



УТОЧНЕНИЕ МОДЕЛИ КОРРЕКЦИИ СТАТИЧЕСКИХ ПОПРАВОК

М.В. Салищев, А.П. Сысоев

*Национальный минерально-сырьевой университет “Горный”
199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21-я линия, 2, Россия; e-mail: Sysoev-50@mail.ru*

Выполнено уточнение структуры модели, описывающей задачу коррекции остаточных статических поправок. Показано, что остаточные сдвиги трасс в задаче коррекции не содержат структурных составляющих временного поля. В задаче коррекции определена роль базы суммирования эталонного разреза (частичной суммы), используемого для определения остаточных сдвигов сейсмических сигналов ОВ. Доказывается, что при равном числе каналов расстановки общего пункта возбуждения центральной и фланговой систем наблюдения можно получить эквивалентные решения задачи коррекции статических поправок. Этот результат важен для оптимизации систем наблюдения в районах с высоким уровнем регулярных помех и сложным строением верхней части разреза.

Обработка данных метода ОГТ, коррекция длиннопериодных статических поправок, фланговая и центральная системы наблюдений

AN UPDATED MODEL OF STATIC SHIFT CORRECTION

M.V. Salishev, A.P. Sysoev

*National Mineral Resources University (University of Mines)
199106, Saint-Petersburg, Vasilevsky Island, 21 line, 2, Russia; e-mail: Sysoev-50@mail.ru*

The paper presents an updated model for correction of static shift. Residual trace shifts in the static correction problem lack structural components of the time field. The residual shifts are determined using the summation window (partial stacks) of a reference. Different solutions to the shift correction problem can be equivalent at an equal number of channels in split spread and end-on spread CSP systems. This result is important for the optimization of observation systems in areas with high regular noise and complex near-surface.

GBS seismic data processing, low-frequency static correction, split and end-on spread

ВВЕДЕНИЕ

Модель временного поля, описывающая задачу совместной коррекции остаточных статических и кинематических поправок при обработке данных метода общей глубинной точки (ОГТ), прошла производственную апробацию в течение десятилетий. Результаты практического применения решения этой задачи столь основательны, что не оставляют места сомнению в достоверности модели. Повторим кратко основные идеи, заложенные в описании задачи.

После ввода априорных статических и кинематических поправок времени географов ОГТ отраженных волн $t_n(x, l)$ опишем уравнением, включающим вертикальное время отражений $t_0(x)$ и остаточные статические поправки пунктов взрыва (ПВ) – $a(x)$ и приема (ПП) – $b(x)$:

$$t_n(x, l) = t_0(x) + a(x-l) + b(x+l), \quad x \in X, l \in L. \quad (1)$$

Здесь x – дискретная переменная, определяющая координату общей глубинной (срединной) точки, l описывает половину расстояния приемник–источник.

Чтобы избежать проблем, связанных с корреляцией отраженных волн по сейсмограммам, времена отраженных волн $t_n(x, l)$ замещают на сдвиги исходных трасс относительно эталонного волнового поля. В частном случае эталонное поле представлено разре-

зом ОГТ, полученным с априорными статическими и кинематическими поправками. Вертикальные времена отражений эталонного поля $t_3(x)$ определим двумя составляющими: истинным значением вертикального времени и “ложной” составляющей $g(x)$:

$$t_3(x) = t_0(x) - g(x).$$

Остаточные сдвиги определим как разность времен отражений исходного и эталонного поля:

$$\begin{aligned} \tau(x, l) &= t_n(x, l) - t_3(x) = \\ &= t_0(x) + a(x-l) + b(x+l) - t_0(x) + g(x). \end{aligned}$$

