



## МЕТОД ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕЧАСТОТНЫХ СТАТИЧЕСКИХ ПОПРАВК

К.А. Эпов, О.О. Адамович

ООО “Геофизические системы данных”, 117198, Москва, Е-302, Ленинский просп., 113/1, Россия,  
e-mail: kirill@gds.ru, aoleg@gds.ru

Рассматривается алгоритм быстрого расчета статических поправок по известным временам прихода отражений, основанный на преобразовании в область пространственных частот. Анализируются погрешности и ограничения метода, показывается связь с другими алгоритмами, изучаются основные аспекты при практической реализации алгоритма. Предлагаемый подход позволяет обоснованно подходить к проблеме регуляризации решения переопределенной системы уравнений, возникающей при решении классической задачи оценки статических поправок. Метод может быть применен не только для решения проблемы статических поправок, но также для решения других задач, сформулированных в рамках поверхностно-согласованной модели (например, коррекция амплитуд, расчет поверхностно-согласованных фильтров и т. д.). Рассмотрены практические аспекты реализации алгоритма в случае 3D-съемок.

*Статические поправки, область пространственных частот, регуляризация, пространственная фильтрация, ошибки решения, параметризация crossspread-OVT*

### SEMI-AUTOMATIC METHOD OF MEDIUM WAVELENGTH STATIC CALCULATIONS

К.А. Эпов, О.О. Adamovich

“Geophysical data systems” Ltd, 117198, Moscow, E-302, Leninsky prosp., 113/1, Russia,  
e-mail: kirill@gds.ru, aoleg@gds.ru

This paper presents fast algorithm of statics corrections calculations based on known reflection times. The grounds of the method are data transformation into a spatial frequency domain. In the article the accuracy and method restrictions are analyzed, relationship with other methods is shown, and the main aspects of practical algorithm application are discussed. This method allows reasonable regularization approach to the solution of an overdetermined equation system that arise in the classical formulation of surface-consistent statics computation problem. The method can be applied not only for statics corrections but for solving any other surface-consistent problem (surface consistent amplitude corrections, surface-consistent filtering, etc). The article also addresses the issue of practical aspects of algorithm realization for 3D surveys.

*Statics corrections, spatial frequency domain, regularization, spatial filtering, solution errors, crossspread-OVT parameterization*

### ВВЕДЕНИЕ

При обработке и интерпретации сейсмических данных одной из главных проблем, с которой сталкиваются геофизики, является учет влияния приповерхностных неоднородностей. Характерным примером является Западно-Сибирский регион, где скоростные аномалии связаны со строением зоны многолетней мерзлоты. Внедрение в производственную сейсморазведку метода многократных перекрытий послужило стимулом для разработки подходов к определению статических поправок непосредственно по сейсмическим данным, без применения дополнительных полевых изысканий. Изучению данного вопроса посвящено большое количество работ, в том числе авторов из России и стран бывшего СНГ: В.М. Глоговского, А.Р. Хачатряна, Т.К. Грингауза [1983], С.В. Гольдина, Г.М. Митрофанова [1975], В.С. Козырева, Е.К. Королева [1994], Ю.П. Шварцмана [1978], В.С. Карапыша [1981] и многих других. Многочисленные исследования показывают, что возможность успешного решения этой задачи зависит от пространственных разме-

ров неоднородностей верхней части разреза [Глоговский, Хачатрян, 1986]. Короткопериодные статические поправки, размер которых существенно меньше длины расстановки, удается рассчитать и учесть при помощи автоматических процедур. Сложнее ситуация со средне- и длиннопериодными статическими поправками. Обычно последние определяются на этапе интерпретации при сопоставлении сейсмических и скважинных данных. При достаточной плотности скважин этим же путем могут быть учтены и среднепериодные аномалии. Однако это условие выполняется далеко не всегда. Кроме того, неправильный учет среднепериодной составляющей зачастую отрицательно сказывается на качестве суммарных разрезов. Для определения статических поправок, размер которых меньше либо сравним с длиной расстановки, с успехом используют интерактивные и полуавтоматические методы (см., например, [Козырев, Королев, 1994; Козырев и др., 2004; Vaxias et al., 1997; Kozyrev et al., 2004]). Недостатком этих подходов является их большая тру-

доемкость. Реализованные в современных коммерческих программных продуктах автоматические методы расчета основаны на поверхностно-согласованной модели. Задаче определения статических поправок в такой постановке посвящено много исследований, и ее свойства изучены очень хорошо.

Авторы настоящей работы не претендуют на открытие какого-то принципиально нового подхода к решению данной проблемы: человечество давно научилось решать системы линейных уравнений. Более того, идея, на которой базируется предлагаемая методика, в похожем виде была рассмотрена еще в работе [Marsoux, 1981]. Основной задачей данного исследования являлся поиск эффективной методики, способной дать оптимальный результат при практической работе с реальными данными.

В наблюдающейся сегодня в производственной сейсморазведке тенденции к автоматизации рутинных процедур, с одной стороны, и развитию интерактивных возможностей при принятии ключевых решений и задании основных параметров, с другой, все большее значение приобретают алгоритмы, в которых заложена возможность быстрого тестирования управляющих параметров с целью оптимизации результата, удовлетворяющего нескольким критериям. По мнению авторов, применительно к задаче определения статических поправок эффективный алгоритм следует искать между автоматическими методами, результат работы которых управляется всего несколькими параметрами, и интерактивными подходами, являющимися очень гибкими, но требующими больших трудозатрат.

Другими словами, эффективная методика должна содержать возможность интерактивной регуляризации, а расчетная часть не быть требовательной к вычислительным ресурсам. Важность первого требования определяется неоднозначностью самого процесса избавления от некорректности (неединственности и неустойчивости). В связи с этим полезно посмотреть на проблему с точки зрения выделения в интерактивную часть алгоритма параметров, контролирующих факторы, вызывающие эту некорректность. Наиболее важной такой характеристикой является частотный состав решения.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА

### Основная идея

В настоящей работе рассматривается классическая задача определения статических поправок для сейсмических данных, сформулированная в поверхностно-согласованном варианте. Предполагается, что в данные уже введены кинематические поправки.

В рамках указанной модели время прихода отражения от выделенного отражающего горизонта обычно представляется в следующем виде:

$$t(x_r, x_s) = r(x_r) + s(x_s) + g(x_{cmp}) + o(x_{cmp}, \Delta x), \quad (1)$$

где  $x_r, x_s$  – координаты приемника и источника;  $x_{cmp} = (x_r + x_s)/2$  – координата средней точки;  $\Delta x = x_r - x_s$  – удаление источник–приемник;  $r(), s()$  – функции, описывающие поверхностно-согласованные поправки для приемников и источников соответственно;  $g()$  – неискаженное время прихода отражения от горизонта (так называемый “структурный” фактор);  $o()$  – фактор остаточной кинематической поправки.

Как известно, уравнения (1), записанные для всех трасс сейсмической съемки, формируют пере-

определенную систему, решение которой тем не менее является неустойчивым [Глоговский, Хачатрян, 1986; Wiggins et al., 1976]. Число уравнений здесь равно числу сейсмических трасс во всем массиве данных, а число неизвестных пропорционально числу средних точек в съемке. Из-за большого объема на практике ее обычно решают численными методами (например, методом Гаусса–Зейделя), используя различные регуляризирующие механизмы. В частности, предполагается, что среднее значение поверхностно-согласованных поправок на профиле (площади) равно нулю.

Рассмотрим для начала 2D-случай (профильные наблюдения). Для простоты также предположим, что остаточные кинематические сдвиги отсутствуют, а функции статических поправок для источника и приемника совпадают (случай наземного источника). Тогда уравнение (1) примет следующий вид:

$$t(x, h) = s(x+h) + s(x-h) + g(x), \quad (2)$$

где  $x = x_{cmp} = (x_r + x_s)/2$  – координата средней точки;  $h = \Delta x/2 = (x_r - x_s)/2$  – половина удаления источник–приемник.

Главная идея предлагаемого метода основана на том, что при переходе в область пространственных частот уравнение (2) преобразуется в выражения

$$T(jk, h) = S(jk) e^{ikh} + S(jk) + G(jk), \quad (3)$$

$$T(jk, h) = S(jk) \cdot 2 \cos(kh) + G(jk). \quad (4)$$

В результате вместо громоздкой системы уравнений (2) для каждой пространственной частоты  $k$  получаем свою систему гораздо меньшего порядка (равного количеству представительных выборок равных удалений, т. е. средней кратности сейсмической съемки), не связанную с другими. Еще раз отметим, что идея перехода в область пространственных частот была предложена еще в работе [Marsoux, 1981]. Однако рассматриваемый здесь подход имеет ряд преимуществ с точки зрения практической реализации.

Суть предлагаемой методики заключается в нахождении частотных компонент статических поправок путем решения уравнений, подобных (3), и введении регуляризации путем фильтрации полученного решения в области пространственных частот. Это позволяет контролировать гладкость получаемого решения, а также гибко управлять такими параметрами, которые обычно на качественном уровне характеризуют статические поправки как “длиннопериодные” или “среднепериодные”. Преимущество предлагаемого подхода заключается в высокой скорости работы, что дает возможность для его использования в интерактивном режиме.

Ниже приводится обзор основных свойств рассматриваемого алгоритма. При этом сознательно проводится анализ на упрощенных моделях (начиная с двухфакторной). Использование элементарных формул позволяет акцентировать внимание на ключевых моментах, влияющих на окончательный результат.

### Анализ на примере двухфакторной модели

На примере (4) рассмотрим основные свойства задачи. Переход к такой упрощенной формулировке позволяет, освобождаясь от технических деталей, выявить главные особенности предлагаемого подхода, а также наметить пути решения проблем, возникающих при практической реализации алгоритма. Например, непосредственно из рассмотрения системы уравнений

(4) становится очевидно, что постоянная составляющая ( $k = 0$ ) не может быть найдена по причине равенства нулю определителя при любых соотношениях удалений источник–приемник. Именно этим объясняется неединственность решения исходной задачи. Поэтому на практике при регуляризации используется предположение об отсутствии данной частотной компоненты (равенстве нулю средних значений факторов  $r()$  и  $s()$ ). Отметим, что эта проблема не так хорошо заметна при формулировке задачи в виде (2) или (1) (см., например, [Глоговский и др., 1983]).

Рассмотрим далее свойства решений для ненулевых пространственных частот.

Теоретически для нахождения функций  $S()$  и  $G()$  из системы (4) достаточно двух уравнений, или двух каналов с разными удалениями:

$$\begin{pmatrix} 2 \cos(kh_1) & 1 \\ 2 \cos(kh_2) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S(k) \\ G(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T(k, h_1) \\ T(k, h_2) \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Отсюда для  $S()$  получаем следующее выражение:

$$S(jk) = \frac{T(k, h_1) - T(k, h_2)}{\text{Det}}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{Det} &= 2(\cos(kh_1) - \cos(kh_2)) = \\ &= 4 \sin\left(\frac{h_1 + h_2}{2} k\right) \sin\left(\frac{h_1 - h_2}{2} k\right). \end{aligned} \quad (7)$$

Устойчивость решения (6) напрямую связана с величиной определителя (7). Можно показать, что для пространственного периода  $L = 2\pi/k$  максимальное по модулю значение определителя достигается при выборе удалений таким образом, чтобы  $h_1 = L \cdot n$  и  $h_2 = L/2 + L \cdot n$ , где  $n$  – целое число.

