

Технология построения сейсмических изображений

Е. В. Рабинович, Г. С. Шефель, А. В. Жуков

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, Россия. 630090, просп. К. Маркса, д. 20.

Аннотация – Предложена идея оригинальной технологии построения сейсмических изображений. Технология отличается от традиционной структурной устойчивостью решения обратной кинематической задачи сейсморазведки. Она основана на применении алгоритмов работы адаптивных фазированных антенных решеток для обработки сейсмических данных. Предлагается два подхода к обработке. Первый заключается в поиске направления, имеющего максимум диаграммы направленности сейсмической фазированной антенной решетки, в узлах изохроны отражения, в которых осуществляется обнаружение сейсмического импульса. Второй подход использует метод углового сверхразрешения Кейпона, который осуществляет поиск максимума пеленгационного рельефа каждой изохроны отражения.

Ключевые слова – сейсморазведка, антенная решетка, метод Кейпона.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных целей сейсмических исследований, направленных на изучение глубинного строения земных недр, является детальное трехмерное изображение строения Земли [1]. Получить такое изображение локального объема геологической среды можно на основе возбуждения в нем упругих волн. Такие волны, распространяясь в толще Земли, взаимодействуют с глубинными границами пластов, составляющих исследуемый объем, и порождают вторичные сейсмические волны различной физической природы (прямые, отраженные, преломленные и др.).

Для построения изображений глубинного строения земных недр (вертикальных и горизонтальных сейсмических разрезов, временных срезов, зоны трещиноватости, возникающей при гидравлическом разрыве пласта, кубов данных и пр.) используются пространственные и временные характеристики пластов горных пород, составляющих земную толщу, а также структура и свойства разделяющих их границ.

Сейсморазведка является основным методом нефтегазовой разведочной геофизики, поскольку дает самое детальное изображение осадочной толщи [2].

В основе построения сейсмических изображений лежат решения прямой и, в первую очередь, обратной кинематических задач сейсморазведки. Эти решения используют кинематические параметры временных полей сейсмических волн, распространяющихся в изучаемой геологической среде, для установления скоростных и геометрических параметров этой трехмерной среды.

Прямая кинематическая задача сейсморазведки заключается в нахождении времен

прихода волн на устройства регистрации (сейсмоприемники), если заданы глубинно-скоростная модель среды, положение источника и момент возбуждения упругой волны.

Обратная кинематическая задача сейсморазведки заключается в нахождении пространственных характеристик границ глубинных пластов, если заданы вид траекторий распространения, скорость и времена прихода волн на сейсмоприемники, а также характеристики кривизны и шероховатости этих границ.

Обратные задачи некорректны, в них нарушено хотя бы одно из условий корректности решения – это условия существования, единственности и устойчивости решения. Поэтому даже приближенное решение обратной кинематической задачи сейсморазведки возможно лишь в рамках некоторых априорных предположений относительно строения и свойств исследуемой среды.

Эти предположения, в первую очередь, реализуются в рамках геометрической сейсмики, которая сводит процесс распространения волны к изучению формы волновых фронтов и сейсмических лучей. Такой подход представляет собой предельный случай, когда в волновом уравнении длина волны стремится к нулю, что схематизирует процесс распространения волны, выделяя, прежде всего, движение энергии сейсмического импульса как целого.

Решить обратную кинематическую задачу сейсморазведки означает так подобрать модель среды и оценки ее параметров, чтобы результат решения прямой задачи совпадал с полученными временами прихода отражений от границ глубинных пластов среды. В действительности исходные времена прихода сейсмических волн известны не точно, а с некоторыми погрешностями. Поэтому в качестве критерия для решения обратной задачи используется не наилучшее, а приемлемое по точности совпадение с наблюдаемыми временами [3].

Известно множество алгоритмов приближенного решения обратной кинематической задачи сейсморазведки. Опыт их применения показывает, что при одних и тех же наблюдениях результаты решения могут заметно отличаться друг от друга, что является следствием отсутствия единственности и структурной неустойчивости решения обратной задачи [4].