Параметр $t_0(x)$ в правой части уравнения исключается, и в результате приходим к традиционной (трехфакторной) модели коррекции остаточных статических и кинематических параметров волнового поля:

$$\tau(x, l) = g(x) + a(x-l) + b(x+l). \quad (2)$$

В работах [Сысоев, Евдокимов, 1986; Сысоев, 1988, 2011] уравнение (2) представлено в области пространственных частот:

$$\begin{aligned} \tau(u, l) &= \sum_x \tau(x, l) e^{-jux} = \\ &= g(u) + a(u) e^{jul} + b(u) e^{-jul}, \quad l = [L_1, L_2]. \end{aligned} \quad (3)$$

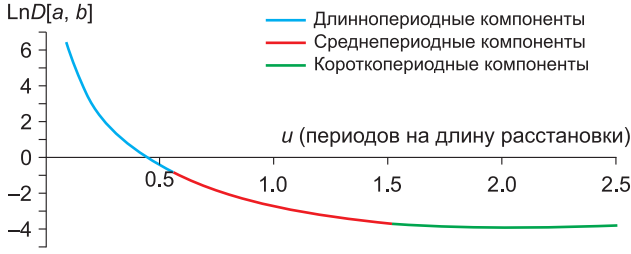


Рис. 1. Зависимость дисперсии оценок гармонических составляющих статических поправок от пространственной частоты.

Для системы уравнений (3) получены оценки дисперсии параметров линейной модели, характеризующие устойчивость решения в зависимости от пространственной частоты u . Принципиальный график дисперсии оценки статических поправок для центральной системы наблюдения в логарифмическом масштабе представлен на рис. 1. Ось абсцисс (пространственной частоты) градуирована в количестве периодов, нормированных к длине расстановки общего пункта возбуждения (ОПВ). По значению дисперсии оценок решение определяется тремя составляющими:

- “высокочастотные” компоненты статических поправок (более двух периодов на длину расстановки). Матрица системы уравнений метода наименьших квадратов (МНК) для этих составляющих близка к ортогональной, для определения этих компонент нет необходимости решать систему уравнений;

- “среднечастотные” (более 0.5 периода на расстановку), определяются в результате совместного оценивания неизвестных;

- “низкочастотные” (менее 0.5 периода на длину расстановки), оцениваются неустойчиво. Последние в процессе практического решения задачи коррекции не определяются.

Отметим, что задача оценки параметров модели (3) аналогична задаче разделения плоских интерферирующих волн $g(x)$, $a(x)$, $b(x)$ с заданными кажущимися скоростями. Как и в задаче разделения волн, проблемы возникают в том случае, когда волны характеризуются близкими “волновыми” числами. В задаче (3) эта ситуация возникает, когда пространственная частота u стремится к нулю.

Система уравнений (3) включает полную систему данных, и можно ожидать, что алгебраическое решение системы уравнений полностью исчерпывает все возможности. Между тем в работе [Козырев и др., 2003] на эмпирическом уровне показано, что применением различных частичных сумм можно улучшить оценки длиннопериодных составляющих, получаемых процедурами совместной коррекции статических и кинематических поправок.

О РОЛИ ЭТАЛОНА В ЗАДАЧЕ КОРРЕКЦИИ СТАТИЧЕСКИХ ПОПРАВOK

Обратим внимание, что при выводе уравнений (2), (3) использовано представление эталонного волнового поля в качестве априорной информации, полученной независимым способом. Но эталонное волновое поле получено не по абстрактным данным, а по исходному волновому полю, времена отражений которого описываются уравнением (1). Функцию $t_3(x)$ верти-

кального времени отражений эталонного поля оценим осреднением наблюдаемых времен по выборке ОГТ:

$$\begin{aligned} t_3(x) &= 1/L \sum_{l=L_1}^{L_2} t_H(x, l) = \\ &= 1/L \sum_{l=L_1}^{L_2} (t_0(x) + a(x-l) + b(x+l)) = \\ &= t_0(x) + 1/L \sum_{l=L_1}^{L_2} a(x-l) + 1/L \sum_{l=L_1}^{L_2} b(x+l). \end{aligned} \quad (4)$$

