

# Методика количественного анализа опытных работ на примере вибросейсмических работ в западном Казахстане

Закариев Ю.Ш., Марутян В.Г., Плешкевич А.Л., Рябов В.Ю., Рябошапко С.М., Цыпышев Н.Н., ОАО ЦГЭ, г. Москва; Мусагалиев М.З., АО НК «КазМунайГаз», г. Астана

## Введение

Основное назначение опытно-методических работ состоит в оптимизации выбора условий возбуждения-приема сейсмических колебаний. Указанная оптимизация осуществляется в тех достаточно узких рамках, которые определены принятыми заранее основными проектными решениями, как-то: типом источника возбуждения (взрывной, вибрационный); типом сейсмической съемки (2D, 3D); номинальной кратностью съемки; максимальным удалением источник-приемник и т.п. В силу организационно-технических причин начало проведения опытно-методических работ приурочивается, как правило, к началу производственных работ, когда фактически уже определены такие узко технические параметры съемки, как-то: коэффициент и величина базы группирования приемников или источников; суммарная нагрузка на грунт для виброисточников или вес заряда и глубина его заложения при взрывных работах. При этом опытно-методические работы зачастую служат лишь подтверждением заранее принятых технических решений, а иногда превращаются в простую формальность. Другим фактором, который снижает значимость результатов проведения опытно-методических работ, является фактическое отсутствие разработанной методики объективного анализа качества сейсмических данных. В отсутствие такой методики критерием оптимальности принятых технических и методических решений является визуальный анализ бумажных выводов полученных сейсмограмм, основанный на опыте и интуиции участвующего в этих работах геофизика, результаты которого, как правило, невозможно объективно охарактеризовать. В последние годы наметился некоторый перелом в таком субъективном подходе к анализу результатов опытно-методических работ. Во многом это связано с появлением современной, компактной и мощной вычислительной техники и соответствующего математического обеспечения, которое позволяет проводить количественный анализ сейсмических данных с элементами их обработки. В статье представлены практические методики компьютеризованного количественного анализа сейсмических данных. Наряду с применением более традиционных оконных оценок будут представлены новые методики количественной оценки качества сейсмических данных, применение которых поможет объективнее оценивать результаты опытных работ. Указанные методики были применены к результатам опытно-методических работ, проведенных в Западном Казахстане на площадях Акниген, Забурунье и Карамандыбае. Помимо иллюстраций их применения по результатам оценивания сделаны некоторые важные выводы, которые касаются не только собственно опытно-методических работ, но и основных производственных.

## Критерии качества исходных сейсмических данных и методы его количественной оценки

Основным критерием качества полевых сейсмических данных следует считать их пригодность для последующей полноценной, качественной обработки, сложность которой продолжает возрастать из года в год. Последнее связано с возрастающей сложностью решаемых геологических задач. Традиционно качество полевых сейсмических данных связывают, прежде всего, с качеством

прослеживания отраженных сейсмических волн от опорных и целевых отражающих горизонтов, их частотным составом, а также с уровнем регулярных волновых помех, главными из которых при наземных работах являются поверхностные волны. Традиционным средством количественного оценивания качества сейсмограмм являются разнообразные оконные оценки. К числу наиболее популярных принадлежат оконные оценки амплитуд и временных частот сейсмической записи в выбранных пользователем пространственно-временных окнах. Указанные окна выбираются, исходя из основных особенностей наблюдаемых сейсмограмм. Так, наземную сейсмограмму можно разделить на три основные области, которые обозначим М, R и S. Кратко охарактеризуем каждую из них.

Область «микросейсм» М, расположенная до теоретических первых вступлений, содержит действительные микросейсм, техногенные и ветровые помехи в случае взрывных источников, а при работе с виброисточниками - значительные по уровню регулярные корреляционные шумы, обычно оторачивающие интенсивные прямую волну и волны первых вступлений. Корреляционные шумы обусловлены боковыми «лепестками», окружающими главный максимум функции взаимной корреляции теоретического свипа-сигнала с отраженным сигналом либо сигналом прямой волны. Указанные шумы имеют тенденцию слабо затухать либо вообще не затухать при значительных временных сдвигах от главного максимума. Хотя эти помехи чаще всего не составляют большой проблемы на малых временах при обработке отражений от неглубоких горизонтов, они могут затруднить обработку отражений от глубоких горизонтов, поскольку связанные с ними волны наблюдаются на значительных временах. Здесь амплитуды полезных отражений в силу фактора геометрического расхождения могут оказаться соизмеримыми или даже меньшими амплитуд корреляционного шума. Отметим, что уровень корреляционных шумов зависит от частотного диапазона и особенностей формы свипа.

Область конуса поверхностных «рэлеевских» волн R содержит волны-помехи, которые могут на порядок и более превышать по амплитуде полезные отраженные волны. Эти волны имеют, обычно, сравнительно низкую частоту колебаний и низкие кажущиеся скорости. Их важной особенностью является сравнительно медленное ослабление в сравнении с полезными отраженными волнами с ростом времени наблюдения, что связано с различными функциями расхождения. Обычные объемные волны в среднем убывают с ростом времени наблюдения из-за фактора геометрического расхождения, как  $1/T$ , тогда как поверхностные, «каналовые» волны убывают значительно медленнее - как  $1/T^{1/2}$ . Указанные волны обычно составляют одну из главных проблем при сейсмической обработке, роль этих помех объективно возрастает с ростом времени наблюдения.

«Сигнальная» область сейсмограммы S расположена ниже области M и волн первых вступлений, вне конуса R интенсивных поверхностных волн. Наблюдаемые в этой области сейсмограммы синфазности полезных отраженных волн часто бывают маскированы плотным фоном интенсивных среднескоростных квазирегулярных волн-помех.



# ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ

имеющих разнообразную природу. Часто на фоне этих волн, имеющих близкий к полезным отражениям частотный состав, не удается уверенно выделить полезные отражения без предварительной частотной фильтрации указанных помех. Обычно волны, наблюдаемые в области S, из-за неупругого поглощения в среде вкупе с фактором геометрического расхождения в среднем ослабляются, как  $1/T^2$  с ростом времени наблюдения, что обусловило популярность применения фактора стационаризации сейсмической записи по времени  $T^2$ .

Исходя из указанного представления сейсмограмм, популярным способом их оценки является вычисление средних по модулю амплитуд  $AM$ ,  $AR$ ,  $AS$  и средних (или преобладающих) частот  $FM$ ,  $FR$ ,  $FS$  в окнах, расположенных в пределах указанных областей M, R и S (рис.1, а), а также отношений полученных оконных оценок типа  $AS/AM$  и  $AS/AR$ . Последние могут условно интерпретироваться как оценки отношения сигнал/помеха. Условность такой интерпретации состоит в том, что оценка  $AS$  necessarily содержит в себе долю квазирегулярных волн-помех, которая может существенно превышать энергетически долю полезных отраженных волн. То же замечание касается оценок частотного состава. Кроме того, сами по себе величины отношений  $AS/AM$  и  $AS/AR$  характеризуют лишь относительное изменение свойств изучаемых сейсмограмм. Они не имеют самостоятельного значения в качестве меры абсолютной величины отношения сигнал/помеха. Тем не менее, указанные простейшие оценки помогают установить ряд важных особенностей изучаемых сейсмограмм, как-то:

- относительная интенсивность источника колебаний - величина  $AS$ , измеренная по сейсмограммам ОПВ;

- относительный уровень поверхностных волн-помех и «микросейсм» - величины отношений  $AR$  и  $AM$ , измеренные по сейсмограммам ОПВ;

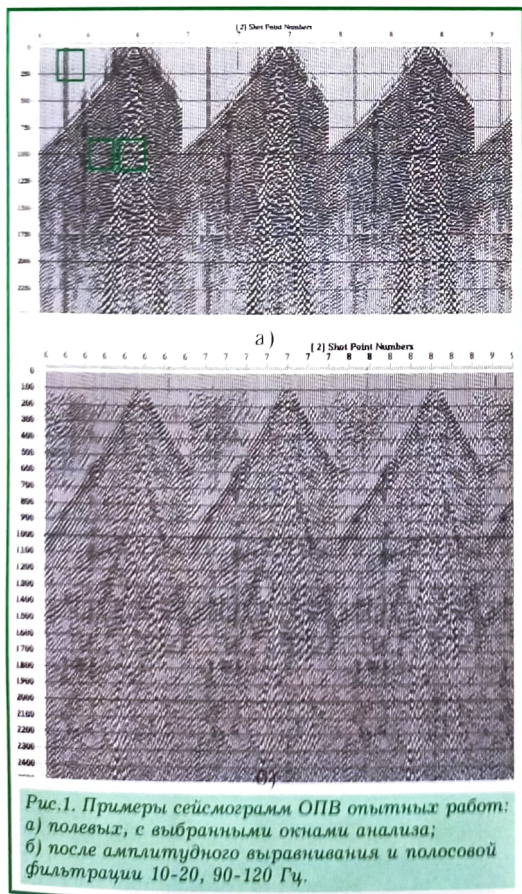
- преобладающий (средний) частотный состав колебаний в разных областях сейсмограммы - величины  $FM$ ,  $FR$ ,  $FS$ , измеренные по сейсмограммам ОПВ

Указанные оценки, число которых составляет шесть, могут быть рекомендованы как необходимый минимум при анализе данных опытно-методических работ и при мониторинге полевых сейсмограмм в ходе проведения основных производственных работ. Помимо этого, при анализе значительных по объему совокупностей данных производственных работ могут использоваться еще две полезные оценки -  $AM$  и  $FM$ , вычисленные по сортировкам (сейсмограммам) ОПВ, - отражающие структуру и уровень техногенных помех (дороги, населенные пункты, работающие нефтепромыслы и т.п.).

Среди иных оконных оценок необходимо упомянуть статистическую оценку  $S/N$  отношения сигнал/помеха, которая претендует на свою универсальность в качестве меры абсолютной величины этого отношения. Указанная оценка исходит из модели помех некоррелированных в профиле направления, т.е. модели белого шума. Такое предположение, не имеющее связи с реальным сейсмическим экспериментом, позволяет на основе сравнения функций взаимной корреляции и автокорреляции трасс изучаемой сейсмограммы оценивать энергетическую составляющую указанной оценки к реальным сейсмическим данным часто приводит к несуразным результатам, что дает основание рекомендовать полностью отказаться от ее практического использования. Подтверждающий сказанное практический пример использования данной оценки приведен в следующем разделе при анализе реальных данных опытно-методических работ на площади Акинген (рис.3).

Заметим, что указанные выше оконные оценки не дают прямого ответа на основной вопрос о качестве сейсмических данных. В лучшем случае эти оценки позволяют косвенно оценить относительные изменения качества производственных сейсмограмм, контролируя их общий амплитудно-частотный уровень, связанный с условиями возбуждения-приема, а также относительную интенсивность регулярных помех типа поверхностных волн и промышленных помех. Указанные оценки обычно затруднительно применять при дифференцировании по качеству результатов опытно-методических работ, имеющих целью оптимизацию условий приема-возбуждения колебаний, что особо касается работ с вибростанциями. Данное обстоятельство послужило причиной разработки альтернативной методики получения количественной оценки отношения сигнал/помеха, к изложению которой мы приступим.