Таким образом, неустойчивость решений обратной кинематической задачи сейсморазведки приводит к некачественному построению сейсмических изображений.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С начала 20-х годов XX века основой технологий построения сейсмических изображений на базе решения обратной кинематической задачи сейсморазведки является интерпретация собранных на поверхности наблюдения данных о временном поле сейсмических волн, отраженных или преломленных от глубинных границ. Это поле регистрируется сейсмоприемниками при неизменном положении источника возбуждений (взрыва или вибратора).

Сейсмические волны регистрируются в точках профиля наблюдения в виде временных рядов (сейсмотрасс), задающих форму волны в виде сейсмических импульсов. Каждая сейсмотрасса является результатом интерференции волн, пришедших на сейсмоприемник.

Далее представление предлагаемой технологии построения сейсмических изображений ведется в сравнении с традиционным решением обратной кинематической задачи сейсморазведки на отраженных волнах, основанном на интерпретации данных, полученных в рамках наиболее распространенного на практике метода общей средней точки (ОСТ).

Изображение одинаково упорядоченных совокупностей импульсов на сейсмотрассах, расположенных последовательно вдоль профиля наблюдения, называют осями синфазности волн. Разным структурам глубинных границ соответствуют разные формы осей синфазности. Первые вступления (начала) импульсов, образующих ось синфазности, располагаются на сейсмограммах вдоль кривых, которые называются годографами.

Годограф волны того или иного типа – зависимость времени распространения волны от расстояния между источником возбуждения и приемником. Для самых простых глубинно-скоростных моделей среды известны аналитические выражения для формы годографов. Для других моделей эти выражения имеют различные приближенные представления.

Интерпретация данных сейсморазведки имеет две основные цели: подбор по наблюдаемым данным модели среды и оценка ее параметров, а также вычисление по полученным годографам осредненных скоростей распространения отраженных волн в среде.

Структура глубинно-скоростной модели среды выявляется в результате прослеживания и корреляции на исходных сейсмограммах интенсивных и протяженных осей синфазности полезных волн. Количество отражающих границ модели соответствует количеству выделенных осей.

Выделение осей синфазности целевых волн позволяет оценить времена их прихода, т. е. аппроксимировать годографы этих волн. Однако эта аппроксимация наблюдаемых годографов характеризуется неопределенностью, связанной с трудностью выявления первых вступлений импульсов в условиях помех и шумов микросейсмической обстановки при регистрации сейсмических сигналов. Присутствующие на сейсмограммах нецелевые волны также увеличивает неопределенность прослеживания осей синфазности.

Процедура выделения осей синфазности полезных волн имеет устойчивое решение только в рамках самой простой горизонтально-слоистой модели среды при постоянной скорости распространения волн и их зеркальном отражении от границ слоев. Данной модели соответствует гиперболический вид наблюдаемых осей синфазности и годографа.

Для получения горизонтальных границ отражения осуществляется спрямление осей синфазности и компенсация нелинейности годографов. Оси спрямляются путем ввода в сейсмотрассы исходных сейсмограмм кинематических поправок – временных сдвигов, соответствующих временам распространения однократно отраженных волн.

Точный расчет кинематических поправок возможен только для известных структурных и скоростных параметров модели среды. Поэтому расчет и ввод кинематических поправок имеет итеративный характер и выполняется многократно, исходя из последующих результатов вычисления скорости распространения волн.

В каждой ОСТ после спрямления годографов и выравнивания временных сдвигов сейсмотрассы суммируются и нормируются, образуя одну сейсмограмму ОСТ.

Результаты интерпретации представляются в виде временного разреза ОСТ – набора сейсмотрасс ОСТ профиля. По приближенным выражениям для полученных форм годографов оцениваются параметры интегральных временных характеристик модели, таких как средняя, эффективная, пластовая скорости, средние градиенты скорости по глубине и/или удалению.

