



## СОВМЕСТНАЯ ОБРАБОТКА СЕЙСМОГРАММ ОПЫТНЫХ РАБОТ ДЛЯ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКА ВОЗБУЖДЕНИЯ

**В.В. Мирошников, А.П. Сысоев**

ОАО «Сибнефтегеофизика», 630005, Новосибирск, ул. Ломоносова, 57, Россия, e-mail [sysoev@sibngf.ru](mailto:sysoev@sibngf.ru)

Функции взаимной и автокорреляции сейсмограмм, полученных из одной точки возбуждения и фиксированной расстановки приборов, позволяют записать систему уравнений, разрешимую относительно сигнала и помехи. Решение этой системы позволяет получить более достоверные оценки амплитудного спектра сигналов по сравнению с результатами независимого оценивания параметров источников.

*Сейсмический сигнал, опытные работы, система нелинейных уравнений*

### JOINT PROCESSING OF EXPERIMENTAL SEISMOGRAMS FOR CHOOSING PARAMETERS OF THE SOURCE

**V.V. Miroshnikov, A.P. Sysoev**

*Sibneftegeofizika, Lomonosova str., 57, Novosibirsk, 630005, Russia, e-mail [sysoev@sibngf.ru](mailto:sysoev@sibngf.ru)*

Autocorrelation and cross-correlation functions of seismograms obtained from the same source point and along receiver spread make it possible to build nonlinear equation system solvable for signal and noise. The solution of this system can produce more reliable estimates of signals amplitude spectrum of compare with independent source parameters estimation.

*Seismic signal, experimental works, a system of nonlinear equations*

### ВВЕДЕНИЕ

Полный цикл исследований по оптимизации условий возбуждения при выполнении сейсмических исследований МОГТ можно разложить на составляющие, которые описываются известными типами задач:

1. Районирование территории по факторам, существенным для характеристик возбуждаемого сейсмического сигнала, и выбор точек для постановки опытных работ.

2. Планирование многофакторного эксперимента (так как при любом типе источника количество перебираемых параметров источника более или равно двум).

3. Обработка результатов эксперимента (оценивание целевых параметров).

4. Выбор оптимальных параметров источника. При решении этой задачи кроме результатов физического эксперимента необходим учет технологических и экономических факторов.

5. Интерполяция параметров источника, заданных в точках выполнения опытных работ, на всю территорию исследования.

В настоящей работе рассматривается третья из перечисленных выше задач – обработка результатов опытных работ. Предполагается, что для одной фиксированной расстановки регистрирующих приборов получена серия сейсмограмм из одного ПВ с различными параметрами возбуждения. В качестве источника возбуждения может рассматриваться любой тип источника упругих волн: взрыв в скважине, вибратор, импульсный и пр. Для взрывов в скважине основные

параметры определяются глубиной заложения и массой заряда. Для вибраторов такими параметрами являются: количество вибраторов, число накоплений, длина свипа и пр.; для электроимпульсных источников – количество источников и число накоплений. Можно видеть, что перечисленные параметры источников влияют на стоимость и производительность полевых работ, поэтому задача выбора их оптимальных величин имеет важное практическое значение.

### НЕЗАВИСИМЫЙ АНАЛИЗ СЕЙСМОГРАММ

Модель сейсмограммы  $f_{il}(t)$  общего пункта взрыва (ОПВ) представим в виде свертки возбуждаемого сигнала  $s_i(t)$  с импульсными характеристиками среды  $h_l(t)$  и приемника  $p_l(t)$ :

$$f_{il}(t) = s_i(t) \cdot h_l(t) \cdot p_l(t) + r_{il}(t), \quad (1)$$

Здесь  $i$  – номер источника в серии экспериментов;  $l$  – номер канала (приемника) в расстановке ОПВ;  $r_{il}(t)$  – случайная помеха. Мы записали модель трассы, которая используется в цифровой обработке при решении задачи оценки и коррекции амплитудно-частотных искажений волнового поля, связанных с неидентичностью условий возбуждения и регистрации.

