



ЛИНЕЙНАЯ ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ЛОКАЦИИ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

Д.Н. Гапеев, А.А. Потапов

*Акционерное общество «Технологии обратных задач»,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 2/2, Россия, e-mail: dg@tinp.ru*

В статье рассматриваются факторы, влияющие на погрешность локации микросейсмических событий. Строятся линеаризованные оценки погрешности, показывается точность данного подхода на примере. Демонстрируется на примерах влияние следующих факторов: ошибки измерения координат микросейсмической антенны, неточность используемой модели для обработки и отсутствие информации о статических поправках, необходимых для компенсации зоны малых скоростей.

Микросейсмический мониторинг, оценка погрешности, микросейсмическое событие, локация, тензор сейсмического момента

ERROR ESTIMATION OF MICROSEISMIC EVENT PARAMETERS

D.N. Gapeev, A.A. Potapov

*«Technologies of Inverse Problems», Joint-Stock Company, Lavrentyev Avenue, 2/2, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: dg@tinp.ru*

In the paper factors affecting error of microseismic events location are considered. Linearized error estimates are constructed, an accuracy of this approach is shown by the example. The influence of the following factors is demonstrated by examples: coordinate measurement errors of the microseismic antenna, errors in the model used for processing, and lack of information on the static corrections necessary to compensate for the low-velocity zone.

Microseismic monitoring, error estimation, microseismic event, location, seismic moment tensor

ВВЕДЕНИЕ

За более чем 20 лет развития микросейсмического мониторинга (МСМ) были разработаны различные подходы к регистрации микросейсмических событий [Сердюков и др., 2015], методов обработки и методик интерпретации результатов. МСМ включает следующие этапы работ: проектирование, полевые работы, специализированная обработка и интерпретация результатов. На первом этапе (проектирования) необходимо иметь представление о возможностях метода, в частности, точности определения параметров микросейсмических событий.

Ключевой частью обработки микросейсмических данных является процедура выделения микросейсмического сигнала, на практике применяются методы, основанные как на лучевом представлении полей [Брыксин и др., 2015], так и на полноволновом моделировании [Азаров и др., 2016; Курленя и др., 2015]. Для надежного решения этой задачи необходимо использовать максимальное количество априорной

информации, но ограничения на искомое решение не должно быть «слишком жесткими». Так как в противном случае это приведет к сильным искажениям событий, не укладывающихся в модель, или к невозможности их выделения. Наиболее часто используемыми ограничениями на процедуру выделения микросейсмических событий являются область поиска событий, механизм очага, форма импульса и модель среды распространения волн.

Задача локации микросейсмических событий в расширенном смысле включает определение координат, тензора сейсмического момента и формы импульса для каждого микросейсмического события. Один из подходов решения задачи локации – обращение годографа прямой волны и пересчет амплитуд в тензор сейсмического момента – естественным образом разделяется на обратную кинематическую и динамическую задачи [Аки, Ричардс, 1983].

Часто оценки погрешностей локации микросейсмических событий для различных систем наблюдений строятся посредством обращения полного функционала [Яскевич и др., 2013] и [Grechka et al., 2013]. Однако в статье будет рассмотрен другой подход – анализ чувствительности [Глинских и др., 2005], основанный на линеаризации функционала прямой задачи [Глинских и др., 2013]. Данный метод позволяет получать оценки разрешающей способности различных методов [Табаровский и др., 2006].

ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТИ

Решением обратной кинематической задачи является нахождение координат гипоцентра. Координаты микросейсмических событий $X_0 = (x_1, x_2, x_3)$ вычисляются, зная «относительный» годограф T прямых волн («относительный», так как неизвестно начальное время возбуждения). В приемниках (X_1, \dots, X_N) сейсмической антенны определяются времена вступлений $T = (t_1, t_2, \dots, t_N)$. Модель распространения волн F задает связь $F(X_0, X_1, \dots, X_N) = T$ годографа и координат микросейсмических событий. Зная модель среды и координаты приемников, обращаем годограф для получения координат микросейсмических событий $X_0 = F_{X_1, \dots, X_N}^{-1}(T)$. Полностью описать процесс моделью невозможно, поэтому на практике всегда используется некоторое приближение \tilde{F} . Несоответствие модели \tilde{F} и реальной среды F приводит к погрешности определения координат $\varepsilon_m = |F_{X_1, \dots, X_N}^{-1}(T) - \tilde{F}_{X_1, \dots, X_N}^{-1}(T)|$.