В то же время для любых двух каналов из выборки ОСТ найдутся пространственные частоты, обращающие определитель (7) в нуль (например,  $L = (h_1 - h_2)/n$ ,  $n$  – целое число; см. также рис. 1). Поэтому с практической точки зрения целесообразно привлекать в анализ по возможности большее число каналов, решая вместо (5) переопределенную систему, в которую включены уравнения для всех удалений. Однако ана-

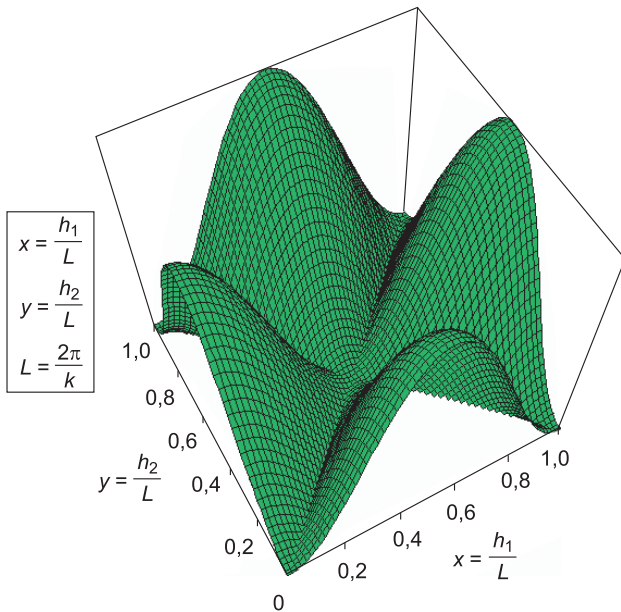


Рис. 1. График модуля определителя системы уравнений (5) двухфакторной модели.

лиз системы (5) позволяет сделать некоторые выводы о свойствах задачи в целом. Приведенные соображения показывают, что статические поправки могут быть определены устойчиво для тех пространственных частот, период которых меньше или сравним с длиной расстановки. Для более низкочастотных компонент решение также возможно. При этом определитель (7) можно записать в следующем виде:

$$\text{Det} = k^2 (h_1^2 - h_2^2) + O((kh)^4) = k^2 (h_1 - h_2)(h_1 + h_2) + O((kh)^4).$$

Из этого выражения, описывающего поверхность гиперболического параболоида в координатах  $h_1$  и  $h_2$ , следует, что при решении системы (5) для малых пространственных частот лучше использовать каналы с минимальным и максимальным удалениями. Определитель системы при этом пропорционален квадрату пространственного периода.

Предположим, что времена прихода отражения измерены с ошибкой:

$$t(x, h) = t_0(x, h) + e(x, h),$$

$$T(k, h) = T_0(k, h) + E(k, h).$$

Тогда ошибка определения  $S()$  с использованием выражения (6) может быть оценена как математическое ожидание следующей величины:

$$\delta S(jk) = \frac{E(k, h_1) - E(k, h_2)}{\text{Det}}.$$

Если пространственные помехи на выборках равных удалений одинаковы по уровню и не коррелированы между собой ( $M(|E(k, h_1)|) = M(|E(k, h_2)|) = E$ ), то для длиннопериодных статических поправок

$$M(|\delta S(jk)|) = \frac{\sqrt{2}E}{\text{Det}} \sim \frac{E}{k^2}. \quad (8)$$

Из этого следует, что погрешность растет прямо пропорционально квадрату пространственного периода. Следовательно, для низкочастотной составляющей необходимо предъявлять довольно жесткие требования к точности определения времен прихода отражений.

Для примера рассмотрим сейсмическую расстановку с максимальным удалением источник–приемник 3 км и минимальным – 100 м, т. е. для расчета длиннопериодной составляющей статических поправок оптимальными являются значения  $h_1 = 50$  и  $h_2 = 1500$ . На рис. 2 представлены графики зависимости ожидаемой погрешности решения уравнений (5) для различного уровня помех (1, 2, 4, 8 мс).

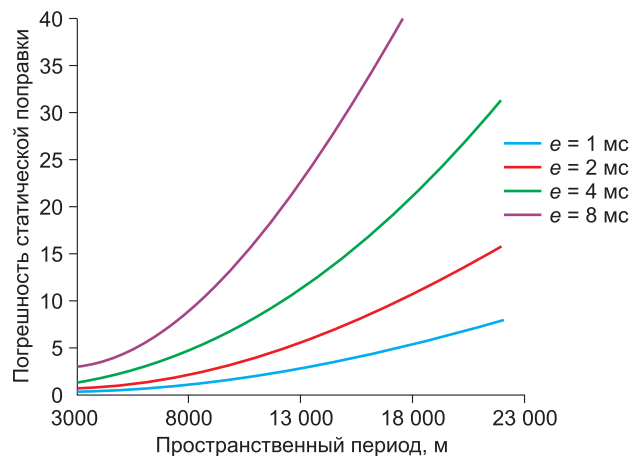


Рис. 2. Погрешность расчета статических поправок (8).

### Трехфакторная модель

При использовании трехфакторной модели с остаточными кинематическими поправками правые части уравнений (2) состоят из четырех слагаемых. Обычно остаточную кинематическую поправку представляют в параболическом виде. Тогда система (2) принимает вид:

$$t(x, h) = s(x + h) + s(x - h) + g(x) + a(x)h^2$$

или в области пространственных частот:

$$T(k, h) = S(k) \cdot 2 \cos(kh) + G(k) + A(k)h^2. \quad (9)$$

Применяя тот же подход, что при анализе (4), можно показать, что для пространственного периода  $L = 2\pi/k$  наиболее устойчивое решение системы (9) из трех уравнений будет получено при разнице  $L/2$  между значениями  $h_{1,2,3}$  (например, при  $h_{1,2,3} = L/2, L, 3L/2$ ). Еще раз отметим, что  $h_i$  – половина расстояния источник–приемник для  $i$ -го разреза равных удалений.

На низких пространственных частотах при решении (9) помимо увеличения погрешности пропорционально квадрату пространственного периода дополнительно возникает проблема неустойчивого разделения факторов  $S()$ ,  $G()$  и  $A()$ . Это связано с тем,

что для малых  $k \left( \cos(x) \approx 1 - \frac{x^2}{2} \right)$  столбцы матрицы, описывающей систему уравнений (9), становятся линейно-зависимыми. При этом сами уравнения могут быть представлены в эквивалентной двухфакторной форме:

$$T(k, h) = (2 \cdot S(k) + G(k)) + (A(k) - k^2 S(k))h^2. \quad (10)$$

Данная система может быть решена, однако из найденных двух факторов невозможно восстановить компоненты  $S()$ ,  $G()$  и  $A()$ , т. е. при рассмотрении трехфакторной модели на низких частотах определитель системы (9) становится малым, что приводит к неустойчивости решения. Между тем, уравнения (10)

эквивалентны задаче (1) в предположении об отсутствии статических поправок. Отсюда следует простой вывод, что при практическом решении задачи в качестве регуляризирующей процедуры можно использовать разделение частотных диапазонов факторов, отвечающих за статические и остаточные кинематические поправки. Например, устойчивость решения может быть достигнута с использованием модели, в которой на низких частотах аномалии корректируются остаточными кинематическими поправками, а на средних и высоких – статическими.

Несколько иная картина наблюдается при раздельном рассмотрении факторов источника и приемника:

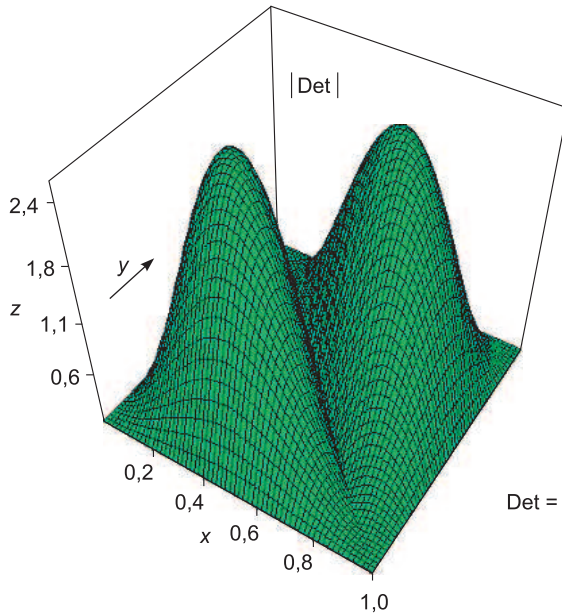
$$t(x, h) = r(x + h) + s(x - h) + g(x), \quad (11)$$

$$T(jk, h) = R(jk)e^{jkh} + S(jk)e^{-jkh} + G(jk). \quad (12)$$

В отличие от (9), на низких пространственных частотах данная система не вырождается в двухфакторную задачу. В остальном для нее справедливы те же закономерности, что и для (4). Максимизируя модуль определителя, можно найти критерий наиболее устойчивой оценки составляющих с различной пространственной частотой. Несложно показать (см. Приложение 1), что для этого необходимо, чтобы разница между удалениями выбранных каналов составляла две трети длины пространственной волны (например, при  $h_{1,2,3} = L/3, 2L/3, L$ ). Если разность любых двух из трех удалений кратна удвоенной длине волны, определитель обнуляется (например, при  $h_{1,2,3} = L/3, L/2, 4L/3$ ; см. также рис. 3).

### Переопределенная система уравнений

Метод ОГТ позволяет формировать из уравнений типа (1), (4) или (12) переопределенную систему. В этом случае отпадает необходимость выбора оптимальных удалений для каждой пространственной частоты, поскольку при поиске решения используются все имеющиеся данные. По этой же причине такая система дает более устойчивое решение.



$$\begin{aligned} x &= \frac{dh_{21}}{L} - \frac{h_2 - h_1}{L} \\ y &= \frac{dh_{32}}{L} - \frac{h_3 - h_2}{L} \\ L &= \frac{2\pi}{k} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Det} &= -2i(\sin(kh_{32}) + \sin(kh_{13}) + \sin(kh_{21})) \\ &k(h_{21} + h_{32} + h_{13}) = 0 \end{aligned}$$

Рис. 3. Модуль определителя для трехфакторной системы уравнений (12).

Рассмотрим результаты анализа системы (4) при наличии данных, позволяющих сформировать  $n$  разрезов равных удалений:

$$\begin{pmatrix} 2 \cos(kh_1) & 1 \\ 2 \cos(kh_2) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ 2 \cos(kh_n) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S(k) \\ G(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T(k, h_1) \\ T(k, h_2) \\ \vdots \\ T(k, h_n) \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Решение ее методом наименьших квадратов приводит к системе нормальных уравнений:

$$\begin{pmatrix} 4 \sum_{i=1}^n \cos^2(kh_i) & 2 \sum_{i=1}^n \cos(kh_i) \\ 2 \sum_{i=1}^n \cos(kh_i) & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S(k) \\ G(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \sum_{i=1}^n \cos(kh_i) T(k, h_i) \\ \sum_{i=1}^n T(k, h_i) \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Отсюда явно могут быть выписаны решения для  $S()$  и  $G()$ . В частности,

$$S(k) = \frac{n \sum_{i=1}^n \cos(kh_i) T(k, h_i) - \sum_{i=1}^n T(k, h_i) \sum_{i=1}^n T(k, h_i) \cos(kh_i)}{\text{Det}}, \quad (15)$$

где Det – определитель системы (14):

$$\text{Det} = 4 \left[ \sum_{i=1}^n \cos^2(kh_i) - \left( \sum_{i=1}^n \cos(kh_i) \right)^2 \right]. \quad (16)$$

Очевидно, что при  $k = 0$  определитель (16) становится равным нулю. Как уже отмечалось, это эквивалентно утверждению о невозможности определения постоянной составляющей статических поправок из системы (4).