Модель (1) представим в спектральной форме и в дальнейшем для краткости записи выражений, переменную частоты  $w$  опустим:

$$F_{il}(w) = S_i(w) \cdot H_l(w) \cdot P_l(w) + R_{il}(w). \quad (2)$$

В этом уравнении с источником связаны два параметра – спектр сигнала  $S_i$  и помехи  $R_{il}$ . Поэтому,

если ограничиться независимым анализом по каждой сейсмограмме, то невозможно разделить спектральные характеристики сигнала и помехи.

Помеху можно разложить на две составляющие:

1. Квазирегулярные помехи типа поверхностных волн, не связанные с сейсмическим сигналом, но зависящие от параметров источника. Этот тип помех может быть исключен из рассмотрения при использовании внутреннего мьютинга.

2. Случайные стационарные по времени промышленные и естественные (типа ветровых) помехи. Можно считать, что условие стационарности помехи выполняется для взрывных источников возбуждения. Для источников, использующих эффект накопления нескольких воздействий, уровень случайной помехи будет связан с параметрами источников.

Запишем выражение для среднего значения спектра функции автокорреляции трасс сейсмограммы ОПВ по выборке трасс с удалениями  $l = 1, \dots, L$ :

$$\begin{aligned} Q_{ii} &= E[F_{il} \cdot F_{il}^*] = E[(S_i \cdot H_l \cdot P_l + R_{il}) \cdot (S_i \cdot H_l \cdot P_l + R_{il})^*] = \\ &= E[(S_i \cdot H_l \cdot P_l) \cdot (S_i \cdot H_l \cdot P_l)^* + (S_i \cdot H_l \cdot P_l) \cdot R_{il}^* + \\ &\quad + R_{il} \cdot (S_i \cdot H_l \cdot P_l)^* + R_{il} \cdot R_{il}^*]. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь символом  $E[\dots]$  обозначено среднее спектра функции автокорреляции (ФАК). Упростим выражение (3), используя следующие предположения:

1. Полезная составляющая волнового поля некоррелирована со случайной помехой:

$$E[(S_i \cdot H_l \cdot P_l) \cdot R_{il}^*] = E[R_{il} \cdot (S_i \cdot H_l \cdot P_l)^*] \approx 0. \quad (4)$$

2. При достаточно большом временном окне спектрального анализа ( $>600$  мс) и при условии выполнения компенсации геометрического расхождения ФАК импульсной характеристики среды определяется как единичная функция соответственно:  $H_l \cdot H_l^* = \text{const}$ . Отметим, что это стандартное предположение, используемое для оценки спектра сейсмического сигнала во многих приложениях.

Отсюда

$$E[(S_i \cdot H_l \cdot P_l) \cdot (S_i \cdot H_l \cdot P_l)^*] = S_i \cdot S_i^* \cdot E[P_l \cdot P_l^*]. \quad (5)$$

Поскольку среднее значение энергетической спектральной характеристики приемников  $E[P_l \cdot P_l^*]$  постоянно для фиксированной расстановки приборов, то примем значение этого параметра равным единице. С учетом введенных предположений спектр функции автокорреляции (3) определяется суммой спектра мощности сигнала и случайной помехи:

$$Q_{ii} = E[F_{il} \cdot F_{il}^*] = S_i \cdot S_i^* + E[R_{il} \cdot R_{il}^*] = |S_i|^2 + |R_{il}|^2. \quad (6)$$

Выражение (6) традиционно используется для оценки спектральных характеристик сейсмических сигналов. В зависимости от отношения сигнал/помеха и особенностей случайной составляющей волнового поля можно выделить два более простых варианта интерпретации (6):

1) если уровень помех мал сравнительно с полезным сигналом, то выражение (6) непосредственно определяет спектр мощности сигнала:

$$Q_{ii} = E[F_{il} \cdot F_{il}^*] = |S_i|^2; \quad (7)$$

2) если уровень помехи постоянен для всех сейсмограмм, то уравнение (6) приводится к виду, допускающему сравнительную оценку спектра мощности сигналов:

$$Q_{ii} = E[F_{il} \cdot F_{il}^*] = |S_i|^2 + |R|^2. \quad (8)$$

Но и в том случае, когда предположение о малости или постоянстве уровня помех не применимо, для однозначного решения задачи сравнительного анализа источников с необходимостью принимается одно из двух допущений об уровне помехи на всей серии сейсмограмм.