Подставим полученное выражение времени эталона в уравнение (2), определяющее остаточные сдвиги трасс:

$$\begin{aligned} \tau(x, l) &= t_H(x, l) - t_3(x) = \\ &= t_0(x) + a(x-l) + b(x+l) - t_0(x) - \\ &- 1/L \sum_{l=L_1}^{L_2} a(x-l) - 1/L \sum_{l=L_1}^{L_2} b(x+l). \end{aligned} \quad (5)$$

Параметр $t_0(x)$ сокращается, в результате остаточные сдвиги трасс описываются только статическими поправками:

$$\begin{aligned} \tau(x, l) &= a(x-l) + b(x+l) - \\ &- 1/L \sum_{l=L_1}^{L_2} a(x-l) - 1/L \sum_{l=L_1}^{L_2} b(x+l). \end{aligned} \quad (6)$$

Формально в уравнении (6) присутствует составляющая, которая определяется как функция координаты профиля x :

$$g(x) = 1/L \sum_{l=L_1}^{L_2} a(x-l) + 1/L \sum_{l=L_1}^{L_2} b(x+l). \quad (7)$$

В силу этого трехфакторную модель (3) можно использовать для задачи коррекции. Но фактор $g(x)$ представляет собой сумму статических поправок ПВ и ПП, сглаженных на интервале половины длины расстановки.

Важным свойством системы уравнений (1) и (3) является линейная зависимость длиннопериодных составляющих факторов ПВ, ПП и ОГТ. Исследуем эту проблему для модели коррекции, описываемой уравнением (6). Запишем уравнение коррекции в спектральном представлении, выполнив разложение $\tau(x, l)$ в ряд Фурье по пространственной переменной x :

$$\begin{aligned} \tau(u, l) &= a(u)(e^{jul} - 1/L \sum_{l=L_1}^{L_2} e^{jul}) + \\ &+ b(u)(e^{-jul} - 1/L \sum_{l=L_1}^{L_2} e^{-jul}), \end{aligned} \quad (8)$$

$$l = [L_1, L_2].$$

В области пространственных частот решение системы уравнений ищется независимо на каждой пространственной частоте $u = const$ и сводится к решению L уравнений относительно двух переменных $a(u)$, $b(u)$.

При $u \rightarrow 0$ значения коэффициентов уравнения (8) стремятся к нулю:

$$e^{-jul} - 1/L \sum_{l=L_1}^{L_2} e^{-jul} \rightarrow 0, \quad e^{jul} - 1/L \sum_{l=L_1}^{L_2} e^{jul} \rightarrow 0.$$

Соответственно, остаточные сдвиги трасс относительно эталона описываются асимптотикой: $\tau(u \rightarrow 0) \approx a(u) \cdot 0 + b(u) \cdot 0 \approx 0$.

Отсюда следует, что остаточные сдвиги трасс $\tau(x, l)$ не содержат низкочастотных пространственных составляющих, и проблема оценивания низкочастотных составляющих статических поправок определяется не только линейной зависимостью параметров, но и неопределенностью типа $0/0$.

Если сейсмические наблюдения выполняются с поверхностным источником возбуждения, то можно принять, что статические поправки источников и приемников равны. Это условие справедливо и для скважинного источника, поскольку статика ПВ и ПП различается на величину вертикального времени, измеряемого в процессе полевых наблюдений. Допустим, что точки приема и возбуждения совпадают, тогда $a(x) = b(x)$ и в уравнении (8) остается один неизвестный параметр:

$$\begin{aligned} \tau(u, l) &= a(u)e^{jul} - a(u) / L \sum_{l=L_1}^{L_2} e^{jul} + a(u)e^{-jul} - \\ &\quad - a(u) / L \sum_{l=L_1}^{L_2} e^{-jul} = \\ &= 2a(u) \left(\cos(ul) - 1 / L \sum_{l=L_1}^{L_2} \cos(ul) \right). \end{aligned} \quad (9)$$