Представляет определенный интерес анализ выражений (15) и (16) для так называемой “идеальной” расстановки: максимальное удаление в ней равно длине всего профиля ОСТ. Можно показать, что в этом случае для ненулевых пространственных частот определитель (16) становится равным  $2n^2$ , где  $n$  – число каналов в расстановке. Если, используя дискретное преобразование Фурье, перейти в область пространственных частот по оси половинных удалений, то оказывается, что выражение (15) для  $j$ -й частоты  $k_j = 2\pi j/L$  ( $j \neq 0$ ) может быть представлено в следующей простой форме (см. также Приложение 2):

$$S(k_j) = \hat{T}(k_j, k_j). \quad (17)$$

Другими словами, статические поправки, представленные в частотной области, могут быть найдены как сечение двумерного спектра наблюдаемых времен прихода отражения (за исключением постоянной составляющей). Это иллюстрирует общеизвестный факт, что операция коррекции статических поправок эквивалентна двумерной пространственной фильтрации поля наблюдаемых времен  $t(x, h)$  [Booker et al., 1976; Kirkhan, Poggiaglielmi, 1976]. Однако, несмотря на всю простоту данного решения, его применение при ограниченных размерах расстановки затруднено. Главным препятствием является несопоставимость выборок сейсмических данных по ОСТ и удалениям. Практи-

ческое использование (17) подразумевает одинаковое (или хотя бы сравнимое) количество отсчетов на осях пространственных частот, отвечающих координате ОСТ и удалениям. Это влечет за собой требование сравнимости длины расстановки и длины участка профиля, участвующего в исходных уравнениях (13) (или (3)). Максимальная длина волны, для которой может быть найдено решение из (17), определяется частотой дискретизации оси пространственных частот, т. е. половиной максимальной удаления источник–приемник. Выражение же (15) теоретически позволяет находить решения для частотных компонент, длина волны которых не только сравнима с длиной расстановки, но и превышает ее. Ограничения связаны лишь с устойчивостью решения, которое зависит от точности определения времен прихода отражений, и с длиной профиля ОСТ.

На самом деле указанные недостатки решения (17) могут быть частично устранены при более детальном анализе. Так, в работе [Marcoux, 1981] было показано, что подобный подход с применением двумерного преобразования Фурье при рассмотрении четырехфакторной модели (1) и менее жесткими требованиями к параметрам расстановки (вместо требований “идеальности” декларировалась лишь ее равномерная дискретизация) позволяет получить решение задачи в частотной области, описывающееся выражением, немногим более сложным, чем (17). Однако определенным недостатком применения дискретного преобразования Фурье по оси удалений является использование дополнительного неявного предположения о периодичности данных в этом направлении (тогда как в (15) вынужденным требованием является только периодичность по координате средних точек). При детальном анализе обнаруживается, что данное допущение является существенным ограничением. Например, при равномерной пространственной дискретизации неявное предположение о том, что данные периодичны по координате удалений с периодом, равным длине расстановки, приводит к тому, что структурный фактор  $G()$  определяется просто путем осреднения времен по выборкам равных удалений (см. Приложение 2), что является плохим приближением.

В связи с этим, а также по ряду других соображений предпочтительнее использовать аналоги (15).

### Система наблюдений 3D

Обобщение определяющих уравнений для случая площадных сейсмических наблюдений не вызывает принципиальных трудностей. Удаления и координаты ОСТ, а также пространственное волновое число становятся векторными величинами. Двухфакторная модель в этом случае описывается следующим уравнением (ср. с (3) и (4)):

$$T(\mathbf{k}, \mathbf{h}) = S(jk)e^{j\mathbf{k}\mathbf{h}} + S(jk)e^{-j\mathbf{k}\mathbf{h}} + G(\mathbf{k}), \quad (18)$$

$$T(\mathbf{k}, \mathbf{h}) = S(\mathbf{k}) \cdot 2 \cos(\mathbf{k}\mathbf{h}) + G(\mathbf{k}), \quad (19)$$

$$\mathbf{k}\mathbf{h} = k_x h_x + k_y h_y.$$

Если снова рассмотреть систему из двух уравнений (19), аналогичную (5), то решение будет выглядеть следующим образом:

$$S(\mathbf{k}) = \frac{T(\mathbf{k}, \mathbf{h}_1) - T(\mathbf{k}, \mathbf{h}_2)}{\text{Det}},$$

$$\text{Det} = 2(\cos(\mathbf{k}\mathbf{h}_1) - \cos(\mathbf{k}\mathbf{h}_2)) = 4 \sin\left(\frac{\mathbf{h}_1 + \mathbf{h}_2}{2} \mathbf{k}\right) \sin\left(\frac{\mathbf{h}_1 - \mathbf{h}_2}{2} \mathbf{k}\right).$$

Определитель обнуляется в том случае, если вектор  $\mathbf{k}$  ортогонален полусумме или полуразности векторов-удалений. Также он становится равным нулю в том случае, если сумма или разность проекций половины удаления каналов на волновой вектор кратна длине волны ( $(\mathbf{h}_1 + \mathbf{h}_2)\mathbf{k} = 2\pi n$ ). В то же время устойчивое определение частотной компоненты  $S(\mathbf{k})$  возможно по удалениям, направление которых отличается от  $\mathbf{k}$ .

Однако на сегодняшний день возможности непосредственного применения данного подхода несколько ограничены. Связано это прежде всего с небольшой плотностью точек физических наблюдений при проведении полевых работ 3D, а также неравномерным распределением трасс по удалениям и азимутам. В результате этого кубы равных удалений при фиксированном азимуте характеризуются очень большим шагом пространственной дискретизации, а также ее неравномерностью. Для предотвращения эффекта наложения частот перед применением данного метода необходимо учесть короткопериодные составляющие статической поправки. Другой проблемой, осложняющей работу с реальными данными, является нерегулярность систем наблюдений, заключающаяся в произвольной форме полигона, ограничивающего участок съемки, неравномерное распределение кратности по площади и т. д. Выборки равных удалений реальных сейсмических съемок характеризуются наличием большого числа пропусков данных на сетке бинирования, что является серьезным препятствием к переходу в область пространственных частот. На первый взгляд, влияние указанных факторов должно приводить к тому, что в рассматриваемой постановке задача практически не будет решаться. Несмотря на это, при удачной перепараметризации некоторые результаты все же могут быть получены даже для таких "прореженных" съемок.

Одной из наиболее эффективных, по мнению авторов, является параметризация cross-spread [Vermeer, 2005]. Ее преимущество заключается в том, что сейсмические данные при подходящей схеме бинирования (по всем четырем осям) достаточно равномерно и плотно покрывают исследуемую территорию.

Рассмотрим пример такой параметризации для трехфакторного уравнения (11). Введем обозначения для координат двух типов выборок cross-spread:

$$1) \mathbf{c}_1 = \begin{pmatrix} x_s \\ y_r \end{pmatrix}, \quad \mathbf{l}_1 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} x_r - x_s \\ y_s - y_r \end{pmatrix};$$

$$2) \mathbf{c}_2 = \begin{pmatrix} x_r \\ y_s \end{pmatrix}, \quad \mathbf{l}_2 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} x_r - x_s \\ y_s - y_r \end{pmatrix} = -\mathbf{l}_1.$$

Тогда уравнение (11) примет вид:

$$t(\mathbf{c}_1, \mathbf{l}_1) = s(\mathbf{c}_1 + \mathbf{l}_1 - \mathbf{h}) + r(\mathbf{c}_1 + \mathbf{l}_1 + \mathbf{h}) + g(\mathbf{c}_1 + \mathbf{l}_1),$$

$$t(\mathbf{c}_2, \mathbf{l}_2) = s(\mathbf{c}_2 + \mathbf{l}_2 - \mathbf{h}) + r(\mathbf{c}_2 + \mathbf{l}_2 + \mathbf{h}) + g(\mathbf{c}_2 + \mathbf{l}_2).$$

Эти две параметризации формально симметричны относительно перестановки местами источников и приемников. Однако для реальных сейсмических съемок 3D в одной из параметризаций (условно назовем ее выборкой первого типа) сетка центральных точек выборок cross-spread располагается на площади с довольно большим шагом дискретизации, соответствующим расстоянию между линиями источников и приемников, а двумерная дискретизация внутри отдельно взятой выборки cross-spread отвечает шагу между при-

емниками и источниками вдоль соответствующих линий (для ортогональных расстановок). При параметризации второго типа наблюдается обратная картина: детальная дискретизация поверхности наблюдений по координатам центральных точек cross-spread компенсируется сильной прореженностью самих выборок cross-spread. Благодаря таким особенностям реальных систем наблюдений, использование двух типов параметризации с необходимостью влечет за собой возникновение отличий в области их применимости, практической реализации алгоритмов и получаемых результатах.

Поскольку с формальной точки зрения полученные два уравнения имеют одинаковый вид, рассмотрим далее первое из них, опуская индексы при переменных. Выполняя двумерное преобразование Фурье по координате  $\mathbf{c}$  (координата центральной точки выборки cross-spread), получаем

$$T(\mathbf{k}, \mathbf{l}) = S(k)e^{-j\mathbf{k}(\mathbf{l}-\mathbf{h})} + R(k)e^{j\mathbf{k}(\mathbf{l}+\mathbf{h})} + G(\mathbf{k})e^{j\mathbf{k}\mathbf{l}}. \quad (20)$$

На первый взгляд данное уравнение отличается от (18) только наличием фазового множителя, однако его левая часть соответствует выборке cross-spread, а не точке ОСТ, т. е. пространственная сетка, по которой выполняется преобразование Фурье, является более редкой. В связи с тем, что средние точки выборок cross-spread расположены на сетке с большим пространственным шагом дискретизации, чем точки ОСТ, можно предположить, что из этих выборок удастся сформировать наборы данных, характеризующиеся примерно одинаковым вектором  $\mathbf{l}$ , без пропусков покрывающие всю площадь. Кроме того, можно утверждать, что для решения поставленной задачи указанная параметризация является более естественной по сравнению с выборками ОСТ, поскольку дискретизация выполняется с шагом, отвечающим поверхностям позициям источников и приемников. Можно также показать, что для сейсмической расстановки типа "крест" решение системы (20) будет эквивалентно решению (18) при записи последней для элементарной ячейки ОСТ с удвоенными линейными размерами.

Рассмотрим для примера типичную сейсмическую расстановку типа "крест" с шагом между приемными линиями 300 м и линиями источников – 50 м. Стандартный размер бина ОСТ для такой расстановки равен  $25 \times 25$  м. При этом шаг пространственной дискретизации для выборок cross-spread составляет  $300 \times 300$  м для первого типа и  $50 \times 50$  м для второго типа. Первые можно использовать для определения низкочастотных компонент статических поправок, а вторые – для среднечастотных. Как уже говорилось, преимущество выборки второго типа (и особенно первого) перед выборками ОСТ с естественным размером бина заключается в их более высокой кратности. Таким образом, один из возможных сценариев решения задачи для неплотных систем наблюдения 3D может выглядеть так:

- определение высокочастотной компоненты с помощью одной из автоматических процедур;
- определение среднечастотной компоненты по выборке cross-spread второго типа (при условии достаточной плотности наблюдений);
- определение низкочастотной составляющей по выборке cross-spread первого типа.

Преимущество параметризации cross-spread перед выборками ОТВ и ОТП для такого типа расстановок заключается в их более равномерной пространственной дискретизации. Так, для рассматриваемого примера, в случае выбора в качестве независимых координат пары ОТВ-удаление, пространственная ячейка характеризовалась бы размерами  $300 \times 50$  м. Между тем возможен подход, при котором определение частотных компонент статических поправок выполняется в три этапа. На первом шаге выполняется анализ по выборкам ОТВ-удаление для пространственных волновых векторов с преимущественным направлением вдоль линий источников. На втором шаге решение ищется для волновых векторов с направлением вдоль линий приема в параметризации ОТП-удаление. Затем эти два решения объединяются. Для системы ОТВ-удаление получаем

$$T(\mathbf{k}, \mathbf{h}) = S(k) + R(\mathbf{k})e^{j2\mathbf{k}\mathbf{h}} + G(\mathbf{k})e^{j\mathbf{k}\mathbf{h}}.$$

Другим возможным подходом к решению проблемы получения качественных выборок является использование процедур гибкого бинирования как по координатам средних точек, так и в пространстве векторов удалений источник–приемник.

