

О требованиях к геометрии сейсмической съёмки 3D

Варенков Е.В., ЗАО НПЦ «ГеоСейсКонтроль», г. Москва

В настоящей статье рассматриваются вопросы определения ошибок положения источников и приёмников сейсмического сигнала (т.е. ошибок геометрии съёмки) при проведении площадных сухопутных сейсморазведочных работ. Исследуются причины возникновения этих ошибок и приводятся алгоритмы их определения при производстве сейсморазведочных работ, уделяется внимание негативному влиянию ошибок геометрии на ход обработки материалов. Целью статьи является выработка рекомендаций по заданию конкретных величин приемлемых (допустимых) ошибок для всех операций, связанных с установкой источников и приёмников, на стадии проектирования работ.

Работы, выполняемые сейсмической партией, неотъемлемым образом включают в себя топографо-геодезические работы по выносу на местность пикетов возбуждения и приёма колебаний по определённой проектной схеме. Именно эти работы – с заранее определённым положением источников и приёмников сейсмического сигнала – и будут нас интересовать.

При рассмотрении ограничимся наиболее распространённым типом съёмок – площадными (3D) наблюдениями с регулярной кратностью, где изначально каждый пункт возбуждения / приёма колебаний, т.е. пункт наблюдений (ПН), имеет некоторые проектные координаты Хпроект и Упроект. Для простоты изложения иллюстрируется случай квадратного бина, однако приведённые рассуждения справедливы и для иных случаев.

Отклонение фактического положения ПН от проектного будем называть ошибкой установки или ошибкой выноса. Согласно идеологии регулярной 3D сейсморазведки, суммарное отклонение фактического положения пунктов возбуждения и приёма от проектного, вызванное ошибками выноса, не должно вызывать изменения кратности сейсмического бина. Это одно из основных требований к геометрии съёмки 3D. Дальнейшее изложение исходит из данной посылки как основной.

Размеры бина определяются, как правило, половиной наименьшей величины расстояния между ПН. Так, если шаг между пунктами возбуждения колебаний (ПВ) и пунктами приёма (ПП) равен 50 метрам соответственно, то размеры бина равны 25х25 метров. Максимальная ошибка выноса в этом случае не должна вызывать выхода средней точки за пределы квадрата 25х25 метров. Для съёмок с прямоугольными (не квадратными) бинами максимальная ошибка выноса ограничивается величиной наименьшей из сторон бина (далее обозначается B_{MIN}).

Чтобы понять механизм влияния отклонений ПН на геометрическое отклонение средней точки, рассмотрим рис. 1 и рис. 2.

Очевидно, что наиболее неблагоприятные варианты с точки зрения последствий ошибок возникают при смещении обоих пунктов в одном направлении на величину, сопоставимую с половиной стороны бина (12,5 м), или при смещении одного пункта на величину стороны бина (25

м). В практике, для обеспечения концентрации средних точек вблизи центра бина, необходимо наложить более строгое ограничение на допустимый радиус разброса точек. Разумным ограничением выглядит установка предельного значения как половины стороны бина.

Следовательно,

$$((\Delta x, y)_{ПВ} + (\Delta x, y)_{ПП}) < B_{MIN} / 2 \quad (1)$$

Отклонения $(\Delta x, y)$ включают в себя ошибки выноса ПВ и ПП ($\Delta_{вынос}$) и определения координат ($\Delta_{опр}$):

$$\Delta x, y = \Delta_{вынос} + \Delta_{опр} \quad (2)$$

На практике ошибка выноса складывается из геодезической ошибки выноса $\Delta_{вынос\ геодез}$ и сейсмической ошибки выноса $\Delta_{вынос\ сейс}$:

$$\Delta_{вынос} = \Delta_{вынос\ геодез} + \Delta_{вынос\ сейс} \quad (3)$$

Геодезическая ошибка выноса определяется методом (способом) вынесения ПН на местность.

Сейсмическая ошибка выноса для ПП определяется целым набором факторов:

- ошибкой центрирования группы сейсмоприёмников относительно уже вынесенного пикета,
- соблюдением шага установки сейсмоприёмников,
- положением приёмной линии относительно оси профиля.