МНК-оценку неизвестного параметра $a(u)$ для системы уравнений (9) можно записать в явной форме:

$$a(u) = \frac{\sum_{l=L_1}^{L_2} \left[\tau(u, l) \left(\cos(ul) - 1 / L \sum_{l=L_1}^{L_2} \cos(ul) \right) \right]}{2 \sum_{l=L_1}^{L_2} \left(\cos(ul) - 1 / L \sum_{l=L_1}^{L_2} \cos(ul) \right)^2}. \quad (10)$$

Из уравнения (10) можно получить выражение для дисперсии оценки неизвестного параметра $a(u)$:

$$D[a(u)] = D[\tau(u, l)] R(u, L), \quad (11)$$

$$\text{где } R(u, L) = 1 / \left(4 \sum_{l=L_1}^{L_2} \left(\cos(ul) - 1 / L \sum_{l=L_1}^{L_2} \cos(ul) \right)^2 \right).$$

Дисперсия оценки для фиксированной пространственной частоты определяется погрешностью исходных данных $D[\tau(u, l)]$ и множителем $R(u, L)$. Множитель $R(u, L)$ является функцией пространственной частоты, списка удалений ПП-ПВ системы наблюдений, а также списка удалений $[M_1, M_2]$, по которому формируется эталонная суммотрасса ОГТ. База формирования эталона может принимать любое значение. Поэтому в описание задачи коррекции следует ввести еще одну переменную M – базу формирования эталона ($M \leq L$). Тогда уравнения (9), (11) приводятся к виду:

$$\begin{aligned} \tau(u, l) &= 2a(u) \left(\cos(ul) - 1 / M \sum_{m=M_1}^{M_2} \cos(um) \right), \\ R(u, L, M) &= \\ &= 1 / \left(4 \sum_{l=L_1}^{L_2} \left(\cos(ul) - 1 / M \sum_{m=M_1}^{M_2} \cos(um) \right)^2 \right). \end{aligned} \quad (12)$$

При изменении значения M знаменатель в уравнении (12) не остается постоянным. Следовательно,

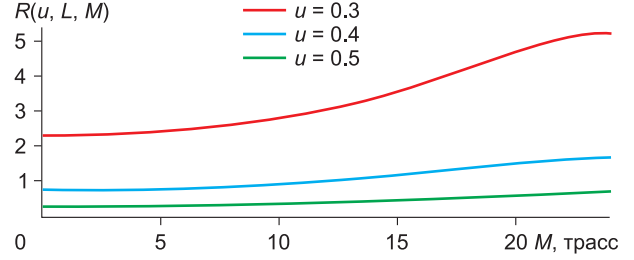


Рис. 2. Зависимость функции $R(u, L, M)$ от базы формирования эталона для пространственных частот $u = 0.3, 0.4, 0.5$.

дисперсия оценки статических поправок определяется тремя переменными: пространственной частотой, списком удалений ПП-ПВ системы наблюдения и списком удалений ПП-ПВ, используемым для формирования эталона. На рис. 2 представлены графики зависимости $R(u, L, M)$ от параметра M , изменяющегося от 1 до максимального значения L . Расчеты выполнены для пространственных частот $u = 0.3, 0.4, 0.5$, что соответствует периоду пространственных гармоник, равному 3, 2.5 и 2 расстановкам.