Так как координаты приемников измеряются с погрешностью, то необходимо оценить влияние на решение кинематической задачи. Погрешность локации событий, вызванную погрешностью измерения координат приемников, обозначим $\varepsilon_s = |\tilde{F}_{X_1, \dots, X_N}^{-1}(T) - \tilde{F}_{\tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_N}^{-1}(T)|$.

Определение времен вступлений по реальным данным выполняется процедурой выделения сигнала, которая имеет различную точность определения в зависимости от различных параметров: несоответствие модели сигнала, несоответствие модели среды, соотношения сигнал/шум, пространственной некогерентности сигнала и т. д. Осложняющие факторы вносят вариации в годограф $\tilde{T} = T + \delta T$. Гипоцентр события с таким возмущением правой части определяется с погрешностью $\varepsilon_d = |\tilde{F}_{X_1, \dots, X_N}^{-1}(T) - \tilde{F}_{X_1, \dots, X_N}^{-1}(\tilde{T})|$. Возможно, стоит отнести влияние зоны малых скоростей (ЗМС) к этой части погрешности, так как это часто компенсируется статическими поправками.

Таким образом, общая погрешность определения координат источника $\varepsilon = |X_0 - \tilde{X}_0| = |F_{X_1, \dots, X_N}^{-1}(T) - \tilde{F}_{\tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_N}^{-1}(\tilde{T})|$ зависит от качества приближения модели \tilde{F} , точности измерения координат приемников $\tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_N$ и точности определения годографа \tilde{T} . Следовательно, верхняя оценка погрешности локации

состоит из трех частей: ошибка, связанная с неточностью модели ε_m , ошибка измерения координат приемников ε_s и ошибка определения годографа ε_d :

$$\varepsilon \leq \varepsilon_m + \varepsilon_s + \varepsilon_d.$$

Необходимо отметить, что ошибка ε_m зависит только от выбранной модели обращения параметров сигнала и никак не зависит от алгоритма выделения сигнала. Эту часть погрешности невозможно выразить аналитически по причине того, что неизвестна среда распространения сейсмических волн. Однако, сравнивая две разных модели, ее можно оценить.

Анализ погрешностей осложняется тем фактом, что оператор является нелинейным (даже в самом простом случае модели однородной среды). Линеаризация функционала $T = \tilde{F}(X_0, \dots, X_N)$:

$$\delta T = \frac{\partial \tilde{F}(X_0, \dots, X_N)}{\partial X_i} \delta X_i$$

позволяет получить количественные оценки погрешности определения гипоцентров и тензоров событий. Погрешность ε_d можно получить, решив полученное линейное уравнение:

$$\varepsilon_d = \left| \left(\frac{\partial \tilde{F}(X_0, \dots, X_N)}{\partial X_0} \right)^{-1} \delta T \right|.$$

Погрешность ε_s выражается следующим выражением:

$$\varepsilon_s = \left| \left(\frac{\partial \tilde{F}(X_0, \dots, X_N)}{\partial X_0} \right)^{-1} \left(\sum_{i=1}^N \frac{\partial \tilde{F}(X_0, \dots, X_N)}{\partial X_i} \delta X_i \right) \right|.$$

Точность этих оценок тем выше, чем меньше член второго порядка в следующем выражении:

$$\tilde{F}(X_0, \dots, X_i + \delta X_i, \dots, X_N) = \tilde{F}(X_0, \dots, X_i, \dots, X_N) + \frac{\partial \tilde{F}(X_0, \dots, X_N)}{\partial X_i} \delta X_i + o(|\delta X_i|^2).$$

МОДЕЛЬ ВОЗМУЩЕНИЙ

Вариации годографа сигнала можно разделить на случайные и систематические. Такие ошибки определения временных параметров можно описать случайными величинами нормального распределения $N(\mu_{t_i}, \sigma_{t_i}^2)$, где μ_{t_i} – систематическая часть погрешности (математическое ожидание) времени на i -ом канале, $\sigma_{t_i}^2$ – дисперсия случайной части.