### ТЕСТИРОВАНИЕ НА МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

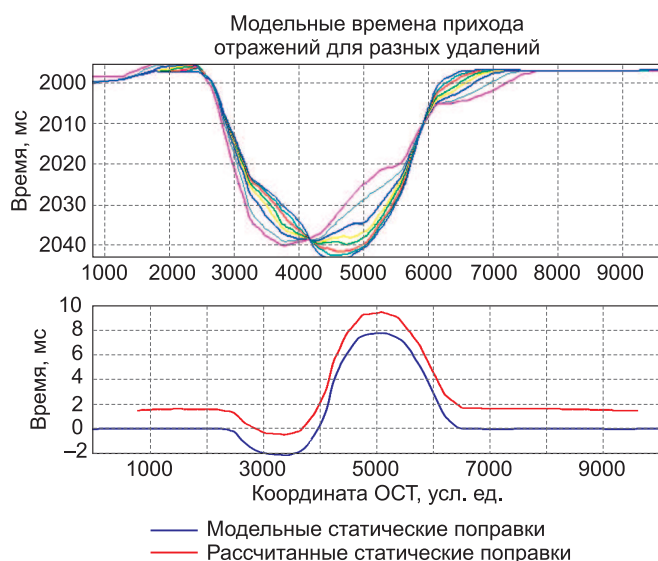
Для первоначального тестирования алгоритма было синтезировано несколько наборов профильных данных, в точности удовлетворяющих уравнениям (2).

#### 2D-данные

На рис. 4 показаны графики, отвечающие простой модели низкочастотной аномалии. Максимальное удаление сейсмической расстановки было взято равным 1 км (т. е. в 4 раза меньше размера аномалии).

Видно, что за исключением постоянной составляющей рассчитанные кривые статических поправок и структурного фактора очень хорошо совпадают с модельными, несмотря на то что характер аномалии носит существенно “длиннопериодный” характер.

Более сложная модель статических поправок, содержащая частотные компоненты на всех пространственных периодах, представлена на рис. 5. Влияние



верхней части разреза моделируется случайной функцией со степенным распределением энергии по частоте (высокие частоты, близкие к частоте Найквиста, были отфильтрованы для наглядности). Длина профиля составляла 48 км, в то время как максимальное удаление, используемое при расчетах, – 2,2 км. При расчете статических поправок рассмотренным способом использовалось всего 6 выборок равных удалений.

Из приведенных графиков видно, что основной вклад в погрешность дает низкочастотная составляющая, период которой почти в 10 раз больше длины расстановки. Более высокочастотные компоненты статических поправок восстанавливаются практически идеально.

### 3D-данные

Для оценки возможностей предлагаемой методики в площадном варианте были синтезированы поля времен, отвечающие уравнению (11) для сейсмической расстановки со следующими параметрами (выбранными по аналогии с характеристиками современных сейсмических съемок 3D, проводимых в Западной Сибири):

- тип расстановки – “крест”;
- шаг между линиями приема – 200 м;
- шаг между линиями источников – 200 м;
- шаг между источниками на линии ПВ – 50 м;
- шаг между приемниками на линии ПП – 50 м;
- количество линий приема в активной расстановке – 8;
- количество каналов в одной линии – 80;
- максимальное удаление – 2000 м;
- площадь съемки – 125 км<sup>2</sup>.

При таких параметрах размер натуральной ячейки сетки ОСТ составлял  $25 \times 25$  м, ячейки сетки cross-spread –  $50 \times 50$  м. Бинирование выборок cross-spread по удалениям осуществлялось на естественную сетку, размер ячеек которой составлял: (половина расстояния между линиями приема) × (половина расстояния между линиями источников). Количество ячеек, отвечающих фиксированному вектору удаления ПВ-ПП, в единичной выборке cross-spread при таком бинировании равнялось 160. Другими словами, максимальное число уравнений в системе (20) составляет 160.

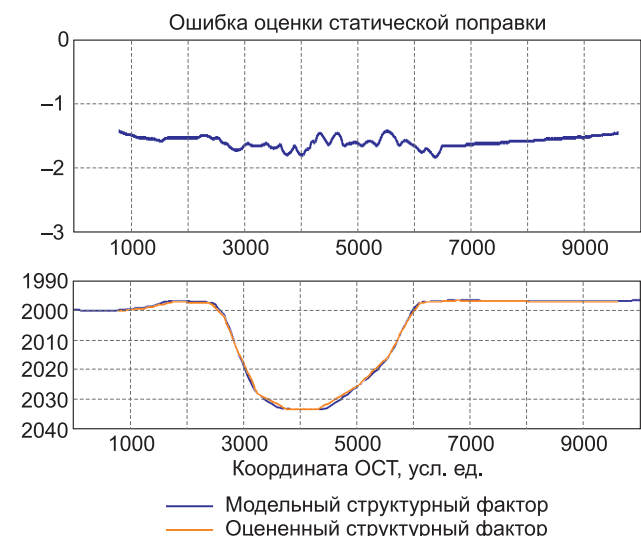
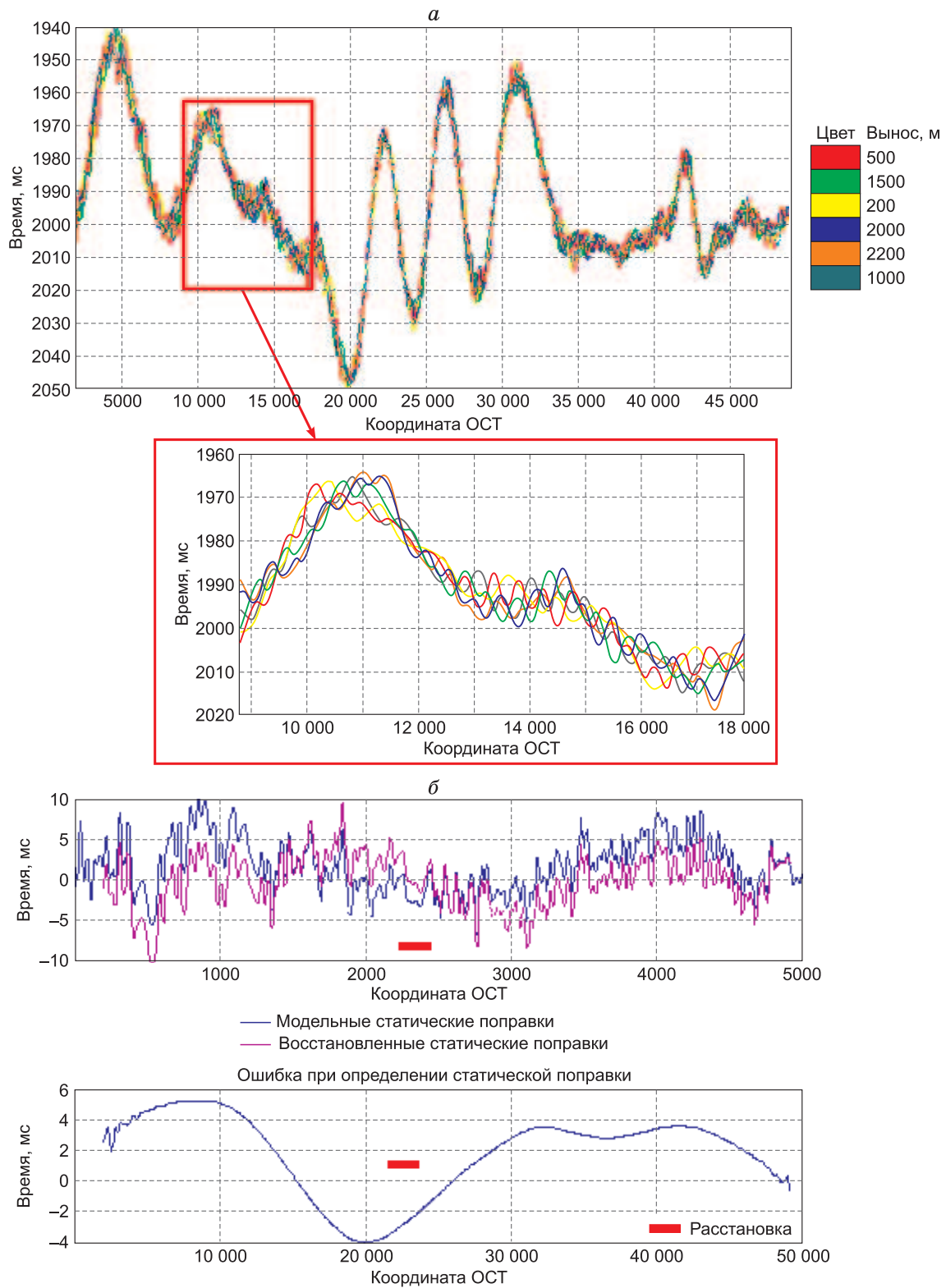


Рис. 4. Пример 1. Одиночная низкочастотная аномалия.



**Рис. 5.** Пример 2. Синтетические данные 2D, широкополосная модель статических поправок: *a* – модельные ВП отражения для различных выборок равных удалений; *б* – результат расчета статических поправок.



При расчете синтетических времен в модель верхней части были заложены 4 аномалии (рис. 6). Первые три имели квадратную форму со сторонами 1500, 2500 и 4500 м и характеризовались временными задержками 40 мс. Четвертая аномалия имела более сложную форму, моделируя влияние меандрирующего русла. Соответствующее ей максимальное значение временной задержки также составляло 40 мс. Структурный фактор модели принимался постоянным.

После выполнения пространственного преобразования Фурье по координатам выборок cross-spread, формирования и решения для каждой пространственной частоты систем уравнений (20) выполнялась пространственная фильтрация полученных распределений факторов  $S(\mathbf{k})$  и  $R(\mathbf{k})$ . Подбор параметров фильтра осуществлялся в интерактивном режиме. В результате максимальная величина пространственного периода, присутствовавшего в решении, составляла 6000 м (использовался изотропный пространственный фильтр, характеризующийся начальной и конечной частотами среза, отвечающими значениям пространственного периода 4000 и 6000 м соответственно).

Полученные карты поправок показаны на рис. 7 (карты поправок за пункт взрыва (ПВ), пункт приема (ПП), структурный фактор). Видно, что ограничение частотного состава и достаточно редкая дискретизация модельной сейсмической расстановки приводит к возникновению краевых эффектов вблизи резких границ аномалий, однако в целом качество восстановления является неплохим.