В соответствии с формулой (11) погрешность оценки параметра $a(u)$ определяется произведением двух составляющих: погрешностью исходных данных и частотной характеристикой, описывающей систему линейных уравнений. Примем, что погрешность наблюденных времен $t_n(x, l)$ является случайной величиной. Тогда дисперсию исходных данных $D[\tau(u, l)]$ оценим как дисперсию разности наблюденных и эталонных времен:

$$\begin{aligned} D[\tau(u, l)] &= D[t_n(u, l)] + D[t_s(u)] = \\ &= D[t_n(u, l)] + 1 / M^2 \sum_{m=M_1}^{M_2} D[t_n(u, m)] = \\ &= D[t_n(u, l)] (1 + 1 / M). \end{aligned} \quad (13)$$

Зависимость двух составляющих уравнения (11) от базы суммирования эталона M разнонаправленна. Дисперсия исходных данных $D[\tau(u, l)]$ максимальна, если в качестве эталона принимается временное поле, определяемое одной линией $m = \text{const}$ ($M = 1$), и уменьшается при увеличении базы формирования эталона. Множитель $R(u, L, M)$, как следует из рис. 2, принимает минимальное значение при $M = 1$ и максимальное при $M = L$.

С учетом (13) оценка дисперсии параметра $a(u)$ приводится к виду

$$\begin{aligned} D[a(u, M)] &= \\ &= D[t_n(u, l)] \frac{(1 + 1 / M)}{\left(4 \sum_{l=L_1}^{L_2} \left(\cos(ul) - 1 / M \sum_{m=M_1}^{M_2} \cos(um) \right)^2 \right)} \end{aligned} \quad (14)$$

На рис. 3 представлены графики, иллюстрирующие зависимость $D[a(u, M)]$ от параметра M для трех пространственных частот: $u = 0.33, 0.4, 0.5$, период которых соответствует 3, 2.5 и 2 расстановкам ОПВ. Расчеты выполнены для фиксированного значения $D[t_n(u, l)] = 1$. Графики иллюстрируют, что минимум дисперсии отмечается при значении $M \approx L/3$.

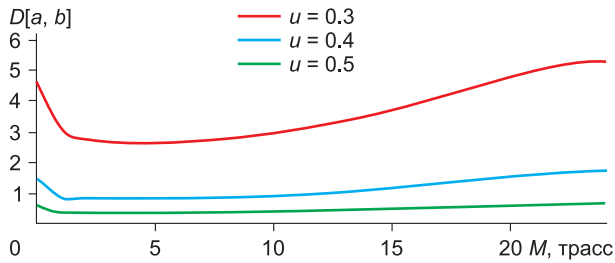


Рис. 3. Зависимость дисперсии оценок гармонических составляющих статических поправок $D[a(u, M)]$ от базы формирования эталона.

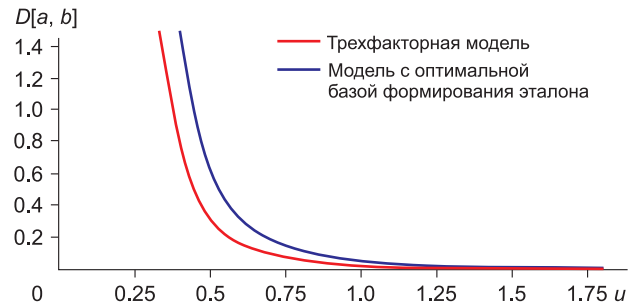


Рис. 4. Сравнение дисперсии оценок гармонических составляющих с полной и оптимальной базой суммирования эталона ($M = 8$).

На рис. 4 представлены графики, описывающие зависимость дисперсии оценок гармонических составляющих статических поправок для модели с полной базой и полученной с оптимальной базой формирования эталона. При оптимальном выборе базы формирования эталона дисперсия оценок длиннопериодных компонент решения уменьшается в ~ 2 раза.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФЛАНГОВОЙ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ

В настоящее время при выполнении полевых работ как 2D, так и 3D доминируют центральные симметричные системы наблюдения, формально определяющие максимальную кратность выборок общей срединной точки (ОСТ). Предположим, что для 2D наблюдений установлены два параметра системы наблюдения: максимальное по модулю удаление ПП–ПВ и число активных каналов расстановки. При заданных параметрах возможны два принципиальных варианта расстановки приборов: центральная и фланговая. При фланговой системе в 2 раза уменьшаются длина расстановки и шаг ПП по профилю наблюдений. Соответственно, в 2 раза сгущается шаг ОСТ и уменьшается кратность системы наблюдения. Кроме этого, в 2 раза увеличивается область пространственных частот неустойчивого оценивания низкочастотных составляющих статических поправок. По формальным критериям достоинства центральной системы очевидны. Рассмотрим далее, насколько этот вывод достоверен.