Сейсмическая ошибка выноса для ПВ опреде-

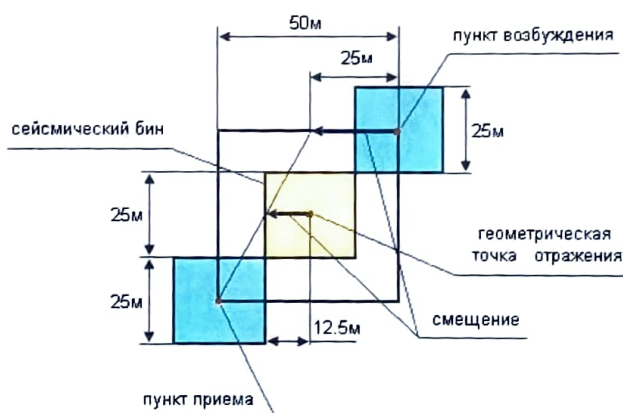


Рис. 1. Смещение пункта взрыва, при котором средняя точка получает одно из наибольших возможных смещений

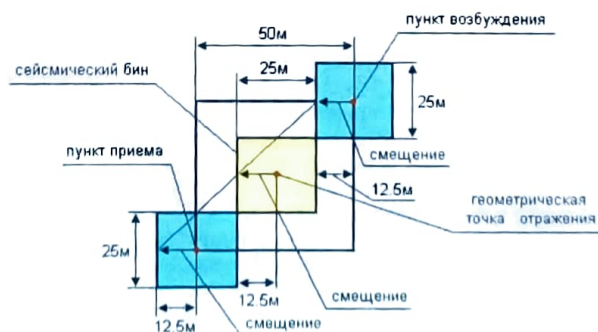


Рис. 2. Совместное смещение пункта взрыва и пункта приёма, при котором средняя точка получает одно из наибольших возможных смещений

СЕЙСМОРАЗВЕДКА
НА МОРЕ И НА СУШЕ

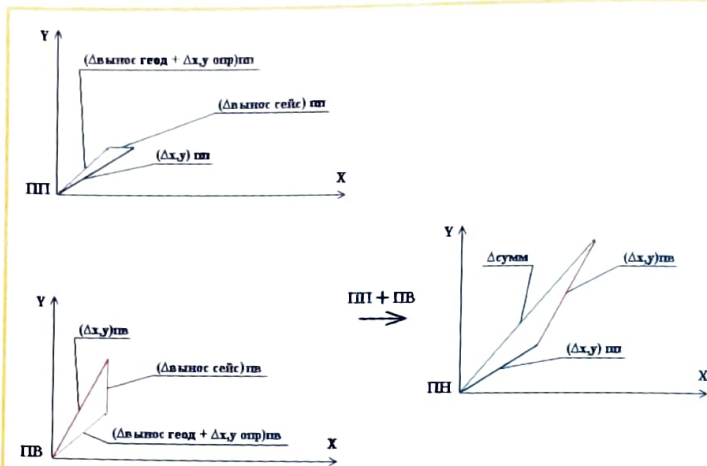


Рис.3. Графическое определение суммарной ошибки выноса ПН

ляется точностью установки источника на ПН, вынесенном топографо-геодезической службой. Под точностью установки источника понимается положение оси скважины при буровзрывных работах, положение источника на пикете при вибрационных или импульсных работах. Отметим, что при группировании источников набор факторов расширяется до приведённого выше для ПП списка.

Ошибка определения координат, очевидно, зависит от способа определения координат.

С учётом всего вышесказанного обобщённая формула для расчёта совокупной ошибки установки (т.е. суммарной ошибки выноса ПН) будет выглядеть так:

$$\begin{aligned} \Delta_{\Sigma} &= (\Delta x, y)_{\text{пп}} + (\Delta x, y)_{\text{пн}} = \\ &= (\Delta_{\text{вынос геод}} + \Delta_{\text{вынос сейс}} + \Delta_{\text{опр}})_{\text{пп}} + \\ &+ (\Delta_{\text{вынос геод}} + \Delta_{\text{вынос сейс}} + \Delta_{\text{опр}})_{\text{пв}} \end{aligned} \quad (4)$$

Графически условная расчётная схема иллюстрируется рис.3.