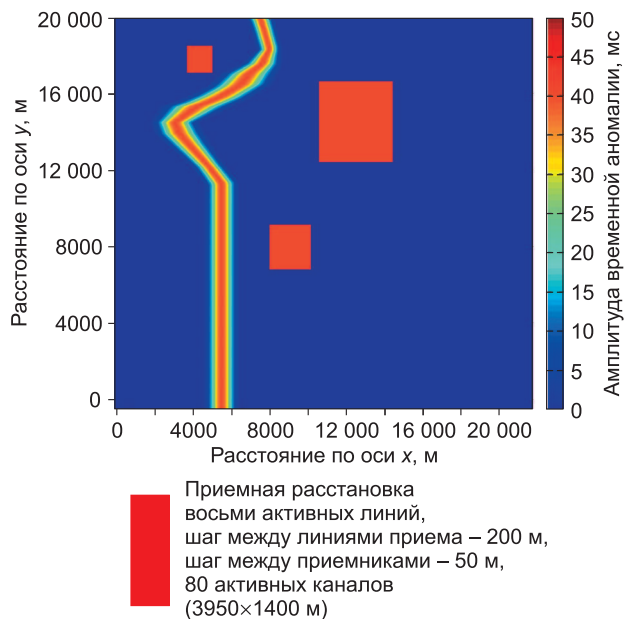
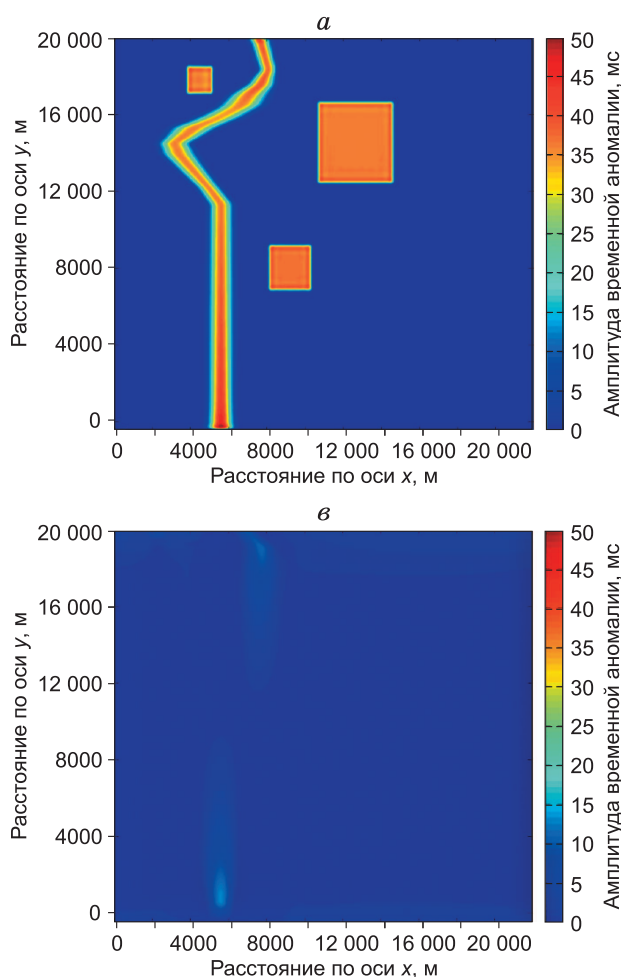


Рис. 6. Пример 3. Модель поверхностно-согласованных статических поправок, использованная для расчета синтетических времен прихода в случае 3D-данных.

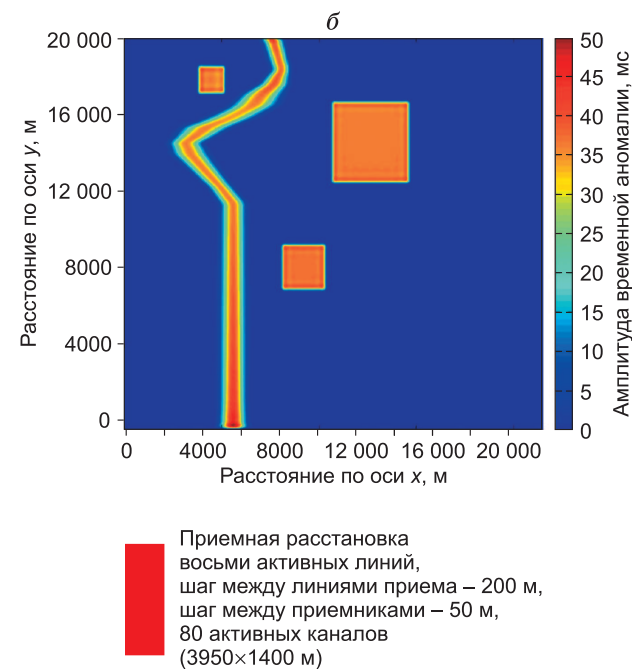
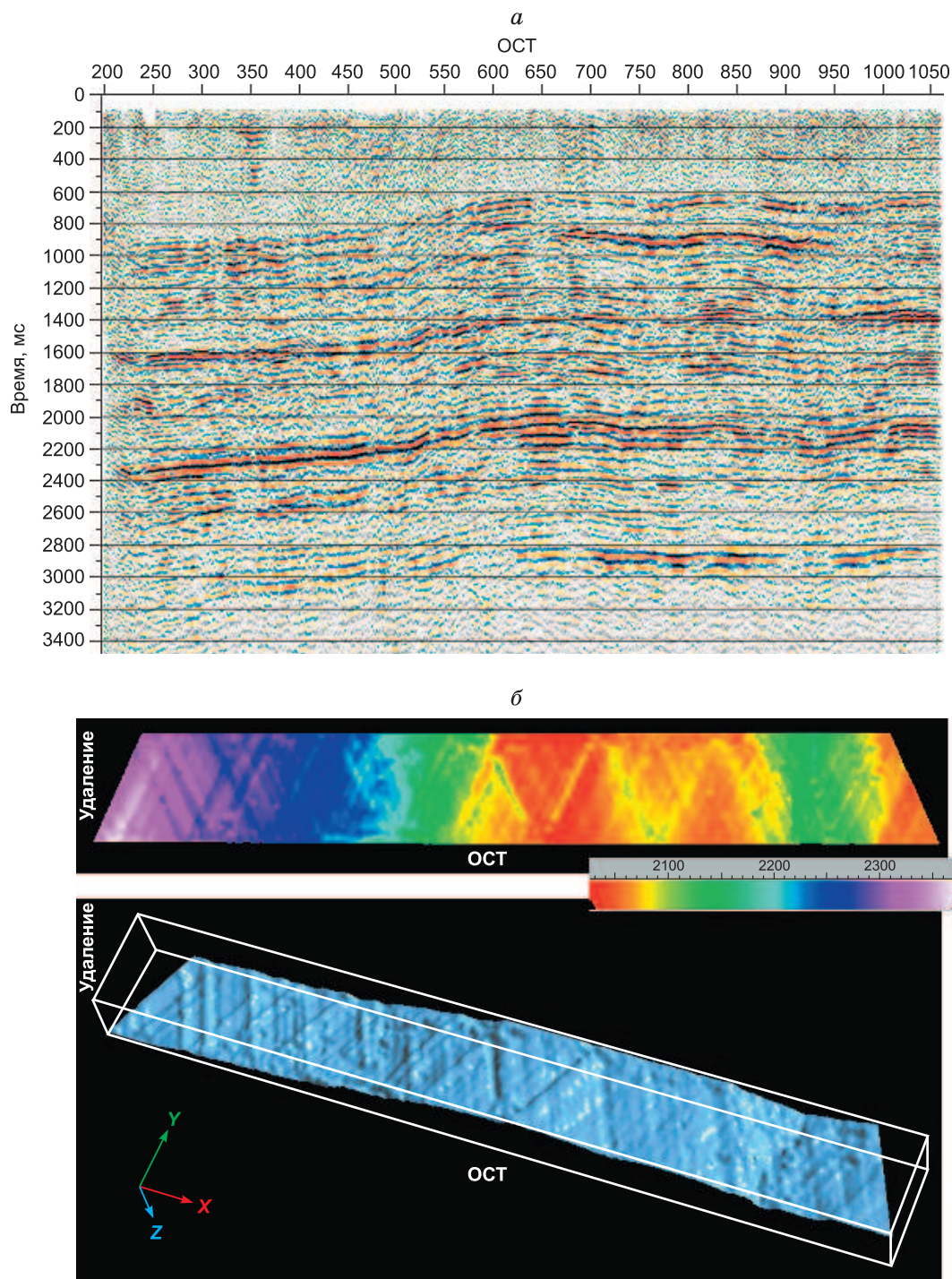


Рис. 7. Пример 3. Результат определения статических поправок по синтетическим данным 3D. Карта поправок для источников (*а*), приемников (*б*); структурный фактор (*в*).

**ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ  
К РЕАЛЬНЫМ ДАННЫМ  
2D-данные**

В качестве первого примера эффективного применения предлагаемой методики к реальным данным рассмотрим результаты, полученные на материалах детализационных сейсморазведочных работ 2D одного из месторождений северной части Западной Сибири. Кратность съемки составляла 32, максимальное удаление – 2950 м, длина профиля – 22 км.

На рис. 8 представлен предварительный временной разрез, полученный с учетом статических поправок за рельеф, а также поле двойного времени пробега (с введенными кинематическими поправками) отражения от горизонта Б (ОГ Б) в координатах ОСТ–удаление. Наличие высокоамплитудных линейных аномалий, прослеживающихся под углом 45° к оси координат ОСТ, говорит о существовании скоростных неоднородностей в верхней части разреза. Особенно значительные искажения наблюдаются на восточном крае профиля.