Параметры источников прямо связаны с материальными затратами на их подготовку, поэтому достоверность заключений по результатам опытных работ имеет четкое финансовое выражение. Это основная причина, по которой задача оценки сигнала источников с учетом помехи представляет практический интерес. Не менее важна вторая составляющая задачи, связанная с оценкой источников в области высоких частот сейсмического диапазона. Основным максимум спектра сейсмических сигналов ограничен узким диапазоном –  $\sim 10\text{--}30, 10\text{--}50$  Гц. Обработка сейсмических данных после процедуры деконволюции выполняется с верхней границей частотного диапазона  $80\text{--}120$  Гц. Выбор параметров источников выполняется по нижней части частотного диапазона обработки с допущением, что полученные соотношения будут верны и для области высоких частот. Это может быть и верное предположение, но непосредственные оценки всегда предпочтительней допущений. Простое решение этой проблемы заключается в представлении спектра  $Q_{ii}(w)$  в логарифмическом масштабе. Но при этом открытым остается вопрос о роли шумовой компоненты. Более корректный способ решения этой задачи заключается в анализе сейсмограмм после деконволюции, выполняемой обратным фильтром, постоянным для трасс каждой сейсмограммы (фильтром ОПВ).

#### СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ СЕЙСМОГРАММ

Запишем выражение для среднего значения спектра функции взаимной корреляции (ФВК) сейсмограмм с номерами источников  $i, k$ :

$$\begin{aligned} Q_{ik} &= E[F_{il} \cdot F_{kl}^*] = E[(S_i \cdot H_l \cdot P_l + R_{il}) \cdot (S_k \cdot H_l \cdot P_l + R_{kl})^*] = \\ &= E[(S_i \cdot H_l \cdot P_l) \cdot (S_k \cdot H_l \cdot P_l)^* + (S_i \cdot H_l \cdot P_l) \cdot R_{kl}^* + \\ &\quad + R_{il} \cdot (S_k \cdot H_l \cdot P_l)^* + R_{il} \cdot R_{kl}^*]. \end{aligned} \quad (9)$$

Введем дополнительное предположение о независимости помехи одноименных трасс, принадлежащих разным сейсмограммам. Мы должны отметить, что этому свойству не удовлетворяют волны-помехи поверхностного типа

$$E[R_{il} \cdot R_{kl}^*] \approx 0. \quad (10)$$

Тогда уравнение для спектра ФВК (9) описывается произведением спектров сигналов и случайной составляющей, с которой свяжем погрешности сделанных допущений:

$$Q_{ik} = E[F_{il} \cdot F_{kl}^*] = S_i \cdot S_k^* + r_{ik}. \quad (11)$$

Перепишем уравнения (6), (11) используя представление Эйлера для комплексных переменных, где

$$Q_{ii} = |Q_{ii}| = \rho_i^2 + r_i^2. \quad (12)$$

$$Q_{ik} = |Q_{ik}| \cdot \exp(j\varphi_{ik}) = \rho_i \cdot \rho_k \cdot \exp[j(\varphi_i - \varphi_k)]. \quad (13)$$

Здесь  $\varphi_{ik}$  – значение фазы комплексного числа  $Q_{ik}$ , характеризующее разность фазовых спектров двух сейсмограмм;  $\rho_i$  – амплитудный спектр сигнала;  $\varphi_i$  – фаза сигнала;  $r_i$  – амплитудный спектр помехи. Последнее уравнение можно разложить на два независимых, описывающих амплитудную и фазовую составляющие комплексного спектра ФВК  $Q_{ik}$  сейсмограмм:

$$|Q_{ik}| = \rho_i \cdot \rho_k, \quad (14)$$

$$\varphi_{ik} = \varphi_i - \varphi_k. \quad (15)$$

При выводе уравнений (12)–(15) сделано несколько упрощающих предположений. Поэтому последние выполняются приближенно, но для краткости представления случайные составляющие правой части опустим.