Рис.3. Графическое определение суммарной ошибки выноса ПН.

Как уже говорилось выше, согласно требованию регулярной 3D сейсморазведки суммарная ошибка установки пары ПВ – ПП по отношению к проектному ни в коем случае не должна вызывать выхода средней точки за пределы сейсмического бина.

Другими словами, фактическая суммарная ошибка установки ПВ и ПП Δ_{Σ} не должна превышать определённую проектом предельную ошибку установки R_{max} :

$$\Delta_{\Sigma} = f((\Delta_{\text{вынос геод}}, \Delta_{\text{вынос сейс}}, \Delta_{\text{опр}})_{\text{пп, пв}}) \leq R_{\text{max}} \quad (5)$$

Как найти аргументы, определяющие величину Δ_{Σ} согласно выражению (5)?

Необходимо подчеркнуть, что непосредственно определить все компоненты этого выражения на отдельно взятом ПН невозможно в силу условности расчётной схемы. Поступим несколько иначе.

Геодезическую ошибку выноса найдём как разницу (расстояние) между проектными координатами и теми фактическими координатами, которые определяет непосредственно исполнитель при производстве работ:

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{вынос геод. x}} &= x_{\text{проект}} - x_{\text{факт}} \\ \Delta_{\text{вынос геод. y}} &= y_{\text{проект}} - y_{\text{факт}} \end{aligned} \quad (6)$$

Далее осреднением полученных значений для всех ПН определяем среднеквадратические ошиб-

ки выноса (СКО) по координатным осям.

Затем находим разницу между координатами, определёнными исполнителем работ (фактическими), и координатами, полученными при независимой выборочной проверке выполнения работ (контрольными):

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{опр. x}} &= x_{\text{контр}} - x_{\text{факт}} \\ \Delta_{\text{опр. y}} &= y_{\text{контр}} - y_{\text{факт}} \end{aligned} \quad (7)$$

Допущение, что координаты, полученные при контрольных измерениях, соответствуют истинному положению точек, обычно является правомочным.

Аналогично предыдущему шагу находим среднеквадратические ошибки определения координат (СКО) по координатным осям.

В силу специфики производства топографо-геодезических работ можно принять, что и для приёмников и для источников геодезические ошибки, как правило, одинаковы

$$\begin{aligned} (\Delta_{\text{вынос геод}}, \Delta_{\text{вынос сейс}}, \Delta_{\text{опр}})_{\text{пп}} &= \\ &= (\Delta_{\text{вынос геод}}, \Delta_{\text{вынос сейс}}, \Delta_{\text{опр}})_{\text{пв}} \end{aligned} \quad (8)$$

Можно несколько упростить ситуацию, если найти разницу сразу между проектными координатами и контрольными:

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{вынос геод. x}} &= x_{\text{проект}} - x_{\text{контр}} \\ \Delta_{\text{вынос геод. y}} &= y_{\text{проект}} - y_{\text{контр}} \end{aligned} \quad (9)$$

Далее определяем среднеквадратические ошибки.

Введём новую величину – ошибку геодезии:

$$\Delta_{\text{геод}} = \Delta_{\text{вынос геод}} + \Delta_{\text{опр}} \quad (10)$$

Тогда формулу (5) можно переписать в виде:

$$\Delta_{\Sigma} = f((\Delta_{\text{геод}}, \Delta_{\text{вынос сейс}})_{\text{пп, пв}}) \leq R_{\text{max}} \quad (11)$$

Сейсмическая среднеквадратическая ошибка выноса для ПП определяется путём осмотра расстановки, а для ПВ – буровых профилей (в случае взрывных источников). При работе с виброисточниками эта величина определяется из наблюдений, полученными соответствующими спутниковыми системами, установленными на виброисточниках и на сейсмостанциях. Затем получаем значения ошибок по координатным осям для ПВ и ПП.