Напомним, что одним из основных методов стандартной обработки является накапливание сигналов отраженной волны вдоль ее синфазности по сейсмограммам ОСТ с последующей нормализацией результата по числу слагаемых. Целью данного накапливания является выделение полезного сигнала отраженной волны на фоне разнообразных помех. Со статистической точки зрения результат указанного накапливания представляет собой среднее арифметическое, служащее, при известных предположениях, несмещенной оценкой с минимальной дисперсией полезного сейсмического сигнала на фоне случайных помех - его математического ожидания. Наряду с найденной величиной этой точечной оценки важной ее характеристикой является выборочная дисперсия или среднеквадратический разброс, характеризующий меру разброса входящих в оценку среднего арифметического отдельных слагаемых. Ясно, что



чем менее будут различаться друг от друга входящие в сумму слагаемые, тем менее зашумлены исходные данные и тем более надежная оценка математического ожидания будет получена. Для иллюстрации сказанного можно рассмотреть два крайних случая. Первый случай - отсутствие коррелированного сигнала вдоль известной оси синфазности. В этом случае среднее арифметическое будет близко к нулю, а выборочная дисперсия или корень из нее - стандартное отклонение, - сравнительно велики. Второй случай, отвечающий полному отсутствию помех или искажений сигнала, - полностью повторяющийся сигнал вдоль оси синфазности от трассы к трассе. Здесь среднее арифметическое совпадает с каждым отдельным слагаемым, а стандартное отклонение будет равно нулю. Сказанное позволяет предложить следующую естественную меру отношения сигнал/помеха,  $\rho$  которую определим безразмерной величиной модуля отношения среднего арифметического к стандартному отклонению:

$$\rho = |\bar{a}| / \sigma, \quad \bar{a} = \frac{1}{N} \left( \sum a_i \right), \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (a_i - \bar{a})^2}, \quad (1)$$

где  $a_i = a_i(t)$  - амплитуда  $i$ -й сейсмической трассы, измеренная вдоль известной синфазности волны  $t$  (например, вдоль теоретического годографа ОСТ или ОПВ заданной отраженной волны). При таком определении величина отношения сигнал/помеха для конкретной отраженной волны будет зависеть от времени  $t$ , поскольку полезный сигнал представляет собой переменную функцию времени. Для того чтобы получить одну единственную оценку отношения сигнал/помеха для заданной отраженной волны можно использовать разные способы. Можно, например, осреднить переменную по времени оценку в некотором временном интервале, охватывающем полезный сигнал:

$$\bar{\rho} = \frac{1}{M} \sum_{|j| \leq M/2} \rho(t_j),$$

где  $t_j = t + j\Delta t \in \Delta T$  - сдвинутая по времени синфазность внутри заданного временного интервала, центрированного относительно линии синфазности  $t = t(x)$ . Поскольку из-за переменной формы сейсмического сигнала большая доля значений  $\rho = \rho(t_i)$  будет иметь в указанном временном интервале  $\Delta T$  сравнительно малую величину, осредненная указанным образом величина отношения сигнал/помеха будет иметь низкие значения и поэтому будет маловыразительной. Указанный недостаток может быть устранен, если осреднять не первые, а более высокие степени  $\rho$ , приписывая, тем самым, больший вес их большим значениям:

$$\bar{\rho}_k = \left( \frac{1}{M} \sum_{|j| \leq M/2} \rho^k(t_j) \right)^{1/k}, \quad (2)$$

где допустимо  $1 \leq k \leq \infty$ . Практика расчетов показала, что подходящими значениями являются, в частности,  $\bar{\rho}_2$ ,  $\bar{\rho}_4$  и  $\bar{\rho}_\infty$ . Заметим, что  $\bar{\rho}_{k+1} \leq \bar{\rho}_k \leq \bar{\rho}_1$ , а  $\bar{\rho}_\infty = \max_i \rho(t_i)$  в заданном интервале  $\Delta T$  центрированном относительно линии синфазности  $t = t(x)$ . Результаты практических расчетов указанных оценок (1)-(2) будут приведены в последующем разделе.

Приведем некоторые свойства указанных оценок. Во-первых, следует подчеркнуть, что данные оценки характеризуют средневзвешенное либо пиковое отношение сигнал/помеха исходных (не суммарных) сейсмических данных. Во-вторых, данные оценки позволяют оценить статистический эффект накопления. Именно, при синфазном накоплении  $N$  сейсмических трасс с оцененным исходным отношением сигнал/помеха  $\bar{\rho}_i$  суммарная трасса будет иметь отношение сигнал/помеха

$\bar{\rho}_\Sigma = \sqrt{N} \bar{\rho}_i$ . Это позволяет дать более обоснованную оценку желаемой кратности накопления при проектировании сейсмической съемки. В соответствии с формулами (1) величина оценки отношения сигнал/помеха  $\bar{\rho}_i$  зависит от разброса амплитуд метим, что этот разброс может быть обусловлен не только полновыми помехами различной природы, но и различием амплитудного уровня отдельных трасс, обусловленным различиями условий приема, а также геометрическим расхождением. Кроме того, значительное влияние может оказать статистический разброс времен наступления сейсмических сигналов относительно теоретической синфазности. С учетом сказанного, для получения не заниженной, а более реалистичной оценки отношения сигнал/помеха перед ее расчетом рекомендуется стационаризовать сейсмические записи умножением их амплитуд на  $T^2$ . Часто оказывается желательным выполнить также элементы обработки, как-то фильтрацию низких частот для подавления поверхностных волн, а также балансировку амплитуд отдельных трасс с помощью нормировки либо АРУ. При этом будет получена более реалистичная оценка отношения сигнал/помеха, которой можно реально достичь в ходе стандартной обработки.