Таким образом, случайные вариации координат гипоцентров δX_0 так же являются нормально распределенными случайными величинами:

$$\delta X_0 = \left(\frac{\partial \tilde{F}(X_0, \dots, X_N)}{\partial X_0} \right)^{-1} \delta T = \left(\sum_j \chi_{1,j} \delta t_j, \sum_j \chi_{2,j} \delta t_j, \sum_j \chi_{3,j} \delta t_j \right),$$

где $\chi_{i,j}$ – компоненты псевдообратной матрицы $\left(\frac{\partial \tilde{F}(X_0, \dots, X_N)}{\partial X_0} \right)^{-1}$, δt_j – компоненты возмущения годографа δT . Число обусловленности матрицы зависит от параметров системы наблюдения и глубинно-скоростной модели. Для описанного ниже примера числа обусловленности для обрабатываемых матриц не превышают 2.

Используя данный подход и предположение, что δt_j – независимые случайные величины, можно получить оценку погрешности по каждой координате отдельно:

$$\mu_{\delta x_i} = \sum_j \chi_{i,j} \mu_{\delta t_j}, \sigma_{\delta x_i}^2 = \sum_j \chi_{i,j}^2 \sigma_{\delta t_j}^2, 1 \leq i \leq 3.$$

Так же интерес представляет оценка погрешности в плоскости (x_1, x_2) (в горизонтальной плоскости, по латерали), которую будем обозначать с нижним индексом δr . Ее можно определить как максимальное значение оценки ошибки при повороте системы координат на угол α :

$$\mu_{\delta r} = \max_{\alpha} \mu_{\delta y_1} = \max_{\alpha} \sum_j (\chi_{1,j} \cos \alpha + \chi_{2,j} \sin \alpha) \mu_{\delta t_j} = \sqrt{\mu_{\delta x_1}^2 + \mu_{\delta x_2}^2},$$

$$\sigma_{\delta r}^2 = \max_{\alpha} \sigma_{\delta y_1}^2 = \max_{\alpha} \sum_j (\chi_{1,j} \cos \alpha + \chi_{2,j} \sin \alpha)^2 \sigma_{\delta t_j}^2 = \frac{\sigma_{\delta x_1}^2 + \sigma_{\delta x_2}^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\delta x_1}^2 - \sigma_{\delta x_2}^2}{2} \right)^2 + \left(\sum_j \chi_{1,j} \chi_{2,j} \sigma_{\delta t_j}^2 \right)^2},$$

где δy_1 – вариации первой компоненты координат гипоцентров после поворота системы координат на угол α .

Общие скалярные оценки погрешности можно выразить следующими формулами:

$$\varepsilon_d^{x_i} = |x_i - \tilde{x}_i| \approx |\mu_{\delta x_i}| + 3\sigma_{\delta x_i}, 1 \leq i \leq 3,$$

$$\varepsilon_d^r = \sqrt{(x_1 - \tilde{x}_1)^2 + (x_2 - \tilde{x}_2)^2} \approx |\mu_{\delta r}| + 3\sigma_{\delta r}.$$

ПРИМЕР

В примере рассматриваются две изотропные горизонтально-слоистые модели среды. Первая модель используется для моделирования микросейсмических событий, вторая для решения задачи локации. Модели построены на основе результатов исследований методом вертикального сейсмического профилирования (ВСП), проведенных на одном из месторождений Западной Сибири в двух разных скважинах. Стоит отметить, что данные, используемые для построения второй модели, специально закруглены.

На рис. 1 представлены значения V_p , V_s и ρ вдоль вертикальной скважины. Как видно на рисунке, представленные модели не совпадают ни по положению отражающих границ, ни по значениям параметров слоев. Однако тренды параметров совпадают и можно говорить о некоторой близости моделей.

В изотропном случае среды $\lambda = \rho(V_p^2 - 2V_s^2)$, $\mu = \rho V_s^2$ тензор сейсмического момента для модели разрыва можно представить в виде:

$$M_{i,j} = \lambda(N \cdot [U])\delta_{i,j} + \mu(n_i[u_j] + n_j[u_i]),$$

где $N = (n_1, n_2, n_3)$ – нормаль к плоскости разрыва, $[U] = ([u_1], [u_2], [u_3])$ – вектор смещения, $(N \cdot [U])$ – скалярное произведение векторов.