Для глубинно-скоростной модели среды временной разрез ОСТ обладает полным подобием по отношению к реальному глубинному разрезу. Однако уже при одной наклонной границе это

подобие нарушается, и для получения правильного изображения отражающих границ временной разрез ОСТ подвергается дополнительной обработке – миграции.

Сутью сейсмической миграции является продолжение волнового поля, полученного на поверхности наблюдения, в направлении обратном распространению волн. Продолжение осуществляется при помощи решения волнового уравнения. От корректности решения зависит качество сейсмической миграции. Различные сложные вычислительные процедуры сейсмической миграции имеют свои достоинства и недостатки, но все они основаны на упрощенных глубинно-скоростных моделях среды.

Построение мигрированной глубинно-скоростной модели часто является субъективным, особенно в случае, когда мигрированные данные с целью лучшей подгонки модели стараются увязать со скважинными данными. В такой ситуации возникает обычная проблема некорректности решения – существует множество моделей, которые, удовлетворяя зарегистрированным данным, могут привести к одинаковому результату.

Таким образом, технология построения сейсмических изображений на базе решения обратной кинематической задачи сейсморазведки, основанная на процедурах интерпретации и миграции полей сейсмических волн, характеризуется высокой степенью неопределенности оценки параметров моделей. Она базируется, в основном, на простейшей горизонтально-слоистой модели среды и осредненных параметрах ее характеристик.

В данной работе предлагается оригинальная технология построения сейсмических изображений, свободная от некорректности решения обратных задач. Рассмотрение ограничивается только двумерными кинематическими параметрами волн на основе геометрической сейсмики продольных отраженных волн. Параметры, связанные с динамикой возбуждения и распространения волн, а также изменением формы и интерференцией сейсмических импульсов полагаются идеальными.

Технология основана на локации (непосредственном измерении) координат точек отражения сейсмических волн от границ пластов исследуемой среды.

Здесь также требуются априорные предположения о характеристиках глубинно-скоростной модели среды. Однако по сравнению с технологией интерпретации и миграции полей сейсмических волн, новая технология позволяет использовать структурно устойчивые алгоритмы построения сейсмических изображений.

III. ТЕОРИЯ

Методы устойчивого решения задач обнаружения отраженных импульсов при различных условиях возбуждения и приема хорошо изучены в радиолокации. Поэтому идея предлагаемой технологии основана на обнаружении сейсмических импульсов, составляющих форму продольной сейсмической волны, отраженной от глубинной границы среды.

Если такие импульсы обнаружены то, в рамках априорных предположений о свойствах среды, можно осуществить локацию (оценку значений) координат их источников, представляющих точки отражения от глубинной границы среды или излученных в процессе образования трещин при проведении гидравлического разрыва пласта.

По полученным значениям координат можно построить изображение линии границы путем последовательного соединения точек отражения.

Таким образом, совместное использование поля времен отраженных волн, полученного по наблюдательным данным, и результата решения задачи обнаружения отраженных импульсов может обеспечить корректное и устойчивое построение сейсмических изображений.

По полевым данным, подвергнутым предварительной обработке в виде очистки от шумов и помех, регулировки усиления, выявления вида сейсмического импульса и многого другого, производится формирование сейсмограмм, характеризующих волновое поле, созданное источником возбуждения колебаний.

Глубинно-скоростная модель среды, с известным распределением скоростей, представляет закон распространения возмущения от точечного источника колебаний, т. е. с кинематической точки зрения – форму сейсмических лучей и фронтов волн для всех сейсмотрасс. Аналитические выражения для формы лучей и изохрон (кривых равного времени прихода волны от каждого источника колебаний) позволяют задать выражения для оценки кинематических параметров сейсмических импульсов отраженных волн – скорости распространения в среде и координат точек отражения от глубинных границ.

Эти оценки обеспечивают, в рамках заданной глубинно-скоростной модели среды, возможность локации координат точек отражения от глубинной границы среды.