Практическая реализация указанной методики требует оценить теоретическую форму синфазности выбранной отраженной волны на сейсмограммах ОПВ, полученных в ходе проведения опытно-методических работ. Имеющийся опыт позволяет рекомендовать следующую последовательность действий. В начале следует с помощью подбора подходящего полосового фильтра наиболее уверенно выделить желаемую синфазность отраженной волны на фоне помех, а также выполнить амплитудную балансировку сейсмических трасс. После этого, с помощью имеющихся интерактивных программных средств нужно выполнить корреляцию отраженной волны на отдельных сейсмограммах, приблизительно оценив форму ее синфазности. Для этого в разработанных программных системах экспресс-обработки и анализа полевых сейсмических данных FN и FNE имеются полуавтоматические средства корреляции и уточнения формы синфазности. Далее, если требуется, отдельные сейсмограммы, входящие в серию проведенных экспериментов, могут быть статически уравнены для устранения постоянных временных сдвигов между отдельными сейсмограммами. Затем все сейсмограммы накапливаются по координате ОПВ. Это делается с целью подавления нерегулярного шума и оптимизации условий выделения синфазности интересующей отраженной волны, а также для исключения субъективного элемента в оценке формы синфазности отражения, из-за адаптации ее формы к отдельной, частной сейсмограмме, - выполняется полуавтоматическая корреляция синфазности отраженной волны по суммарной сейсмограмме. Практический опыт показал, что результаты данной корреляции целесообразно сгладить либо с помощью скользящего среднего, либо аппроксимировать ее гладкой теоретической кривой по методу наименьших квадратов. Устойчивые и реалистичные результаты удастся получить при аппроксимации по методу наименьших квадратов наблюдаемой синфазности отражения отрезком параболы, которая и отождествляется с ее теоретической формой. Затем полученная оценка формы синфазности последовательно применяется к каждой отдельной сейсмограмме ОПВ, входящей в серию проведенных экспериментов, для получения соответствующих оценок отношения сигнал/помеха  $\bar{\rho}_2$ ,  $\bar{\rho}_4$  и  $\bar{\rho}_\infty$ .

Заметим, что в качестве альтернативы предложенной мере отношения сигнал/помеха (1)-(2)

могут быть успешно использованы оценки нормированных функций взаимной корреляции или функции подобия по ансамблю сейсмических трасс [1,2]. Эти оценки, популярные при построении спектров скоростного анализа, обычно изменяются синхронно с представленными оценками (1)-(4). В отличие от последних они уже не имеют столь наглядной физической интерпретации.

#### Практический пример: анализ результатов опытно-методических работ на площади Акинген

В ходе опытно-методических работ на данной площади были проведены традиционные серии экспериментов, содержащие переборы: числа накопленных, длины свипа, его верхней граничной частоты, величины его начального конуса, нагрузки на грунт, а также способ группирования вибраторов - на линейной базе или по углам квадрата. На рис.1а представлены примеры типичных необработанных сейсмограмм опытных работ, на которых можно проследить синфазности полезных отраженных волн. Одно из отражений имеет синфазность с вершиной на времени около  $t_0=1000$  мс. При построении оконных оценок использовалось окно S шириной 300 мс, охватывающее указанную синфазность. Окно R, имеющее сходную конфигурацию, было расположено на том же времени в конусе поверхностных волн; окно M было расположено на времени до теоретических первых вступлений. При анализе полученных сейсмограмм обратила на себя внимание их разнородность с точки зрения уровня их амплитуд. Для количественной оценки этого явления были рассчитаны амплитудные оконные оценки AS, графики которых представлены на рис.2 с разбивкой по сериям отдельных, взаимосвязанных экспериментов и приведены полученные результаты.

На рис. 2.а представлена зависимость амплитуд сейсмограмм в окне S от верхней граничной частоты свипа. Полученная зависимость близка к обратной пропорциональной - увеличение верхней частоты свипа в 1,5 раза с 80 до 120 Гц приводит к уменьшению амплитуды сейсмограммы примерно в 1,5 раза (при прочих равных условиях). Увеличе-

ние длины начального конуса свипа в пределах от 250 до 1000 мс практически не приводит к изменению амплитуды записи в окне S, что демонстрирует рис.2.б. Увеличение длины свипа в диапазоне от 8 до 16 (с), а также увеличение числа накоплений с 2 до 8 привело к пропорциональному росту амплитуд соответствующих сейсмограмм (рис.2.в,г).

При анализе зависимости амплитуд от числа накоплений при работе со станциями SN фирмы «SERCCEL» чрезвычайно важным является стационарный параметр, характеризующий следующее условие: до или после суммирования производится корреляция со свипом. В проведенных экспериментах корреляция выполнялась до суммирования. В ином случае зависимость от числа накоплений является квадратичной.

Изменение нагрузки на грунт в диапазоне от 40 до 70% привело к значимому - в 2, 7 раза, - увеличению амплитуд записи (рис.2.д). Характер зависимости - нелинейный.

Изучение амплитудных характеристик сейсмограмм в окне R области распространения поверхностных волн свидетельствует в основном о синхронном поведении оценок AR и приведенных выше оценок AS. Важное исключение составляют те эксперименты, которые приводят к увеличению относительной величины начального конуса свипа  $DT/T$ , где  $DT$  - величина начального конуса,  $T$  - длина свипа. Так увеличение его относительной величины с 2% до 8% (в основном, за счет увеличения начального конуса с 250 до 1000 мс) привело к подавлению поверхностной волны и увеличению отношения  $AS/AR$  приблизительно 1,8 раза (рис.2.е). В изучаемом диапазоне величин эта зависимость близка к параболической. Кроме того, имеется слабый, но устойчивый рост отношения  $AS/AR$  с ростом верхней граничной частоты свипа, и уменьшение этого отношения при увеличении длины свипа. Объяснение указанных трендов будет дано позднее.