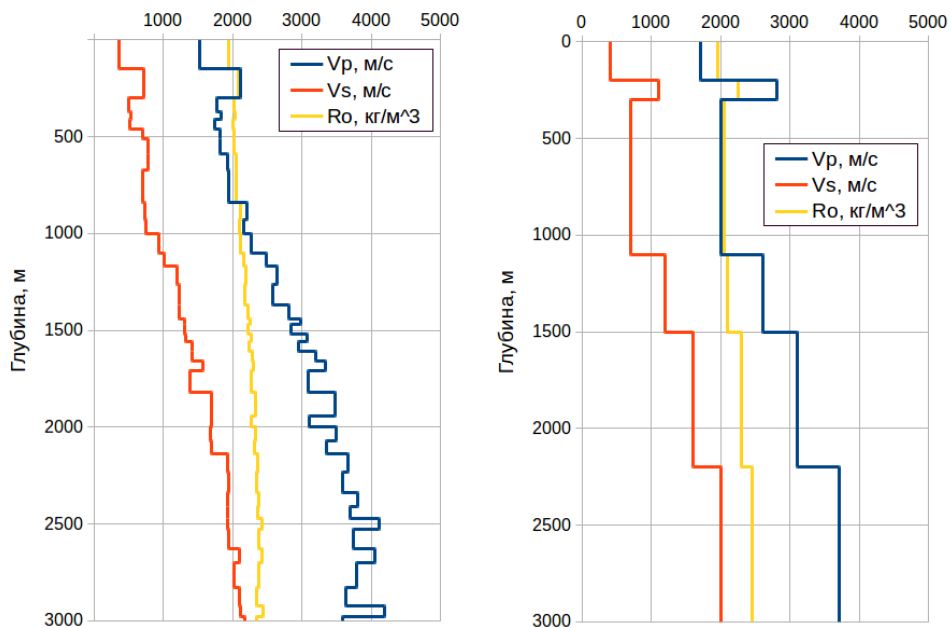


Рис. 1. Данные, используемые для построения слоистых моделей среды: слева – модель для расчета параметров микросейсмических событий, справа – упрощенная модель, применяемая для обработки

Рассмотрим модель вертикального разрыва, ориентированного на север $N = (1,0,0)$, с раскрытием трещины и с разным смещением по глубине и по азимуту разрыва $[U] = (0,1; 1; 0,5)$. Амплитуды сигнала на гиперплоскости $x_3 = 0$ для источника, помещенного в точке $X_0 = (0,0,2950)$, с описанным выше тензором сейсмического момента представлены на рис. 2. Импульс источника выбран в виде модели Рикера 30 Гц, магнитуда события равна минус одному.

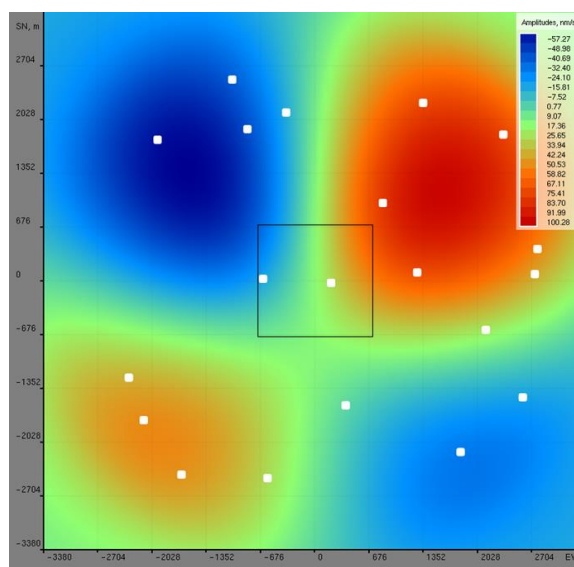


Рис. 2. Микросейсмическая антенна, состоящая из 20 групп (49=7*7 цифровых каналов с шагом 10 м); цвет фона соответствует амплитудам p -волны на дневной поверхности; квадратом выделена область поиска событий

Рассмотрим микросейсмическую антенну, представленную на рис. 2, состоящую из 20 цифровых групп приемников. Каждая цифровая группа состоит из $49=7*7$ цифровых каналов, регистрирующих вертикальную компоненту вектора скорости смещения, расстояние между соседними каналами 10 м. Апертура микросейсмической антенны составляет около 6 000 м.