Рассмотрим два метода обнаружения сейсмических импульсов, являющиеся основой локационной технологии построения сейсмических изображений. Это метод квадратурного корреляционного обнаружения сигнала с равномерно распределенной фазой [5] и метод углового сверхразрешения Кейпона [6], позволяющий оценить направление приема сигналов (пеленг источников сигналов) [7].

Локация источников сейсмических импульсов осуществляется совокупностью сейсмоприемников, расположенных на земной поверхности по прямой линии на равных расстояниях друг от

друга. В первом методе эта совокупность используется как простая фазированная антенная решетка, а во втором как адаптивная фазированная антенная решетка.

Использование алгоритмов обработки сигналов фазированными антенными решетками обеспечивает увеличение отношения мощности полезного сигнала к средней мощности шума. Благодаря этому система локации источников сейсмических импульсов способна обнаруживать слабые полезные сигналы с заданного направления на фоне сейсмических помех искусственного и естественного характера. А при использовании адаптивных фазированных антенных решеток подавлять шум «конкурирующих» импульсов, приходящих с других направлений.

Фазированная антенная решетка осуществляет обработку сигналов, которая заключается в формировании выходного сигнала путем суммирования принятых сигналов с весовыми коэффициентами фазовращателей. Диаграммой направленности (ДН) антенной решетки называется зависимость комплексной амплитуды выходного сигнала от направления прихода плоской волны единичной амплитуды.

Задача сейсмической фазированной антенной решетки (СФАР) установить максимум ДН в направлении на узлы сетки локации (размеченные с заданным шагом точки изохрон отражения), в которых будет осуществляться обнаружение сейсмического импульса.

Обнаружение импульса отражения по методу углового сверхразрешения Кейпона осуществляется сейсмической адаптивной фазированной антенной решеткой (САФАР) по максимуму пеленгационного рельефа каждой изохроны отражения.

САФАР обеспечивает, кроме установления максимума ДН в направлении приема ожидаемого полезного сигнала, максимально возможное подавление шума сейсмических импульсов, приходящих с других направлений. При этом число и направления воздействия шумов и помех заранее не известны. САФАР отличается от СФАР тем, что фазовращатели заменяются регулируемые комплексными весовыми коэффициентами, изменяющими входные сигналы, как по амплитуде, так и по фазе. Выбор весовых коэффициентов производится с целью максимального подавления шумов и помех при минимальном ослаблении полезного сигнала.

Форма каждой изохроны отражения вычисляется, в соответствии с глубинно-скоростной моделью среды, по измеренному времени прихода соответствующих ей импульсов отражения, расстоянию между источником колебаний и сейсмоприемником и скоростью распространения волн в среде.

Рассмотрение ограничим, для большей наглядности, простейшей моделью границы однородного слоя с постоянной скоростью распространения сейсмических волн. В этой модели изохрона имеет форму эллипса, а волны распространяются по лучам в виде прямых линий.

Работа СФАР согласно методу квадратурного корреляционного обнаружения импульса отражения осуществляется на основе вычисления суммарных сейсмограмм для заданных узлов – точек, лежащих на изохроне отражения [8].

Для СФАР K -мерный столбец нормированных коэффициентов фазовращателей имеет вид

$$\mathbf{W}(\psi) = (w_1(\psi), w_2(\psi), \dots, w_K(\psi))^T,$$

$$w_k^* = \frac{1}{\sqrt{K}} \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} (k-1)d \sin(\psi)\right],$$

где ψ – параметр, определяющий значения весовых коэффициентов; λ – длина волны; d – нормированное по отношению к длине волны расстояние между сейсмоприемниками.

Векторная форма представления нормированных сейсмических импульсов, поступающих на K сейсмоприемников, имеет вид $\mathbf{s}(t) = \mathbf{S}(\varphi) \exp(j\omega_0 t)$, где

$$\mathbf{S}(\varphi) = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \dots \\ S_K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} d \sin(\varphi)\right] \\ \dots \\ \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} (K-1)d \sin(\varphi)\right] \end{pmatrix}$$

– вектор комплексных амплитуд; φ – угол падения плоской монохроматической волны на профиль наблюдения; ω_0 – несущая частота импульса.