Продемонстрируем применение к реальным данным статистической оконной оценки отношения сигнал/помеха  $S/N$ , основанной на сравнении

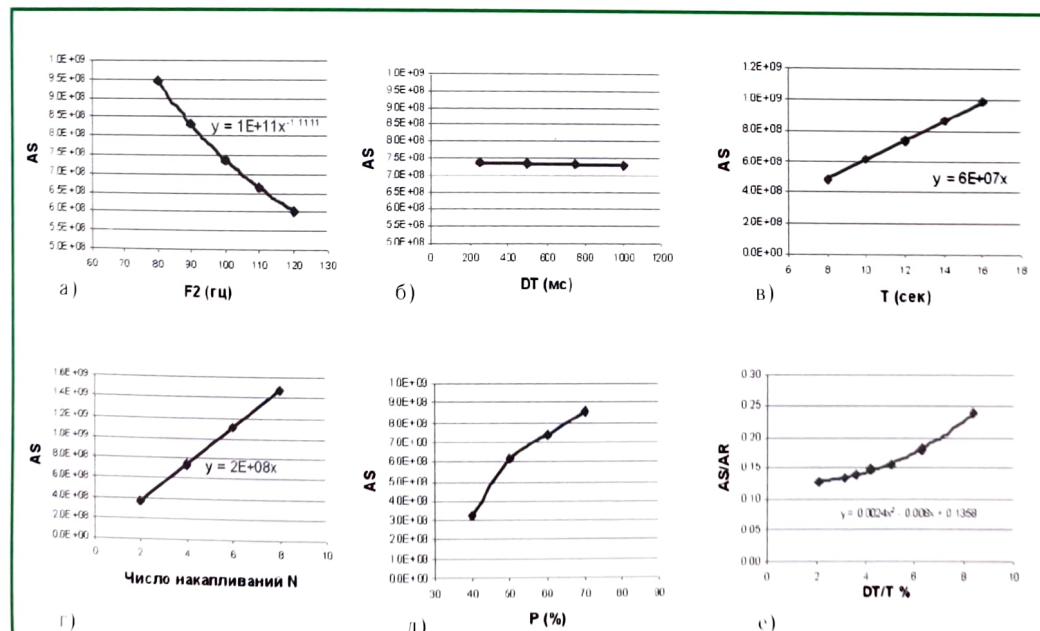


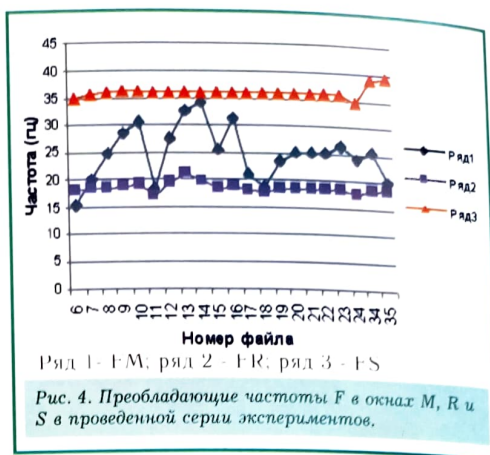
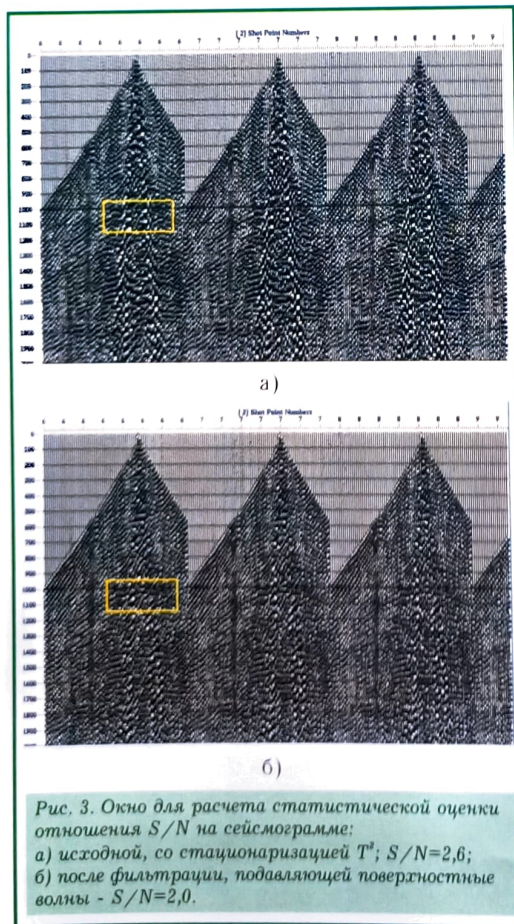
Рис. 2.

- зависимость амплитуды AS полезной части записи от верхней граничной частоты свипа  $F_2$ ;
- зависимость амплитуды AS полезной части записи от величины конуса  $DT$  (мс);
- зависимость амплитуды AS полезной части записи от числа накоплений  $N$ ;
- зависимость амплитуды AS полезной части записи от величины нагрузки  $P$  (%);
- зависимость отношения оконных оценок амплитуд  $AS/AR$  от относительной величины конуса  $DT/T$  %;

взаимно корреляционной и автокорреляционной функций сейсмических трасс. На рис.3 приведен пример сейсмограммы: а) до фильтрации, б) после полосовой фильтрации, позволившей ослабить поверхностную волну и существенно улучшить прослеживаемость полезного отражения. По этой сейсмограмме были рассчитаны указанные оценки отношения сигнал/помеха до и после фильтрации. Оценка отношения сигнал/помеха до фильтрации была равной  $S/N=2,6$ , а после фильтрации значительно уменьшилась и стала равной  $S/N=2,0$ . Очевидно, что причиной абсурдного результата стала настройка данной оценки на регулярную помеху - поверхностную волну как на полезную волну. Можно полагать, что такое свойство указанной оценки является фатальным недостатком, который препятствует ее практическому использованию.