При обработке сейсмических данных геометрия многократных систем наблюдения существенна для решения следующих задач:

1. Вычитание регулярных помех с линейным годографом.

2. Вычитание кратных волн с гиперболическим годографом.

3. Подавление нерегулярных помех.

4. Коррекция статических поправок.

5. Интерпретация волн первых вступлений с целью определения модели ВЧР.

Для вычитания регулярных помех с линейным годографом по сейсмограммам ОПВ фланговая система, с более частой расстановкой приборов, имеет более острую характеристику направленности интерференционной системы. Поэтому при решении этой задачи следует отдать предпочтение фланговой системе.

Выборка трасс со строго фиксированным значением ОСТ существенна только с точки зрения геометрической сейсмологии. Волновая природа событий позволяет выполнять процедуры вычитания кратных волн и статистического подавления помех суммированием по суперсейсмограммам с кратностью, в несколько раз превышающей кратность выборки ОСТ. При равном числе каналов расстановки фланговая и центральная системы наблюдения имеют одинаковую плотность трасс на единицу длины профиля, поэтому для решения задач (2) и (3) эти системы эквивалентны.

На рис. 5 приведены графики дисперсии оценок гармонических составляющих статических поправок центральной и фланговой систем наблюдения при равном значении максимального по модулю удаления ПП–ПВ и равном числе каналов расстановки ОПВ. Из сравнения двух графиков очевидно, что при переходе от центральной к фланговой системе наблюдения вдвое увеличивается область неустойчиво определяемых пространственных частот.

Свойства решения принципиально меняются, если ввести дополнительное условие равенства факто-

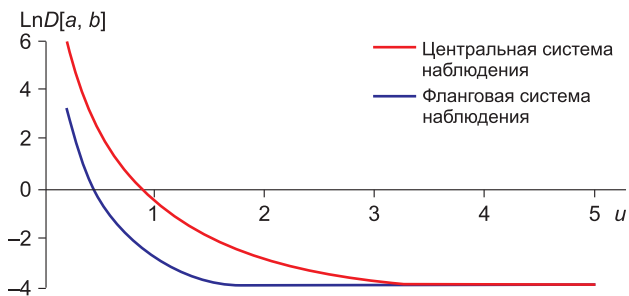


Рис. 5. Графики дисперсии остаточных статических поправок для фланговой и центральной систем наблюдения.

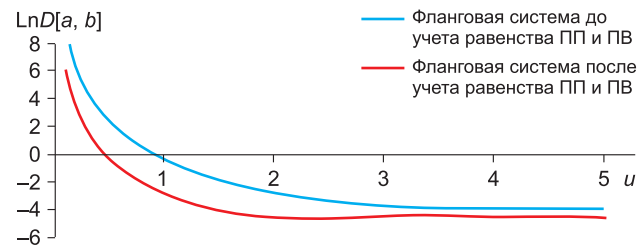


Рис. 6. Дисперсии оценок гармонических составляющих статических поправок для фланговой системы наблюдения.