Суммарная сейсмограмма $s(t, \theta)$ вычисляется путем суммирования зарегистрированных сейсмических импульсов с весовыми коэффициентами фазовращателей СФАР, определяемыми задержками распространения сигнала вдоль профиля наблюдения.

$$\begin{aligned} s(t, \theta) &= p(t) \mathbf{W}^H(\psi) \mathbf{S}(\varphi) \exp(j\omega_0 t) = p(t) \sum_{k=1}^K w_k^* S_k \exp(j\omega_0 t) = \\ &= \frac{p(t)}{\sqrt{K}} \sum_{k=1}^K \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} (k-1)d \sin(\varphi - \psi)\right] \exp(j\omega_0 t) = \\ &= p(t) F(\varphi) \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} (K-1)d \sin(\varphi - \psi)\right] \exp(j\omega_0 t) = \\ &= S(t) \exp(j\theta) \exp(j\omega_0 t); \end{aligned}$$

$$|F(\varphi)| = \sqrt{K} \frac{\left| \sin\left[\frac{\pi}{\lambda} d (K-1) \sin(\varphi - \psi)\right] \right|}{K \left| \sin\left[\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\varphi - \psi)\right] \right|}.$$

Здесь $|F(\varphi)|$ – амплитудная ДН СФАР; $p(t)$ – известная функция времени, задающая форму импульса [9]. Верхний индекс «*» обозначает комплексное сопряжение, « T » – операцию транспонирования, а « H » – эрмитовое сопряжение,

т. е. одновременное выполнение операций транспонирования и комплексного сопряжения.

Модель суммарной сейсмограммы, заданной на интервале $[0, T]$, можно представить как колебание, состоящее из суммы квазидетерминированного сейсмического импульса $s(t, \theta) = S(t) \exp[j(\omega_0 t + \theta)]$ и помехи $n(t)$:

$$y(t) = \delta s(t, \theta) + n(t), \quad 0 \leq t \leq T.$$

Здесь $n(t)$ - центрированный белый гауссов шум со спектральной плотностью мощности $N(\omega) = 0.5N_0$.

В квадратурном корреляционном методе обнаружения импульса отражения фаза импульса θ предполагается неизвестной, равномерно распределенной на интервале $[-\pi, \pi]$ случайной величиной.

Задача обнаружения сейсмических импульсов в узлах изохроны отражения, соответствующих максимуму ДН СФАР, осуществляется в соответствии с критерием Байеса, имеющим правило принятия решения, обеспечивающее минимальное значение среднего риска C . Оно зависит от вероятности правильного обнаружения сигнала P_D и вероятности неправильного обнаружения сигнала P_F :

$$C \rightarrow \min \Leftrightarrow P_D - \Lambda_0 P_F \rightarrow \max.$$

При решении задач сейсморазведки естественно положить $\Lambda_0 = \frac{C_{01}}{C_{10}} = 5$, где C_{01} - риск пропуска сейсмического импульса; C_{10} - риск ложной тревоги.

Для принятия решения об обнаружении импульса в узле изохроны отражения, на который сфазирована СФАР, следует вычислить отношение правдоподобия $\Lambda[y(t)]$ реализации суммарной сейсмограммы $y(t)$ и сравнить его значение с Λ_0 . Если $\Lambda[y(t)] > \Lambda_0$, то принимается решение об обнаружении сейсмического импульса ($\delta = 1$), иначе принимается решение, что импульс не обнаружен ($\delta = 0$).

Такая процедура обнаружения реализована в большом числе известных квадратурных корреляторов.

Обнаружение импульса отражения с помощью САФАР осуществляется на основе сканирования ею узлов изохроны отражения, вычисления в них пеленгационного рельефа и выбора узла, отвечающего максимальному значению рельефа.