Коротко остановимся на оконных оценках частотного состава сейсмограмм опытных работ. На рис.4 представлены графики преобладающих частот записей в окнах M,R и S - FM, FR и FS, - в проведенной серии экспериментов. Оконная оценка преобладающей частоты была построена на основе первого нуля-пересечения осредненной в окне анализа автокорреляционной функции сейсмических трасс, входящих в окно. Время указанного первого нуля-пересечения полагалось равным 1/4 преобладающего периода колебаний, откуда и получалась оценка преобладающей частоты. Опыт практических расчетов позволяют рекомендовать именно эту оценку в качестве надежной и устойчивой величины преобладающей частоты. Альтернативная оценка в виде максимума амплитудно-частотного спектра характеризуется своей неустойчивостью и, как следствие, недостоверностью, а другие оценки типа средневзвешенной частоты амплитудного спектра или его медианы, обычно дают завышенные значения преобладающей частоты.

Результаты анализа преобладающих частот сейсмической записи свидетельствуют, что оценки



преобладающих частот FS в области полезных отражений практически не зависят от условий проведения экспериментов за исключением замены линейного группирования источников на группирование типа «квадрат». При этом оценка преобладающей частоты FS увеличилась с 35-36 Гц до 39 Гц. Как было установлено в ходе дальнейших исследований, данное повышение частоты записи связано с заметным ухудшением прослеживаемости отраженных волн и увеличением фона нерегулярных помех, что и стало причиной указанного повышения частоты.

Подводя промежуточные итоги проведенного анализа оконных оценок результатов опытно-методических работ, можно сделать определенные выводы. На амплитуду сейсмограмм ОПВ значимо повлияли следующие факторы.

1. Величина верхней граничной частоты свипа. Зависимость от ее величины близка к обратной пропорциональной. Так, увеличение верхней граничной частоты с 80 Гц до 120 Гц привело к уменьшению средней амплитуды сейсмограмм примерно в 1,5 раза (при прочих равных условиях).

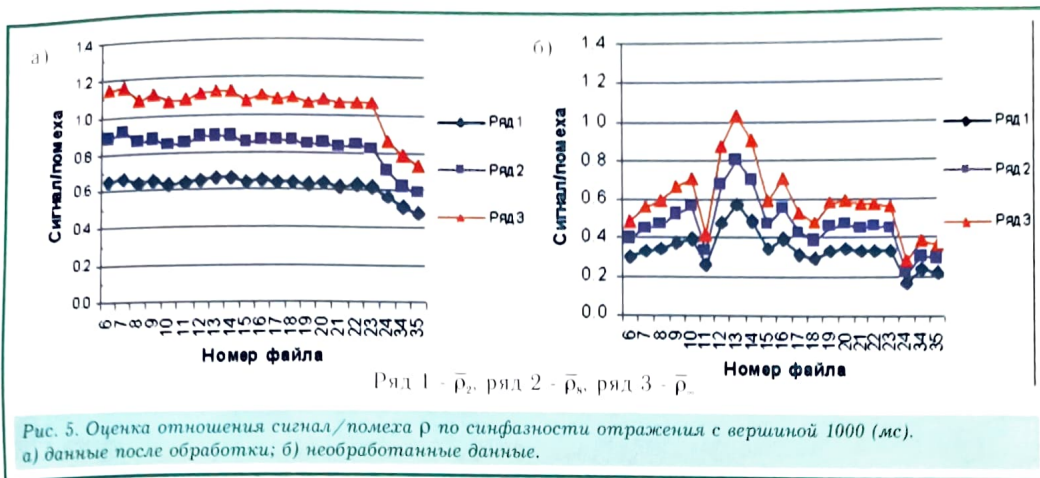
2. Длина свипа. Зависимость амплитуды от ее длины близка к пропорциональной. Так, увеличение длины свипа с 8с до 16с привело примерно к двукратному росту амплитуды.

3. Число накапливаний. При использовании режима корреляции до накапливания амплитуда сейсмограммы пропорциональна числу накапливаний (их увеличение с 2 до 8 приводит к росту амплитуды в 4 раза); при задании корреляции после накапливания амплитуда квадратично зависит от числа накапливаний (их увеличение с 2 до 8 приводит к росту амплитуды в 16 раз).

4. Нагрузка (усилие) на грунт. Изменение нагрузки от 40% до 70% привело к нелинейному росту амплитуды в 2,7 раза.

Все указанные выше факторы воздействуют на амплитуду практически синхронно, как в области полезных волн S, так и поверхностных волн R.

Специфическое действие на амплитуды сейсмограмм оказывает увеличение длины начального конуса свипа. Указанное увеличение в диапазоне от 250 мс до 1000 мс практически не влияет на амплитуду полезных волн в окне S и значимо - приблизительно в 1,8 раза, - ослабляет амплитуду поверхностных волн в окне R. Указанный эффект имеет простое объяснение и связан с тем, что увеличение длины конуса в начальной части свипа приводит к уменьшению доли низких частот, и, следовательно, подавлению (фильтрации) низкочастотной части сейсмической записи. Соответственно, подавление низких частот приводит к ослаблению поверхностных волн. Суждение о полезности такого рода ослабления за счет увеличения начального конуса свипа будет приведено в заключительной части работы.



Возникают следующие естественные вопросы. Как связаны (и связаны ли вообще) отмеченные выше особенности сейсмограмм опытных работ с их качеством? Какие условия возбуждения/приема колебаний следует признать более предпочтительными, а какие менее? Представленные выше оконные оценки сейсмограмм и основанный на них анализ не дают прямого ответа на эти основные вопросы. Для ответа на них необходимо оценить качество прослеживания полезных отражений на фоне разнообразных помех, что может быть выполнено с помощью предложенной методики расчета отношения сигнал/помеха, предполагающей корреляции синфазности отражения.