ров ПВ и ПП. Из уравнения (11) следует, что влияние геометрии системы наблюдения определяется коэффициентом $R(u, L)$. Для перехода к фланговой системе наблюдения необходимо изменить диапазон суммирования и вдвое уменьшить шаг изменения переменной l .

$$R_{\Phi}(u, L, M) = 1 / \left(2 \sum_{l=0}^{2L} \left(\cos(ul / 2) - 1 / M \sum_{m=0}^{2M} \cos(um / 2) \right)^2 \right) \quad (15)$$

В силу симметрии функции по переменной l практическое равенство функций $R(u, L, M)$ для центральной (12) и $R_{\Phi}(u, L, M)$ для фланговой систем наблюдения с одинаковым числом каналов расстановки ОПВ и одинаковым значением максимального удаления ПП–ПВ достаточно очевидно. Из этого следует, что будут равны дисперсии оценок статических поправок, что иллюстрируется графиками на рис. 1, 6. Следовательно, для задачи коррекции статических поправок можно обеспечить эквивалентность фланговой и центральной систем наблюдения.

Эквивалентность этих систем наблюдения доказана для случая равенства факторов ПВ и ПП. Данное условие выполняется фактически в случае, если полевые наблюдения выполнены при строгом соответствии координат источников и приемников. Но это требование к системам наблюдения является избыточным, поскольку условие равенства факторов ПВ и ПП необходимо учитывать только для оценки низкочастотных пространственных составляющих статических поправок.

По результатам сравнительного анализа фланговой и центральной систем наблюдения можно сделать вывод, что сопоставляемые системы как минимум эквивалентны. Но сокращение шага ПП фланговой системы позволяет повысить достоверность и однозначность выделения и корреляции преломленных волн первых вступлений. Этот фактор крайне важен для оценки параметров структурно-скоростной модели верхней части разреза районов со сложным строением ВЧР, к которым может быть отнесена вся территория Восточной Сибири.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Уточнена модель коррекции остаточных статических поправок. Показано, что остаточные статические сдвиги трасс относительно эталонного волнового поля не содержат “остаточной” структурной составляющей временного поля.

2. Аналитически подтверждена целесообразность применения частичных сумм для повышения устойчивости оценки низкочастотных пространственных составляющих статических поправок.

3. Условие равенства низкочастотных составляющих статических поправок ПВ и ПП приводит к эквивалентности центральной и фланговой систем наблюдения для задачи коррекции статических поправок волнового поля отраженных волн.

4. На основании качественного анализа сравнительной эффективности фланговой и центральной систем наблюдения при решении основных задач цифровой обработки сделано предположение о целесообразности применения фланговой системы наблюдения в районах со сложным строением ВЧР. Этот вывод целесообразно проверить результатами опытно-методических работ.

Литература

- Козырев В.С., Жуков А.П., Коротков И.П. и др.** Учет неоднородностей верхней части разреза в сейсморазведке. М.: Недра, 2003.
- Сысоев А.П.** Анализ устойчивости оценивания статических и кинематических параметров в МОВ // Математические проблемы интерпретации данных сейсморазведки. Новосибирск: Наука, 1988.
- Сысоев А.П.** Прикладные задачи компенсации неоднородности верхней части разреза при обработке и интерпретации сейсмических данных // Новосибирск: ИНГГ СО РАН. Новосибирск, 2011. 90 с. (Библиотека журнала “Технологии сейсморазведки”).
- Сысоев А.П., Евдокимов А.А.** Коррекция формы сейсмического сигнала в МОВ на основе спектрально-статистического метода (ССМ) // Геология и геофизика. 1986. № 5. С. 95–103.

*Поступила в редакцию 18 июня 2014 г.,
в окончательном варианте – 16 июля 2014 г.*

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

САЛИЩЕВ Михаил Всеволодович – аспирант кафедры геофизических и геохимических методов Национального минерально-сырьевого университета “Горный”, Санкт-Петербург.
Тел.: 8 812 321 24 47, 8 952 392 74 69, e-mail: mihail19@inbox.ru

СЫСОЕВ Анатолий Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры геофизических и геохимических методов Национального минерально-сырьевого университета “Горный”, Санкт-Петербург.
Тел.: 8 812 304 54 07, 8 911 841 31 25, e-mail: Sysoev-50@mail.ru