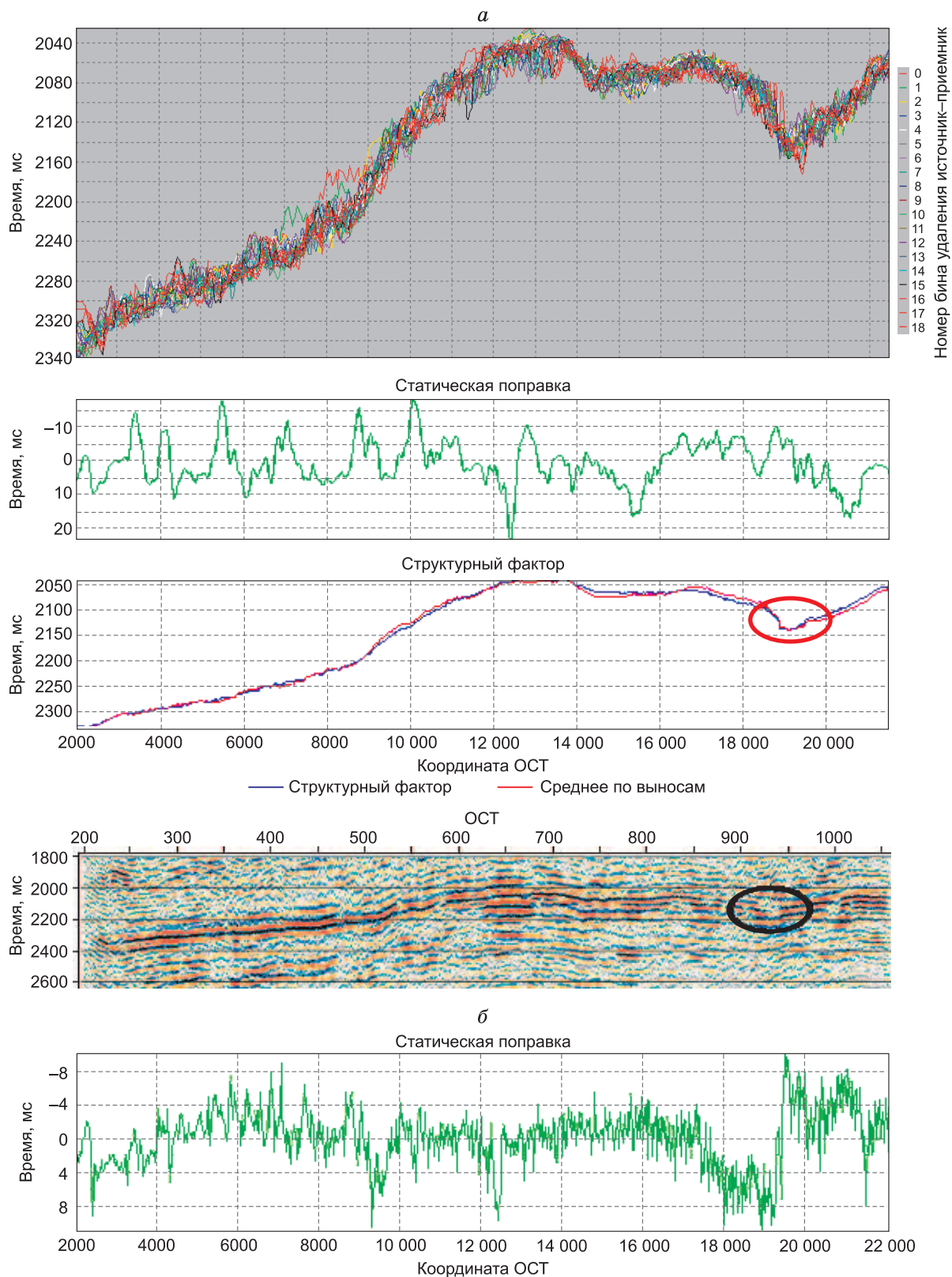


**Рис. 8.** Пример 4. Сейсмические данные 2D (Западная Сибирь):

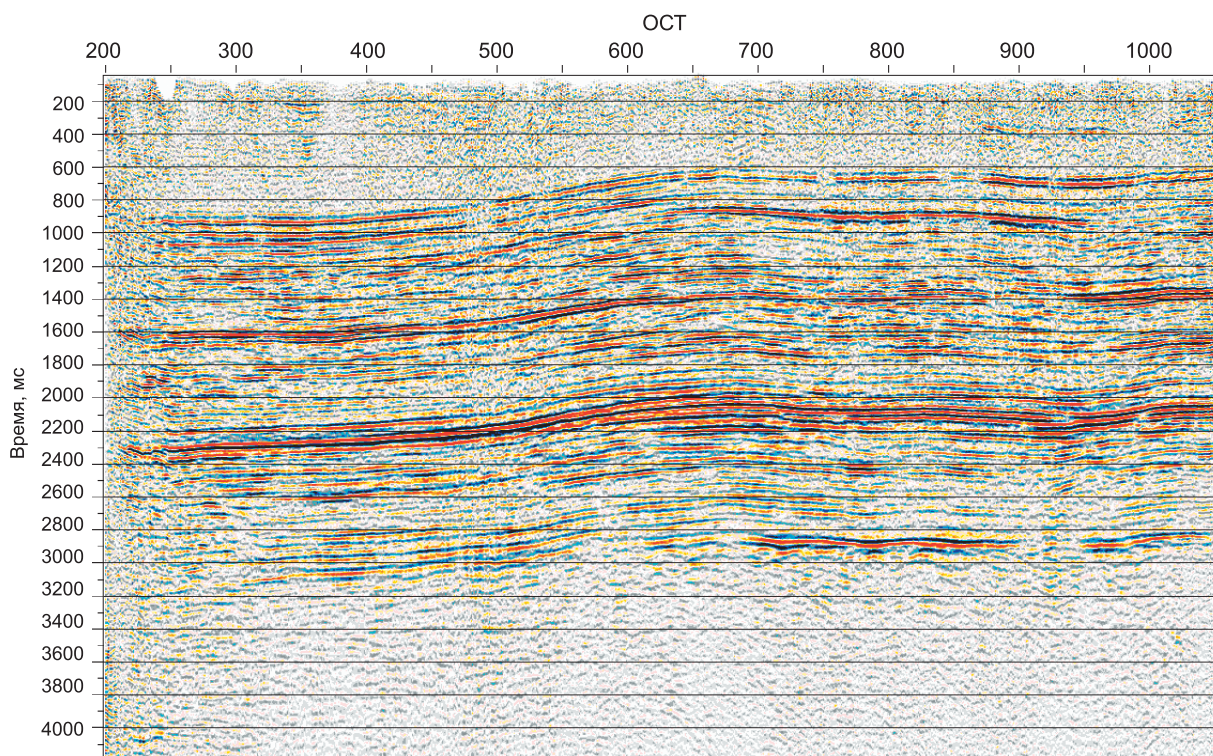
*a* – предварительный временной разрез, *б* – поле времен двойного времени пробега от ОГ Б в координатах ОСТ–удаление.

Результат применения первой итерации определения статических поправок по представленной здесь методике показан на рис. 9. Для сравнения на графике восстановленного структурного фактора нанесен

также результат осреднения поля времен по всем удалениям. По причинам, приведенным выше, значимые отличия этих двух графиков не позволяют искать решение в виде (17).



**Рис. 9.** Результат оценки статических поправок:  
*а* – первая итерация, *б* – вторая итерация.



**Рис. 10.** Пример 4. Суммарный временной разрез после двух итераций коррекции статических поправок.

После первой итерации не удалось полностью скорректировать аномалию верхней части разреза (ВЧР), расположенную в восточной части профиля (в интервале OCT 900–950). Это было связано с тем, что на данном участке профиля измерение времен прихода отражения характеризуется низкой точностью. После первой итерации качество определения времени пробега улучшилось, что позволило с меньшей погрешностью выявить и учесть данную аномалию. После повторного скоростного анализа и второй итерации расчета статических поправок был получен разрез, показанный на рис. 10.

Данный пример иллюстрирует тот факт, что одной из основных проблем в процедуре коррекции статических поправок является достоверное определение времен прихода отражений, задающих левую часть уравнения (1). Ошибки на этом этапе могут играть даже более важную роль, чем тонкая настройка регуляризирующих параметров. В то же время линейность исходной системы уравнений и независимость ее коэффициентов от параметров волнового поля позволяют эффективно применять итеративный подход к решению задачи. При этом существенной является возможность коррекции левой части уравнения (1) или (20) на каждом шаге поиска решения. Улучшение качества сейсмического изображения после применения статических поправок позволяет уменьшить погрешность определения времен прихода отражения, что, в свою очередь, повышает точность нахождения решения системы (1) на следующей итерации.

### 3D-данные

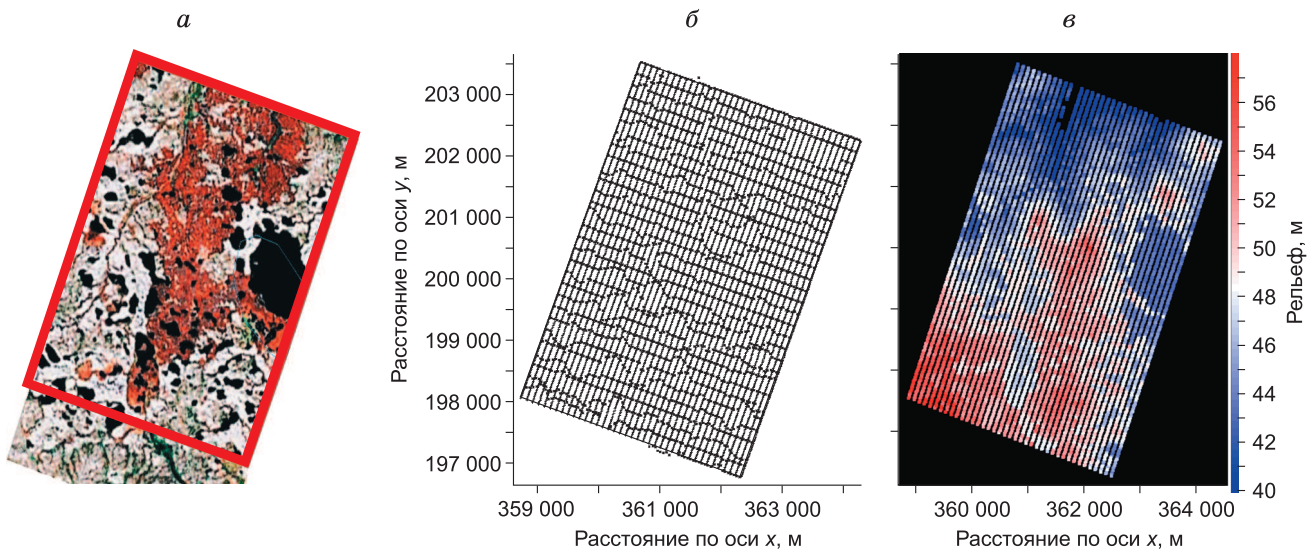
Рассмотрим кратко особенности применения описанной методики на примере сейсмических данных 3D, полученных на одном из месторождений се-

вера Западной Сибири. Для этой территории характерной является проблема определения статических поправок, связанных с неоднородностью толщи многолетнемерзлых пород. Параметры расстановки сейсмической съемки 3D были следующими:

- тип расстановки – “крест”;
- шаг между линиями приема – 100 м;
- шаг между линиями источников – 200 м;
- шаг между источниками на линии ПВ – 50 м;
- шаг между приемниками на линии ПП – 25 м;
- количество линий приема в активной расстановке – 18;
- количество каналов в одной линии – 128;
- количество каналов в активной расстановке – 2160;
- максимальное удаление – 1950 м;
- номинальная кратность OCT – 72;
- размер бина – 12,5 × 25 м;
- площадь съемки – 30 км<sup>2</sup>.

На рис. 11 показана схема фактического расположения источников и приемников, карта рельефа, а также космоснимок района работ.

Следует отметить, что указанные характеристики расстановки на сегодняшний день являются достаточно уникальными для среднестатистической съемки 3D в России. Связано это с тем, что основной задачей перед сейсморазведочными работами в данном случае являлось детальное изучение относительно неглубоко (менее 1 км) залегающих продуктивных отложений сеноманского возраста. Близость целевого интервала к поверхности и сильная неоднородность его внутреннего строения послужили основными причинами необходимости проектирования и проведения сейсморазведочных работ повышенной плотности. Однако намечающиеся тенденции в современной производ-

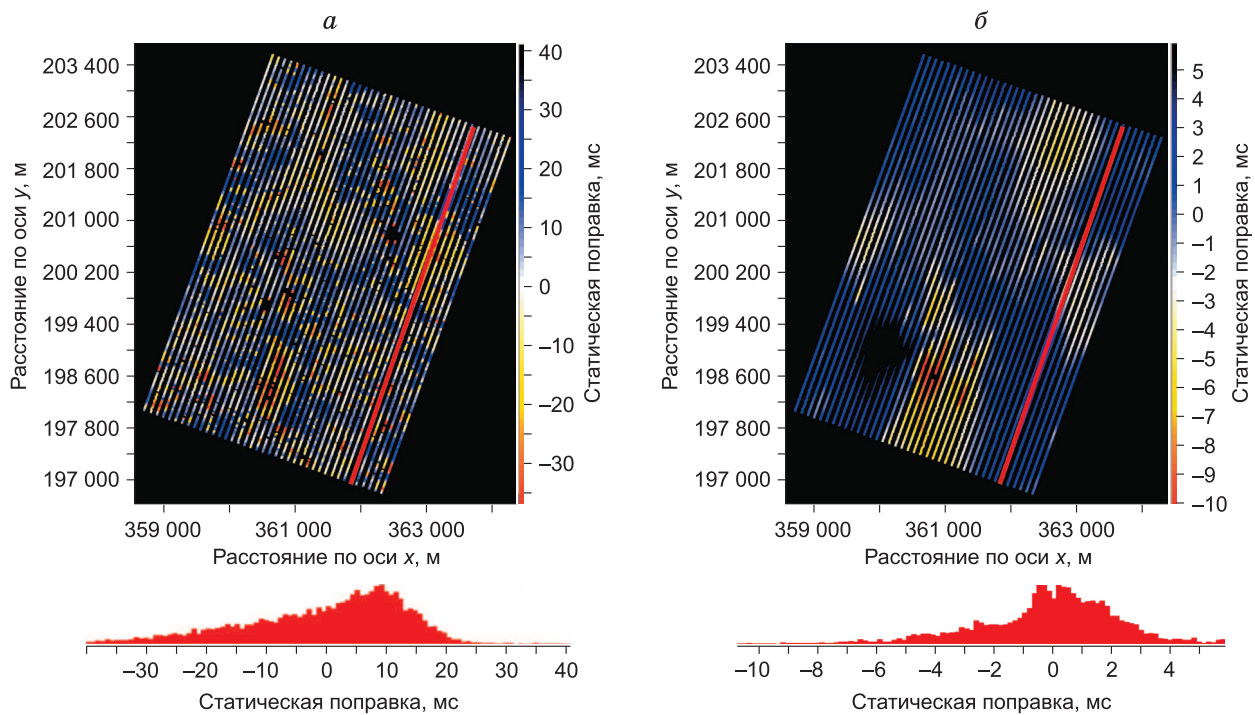


**Рис. 11.** Космоснимок района работ (а); схема расположения источников и приемников съемки 3D (б); карта рельефа (по пунктам приема) (в).

ственной сейсморазведке позволяют надеяться на то, что постановка более плотных съемок 3D в недалеком будущем перестанет быть исключением из правил.