Для более уверенной корреляции синфазностей полезных отражений были выполнены элементы сигнальной обработки сейсмограмм, после которой стала уверенно прослеживаться синфазность отражения с вершиной на времени около 1000 мс (рис. 1.6). На основе указанной синфазности в окружающем ее 30 мс окне были рассчитаны оценки  $\bar{\rho}_1$ ,  $\bar{\rho}_2$  и  $\bar{\rho}_3$  (см. формулы (1)-(2)). Результаты расчетов приведены ниже на рис. 5.а. Полученные оценки  $\bar{\rho}_1$ ,  $\bar{\rho}_2$  и  $\bar{\rho}_3$  демонстрируют примерное постоянство отношения сигнал/помеха в пределах всего ряда сейсмограмм за исключением трех последних с номерами 24, 34 и 35, для которых характерно значимое уменьшение отношения сигнал/помеха. Заметим, что сейсмограмма с номером 24 отвечает уменьшению нагрузки на грунт с 60% до 40%, а с номерами 34 и 35 - замене линейного группирования источников на группирование типа «квадрат» без перепада и с перепадом соответственно. Отметим, что полученные количественные оценки полностью отвечают результатам визуального анализа сейсмограмм.

Проведенный анализ свидетельствует, что при вибротсейсмических работах изменение таких параметров возбуждения колебаний, как длина свипа, ширина его частотной полосы, число накопленных, величина начального конуса свипа, практически не повлияло на качество прослеживания отраженных волн на обработанных сейсмограммах. Факторами, которые значимо повлияли на их качество, являются способ группирования вибраторов и нагрузка на грунт. В проведенной серии экспериментов возбуждение колебаний с помощью групп вибраторов типа «квадрат», а также с уменьшенной до 40% нагрузкой на грунт привело к ухудшению качества сейсмограмм относительно линейного группирования и номинальной нагрузки на грунт 60-70%.

Помимо качества прослеживания отраженных волн на фоне помех существенное значение имеет частотный состав сигнальной составляющей. Очевидно, для последующей обработки желателен широкополосный частотный состав зарегистриро-

ванных сигналов отраженных волн. Оконные оценки частотных спектров сейсмических колебаний имеют своим существенным недостатком отсутствие избирательности, поскольку в окно анализа помимо полезных отраженных волн входят многочисленные помехи. Для исправления этого недостатка и получения более избирательных оценок можно рекомендовать формирование суммарного сигнала накоплением трасс вдоль оценки теоретической синфазности отраженной волны. На рис. 6 представлена подборка суммотрасс, каждая из которых получена накоплением вдоль синфазности отражения  $t_0=1000$  мс всех трасс для каждой из сейсмограмм ОПВ, входящих в серию опытных работ. Отметим, что визуальный анализ полученных суммотрасс и расчет их амплитудно-частотных спектров, или оценка преобладающих частот полезного сигнала свидетельствуют о мало значимом отличии их частотного состава и разрешенности записи.

Существенно иная картина наблюдается при оценке отношения сигнал/помеха по необработанным сейсмограммам со стационаризацией амплитуд  $t^2$  (рис. 5.б). При получении этих оценок применена оценка формы синфазности отражения, полученная после фильтрации, - как наиболее надежная. Анализ необработанных данных приводит к следующим результатам. Отношение сигнал/помеха на необработанных данных, оцененное по синфазности отражения с вершиной 1000 мс, наиболее сильно зависит от величины начального конуса свипа. При увеличении длины конуса с 250 мс до 1000 мс указанное отношение вырастает в 2 и более раза. Как уже было отмечено, причина данного явления в том, что при увеличении длины конуса происходит ослабление низкочастотных составляющих свипа, что приводит к фильтрации низкочастотной поверхностной волны. Сказанное подтверждается визуальным анализом необработанных сейсмограмм, на которых четко проявляется ослабление поверхностных волн при увеличении относительной длины конуса. Помимо этого наблюдается значимая зависимость отношения сигнал/помеха от величины верхней граничной частоты свипа и от длины свипа. Именно, повышение верхней граничной частоты, а также уменьшение длины свипа приводят, при прочих равных условиях, к увеличению оценки отношения сигнал/помеха по синфазности отражения -  $t_0=1000$  мс. Причиной является опять-таки подавление поверхностной волны. Именно при неизменной длине свипа и величине начального конуса увеличение его верхней граничной частоты с неизбежностью приводит к более глубокому ослаблению низкочастотных составляющих (за счет начального конуса свипа) и, соответственно, к подавлению поверхностных волн. Тот же эффект проявляется при уменьшении длины

# ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ

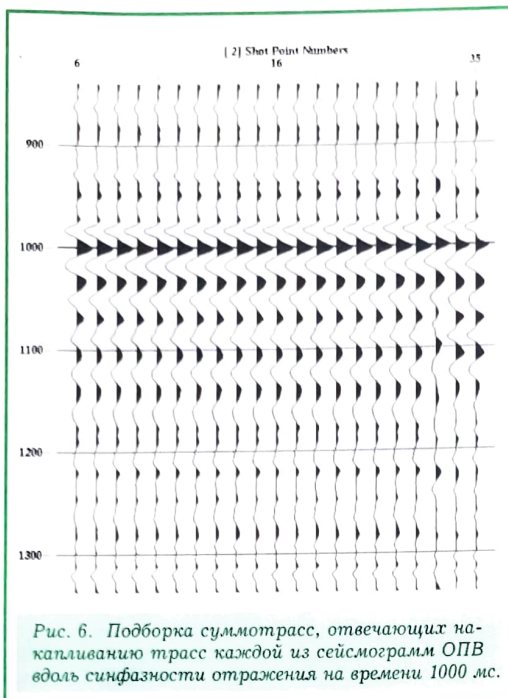


Рис. 6. Подборка суммотрасс, отвечающих на-  
капливанию трасс каждой из сейсмограмм ОПВ  
вдоль синфазности отражения на времени 1000 мс.

