

Критерии и алгоритмы оценки качества полевых сейсмозаписей

Тищенко И.В., Тищенко А.И., ООО «Геофизические системы данных», Жуков А.А., ОАО «ТНК-ВР Менеджмент», г. Москва

Введение

В настоящее время проблема организации и обеспечения эффективного контроля качества (QC) сейсморазведочных работ приобретает всё большую актуальность. Тому есть несколько основных причин.

Во-первых, затраты на проведение полевых работ составляют сегодня порядка 80% от стоимости полного цикла сейсморазведочных работ, включающих также обработку и интерпретацию данных. Потеря или снижение качества полевых данных ведет к большим экономическим потерям, увеличивает сроки изучения лицензионных площадей, ограничивает использование технологий динамической интерпретации данных сейсморазведки, таких как: сейсмическая инверсия, прогнозирование фильтрационно-емкостных свойств коллекторов, АВО-анализ, атрибутивный и сейсмофациальный анализ. Без использования этих технологий сегодня невозможно построение достоверной модели месторождения и оценка запасов месторождения.

Во-вторых, в связи с возросшим уровнем технической оснащённости сейсмопартий, проявляющейся в использовании многоканальных телеметрических систем с количеством каналов до 10000-15000, сейсмодатчиков с улучшенными техническими характеристиками и высокопроизводительной конвейерной технологии 2D и 3D съёмки высокой кратности, исполнители работ стали уделять меньше внимания вопросам оптимизации методики и параметров съёмки. Исполнители всё больше уповают на возможность получения избыточной кратности с последующей отбраковкой «плохих» данных.

В-третьих, Заказчики, не имея возможностей собственными силами осуществить контроль качества полевых данных, привлекают независимых супервайзеров (специалистов или фирмы) для осуществления оперативного контроля и повышения качества получаемых в поле сейсмоданных. В свою очередь, каждый из этих специалистов руководствуется своими, порой субъективными, критериями и средствами оценки качества сейсмограмм.

Последнее десятилетие характеризуется бурным развитием технологии QC в направлении от простого визуального контроля до выполнения в поле экспресс-обработки с получением мигрированных разрезов ОГТ и 3D кубов данных.

На рис. 1 представлены основные характеристики качества сейсмограммы.

Как правило, при оценке качества работы сейсмической партии и полученных сейсмических данных основное внимание концентрируется на техническом браке: ошибки в геометрии съёмки, неработающие каналы, перевернут полярности, искажения записи и т.п. И это действительно важно.

Вместе с тем, не меньшее, если не большее, значение имеет задача оценки «геофизического качества» сейсмограммы. Что понимается под этим термином?

Под этим понимаются простые, но очень важные основные характеристики сейсмической записи: соотношение сигнал/помеха в области регистрации целевых отражений, ширина спектра, значение доминантной частоты полезного сигнала, доля низких и высоких частот в спектре полезного сигнала и некоторые другие атрибуты волнового поля. Именно эти характеристики контролируют разрешенность и динамическую выразитель-

ность записи.

Существует иллюзия, что любой геофизик средней квалификации способен «на глаз» безошибочно отличить хорошую сейсмограмму от плохой. Это большое заблуждение, которое мы попытаемся проиллюстрировать на примерах. Причина в том, что существуют различные представления и алгоритмы измерения упомянутых выше базовых характеристик сейсмической записи, а также устаревшие и ошибочные догмы, сформированные на начальном этапе использования цифровых методов сбора и обработки сейсморазведочных данных.

Вот краткий перечень упомянутых догматических представлений:

- основными нерегулярными помехами, затрудняющими выделение полезных отраженных волн на больших временах (3-6 секунды записи), являются микросейсм;
- чем выше энергия возбужденного волнового поля относительно уровня микросейсм, тем лучше;
- увеличение энергии отраженных волн относительно регулярных и нерегулярных помех в несколько раз (в 2-3 раза) или соответствующее ослабление помех обеспечивает существенное улучшение качества результатов обработки;
- увеличение количества накопленных сейсмограмм (коррелограмм) на пикете возбуждения позволяет существенно ослаблять уровень регистрируемых помех.