Модель сейсмограммы, обрабатываемой САФАР, состоящей из K элементов, может быть представлена следующим образом

$$\mathbf{Z} = \sum_{j=1}^J p_j(t) \mathbf{S}(\varphi_j),$$

где J - число дискретных источников сейсмических импульсов; $p_j(t)$ и φ_j - комплексные амплитуда и угол прихода волны, соответствующей индексу j ; $\mathbf{S}(\varphi_j)$ - K -мерный управляющий вектор-гипотеза полезного сигнала, принимаемого решеткой от источника с номером j ; $\mathbf{Z}$ - K -мерный вектор принятого сигнала.

Модель предполагает, что комплексные амплитуды волн различных источников статистически независимы, а сигналы в элементах решетки для каждого источника коррелированы (коэффициент корреляции равен единице). Это значит, что вектор-гипотеза сигнала $\mathbf{S}(\varphi_j)$ каждого источника является детерминированным и представляет одновременно характер волнового фронта и конфигурацию САФАР.

Вектор весовых коэффициентов фазовращателей САФАР, минимизирующий среднюю мощность на выходе антенны по критерию Кейпона имеет вид

$$\mathbf{W} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}(\varphi)}{\mathbf{S}^H(\varphi) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}(\varphi)}.$$

Отношение сигнал/шум для САФАР вычисляется по формуле $Q = \mathbf{S}^H(\varphi) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}(\varphi)$, где $\mathbf{R}$ - максимально правдоподобная выборочная оценка корреляционной матрицы входных сейсмических импульсов.

Построение пеленгационного рельефа осуществляется при сканировании вектором-гипотезой углового сектора, содержащего источник сейсмического импульса и/или помехи любого рода в узлах изохроны отражения. В направлении, отличном от направления на помеху, последняя успешно подавляется и отношение сигнал/шум на выходе антенны получается высоким. Когда вектор-гипотеза $\mathbf{S}(\varphi_j)$ в процессе сканирования попадает на помеху, подавления последней не происходит и отношение Q падает.

Разрешающей функцией или функцией рельефа САФАР, используемой в алгоритме Кейпона, является зависимость величины, обратной Q , от угловой координаты φ :

$$\mu(\varphi) = \frac{1}{\mathbf{S}^H(\varphi) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}(\varphi)}.$$

Функция рельефа подобного вида дает возможность оценить изменение амплитуды отраженных сейсмических импульсов с изменением расстояния между источником возбуждения колебаний и сейсмоприемником, что может использоваться как углеводородный индикатор для газа.

САФАР, оптимизированная по критерию Кейпона стремится подавить любой мешающий источник сейсмического импульса, волновой фронт которого отличается от вектора-гипотезы импульса $\mathbf{S}(\varphi)$. Поэтому средняя мощность на выходе решетки минимальна везде, кроме узкой области углов, где располагается j -й источник сейсмического импульса. Непосредственно в направлении на этот источник функция $\mu(\varphi)$

имеет максимум, поскольку волновой фронт источника $S(\varphi_j)$ совпадает с вектором $S(\varphi)$, а коэффициент передачи САФАР фиксирован и равен единице. Следовательно, сигнал от j -го источника сейсмического импульса не может быть подавлен.

В заключение следует отметить, что локация по методу углового сверхразрешения Кейпона может быть настроена на обнаружение источников сейсмических импульсов в условиях различных глубинно-скоростных моделей среды.

В рамках одной модели среды локация источников сейсмических импульсов может осуществляться не только для отраженных волн, но и для дифрагированных и многократно отраженных волн, а также в ситуациях, связанных с различными локальными отклонениями от базовой модели границ отражения и/или нарушениями ее свойств. Сюда можно отнести выклинивающиеся пласты, дизъюнктивные нарушения, линзы, диапировые структуры и др.

Дополнительная разрешающая способность локации обеспечивается за счет возможности двухэтапной процедуры пеленгации: на первом этапе – перебор векторов-гипотез с относительно большим шагом по узлам основной изохроны отражения. После обнаружения локальных искажений границы можно провести второй этап более детальной фазировки САФАР на объекты среды, отличающиеся отражающими свойствами.

IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В статье изложена основная идея принципиально новой сейсморазведочной технологии, предназначенной для построения сейсмических изображений и некоторые теоретические основания для ее реализации. Технология позволяет устранить или уменьшить неоднозначности, имеющие место при решении обратной кинематической задачи сейсморазведки традиционной технологией построения сейсмических изображений.

Технология имеет целью разведку неисследованных районов для выявления потенциальных нефтегазоносных структур, а также для получения информации об уже эксплуатирующихся или подвергнутых гидравлическому разрыву продуктивных пластах. Применение локационной технологии может обеспечить построение сложных геологических моделей нефтегазовых и иных месторождений. Она может использоваться в условиях взрывной, импульсной и вибрационной сейсморазведки.

За рамками статьи остались материалы, связанные с особенностями практической реализацией технологии. Также не производилось сравнение предложенной и традиционной технологий в различных аспектах,

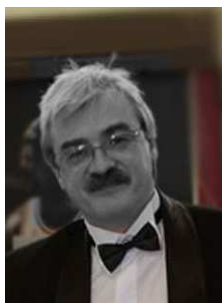
таких как производственные, вычислительные и материальные затраты, точность и разрешающая способность алгоритмов построения сейсмических изображений. Эти материалы послужат основой дальнейших публикаций.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пузырев Н.Н. Интерпретация данных сейсморазведки методом отраженных волн. М.: Гостехиздат, 1959. 452 с.
- [2] Воскресенский Ю.Н. Построение сейсмических изображений. М.: РГУ НГ, 2006. 117 с.
- [3] Глоговский В. М., Лангман С. Л. Свойства решения обратной кинематической задачи сейсморазведки. Технологии сейсморазведки. Новосибирск. ИНГГ им. А.А. Трофимука СО РАН, Т. 1. 2009. С. 10–17.
- [4] Глоговский В.М., Мешбей В.И., Цейтлин М.И., Лангман С.Л. Кинематико-динамическое преобразование сейсмической записи для определения скоростного и глубинного строения среды. Сборник докладов второго научного семинара стран-членов СЭВ по нефтяной геофизике. Т. 1. Сейсморазведка. М.: 1982. С. 327–331.
- [5] Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь. 1983. 320 с.
- [6] Capon J. High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis. Proc. IEEE, vol. 57, no. 8, p. 1408–1418. August 1969.
- [7] Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. – М.: Радио и связь, 2003. – 200 с.
- [8] Рабинович Е.В., Туркин А.С., Новаковский Ю.Л. Наземная локация микросейсмических сигналов для мониторинга гидравлического разрыва пласта. Доклады ТУСУР. 2012. № 1(25). Ч. 1. С. 104–112.
- [9] Рабинович Е.В., Ганчин К.С., Пупышев И.М., Шефель Г.С. Модель сейсмического импульса, возникающего при гидравлическом разрыве пласта. Математические структуры и моделирование. 2014. № 4. С. 107–113.



Евгений Владимирович Рабинович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Вычислительная техника» НГТУ. Автор более 100 научных работ. Научные интересы: цифровая обработка сигналов, моделирование нелинейных динамических систем. Новосибирск, Россия. 630090, просп. К. Маркса, д. 20.
E-mail: Rabinovich@corp.nstu.ru



Григорий Самуилович Шефель, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Высшая математика» НГТУ. Автор 20 научных работ. Научные интересы: теория отображений. Новосибирск, Россия. 630090, просп. К. Маркса, д. 20.

E-mail: ligr1x@yahoo.com



Андрей Владимирович Жуков, студент кафедры «Вычислительная техника» НГТУ. Научные интересы: цифровая обработка сигналов. Новосибирск, Россия. 630090, просп. К. Маркса, д. 20.

Статья получена 25 апреля 2018 г.