сви́па и неизменных граничных частотах и длине конуса. Сказанное объясняет и то, что для необработанных данных график отношения  $AS/AR$  обычно повторяет форму графиков отношения сигнал/помеха  $\bar{p}_2$ ,  $\bar{p}_k$  и  $\bar{p}_m$ , представленных на рис.5.б.

#### Выводы и рекомендации

Подводя итог проведенным исследованиям оценки качества сейсмограмм опытно-методических работ, следует выделить одну серьезную проблему. Центральным вопросом состоит в том, каким рядом сейсмограмм следует руководствоваться при оценке их качества, на котором и будет основан последующий выбор оптимальных условий возбуждения-приема колебаний. Следует ли пользоваться исходными необработанными сейсмограммами или сейсмограммами после частичной обработки, состоящей в фильтрации основной помехи интенсивных, низкочастотных поверхностных волн? Как было показано, результаты анализа обработанных и необработанных сейсмограмм при вибросейсмических наблюдениях могут привести к радикально отличающимся выводам. То же замечание касается и визуальной их оценки. Опуская отличия в абсолютном амплитудном уровне исходных сейсмограмм, основное их отличие состоит в интенсивности конуса поверхностных волн-помех относительно полезной части записи. Указанная относительная интенсивность поверхностных волн, выражаемая отношением  $AS/AR$ , в проведенной серии экспериментов практически зависит от одного единственного фактора -  $DT/T$  (%), - относительной величины начального конуса сви́па. Данное отношение характеризует неравномерность частотного спектра сви́па, за счет которой происходит подавление основной низкочастотной помехи - поверхностной волны. Можно утверждать, что аналогичный эффект достигается увеличением начальной частоты сви́па с 10 Гц до 15 или, скажем, до 20 Гц. Следует ли такой способ подавления поверхностных волн на полевых сейсмограммах считать полезным или его целесообразнее отнестись на этап стандартной сигнальной обработки? Более правильным представляется второе. Напомним, что сигнальная обработка сейсмограмм полосовым фильтром 10-20, 90-120 Гц практически полностью нивелирует их различия, т.е. при вибросейсмических работах качество сейсмических данных - с точки зрения результатов их последующей сигнальной

обработки, - чрезвычайно слабо зависит от параметров сви́па в разумных, достаточно широких пределах. Сказанное позволяет сделать вывод о полевых работах и частотного диапазона проведения мехи - поверхностной волны, - можно использовать некоторые стандартные параметры возбуждения колебаний, не приводящие к перерукам в работе вибраторов, их преждевременному износу и подомке. С этой точки зрения допустимо использовать достаточно большую величину начального конуса сви́па 750-1000 мс, имеющего стандартную длину 10-12 с и частотную полосу от 8-10 до 90-100 Гц. Такой режим мягкого подавления низких частот представляется сравнительно безопасным с точки зрения перспектив последующей сигнальной обработки.

Следует отметить, что при взрывных работах для подавления поверхностных волн обычно используют увеличение глубины погружения таряда. В отличие от вибросейсмических работ такая мера не связана с искусственным ограничением частотного диапазона сейсмограмм. По этой причине при взрывных работах важным представляется анализ сейсмограмм без их частотной фильтрации в ходе предварительной обработки.

Поскольку современный граф обработки часто предполагает использование балансировки амплитуд и деконволюции с учетом поверхностных условий, чрезвычайно важным условием грамотного проведения полевых работ является отсутствие резких изменений параметров возбуждения колебаний, приводящих к резким изменениям амплитудно-частотных характеристик сейсмограмм. В частности, поскольку амплитуда сейсмограмм пропорциональна длине сви́па и обратно пропорциональна его верхней граничной частоте, указанные параметры должны оставаться, как правило, неизменными. То же касается изменения таких важнейших параметров возбуждения как число накапливаний, величина нагрузки на грунт и коэффициент группирования, которые чрезвычайно сильно влияют на амплитуду сейсмограмм. С точки зрения перспектив последующей обработки с сохранением амплитуд резкие и бесконтрольные изменения указанных параметров возбуждения ничем не отличаются от бесконтрольного изменения коэффициента усиления на сейсмической станции. В отличие от последнего, изменения указанных параметров возбуждения, как правило, не могут быть автоматически учтены т.н. МР-фактором, что способно привести к динамическим искажениям окончательных результатов обработки.

Отметим, что в проведенной серии экспериментов, примененные параметры линейного группирования источников были далеки от оптимальных, что связано с чрезмерно большим расстоянием между соседними вибраторами в группе, составлявшим около 12 м. Несмотря на это, как обработанные, так и необработанные сейсмограммы демонстрируют заметное ухудшение своего качества при замене линейного группирования источников на группы типа «квадрат».

Главный вывод проведенных исследований состоит в том, что именно вопросам оптимизации группирования следует уделять основное внимание.

#### Литература

1. Yilmaz O. Seismic Data Processing - Tulsa: SEG, 1987.
2. Хаттон Л., Уэрддингтон М., Мейкин Д. Обработка сейсмических данных М., «Мир», 1993.
3. Под ред. Гурвича И.И., Номоконова В.П. Справочник геофизика М., «Недра», 1981.
4. У.Притчетт. Получение надежных данных сейсморазведки М., «Мир», 2001 г.