На рис. 3 представлены значения ошибок определения координат источников ε_m^T , связанных с различием моделей, используемых для расчета прямой и обратной задач. Погрешность локации в горизонтальной плоскости у большей части области укладывается в 5 м, на краях доходит до 10 м. Значение ошибки по глубине находится в диапазоне 75–110 м, что часто для практических задач неудовлетворительно.

Эта часть погрешности зависит от качества глубинно-скоростной модели и теоретически может принимать значения от нуля до сколь угодно больших значений. Однако это слагаемое погрешности имеет полностью систематический характер, что приводит к смещению всех событий на указанную величину. Это дает возможность вводить процедуры коррекции по локации событий с заранее известными координатами, например, по перфорационным взрывам. В представленном на рис. 3 случае простой перенос перфорационного взрыва позволяет значительно уменьшить погрешность по глубине – до 35 м во всей области, и до 5–10 м в большей ее части.

Стоит отметить, что за качество решения задачи отвечает значение невязки. Как видно на рис. 4 среднеквадратичные значения невязки укладываются в 2 м/с, а максимальные отклонения на отдельных каналах находятся в диапазоне 1–5 м/с. Это говорит о том, что задача во временной области решена хорошо. Можно сделать вывод, что решение задачи выделения сигнала во временной области не гарантирует нахождения точного значения гипоцентров микросейсмических событий.

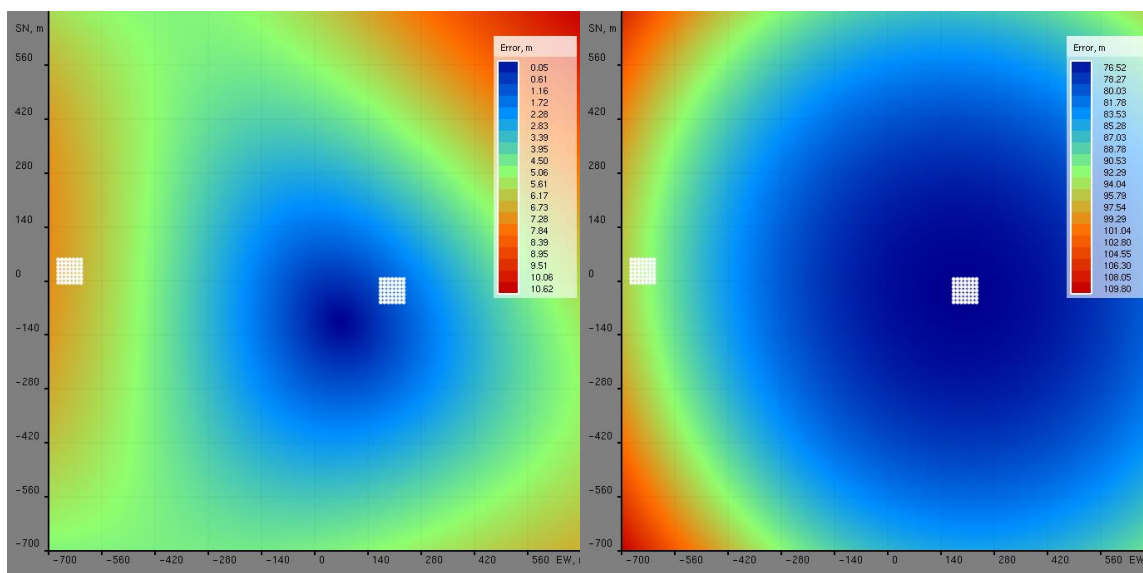


Рис. 3. Значения ошибок локации, которые связаны с различием моделей для прямой и обратной задачи: слева – ошибка по латерали; справа – ошибка по глубине