Ниже мы попробуем оценить области корректного применения перечисленных представлений.

Рассмотрим последовательно способы и алгоритмы измерения основных атрибутов сейсмической записи.

Что есть сигнал, а что – помеха?

Отношение сигнал/помеха является одной из важнейших характеристик геофизического качества сейсмограммы. Проблема в том, что в геофизике приняты и рекомендованы различные способы расчёта этого атрибута, которые, порой, могут привести к противоположным выводам.

Рассмотрим наиболее распространённые алгоритмы.

Один из самых распространённых способов, заключается в измерении среднеквадратичных нормированных амплитуд в трёх окнах и в вычислении отношений этих амплитуд друг к другу (рис.2). Одно из окон задаётся в поле сейсмограммы «до первых вступлений» и тем самым оценивается уровень микросейсм или «случайного шума», окно A1. Второе окно выбирается «в области регистрации целевых отражений» и тем самым оценивается уровень сигнала, окно A2. Третье окно выбирается в области регистрации поверхностной «регулярной



Рис. 1 Характеристики качества сейсмограммы

волны-помехи» и тем самым оценивается её интенсивность, окно АЗ. Отношение указанных оценок амплитуд в окнах даёт, соответственно, отношения сигнал/микросейсм (А2/А1) и сигнал/регулярная помеха (А3/А2).

Нетрудно заметить недостатки этого способа измерения. На самом деле в окне «измерения сигнала» регистрируется суперпозиция всех типов волн: отражённых, регулярных помех и случайного шума и предложенным способом мы никак не сможем отделить их друг от друга. Доля энергии отражённых волн в таком окне сильно зависит от сейсмогеологических условий района работ. Например, в некоторых районах Западной Сибири доля полезных волн может достигать 70-80%. В районах Восточной Сибири она может быть всего на уровне 5-10%. В любом случае, если на этапе проведения опытно-методических работ мы решим исследовать зависимость соотношения сигнал/помеха по рассматриваемому способу, то мы однозначно констатируем, что чем больше заряд, тем выше отношение сигнал/помеха. Самое высокое значение этого атрибута получится при размещении заряда на поверхности земли - в этом случае среднеквадратичная оценка амплитуды в окне ожидаемого отражения будет максимальной, а уровень микросейсм останется неизменным.

Иллюстрацией к вышеизложенному выводу может служить сравнение двух сейсмограмм, полученных в процессе выполнения ОМР на одной из площадей в Западной Сибири (рис. 2а и б). Одна из них (рис. 2а) получена при заложении заряда весом 1,5 кг на глубину 6 метров, а вторая - при заложении заряда всего 0,5 кг, но на глубину 18 м. Соотношение «сигнал/микросейсм» на первой сейсмограмме на порядок выше, чем на второй сейсмограмме. Вместе с тем, очевидно, что доля отражённых волн на второй сейсмограмме намного выше, а частотный спектр полезных волн шире и равномерней.

Другой пример с использованием сейсмограмм по Восточной Сибири представлен на рис. 3. На верхнем фрагменте рис. 3,а отношение энергии отражений в окне к энергии микросейсм в 10 раз выше, чем на фрагменте рис. 2,б. Тем не менее, все показатели качества сейсмограммы лучше для более слабой записи (см. в правом верхнем углу рисунка). Есть ещё более яркие примеры, когда рассматриваемое отношение отличается в 100 и более раз.

Измерение отношения амплитуд отражённых волн к регулярной помехе может представлять определенный интерес, но в описанном варианте мало что даёт для практических целей совершенствования методики полевых работ. Причины следующие: важна не только интенсивность помехи, но и её площадная доля в поле сейсмограммы. Одно дело, если конус поверхностной волны-помехи узок и совсем другое дело, если он занимает большую часть сейсмограммы. Кроме того, широкий динамический диапазон записи современных сейсмостанций обеспечивает успешное подавление подобного рода помех на этапе обработки данных. Опыт применения обратных и многоканальных фильтров показывает, что не представляет труда «вытянуть» сигнальную составляющую поля, сохранив её динамические особенности, даже в случае, когда её энергия находится на уровне 1-2% от уровня энергии поверхностной волны.