Seismic Imaging Technology

E. V. Rabinovich, G. S. Shefel, A. V. Zhukov

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. 630090, str. Prosp. K. Marksa, h. 20.

Abstract: The idea of the original seismic imaging technology is proposed. The technology differs from the traditional structural stability of the solution of the inverse kinematic seismic task. It is based on the application of algorithms for the operation of adaptive phased antenna arrays for the processing of seismic data. There are two approaches to processing. The first is to find the direction having the maximum of the directional diagram of the seismic phased array antenna at the reflection isochron nodes in which the seismic pulse is detected. The second approach uses the method of the angular superresolution of Keipon, which searches for the maximum of the direction-finding relief of each reflection isochron.

Key words - seismic prospecting, antenna array, Keipon method.

REFERENCES

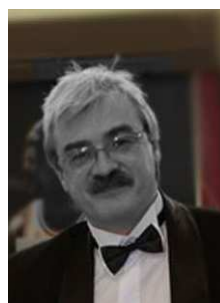
- [1] Puzyrev N.N. Interpretatsiya dannykh seysmorazvedki metodom otrazhennykh voln. M.: Gostoptekhizdat, 1959. 452 s.
- [2] Voskresenskiy YU.N. Postroyeniye seismicheskikh izobrazheniy. M.: RGU NG, 2006. 117 s.
- [3] Glogovskiy V. M., Langman S. L. Svoystva resheniya obratnoy kinematicheskoy zadachi seysmorazvedki. Tekhnologii seysmorazvedki. Novosibirsk. INGG im. A.A. Trofimuka SO RAN, T. 1. 2009. C. 10–17.
- [4] Glogovskiy V.M., Meshbey V.I., Tseytlin M.I., Langman S.L. Kinematiko-dinamicheskoye preobrazovaniye seismicheskoy zapisi dlya opredeleniya skorostnogo i glubinnogo stroyeniya sredy. Sbornik dokladov vtorogo nauchnogo seminaru stran-chlenov SEV po neftyanoy geofizike. T. 1. Seysmorazvedka. M.: 1982. S. 327–331.
- [5] Tikhonov V.I. Optimal'nyy priyem signalov. M.: Radio i svyaz'. 1983. 320 s.
- [6] Capon J. High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis. Proc. IEEE, vol. 57, no. 8, p. 1408–1418. August 1969.
- [7] Ratynskiy M.V. Adaptatsiya i sverkhrazresheniye v antennoykh reshetkakh. – M.: Radio i svyaz', 2003. – 200 s.
- [8] Rabinovich Ye.V., Turkin A.S., Novakovskiy YU.L. Nazemnaya lokatsiya mikroiseymicheskikh signalov dlya monitoringa gidravlicheskogo razryva plasta. Doklady TUSUR. 2012. № 1(25). CH. 1. C. 104–112.
- [9] Rabinovich Ye.V., Ganchin K.S., Pupyshev I.M., Shefel' G.S. Model' seymicheskogo impul'sa, vznikayushchego pri gidravlicheskoy razryve plastayu Matematicheskiye struktury i modelirovaniye. 2014. № 4. S. 107–113.



Evgeny Vladimirovich Rabinovich, Doctor of technical sciences, Professor, professor of the Department "Computer Science" of the NSTU. Author of more than 100 scientific works. Scientific interests: digital signal processing, modeling of nonlinear dynamic systems.

Novosibirsk, Russia. 630090, str. K. Marksa, 20.

E-mail: Rabinovich@corp.nstu.ru



Grigoriy Samuilovich Shefel, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Higher Mathematics Department of the NSTU. Author of 20 scientific works. Scientific interests: mapping theory.

Novosibirsk, Russia. 630090, str. K. Marksa, 20.

E-mail: ligr1x@yahoo.com



Andrey Vladimirovich Zhukov, student of the department "Computer Science" of the NSTU. Scientific interests: digital signal processing.

Novosibirsk, Russia. 630090, str. K. Marksa, 20.

The paper was received on April 25, 2018.