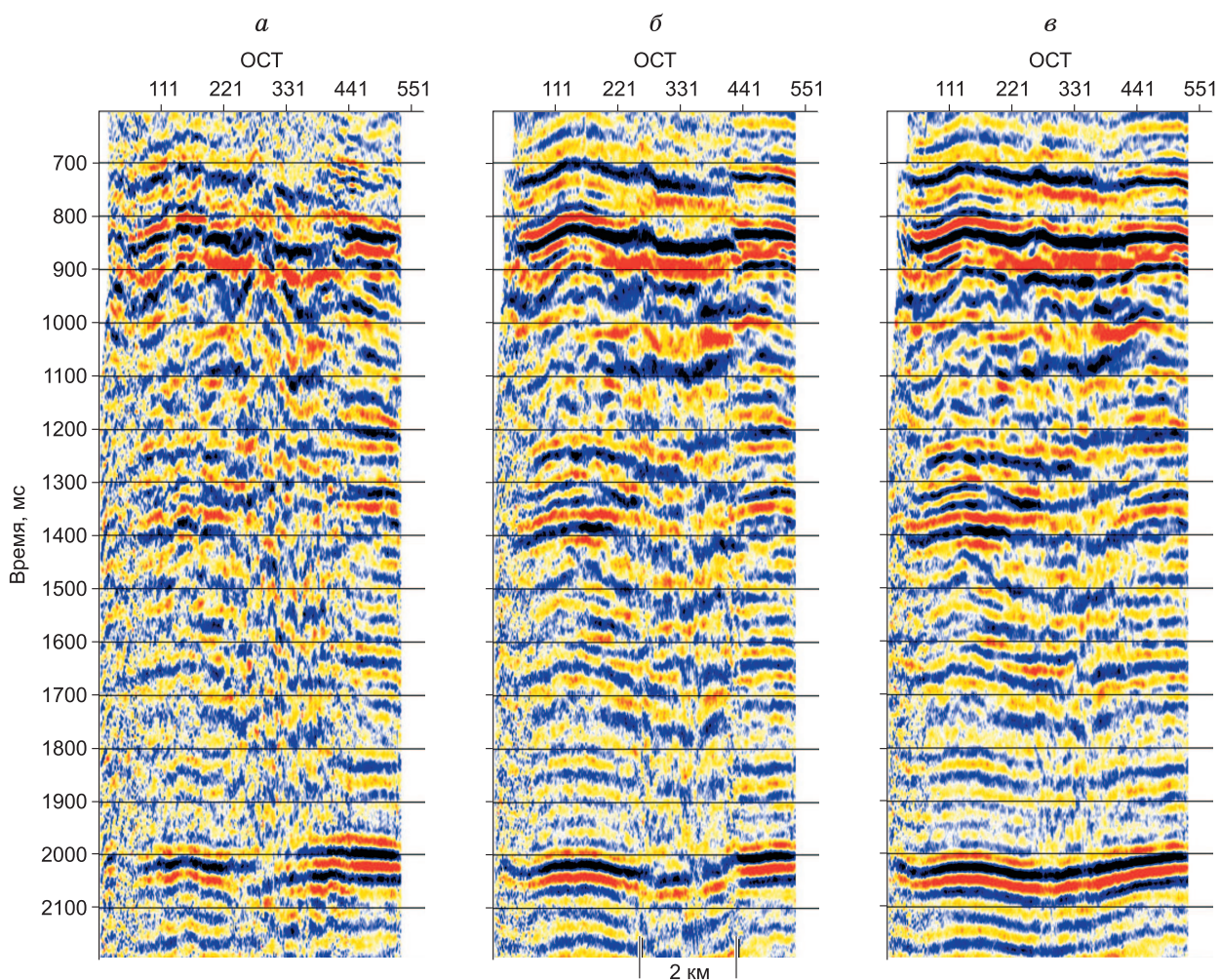
В рассматриваемом примере неучет статических поправок негативно сказывается на качестве суммарных временных разрезов. При этом контуры анома-

лий, связанных с рельефом и областями под крупными озерами, могут быть прослежены и на картах высокочастотных статических поправок (рис. 12, а), полученных одним из стандартных методов без использования поверхностно-согласованной модели. Однако отсутствие среднечастотной составляющей не



Приемная расстановка  
18 активных линий,  
шаг между линиями приема – 100 м,  
шаг между приемниками – 25 м,  
128 активных каналов  
(3175×1700 м)

**Рис. 12.** Карты статических поправок для пунктов приема: а – короткопериодная составляющая, полученная автоматическим методом максимизации энергии суммотрассы; б – среднепериодная составляющая, рассчитанная с применением рассматриваемого подхода в области пространственных частот.



**Рис. 13.** Фрагменты временных разрезов:

*a* – с учетом априорных статических поправок за рельеф; *б* – с учетом короткопериодной составляющей статических поправок; *в* – с учетом среднепериодной составляющей, полученной с применением рассматриваемого подхода.

позволяет провести выравнивание времен отражений в пределах выборок ОСТ перед суммированием, что является причиной низкого качества сейсмического изображения (рис. 13, *a*, *б*). Применение рассмотренной в настоящей работе методики позволило получить карту среднечастотной составляющей статических поправок (см. рис. 12, *б*), использование которых приводит к заметному положительному эффекту (см. рис. 13, *в*). Расчет данных поправок выполнялся с использованием параметризации cross-spread первого типа (что обусловило “низкочастотный” характер получаемого результата): шаг между центральными точками выборок составлял  $100 \times 200$  м. При этом количество бинов в отдельной выборке cross-spread могло достигать 4608 (128 вдоль линий приема и 36 вдоль линий источников). Для предотвращения эффекта наложения частот в качестве исходных данных использовались времена с учтенными короткопериодными поправками, полученными автоматическим методом.

Основной задачей рассмотрения описанного выше примера являлась проверка работоспособности методики на реальных 3D-данных. Понятно, что для съемок небольшой площади (относительно размера

активной расстановки), характеризующихся достаточно высокой плотностью наблюдений, предлагаемая методика будет давать результаты, сходные с результатами применения других алгоритмов, использующих поверхностно-согласованную модель. Однако при увеличении площади работ различия в подходах к регуляризации решения будут оказывать значительное влияние на характеристики получаемых распределений статических поправок.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная в настоящей работе методика позволяет эффективно решать задачу определения статических поправок в рамках поверхностно-согласованной модели. Основными этапами решения данной проблемы являются:

- процедура определения времен прихода отражения (левой части уравнения (1));
- регуляризация решения, заключающаяся в ограничении частотного диапазона решения;
- возможность организации итеративного процесса с коррекцией поля времен на каждом шаге и интерактивным подбором параметров регуляризации.

Предлагаемый подход доказал свою эффективность для профильных (2D) наблюдений. Успех его применения к данным 3D-сейсморазведки сильно зависит от плотности и регулярности сейсмической расстановки. Низкая кратность ОСТ и неравномерность распределения трасс по удалениям и азимутам являются существенным ограничением для решения рассматриваемой задачи в области пространственных частот, однако в современной производственной сейсморазведке наблюдаются тенденции к увеличению плотности сейсмических съемок и применению широкоазимутальных расстановок, что открывает широкие перспективы для развития предлагаемого подхода в недалеком будущем.

Другим препятствием, затрудняющим практическое применение рассмотренной методики, может являться неправильная форма полигона сейсмической съемки 3D. На больших площадях данная проблема может быть частично решена путем разделения участка работ на отдельные (возможно, перекрывающиеся) прямоугольные области, нахождения статических поправок для этих областей и последующей сшивки полученных решений.

В целом авторы выражают надежду, что предлагаемый подход может послужить эффективным инструментом для решения задачи учета влияния неоднородностей ВЧР.

Рассмотренная методика содержит в себе потенциальные возможности для обобщения. Хорошо известно, что формулировка задачи определения статических поправок полностью эквивалентна проблеме коррекции амплитуд сейсмической записи за поверхностные условия [Гольдин, Митрофанов, 1975; Taner, Koehler, 1981]. Отличия заключаются лишь в том, что вместо времен прихода отражения в левой части уравнения (1) расположены логарифмы амплитуд отраженной волны. Вектор неизвестных при этом содержит логарифмы корректирующих множителей, отвечающих поверхностным позициям источников и приемников, фактору удаления, а также “глубинному” фактору:

$$\ln(A(x_r, x_s)) = \ln(A_R(x_r)) + \ln(A_S(x_s)) + (A_G(x_{cmp})) + (A_O(x_{cmp}, \Delta x)). \quad (21)$$

Переходя в область пространственных частот, получаем выражение

$$L(\mathbf{k}, \mathbf{h}) = LS(jk)e^{jkh} + LR(jk)e^{-jkh} + LG(\mathbf{k}) + LO(\mathbf{k})|h|^2. \quad (22)$$

Вводя частотную зависимость в выражение (22), получаем формулировку задачи коррекции амплитудного спектра отраженных волн за поверхностные условия:

$$L(\omega, \mathbf{k}, \mathbf{h}) = LS(\omega, jk)e^{jkh} + LR(\omega, jk)e^{-jkh} + LG(\omega, \mathbf{k}) + LO(\omega, \mathbf{k})|h|^2.$$

Рассмотренный в настоящей работе подход полностью применим к решению данных систем уравнений, однако при практической реализации может возникнуть ряд новых трудностей. Амплитудные аномалии сейсмической записи, связанные с поверхностью, не всегда удовлетворяют поверхностно-согласованной модели. Например, при перемещении прием-

ных линий в процессе полевых работ на одной и той же поверхностной позиции могут быть реализованы различные условия приема, не связанные ни с условиями данной позиции, ни с номером канала, ни тем более с поверхностной позицией источника. Этим, в частности, объясняется менее успешное применение на практике таких процедур, как поверхностно-согласованная амплитудная коррекция или поверхностно-согласованная деконволюция, по сравнению с аналогичными модулями по коррекции статических поправок. Для улучшения ситуации необходимо на этапах предобработки по возможности выполнять коррекцию поверхностно-несогласованных амплитудных аномалий. Для этого обычно применяют различные процедуры, позволяющие выявить и скомпенсировать явные аномальные выбросы, однако полностью решить задачу о корректном восстановлении распределения амплитуд таким способом, как правило, не удается. Наличие остаточных амплитудных аномалий, не привязанных к конкретному участку дневной поверхности, затрудняет решение последующей задачи в поверхностно-согласованной постановке, а на окончательных суммарных временных разрезах приводит к возникновению характерных полос переменного усиления. Поэтому важно как можно более тщательно подходить к вопросу коррекции амплитудных аномалий на этапе предобработки. Предлагаемый в настоящей работе подход может служить эффективным инструментом, позволяющим локализовать и оценивать такие аномалии при организации итеративного процесса коррекции амплитуд. С этой точки зрения большой информативностью могут обладать карты невязок, получаемые в результате решения переопределенных систем уравнений типа (21).

На первый взгляд кажется естественным объединение задачи определения временных (статических) и амплитудных поправок с составлением единой системы уравнений. При этом действительная часть решения данной системы будет отвечать логарифму корректирующих множителей амплитудных поправок, а мнимая часть – классическому решению задачи определения статических поправок [Taner, Koehler, 1981]. Однако на этом пути (помимо рассмотренного ранее вопроса об адекватности поверхностно-согласованной модели для сейсмических амплитуд) возникают дополнительные сложности, связанные с неоднозначностью определения фазового спектра. Поэтому для достижения устойчивости решения такой системы придется использовать дополнительные ограничения. В связи с этим может оказаться, что вычислительную часть определения поверхностно-согласованных поправок для амплитуд и времен с практической точки зрения лучше разделить. Однако часто наблюдаемое наличие корреляции между пространственным положением статических и динамических аномалий говорит о целесообразности объединения процедур их оценки и учета в рамках единого итеративного подхода.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена на базе ООО “Геофизические системы данных”. Авторы выражают признательность Виталию Степановичу Козыреву за обсуждения и высказанные ценные замечания при подготовке настоящей работы.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### П1. Анализ определителя системы уравнений для трехфакторного случая (2D-вариант)

Рассмотрим вопрос об устойчивости определения частотных компонент трехфакторной модели (факторы источника, приемника, глубинный) посредством решения системы из трех уравнений вида (12). Очевидно, наименьшей чувствительностью к погрешностям времен будет характеризоваться система с максимальным по модулю значением определителя.