С другой стороны, современная тенденция использования одиночных приборов типа «VectorSeis» вместо группы приборов неизбежно приведёт к увеличению доли энергии поверхностных волн на полевых сейсмограммах и к переносу центра тяжести борьбы с этим типом помех с этапа полевых наблюдений на этап камеральной обработки данных.

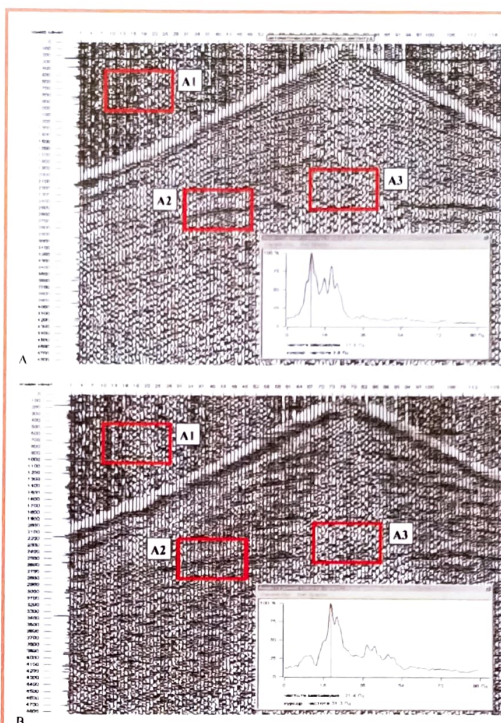


Рис. 2. Сравнение сейсмограмм и их спектров, полученных с различным весом и глубиной погружения заряда: а- глубина 6 метров, вес 1,5 кг; в- глубина 18 метров, вес- 0,5 кг. А1- окно анализа микросейсм; А2- окно анализа сигнала; А3- окно анализа регулярной помехи.

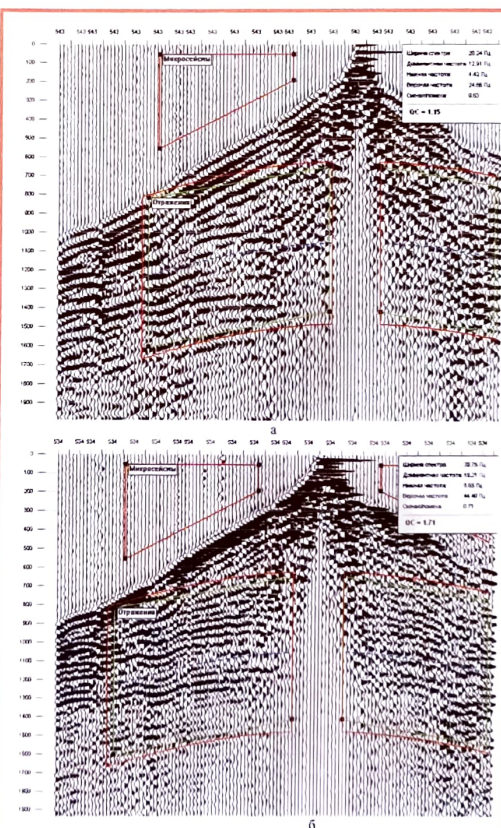


Рис. 3. Сравнение соседних сейсмограмм с различным отношением средней амплитуды отражений (Ао) к уровню микросейсм (Ам) в выделенных окнах. а) Ао/Ам = 41,0, коэффициент качества QC= 1,15; б) Ао/Ам = 3,9, коэффициент качества QC= 1,77;