Если  $N$  – количество анализируемых сейсмограмм, то система уравнений, связывающих корреляционные функции сейсмограмм с параметрами сигналов источников, включает в себя  $N(N+1)/2$  уравнений при  $N$  неизвестных и является переопределенной. Эту систему уравнений мы можем разделить на две независимые: для спектров ФВК

$$\left\{ \begin{array}{l} |Q_{12}| = \rho_1 \cdot \rho_2, \\ |Q_{13}| = \rho_1 \cdot \rho_3, \\ |Q_{14}| = \rho_1 \cdot \rho_4, \\ \dots \\ |Q_{N-1,N}| = \rho_{N-1} \cdot \rho_N \end{array} \right. \quad (16)$$

и спектров ФАК

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{11} = \rho_1^2 + r_1^2, \\ \dots \\ Q_{NN} = \rho_N^2 + r_N^2. \end{array} \right. \quad (17)$$

Система уравнений (16) для ФВК является переопределенной и состоящей из  $N(N-1)/2$  уравнений с  $N$  неизвестными. Как правило, подобные системы решаются путем их логарифмирования для получения набора линейных алгебраических уравнений [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ln |Q_{12}| = \ln \rho_1 + \ln \rho_2, \\ \ln |Q_{13}| = \ln \rho_1 + \ln \rho_3, \\ \ln |Q_{14}| = \ln \rho_1 + \ln \rho_4, \\ \dots \\ \ln |Q_{N-1,N}| = \ln \rho_{N-1} + \ln \rho_N. \end{array} \right. \quad (18)$$

Обычным способом решения переопределенной системы линейных уравнений является проекционное преобразование ее в нормальную систему с дальнейшим решением последней каким-либо стандартным способом. Проекционное преобразование осуществляется умножением матрицы системы уравнений и вектора правой части на некоторую матрицу с противоположными по отношению к матрице системы размерностями. Если нет никаких сведений о каких-то особенностях системы, то принято в качестве матри-

цы преобразования использовать транспонированную матрицу системы. В этом случае реализуется метод наименьших квадратов, т. е. выполняется условие минимума суммы квадратов невязки оценок наблюдений и правых частей исходной системы.

Однако, как показали расчеты, при решении системы (16) описанная методика приводит к не самым лучшим результатам. Квадратичная невязка получается минимальной для логарифмов значений правой части. А при переходе к исходным значениям правой части и непосредственным значениям амплитудных спектров сигнала невязка ощутимо изменяется. Это приводит к заметно искаженным значениям сигналов и помех, особенно в том случае, когда значения правой части сильно варьируют, т. е. когда осредненные спектры сейсмограмм сильно отличаются от эксперимента к эксперименту.

Экспериментально установлено, что несколько лучшее решение можно получить преобразованием системы нелинейных уравнений (16) путем поблочного суммирования по строкам к нормально определенному виду

$$\left. \begin{array}{l} (\rho_2 + \rho_3 + \rho_4 + \dots + \rho_N) \cdot \rho_1 = F_1, \\ (\rho_1 + \rho_3 + \rho_4 + \dots + \rho_N) \cdot \rho_2 = F_2, \\ (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \dots + \rho_N) \cdot \rho_3 = F_3, \\ \dots \\ (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \dots + \rho_{N-1}) \cdot \rho_N = F_N, \end{array} \right\} \quad (19)$$

$$\text{где } F_i = \sum_{j=1}^N |Q_{ij}| - |Q_{ii}|.$$

Несмотря на свою нелинейность, систему можно успешно разрешить с помощью итерационных методов. Здесь использовался аналог метода Гаусса–Зейделя для систем линейных алгебраических уравнений.

После вычитания возведенных в квадрат результатов решения системы (19) из соответствующих спектров мощности ФАК полученные спектры помех можно сопоставлять со спектрами сигналов, а также оценивать по отдельности при дальнейшем выяснении наиболее оптимальных условий возбуждения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВОЙ ОБРАБОТКИ

Серия из 12 сейсмограмм получена при фиксированной массе заряда 1 кг с перебором глубины заложения заряда в диапазоне 7,5–24 м. Сейсмограммы в целом хорошего качества с явным доминированием поля отраженных волн. На рис. 1 представлены окна

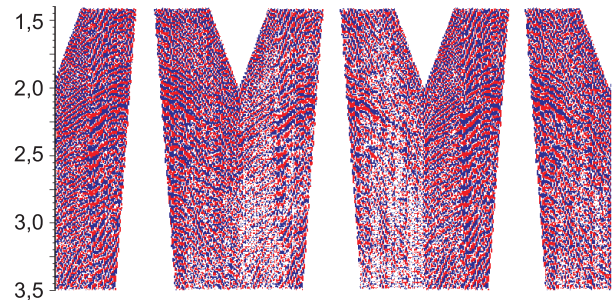


Рис. 1. Временные окна для сравнительного анализа исходных сейсмограмм.