Обозначим  $Z_p = e^{ikh_p}$ , где  $h_p$  – половина удаления источник–приемник для  $p$ -го канала (здесь принята условная нумерация каналов, не связанная с порядком расположения приемников в расстановке). Тогда система из трех уравнений (12) переписывается в виде

$$\begin{pmatrix} Z_1 & Z_1^{-1} & 1 \\ Z_2 & Z_2^{-1} & 1 \\ Z_3 & Z_3^{-1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S(k) \\ R(k) \\ G(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T(k, h_1) \\ T(k, h_2) \\ T(k, h_3) \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Выпишем определитель (раскладывая по последнему столбцу)

$$\text{Det} = \left( \frac{Z_2}{Z_3} - \frac{Z_3}{Z_2} \right) + \left( \frac{Z_3}{Z_1} - \frac{Z_1}{Z_3} \right) + \left( \frac{Z_1}{Z_2} - \frac{Z_2}{Z_1} \right),$$

вводя обозначение для полуразности удалений  $h_{sp} = h_s - h_p$  и учитывая, что

$$\frac{Z_s}{Z_p} = e^{ikh_{sp}} = e^{ik(h_s - h_p)} = e^{-ik(h_p - h_s)} = e^{ikh_{ps}},$$

получаем

$$\text{Det} = e^{ikh_{23}} - e^{-ikh_{23}} + e^{ikh_{31}} - e^{-ikh_{31}} + e^{ikh_{12}} - e^{-ikh_{12}}, \quad (24)$$

Иными словами, величина определителя зависит не от абсолютных значений половины удалений источник–приемник, а от их разности, нормированной на длину пространственного периода  $L = 2\pi/k$ . Поскольку величины  $h_{12}$ ,  $h_{23}$ ,  $h_{31}$  не являются независимыми, введем обозначения:

$$x = kh_{23} = \frac{2\pi}{L}(h_2 - h_3),$$

$$y = kh_{31} = \frac{2\pi}{L}(h_3 - h_1).$$

Тогда  $kh_{12} = -(x + y)$ .

Выражение (24) может быть записано в виде

$$\text{Det} = 2i(\sin(x) + \sin(y) + \sin(x+y)). \quad (25)$$

Приравниваем к нулю производные от данного выражения по переменным  $x$  и  $y$ :

$$\begin{cases} \cos(x) - \cos(x+y) = 0 \\ \cos(y) - \cos(x+y) = 0 \end{cases}.$$

Решая эту систему уравнений, находим четыре семейства решений, из которых только одно отвечает отличному от нуля значению определителя:

$$\begin{cases} x = \frac{2\pi n}{3} + 2\pi l \\ y = x + 2\pi m \end{cases}.$$

Здесь  $m$ ,  $l$  и  $n$  – целые числа,  $n \neq 3p$ ,  $n \neq 0$ . При этом модуль определителя достигает максимального значения  $-3\sqrt{3}$ .

Данное семейство решений исчерпывается следующими соотношениями полуразности удалений (с точностью до перестановки индексов;  $m$ ,  $l$  – произвольные целые числа):

$$\begin{pmatrix} h_{23} = \frac{L}{3} + Ll, & \frac{2L}{3} + Ll \\ h_{31} = \frac{L}{3} + Lm, & \frac{2L}{3} + Lm \end{pmatrix}.$$

Другими словами, наиболее устойчивое решение системы (23) для частотной составляющей статических поправок, отвечающей пространственному периоду  $L$ , следует ожидать при значении полуразности удалений, равной (с точностью до периода) одной трети или двум третям  $L$ . Если же какие-либо два удаления отличаются на величину, кратную  $2L$ , то, как можно увидеть из (25), определитель становится равным нулю и система (23) не имеет единственного решения.

### П2. Анализ системы уравнений для “идеальной” расстановки 2D

Рассмотрим фланговую сейсмическую расстановку с равномерным шагом между приемниками  $2\Delta h$ , совпадающим с интервалом между источниками. Дополнительно предположим, что длина активной расстановки совпадает с длиной полнократной зоны анализируемого участка профиля. Тогда половина удаления для  $p$ -го канала ( $p = 0, 1, \dots, n-1$ ) будет равна  $h_p = h_0 + \Delta h \cdot p$ , а уравнение (12) запишется как

$$T(k, h_p) = R(k)Z_0 Z^p + S(k)Z_0^{-1} Z^{-p} + G(k), \quad (26)$$

где  $Z_0 = e^{jh_0 k}$ ,  $Z = e^{j\Delta h k}$ .

При этом разрешенность по оси пространственных частот определяется длиной профиля и равна  $\Delta k = 2\pi/(n\Delta h)$ , частота Найквиста  $k_{\max} = \pi/(\Delta h)$ , а дискретное преобразование Фурье вычисляется для круговых пространственных частот  $k_s = 2\pi s/(n\Delta h)$ ,  $s = 0, 1, \dots, n-1$ .

Тогда система нормальных уравнений, отвечающая переопределенной системе (26), будет иметь вид

$$\begin{pmatrix} Z_0^2 \sum_{p=0}^{n-1} Z^{2p} n & Z_0^2 \sum_{p=0}^{n-1} Z^{2p} \\ n Z_0^{-2} \sum_{p=0}^{n-1} Z^{-2p} & Z_0^{-1} \sum_{p=0}^{n-1} Z^{-p} \\ Z_0 \sum_{p=0}^{n-1} Z^p & Z_0^{-1} \sum_{p=0}^{n-1} Z^{-p} n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S(k) \\ R(k) \\ G(k) \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} Z_0 \sum_{p=0}^{n-1} Z^p T(k, h_p) \\ Z_0^{-1} \sum_{p=0}^{n-1} Z^{-p} T(k, h_p) \\ \sum_{p=0}^{n-1} T(k, h_p) \end{pmatrix}. \quad (27)$$

Далее можно выписать решение данной системы, основываясь на следующих вспомогательных тождествах (верных при указанных ограничениях на параметры расстановки).



Учитывая свойство “идеальности” сейсмической расстановки, получаем:

$$Z^n = e^{j\Delta h k_s n} = e^{j\Delta h \frac{2\pi s}{\Delta h}} = e^{j2\pi s} = 1.$$

Тогда

$$\sum_{p=0}^{n-1} Z^p = \frac{Z^n - 1}{Z - 1} = \begin{cases} 0, & Z \neq 1 : s \neq 0 \\ n, & s = 0 \end{cases},$$

$$\sum_{p=0}^{n-1} Z^{2p} = \frac{Z^{2n} - 1}{Z^2 - 1} = \begin{cases} 0, & Z \neq \pm 1 : s \neq 0, \frac{n}{2} \\ n, & s = 0, \frac{n}{2} \end{cases}.$$

Основываясь на этих выражениях, для значений пространственной частоты, не равной нулю и частоте Найквиста, система уравнений (27) преобразуется к виду

$$\begin{pmatrix} 0 & n & 0 \\ n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S(k) \\ R(k) \\ G(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_0 \sum_{p=0}^{n-1} Z^p T(k, h_p) \\ Z_0^{-1} \sum_{p=0}^{n-1} Z^{-p} T(k, h_p) \\ \sum_{p=0}^{n-1} T(k, h_p) \end{pmatrix},$$

откуда выписывается решение:

$$R(k) = \frac{Z_0}{n} \sum_{p=0}^{n-1} Z^p T(k, h_p),$$

$$S(k) = \frac{Z_0^{-1}}{n} \sum_{p=0}^{n-1} Z^{-p} T(k, h_p), \quad (28)$$

$$G(k) = \frac{1}{n} \sum_{p=0}^{n-1} T(k, h_p). \quad (29)$$

Правая часть выражения (28) представляет собой сечение двумерного преобразования Фурье от функции  $t(x, h)$ , умноженное на фазовый множитель  $Z_0^{-1}$ . Для “идеальной” расстановки с нулевым минимальным удалением данный фазовый множитель равен единице, в результате чего выражение (28) преобразуется к (17). Заслуживает внимания также выражение (29), означающее, что для “идеальной” расстановки структурный фактор может быть получен простым осреднением поля времен по всевозможным значениям удалений, что, безусловно, плохо применимо к реальным сейсмическим данным в случае наличия длинно- и среднепериодных статических аномалий.

## Литература

- Глоговский В.М., Хачатрян А.Р.** Коррекция статических поправок в сейсморазведке МОГТ на нефть и газ. М.: ВНИИОЕНГ, 1986.
- Глоговский В.М., Хачатрян А.Р., Грингауз Т.К.** К оценке дефекта системы уравнений коррекции статических поправок // Нефтегазовая геология и геофизика. 1983. № 11. С. 10–11.
- Гольдин С.В., Митрофанов Г.М.** Спектрально-статистический метод учета поверхностных неоднородностей в системах многократного прослеживания отраженных волн // Геология и геофизика. 1975. № 11. С. 102–111.
- Карпыш В.С.** Определение статических поправок при возбуждении сейсмических колебаний на поверхности земли // Разведочная геофизика. 1981. Вып. 93. С. 31–40.
- Козырев В.С., Королев Е.К.** Интерактивная методика коррекции статических поправок для условий сложного строения верхней части разреза // Геофизика. 1994. № 3. С. 13–19.
- Козырев В.С., Жуков А.П., Коротков И.П., Жуков А.А., Шнеерсон М.Б.** Учет неоднородностей верхней части разреза в сейсморазведке. Современные технологии. М.: Недра, 2004. 227 с.
- Шварцман Ю.П.** Алгоритм определения статических временных сдвигов сейсмических трасс // Прикладная геофизика. 1978. Вып. 93. С. 64–72.
- Baxias F., Glogovsky V., Langman S.** An interactively constrained approach to long period static corrections // The 59th Conference and Tech. Ext., EAGE. The extended abstracts. 1997. V. 1. P. 1925–1928.
- Booker A.H., Linville A.F., Wason B.** Long wavelength static estimation // Geophysics. 1976. V. 41, N 5. P. 939–959.
- Kirkham D.J., Poggiagliolmi E.** Long period statics determination by inverse filtering // Geophysical prospecting. 1976. V. 24, N 4. P. 737–755.
- Kozyrev V., Zhukov A., Korotkov I., Zhukov A.** An interactive solution for resolving mid-wavelength statics anomalies // Leading Edge. 2004. P. 270–274.
- Marcoux M.O.** On the resolution of statics, structure, and residual normal moveout // Geophysics. 1981. V. 46, N 7. P. 984–993.
- Taner M., Turhan, Koehler F.** Surface consistent corrections // Geophysics. 1981. V. 46, N 1. P. 17–22.
- Vermeer Gijs J.O.** 3-D seismic survey design // SEG. 2005.
- Wiggins R.A., Lerner K.L., Wisecup R.D.** Residual statics as a general linear inverse problem // Geophysics. 1976. V. 41, N 5. P. 922–938.

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

**ЭПОВ Кирилл Александрович.** Дата рождения 20.05.1977. Закончил в 2000 году магистратуру кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ. На данный момент работает начальником отдела интерпретации ООО “Геофизические системы данных”. Москва, Ленинский проспект, 113/1, офис Е-302. E-mail: kirill@gds.ru; раб. +7495-234-27-94, доб. 132.

**АДАМОВИЧ Олег Олегович.** Дата рождения 20.04.1982. Закончил в 2005 году магистратуру кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ. На данный момент работает начальником отдела обработки ООО “Геофизические системы данных”. Москва, Ленинский проспект, 113/1, офис Е-302. E-mail: aoleg@gds.ru; раб. +7495-234-27-94, доб. 132.