\circ$ при шаге изменения угла векторной селекции сейсмических волн $g = 0.1\text{--}0.2^\circ$.

Для горизонтальной плоскости XY диапазон угловой векторной селекции может составлять $0\text{--}180^\circ$. Соответственно при шаге селекции по углу $g = 1^\circ$ число линий в растре будет в последнем случае составлять $k = 181$. На растрах плоскостей XY и ZR будет отображаться вся векторная картина сигналов, зарегистрированных в точке приема сейсмических волн. Эта картина будет отображать особенности структуры среды проведения сейсморазведочных работ, характеризующейся особенностями возникновения и распространения в ней различных сейсмических волн (продольных, поперечных).

Высокая угловая избирательность функции селекции (масштабный коэффициент $K > 100$) может привести к пропуску выделения той или иной сейсмической волны вследствие несовпадения углов ориентации вектора сейсмической волны q с шагом селекции g . Для устранения этого явления возможен переход на режим селекции с меньшим шагом по углу g или использование функции селекции с меньшим значением масштабного коэффициента ($K = 10\text{--}30$). Меньшему значению масштабного коэффициента K соответствует более широкая диаграмма угловой избирательности функции селекции (см. рис. 2, а, б).

При суперпозиции сейсмических волн в моменты наложения одной волны на другую движение частиц среды может представляться слабонаправленным. Годограф вектора (линия, описываемая концом вектора), построенный с использованием выходных сигналов трехкомпонентных датчиков, может существенно отличаться в эти моменты от прямой линии. По этой

причине вектор выходных сигналов датчиков при суперпозиции сейсмических волн (или при наложении помехи) может совершать вращательное движение в одном или другом направлении. Угловое положение вектора на временном интервале наложения волн будет соответственно изменяться во времени. При селекции сейсмических волн в случае вращения вектора момент совпадения мгновенных значений углового положения вектора и угла функции селекции будет кратковременным и однократным за один оборот вектора для каждого значения kg . Чем выше угловая избирательность функции векторной селекции волн, тем короче временной интервал совпадения углового положения вектора q при его вращении и шага селекции kg . Вследствие этого при суперпозиции сейсмических волн в течение времени наложения волн результат селекции будет представляться на каждой линии (или части линии) растра очень коротким одиночным импульсом для каждого шага смещения функции селекции g за один оборот вектора. Полная картина результата векторной селекции зарегистрированных сейсмических волн при проведении сейсморазведочных работ будет представляться растрами по плоскостям XY , ZR , располагаемыми на экране одного или двух мониторов. При наложении сейсмических волн одна на другую на линиях растра будут отображаться только части модуля векторов волн, соответствующие времени отсутствия суперпозиции волн.

Следует заметить, что при отражении сейсмических волн от границ слоев среды проведения сейсморазведочных работ, которые в общем случае будут иметь различную конфигурацию, векторы волн будут менять свою первоначальную ориентацию, полученную при отражении от нижних границ слоев среды. Реально сейсмические волны, отраженные от нижних слоев среды, при прохождении большого числа слоев к точке приема будут характеризоваться векторами, многократно меняющими свою ориентацию в пространстве. Степень изменения ориентации векторов волн при этом может в определенной мере зависеть

от числа слоев, пройденных той или иной волной, и от характеристик среды (наклона границ слоев, скорости распространения волн, однородности среды). Использование вертикального сейсмического профилирования (ВСП) позволит путем установки трехкомпонентных датчиков на разной глубине в скважине сокращать число слоев, которые проходят сейсмические волны. Соответственно, уменьшится число возможных изменений положения векторов волн в пространстве.

При интерпретации результатов векторной селекции сейсмических волн представляется важным наличие изображения на первых линиях раstra сигналов, зарегистрированных трехкомпонентным датчиком, а также модулей векторов и их радиальных компонент. Использование таких записей расширит возможности анализа информации, получаемой от трехкомпонентных датчиков при проведении сейсморазведочных работ, путем сопоставления изображения модулей векторов сигналов и результатов селекции волн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Идея растрового представления результатов селекции сейсмических сигналов впервые описана Е.И. Гальпериным [1955, 1977]. Реализация этой идеи осуществлялась с помощью сейсмоприемников, устанавливаемых в горизонтальной и вертикальных плоскостях с разными сдвигами по углам их ориентации. Результат регистрации сейсмических сигналов от каждого датчика выводился на свою линию многоканального самописца. По положению линии, соединяющей максимумы сигналов на каждой линии записи, определялась поляризация сейсмических волн и оценка углов ориентации вектора сейсмической волны. Вследствие малой пространственной избирательности каждого датчика, а также из-за различий их частотных характеристик оценка поляризации сейсмических волн и углов ориентации векторов сейсмических волн осуществлялась с невысокой точностью. Ширина характеристики пространственной избирательности такого сейсмоприемника составляет 90° на уровне 0.7. При такой пространственной избирательности сейсмоприемником воспринимаются сейсмические волны без разделения по ориентации их векторов в пределах 90° .

Применение функции селекции сейсмических волн по вектору смещения частиц среды открывает возможности анализа тонкой структуры сейсмических явлений в точках приема сигналов при проведении сейсморазведочных работ. Реализация растрового представления результатов векторной селекции, изложенного в настоящей статье, позволит получить уни-

кальные волновые характеристики среды в точках приема при проведении сейсморазведочных работ. При этом для приема сейсмических сигналов необходимо использовать трехкомпонентные датчики с идентичными частотными характеристиками приемных каналов. Варианты построения указанных датчиков представлены в [Разнатов, 2011]. Из известных трехкомпонентных датчиков наиболее соответствуют идее реализации растрового представления результатов векторной селекции сейсмических волн цифровые трехкомпонентные акселерометры, изготовленные по технологии MEMS (Sercel, Франция), а также VectorSeis (США), с собственной частотой 1 кГц. Частотная характеристика этих акселерометров имеет подъем 40 дБ на декаду при регистрации движения частиц среды по смещению в полосе частот, используемой при проведении сейсморазведочных работ. Это может привести к повышенному уровню регистрируемых высокочастотных помех производственного или естественного характера, что может сделать необходимой коррекцию частотных характеристик приемных каналов с целью снизить влияние уровня таких помех на качество регистрируемых сигналов.

Необходимо разработать соответствующее программное обеспечение для отображения результатов селекции сейсмических волн на одном или двух мониторах. Экспериментальные исследования с использованием цифровых акселерометров в реальных условиях сейсморазведочных работ позволят установить эффективность растрового представления результатов селекции линейно-поляризованных сейсмических волн для решения задачи поиска месторождения нефти или газа при использовании ограниченного числа точек приема сейсмических сигналов. Особенности изображения векторной картины зарегистрированных сейсмических волн, отраженных от границ слоев среды в известных местах наличия углеводородов, позволят установить связь растрового представления результатов селекции сейсмических волн с наличием их месторождения.

Литература

- Гальперин Е.И. Азимутальный метод сейсмических наблюдений. М., 1955.
Гальперин Е.И. Поляризационный метод сейсмических исследований. М.: Недра, 1977.
Разнатов В.Н. Селекция линейно поляризованных сейсмических волн. М.: Буки Веди, 2011. 172 с.

*Поступила 15 сентября 2014 г.,
в окончательном варианте – 5 декабря 2014 г.*

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

РАЗНАТОВ Владимир Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ЗАО “ПАНГЕЯ”.
Тел.: +7 916 503 95 94, e-mail: raznatov@yandex.ru