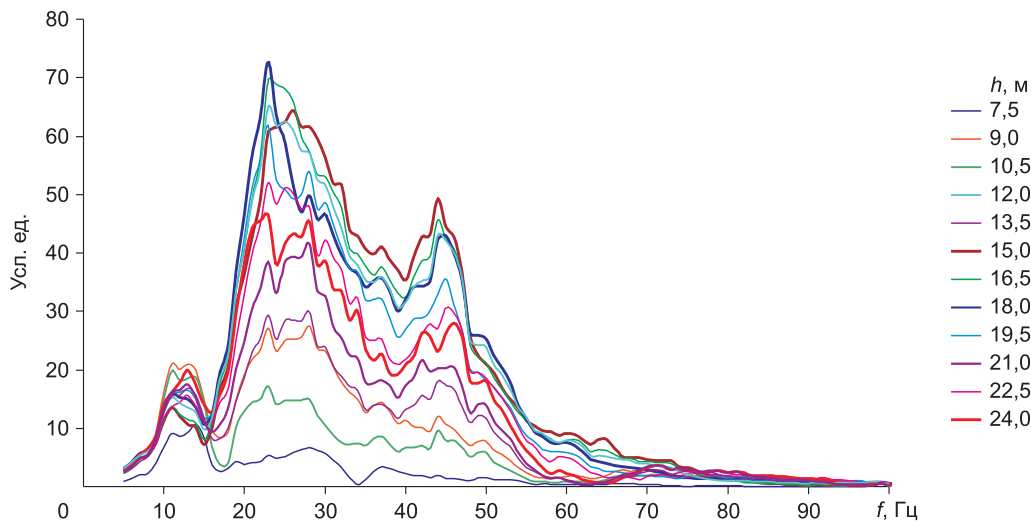


Рис. 2. Графики оценок амплитудного спектра сигналов.

анализа исходных сейсмограмм после компенсации геометрического расхождения и применения внешне-го и внутреннего мьютинга.

Сводный график оценок амплитудного спектра сигналов, полученных решением системы уравнений (19), приведен на рис. 2.

Для более наглядного выполнения сравнительно-го анализа для каждого источника получим среднее значение амплитудного спектра в диапазоне 10–60 Гц для трех параметров – спектра трасс, оценок спектра сигнала и помехи (рис. 3).

Уровень помехи в 2–3 раза меньше сигнала, поэтому спектры сигналов и исходных сейсмограмм очень близки. Здесь выполняется условие (7) и, соответственно, оценки амплитудного спектра трасс являются хорошими оценками для спектра сигналов. Из приведенных графиков следует, что зависимость амплитуды сигналов от глубины заложения заряда имеет многомодальный вид с двумя основными максимумами. Первый максимум выделен на глубине 12 м, второй – в диапазоне глубин 15,0–19,5 м, глобальный максимум определен на глубине 15 м. Выбор глубины источника из диапазона указанных значений соответствует вариации амплитуды сигнала в пределах 10 %.

Уровень помехи на рис. 3 также является функцией глубины с диапазоном изменения 3–11 усл. ед. Имея для каждой глубины источника оценки ампли-

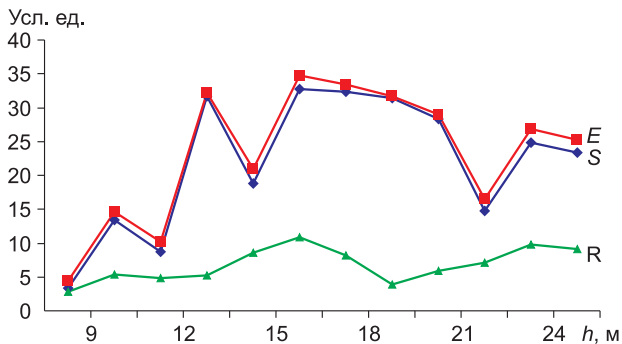


Рис. 3. Средние значения амплитудного спектра в диапазоне 10–60 Гц для исходных сейсмограмм ( $E$ ), оценки сигналов ( $S$ ) и помехи ( $R$ ).