СУПЕРВАЙЗИНГ В РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКЕ РАБОТЫ

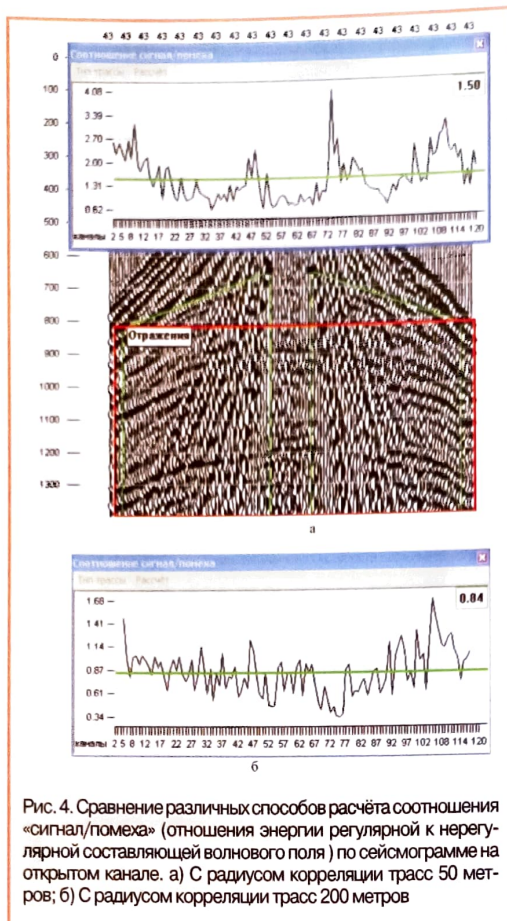


Рис. 4. Сравнение различных способов расчёта соотношения «сигнал/помеха» (отношения энергии регулярной к нерегулярной составляющей волнового поля) по сейсмограмме на открытом канале. а) С радиусом корреляции трасс 50 метров; б) С радиусом корреляции трасс 200 метров

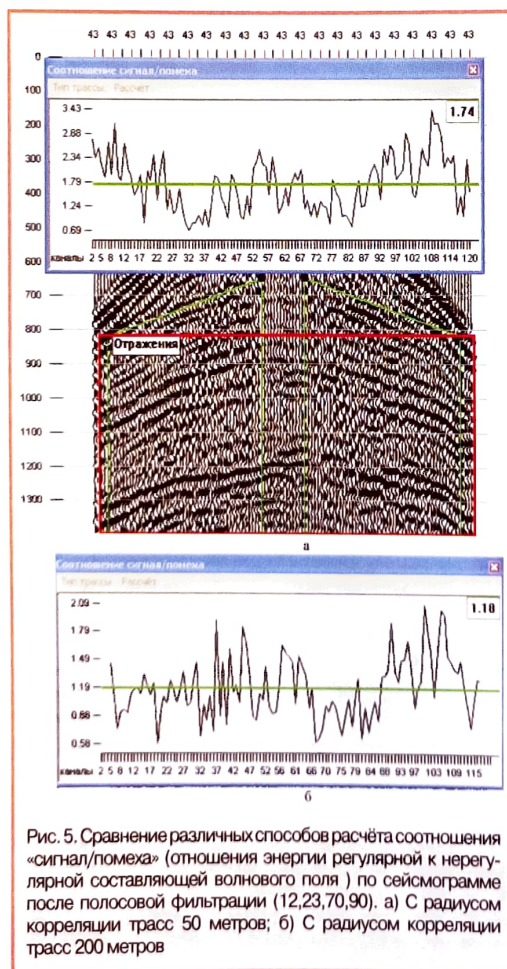


Рис. 5. Сравнение различных способов расчёта соотношения «сигнал/помеха» (отношения энергии регулярной к нерегулярной составляющей волнового поля) по сейсмограмме после полосовой фильтрации (12, 23, 70, 90). а) С радиусом корреляции трасс 50 метров; б) С радиусом корреляции трасс 200 метров

Общий вывод таков: не следует рассматривать высокий уровень превышения возбуждённого поля над уровнем микросейсм, как важный показатель качества сейсмограммы. Качественным может считаться материал, на котором это отношение достигает значений в диапазоне от 2 до 5.