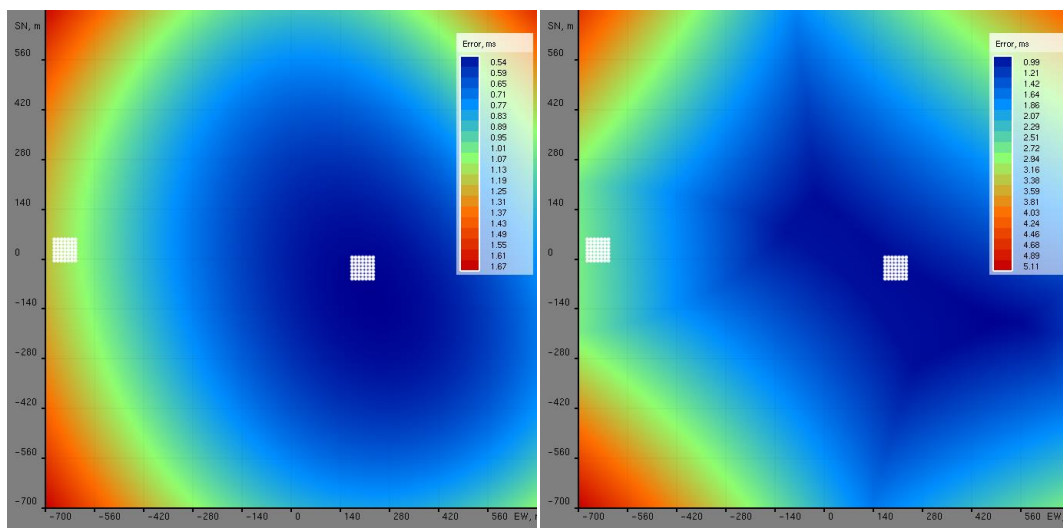


Рис. 4. Значение невязки найденного решения в случае использования различных моделей для прямой и обратной задачи: слева – среднеквадратичная невязка, справа – максимальная компонента невязки

Представим оценку погрешности определения координат событий в случае измерения координат приемников при помощи приборов спутниковой навигационной системы GPS/ГЛОНАСС «невысокой» точности, которые определяют координаты приемников в горизонтальной плоскости с точностью 5 м, а по высоте – 20 м. На рис. 5 представлена погрешность определения координат приемников: в горизонтальной плоскости – 7–10 м, по глубине – 25–30 м. Применение оборудования геодезического класса точности, которое точнее как минимум на два порядка, нивелирует эту составляющую погрешности локации микросейсмических событий практически полностью.

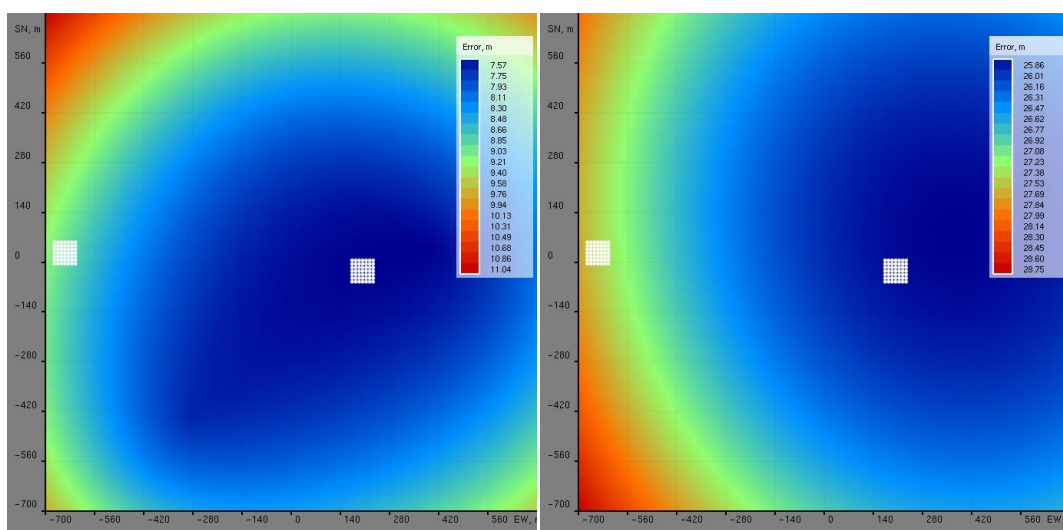


Рис. 5. Значения ошибок определения координат источников, связанных с ошибками измерения координат приемников (в горизонтальной плоскости – 5 м, по высоте – 20 м): слева – ошибка по латерали, справа – ошибка по глубине

Рассмотрим оценку влияния ЗМС на определение координат события, которое моделируется статическими поправками. Рассмотрим вариант, когда статические поправки имеют регулярную и

случайную составляющие. Это хорошо описывает случай, когда на площади ранее были проведены работы по изучению ЗМС. Значения регулярной составляющей статических поправок представлены на рис. 6 (группы пронумерованы с севера на юг). Случайную составляющую выберем равную 3 м/с на всех каналах записи. Как видно на рис. 7, погрешность по латерали составляет 6-13 м, по глубине 10-30 м.