Таким образом, получаем среднеквадратические ошибки составляющих выражения (11), причём раздельно по осям x и y. Такое разделение позволяет просуммировать дисперсии и получить в конечном итоге:

$$\begin{aligned} \Theta_x &= \sqrt{\left[(\overline{\Delta_{\text{геод. x}}})^2 + (\overline{\Delta_{\text{вынос сейс. x}}})^2 \right]_{\text{пп}} +} \\ &+ \left[(\overline{\Delta_{\text{геод. x}}})^2 + (\overline{\Delta_{\text{вынос сейс. x}}})^2 \right]_{\text{пв}} \\ \Theta_y &= \sqrt{\left[(\overline{\Delta_{\text{геод. y}}})^2 + (\overline{\Delta_{\text{вынос сейс. y}}})^2 \right]_{\text{пп}} +} \\ &+ \left[(\overline{\Delta_{\text{геод. y}}})^2 + (\overline{\Delta_{\text{вынос сейс. y}}})^2 \right]_{\text{пв}} \end{aligned} \quad (12)$$

где двойная черта обозначает среднеквадратическое значение параметра.

Мы имеем две нормально распределённые случайные величины x и y – суммарные ошибки выноса по осям x и y – аргументы функции случайной величины Δ_{Σ} . Мы также должны знать определённые

ное проектом предельное отклонение R_{MAX} . Осталось задаться вероятностью и посчитать, в круг какого радиуса R попадает наша функция случайной величины Δ_{Σ} , аргументы x и y которой имеют СКО по осям, равные Θ_x и Θ_y , а затем сравнить полученный радиус R и предельное отклонение R_{MAX} .

Таким образом, необходимо написать формулу, определяющую вероятность попадания случайной величины $\Delta_{\Sigma} = f(x, y)$ в круг радиуса R .

Вначале запишем формулу для совместной плотности вероятности двух случайных величин, распределённых нормально по осям x и y :

$$p_{xy} = \frac{1}{2\pi\Theta_x\Theta_y} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\Theta_x^2} + \frac{y^2}{\Theta_y^2}\right)} \quad (13)$$

где x и y – аргументы функции суммарной ошибки выноса Δ_{Σ} .

Выбирая большее из двух СКО и принимая $\max\{\Theta_x, \Theta_y\} = \Theta_{xy}$, получим:

$$p_{xy} = \frac{1}{2\pi\Theta_{xy}^2} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2+y^2}{\Theta_{xy}^2}\right)} \quad (14)$$

При этом в геометрическом смысле мы предполагаем, что фигурой рассеивания случайных значений отклонений является круг радиуса $r^2 = x^2 + y^2$.

Запишем формулу для подсчёта вероятности попадания случайного значения $\Delta_{\Sigma} = f(r)$ в круг радиуса $r=R$ при значении среднеквадратического отклонения Θ_{xy} , переходя от прямоугольных координат к полярным:

$$F = \int_0^R \int_0^{2\pi} \frac{1}{2\pi\Theta_{xy}^2} e^{-\frac{1}{2}\frac{r^2}{\Theta_{xy}^2}} r dr d\phi \quad (15)$$

Подынтегральное выражение представляет собой плотность вероятности распределения Рэлея, описывающего распределение длины двумерного случайного вектора, прямоугольные координаты которого независимы и подчиняются закону нормального распределения.

После преобразований получим:

$$F = 1 - e^{-\frac{R^2}{2\Theta_{xy}^2}} \quad (16)$$

Если принять $F = 0.99$, то можно получить:

$$e^{-\frac{R^2}{2\Theta_{xy}^2}} = 0.01 \quad (17)$$

Мы ищем радиус круга R , в который с вероятностью 99% попадёт случайное значение суммарной ошибки выноса на каком-либо ПН. Однако проще вычислить отношение R/Θ_{xy} , при котором соблюдается условие (17). Воспользовавшись формулой (16), найдём:

$$R/\Theta_{xy} \approx 3, \quad (18)$$

откуда получим $[\Theta_{xy}]_{\text{MAX}} = R_{\text{MAX}}/3$.

Таким образом, если принять $R_{\text{MAX}} = B_{\text{MIN}}/2$, что соответствует условию концентрации средних точек вблизи центра бина, то, согласно полученным результатам, среднеквадратическое отклонение по любой из осей не должно превышать $[\Theta_{xy}]_{\text{MAX}} = B_{\text{MIN}}/6$.