туды помехи и сигнала, получим график отношения сигнал/помеха (рис. 4). По этому критерию доминирует сейсмограмма с глубиной заряда 18 м.

Получим аналогичные оценки, но для сейсмограмм после применения деконволюции по источникам, где оператор предсказывающей деконволюции рассчитывается независимо для каждой сейсмограммы ОПВ. Графики оценок амплитудного спектра сигналов приведены на рис. 5. Спектр сигналов снижается до частоты 125 Гц, на более высоких частотах значение близко к постоянному уровню. Из этого можно сделать предварительный вывод о возможности выполнения обработки с верхней граничной частотой 125 Гц. Можно отметить, что после деконволюции на графиках проявляется гармоника, кратная  $\sim 50$  Гц. Для каждого источника определим среднее значение амплитудного спектра в диапазоне 10–90 Гц для трех параметров – спектра трасс, оценок спектра сигнала и помехи (рис. 6). Сравнивая графики до и после деконволюции (см. рис. 3, 6), можно видеть, что результаты различаются только масштабным множителем.

На рис. 7 представлены графики трех параметров источников для глубины возбуждения 18 и 15 м: спектра исходных сейсмограмм ( $E(f)$ ), сигнала ( $S(f)$ ) и помехи ( $R(f)$ ), оценки которых выполнены по сейсмограммам после деконволюции. Источник на глубине 15 м определяется по абсолютному максимуму сред-

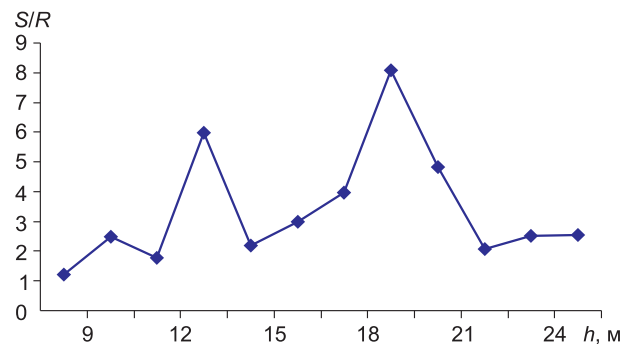


Рис. 4. График отношения сигнал/помеха в диапазоне частот 10–60 Гц.



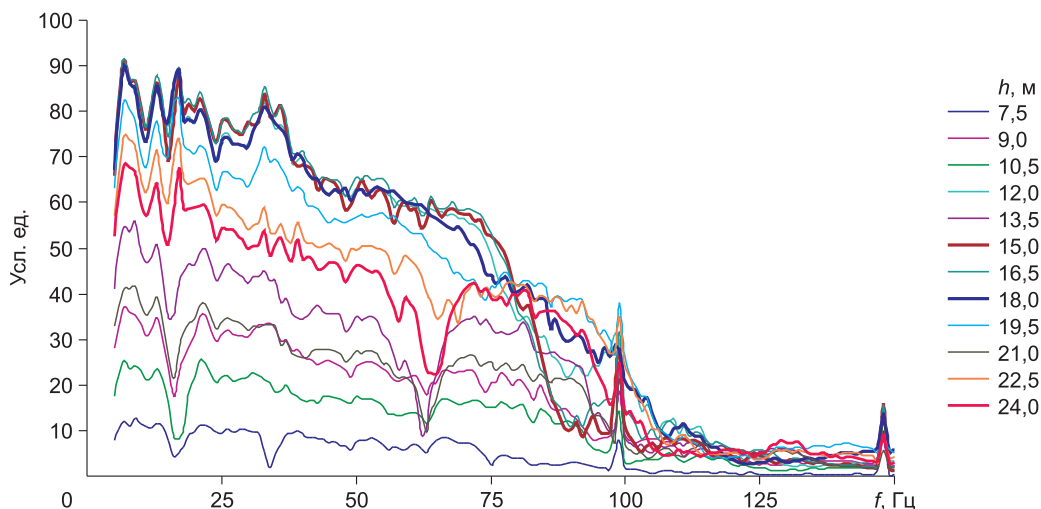


Рис. 5. Графики оценок амплитудного спектра сигналов после деконволюции.