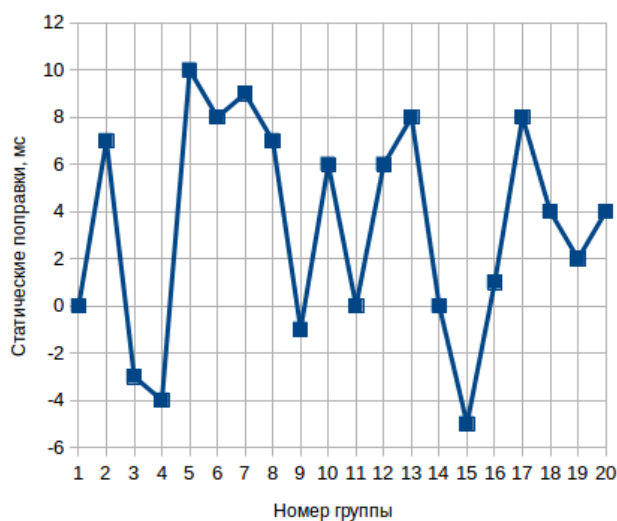


Рис. 6. Статические поправки для групп микросейсмической антенны, позволяющие корректировать влияние ЗМС

Операция линеаризации функционала вносит ошибки в оценки погрешности. Точность построенных линеаризованных оценок погрешностей для микросейсмического мониторинга с использованием поверхностной системы наблюдения представлена на рис. 8, где указана разница оценок для регулярной составляющей статических поправок (рис. 6). Погрешность на уровне 10 см предоставляет возможность применения линеаризованных оценок погрешности для практических задач.

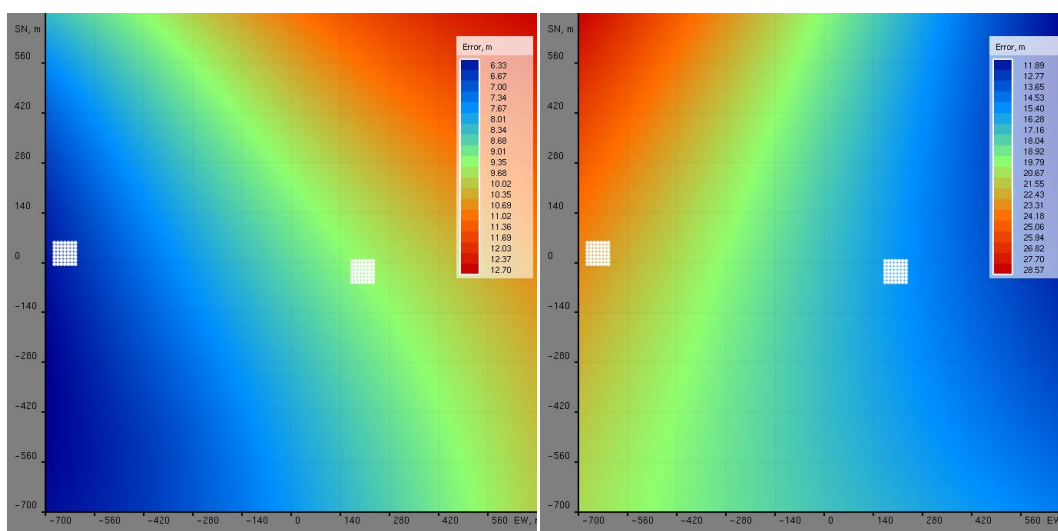


Рис. 7. Значения ошибок определения координат источников, связанных с влиянием ЗМС (неучет статических поправок): слева ошибка по латерали; справа – по глубине