Напомним, что данная величина отклонения включает суммарную ошибку выноса – как геодезическую (стандартно определяемую требованиями проектов на производство сейсморазведочных работ в ~2 м и зависящую от совокупности точности используемой аппаратуры и метода выноса ПН), так и ошибку установки источников / приёмников на пикете. Исходя из рассуждений, проведённых в

статье, можно обоснованно определить максимально допустимую ошибку сейсмического выноса, т.е. установки пикетов на ПН.

Отметим, что данный результат хорошо согласуется с существующими требованиями нефтяных компаний – заказчиков сейсморазведочных работ.

Рассмотрим конкретный пример.

В ходе проектирования были заданы следующие величины ошибок:

$$\Delta_{\text{ГЕОД, проект}} = 1.5 \text{ м},$$

$$\left(\Delta_{\text{ВЫНОС СЕЙС, проект}}\right)_{\text{ПВ}} = 3 \text{ м},$$

$$\left(\Delta_{\text{ВЫНОС СЕЙС, проект}}\right)_{\text{ПП}} = 1 \text{ м}.$$

Для определённости можно считать проектные отклонения по координатным осям попарно равными друг другу.

В ходе контрольных измерений были получены следующие величины проекций ошибок:

по оси x –

$$\Delta_{\text{ГЕОД, x}} = 1.5 \text{ м};$$

$$\left(\Delta_{\text{ВЫНОС СЕЙС}}\right)_{\text{ПП}} = 0.9 \text{ м},$$

$$\left(\Delta_{\text{ВЫНОС СЕЙС}}\right)_{\text{ПВ}} = 3 \text{ м}.$$

по оси y –

$$\Delta_{\text{ГЕОД, y}} = 1.7 \text{ м};$$

$$\left(\Delta_{\text{ВЫНОС СЕЙС}}\right)_{\text{ПП}} = 0.8 \text{ м},$$

$$\left(\Delta_{\text{ВЫНОС СЕЙС}}\right)_{\text{ПВ}} = 5 \text{ м}.$$

Посмотрим, к чему могут привести такие ошибки, т.е. сумеем ли мы при таких ошибках удержать геометрическую среднюю точку вблизи центра бина с размерами 25х25 м.

В нашем случае $R_{\text{MAX}} = B_{\text{MIN}}/2 = 12.5 \text{ м}$, согласно (18) принимаем $[\Theta_{xy}]_{\text{MAX}} = 4.2 \text{ м}$.

Подставим конкретные значения в формулы (12):

$$\Theta_x = \sqrt{1.5^2 + 0.9^2 + 1.5^2 + 3.0^2} = 3.8 \text{ м},$$

$$\Theta_y = \sqrt{1.7^2 + 0.8^2 + 1.7^2 + 5.0^2} = 5.6 \text{ м}.$$

Выбираем из полученных значений максимальное (Θ_y) и сравниваем с $[\Theta_{xy}]_{\text{MAX}}$.

$$\text{Поскольку } \Theta_y = 5.6 \text{ м} > [\Theta_{xy}]_{\text{MAX}} = 4.2 \text{ м},$$

получается, что только 91.7% всех ПН будут установлены так, что их средние точки не выйдут за пределы допустимой зоны вокруг центра бина. Анализируя результаты для Θ_x и Θ_y , можно определить максимально приемлемое смещение источников колебаний относительно установленных пикетов, поскольку установка источника на пикете – самое трудное звено в деле сохранения корректности геометрии сейсмической съёмки.

Таким образом, на ошибки геометрии сейсмической съёмки влияют ошибки производства топографо-геодезических работ, ошибки установки источников и ошибки установки приёмников. Влияние этих ошибок независимо, т.е. таково, что, уменьшая одну из них, можно увеличить другую. Главное – не превысить предельной величины, которая может определяться предложенным в этой статье условием концентрации средних точек вблизи центра бина, а может другими параметрами, исходя из условий работ или требований обработки, обоснованными на этапе проектирования.