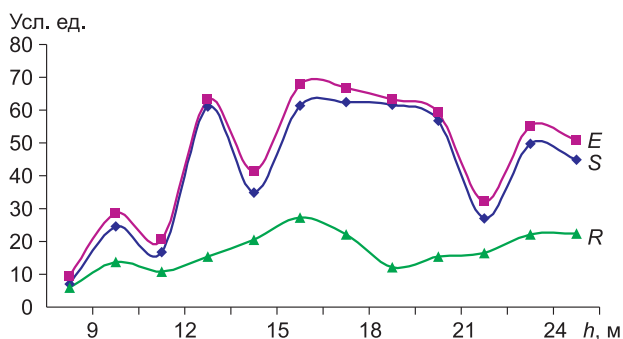


Рис. 6. Средние значения амплитудного спектра в диапазоне 10–90 Гц после деконволюции: для исходных сейсмограмм ( $E$ ), оценки сигналов ( $S$ ) и помехи ( $R$ ).

ней амплитуды спектра, на 18 м имеем глобальный максимум для оценки отношения сигнал/помеха (см. рис. 6). Источник с глубины 18 м характеризуется более низким уровнем помехи и, как следствие, графики спектра трасс и сигнала близки. Для глубины 15 м расхождение между этими кривыми более значимо, особенно в области высоких частот. Важное различие спектров сигналов связано с различной крутизной графиков в диапазоне частот 80–90 Гц.

Мы еще раз обратим внимание на присутствие амплитудной аномалии спектра на частотах 99 и 148 Гц, которая выделяется как на сигнальной, так и на шумовой составляющей. Казалось бы, что должна выделяться также основная гармоника на частоте ~50 Гц, но этот эффект на графиках не проявляется.

### ВЫВОДЫ

В работе рассмотрен способ совместной обработки сейсмограмм опытных работ, позволяющий разделить сейсмическую запись на полезную и шумовую составляющие и получить более достоверные оценки спектра сейсмического сигнала источников.

На частном примере показано, что сравнительные оценки сигналов, такие как среднее значение амплитудного спектра, отношение сигнал/помеха, принципиально совпадают при анализе сейсмограмм до и после выполнения деконволюции. Тем не менее при-

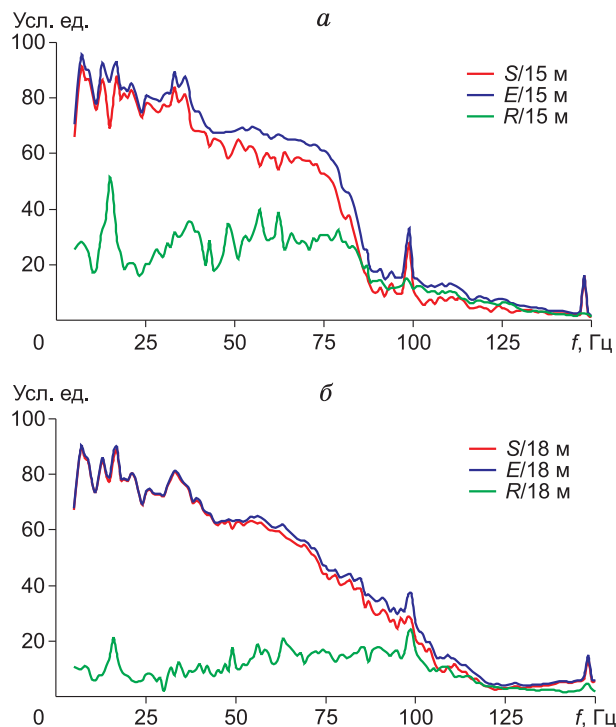


Рис. 7. Амплитудные спектры источников при глубине погружения заряда:

$a$  – 15 м;  $б$  – 18 м.

Здесь  $S$  – спектр сигнала;  $R$  – помехи;  $E$  – спектр исходных трасс.

менение деконволюции при анализе оправдано, так как позволяет выявить особенности спектра сигналов в полосе частот, соответствующей диапазону цифровой обработки данных МОГТ.

### Литература

1. Гольдин С.В., Митрофанов Г.М. Спектрально-статистический метод учета поверхностных неоднородностей в системах многократного прослеживания отраженных волн // Геология и геофизика. 1975. № 6. С. 102–112.