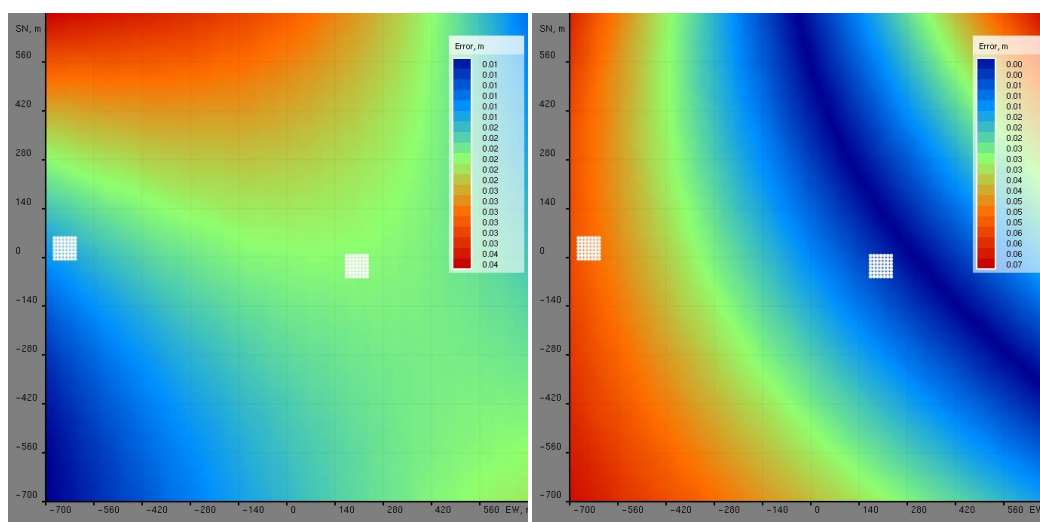


Рис. 8. Разница линейризованной и полной оценок погрешности для регулярной части влияния ЗМС (не учет статических поправок)

ВЫВОДЫ

Представленные оценки погрешности локации микросейсмических событий позволяют получать количественные априорные оценки точности, подходящие для практических задач проектирования систем наблюдения микросейсмического мониторинга.

Измерения координат датчиков микросейсмической антенны при помощи оборудования геодезического класса точности, позволяет уменьшить соответствующую часть ошибок локации микросейсмических событий практически до нуля.

Незнание исходной модели порождает погрешность, которая зависит от качества используемой для обработки глубинно-скоростной модели. Значение этой составляющей погрешности можно значительно снизить при помощи применения процедуры коррекции по перфорационным взрывам.

ЛИТЕРАТУРА

Азаров А.В., Сердюков А.С., Яблоков А.В. Методика определения механизмов очагов микросейсмических событий на основе моделирования полных волновых полей в горизонтально-слоистых средах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 10. – С. 131–143.

Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. – М.: Мир, 1983. – 360 с.

Брыксин А.А., Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Колесников Ю.И., Хогоев Е.А. Локализация сейсмических возбуждений при гидроразрыве пласта: классический и экспериментальный томографические подходы // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 13-25 апреля 2015 г.): "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология": Сб. материалов в 3 т. – 2015. – Т. 2. – С. 20–24.

Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Эпов М.И. Линейризованные решения прямых и обратных двумерных задач высокочастотного электромагнитного каротажа в проводящих средах с учетом токов смещения // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 12. – С. 1942–1951.

Глинских В.Н., Эпов М.И. Анализ пространственной чувствительности относительных характеристик в задачах высокочастотного электромагнитного каротажа // Геология и геофизика. – 2005. – Т. 46, № 11. – С. 1168–1175.

Курленя М.В., Сердюков А.С., Азаров А.В., Никитин А.А. Численное моделирование волновых полей от микросейсмических событий при подземной добыче полезных ископаемых // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – № 4. – С. 61–69.

Сердюков С.В., Азаров А.В., Дергач П.А., Дучков А.А. Аппаратные решения микросейсмического мониторинга геодинамических процессов при подземной разработке твердых полезных ископаемых // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – № 3. – С. 192–200.

Табаровский Л.А., Эпов М.И. Оценка разрешающей способности электромагнитных методов // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47, № 5. – С. 568–578.

Яскевич С.В., Дучков А.А. Сравнение точности локации микросейсмических событий при использовании наземных и скважинных систем наблюдений // Технологии сейсморазведки. – 2013. – № 3. – С. 43–51.

Grechka V., Blais E. Explicit Solutions to Microseismic Event-location Problem // 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE Europe, 2013.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ГАПЕЕВ Денис Николаевич – заместитель директора по научной работе АО «Техобраз».

ПОТАПОВ Андрей Александрович – младший инженер-программист АО «Техобраз».