Корректный и не зависящий от района работ способ измерения отношения сигнал/шум работ достаточно распространён. Суть его состоит в оценке отношения энергии когерентной составляющей волнового поля к энергии случайной составляющей. Оценка получается с помощью расчёта нормированных функций автокорреляции (ФАК) и взаимной корреляции (ФВК) различных комбинаций трасс в заданном окне по формуле:

$$[S/N] = \left[\frac{[g'_{ij}]_M}{1 - [g'_{ij}]_M} \right]^2,$$

где

$$[g'_{ij}]_M = \frac{a_i a_j r_w(0)}{[a_i^2 r_w(0) + r_{ni}(0)]^{1/2} \cdot [a_j^2 r_w(0) + r_{nj}(0)]^{1/2}}$$

$a_i a_j r_w(0)$ - максимум функции взаимной корреляции двух трасс (i-й и j-й)

$[a_i^2 r_w(0) + r_{ni}(0)]^{1/2}$ - автокорреляционная функция i-й трассы в нуле

$[a_j^2 r_w(0) + r_{nj}(0)]^{1/2}$ - автокорреляционная функция j-й трассы в нуле;

Оппоненты этого способа справедливо отмечают, что в сигнальную составляющую могут войти и когерентные волны-помехи. Это действительно может случиться, если не принять дополнительных элементарных мер. А именно: расчёт ФАК и ФВК необходимо выполнять в окне вдоль годографов пакета отраженных волн, ограничив при этом величину допустимого смещения трасс при расчёте ФВК. Дополнительные способы исключения вклада регулярной помехи в оценку отношения сигнал/помеха (С/П) могут быть построены на ослаблении помехи полосовым фильтром и на использовании параметра «радиус корреляции» помехи.

Все эти подходы реализованы в программе «SeisWin-QC» (ООО «ГСД»). Рассмотрим примеры. На рис. 4 показано сравнение двух алгоритмов расчёта отношения С/П. На рис. 4, а показан график С/П для набора трасс в окне, полученный стандартным способом с использованием соседних трасс для расчёта ФВК. На рис. 4, б задан максимальный радиус корреляции помехи 200 метров. Из сравнения графиков видно, что первый способ даёт завышенные оценки С/П (в среднем 1,5), что объясняется частичным включением в сигнальную составляющую некоторой доли энергии регулярных помех в диапазоне каналов 35-57 и 67-90. Второй способ лишен этих недостатков и даёт нам более достоверную оценку С/П на уровне 0,8.

Те же самые оценки, полученные после применения полосового фильтра 12, 23, 70, 90, (Рис. 5), ослабляющего основную помеху, показывают нам более высокие значения С/П по обоим алгоритмам (1,74 и 1,18 соответственно), что вполне естественно. Тем не менее, значения С/П на верхнем графике остаются завышенными, так как по-прежнему включают часть энергии регулярных волн-помех. Хорошим признаком является принципиальная схожесть верхнего и нижнего графиков, хотя предпочтение следует отдавать результатам, полученным с использованием увеличенного радиуса корреляции помехи (Рис. 5, б).

Анализируя амплитудно-частотные характеристики (АЧХ, спектры) сейсмограммы в различных окнах (см. рис. 3), мы получаем результаты, анало-

гичные представленным на рис.6. Частотный спектр микросейсм достаточно широк и равномерен (рис.3.а). Спектр в окне отраженных волн имеет максимум на низких частотах (10-20 Гц) и быстро затухает на частотах выше 30 Гц (рис. 6.б). Спектр «нерегулярного в пространстве» волнового поля на больших временах в области отсутствия видимых отражений в принципе аналогичен спектру отраженных волн, но с большей потерей энергии в диапазоне высоких частот (рис.6.в).

Интересно, что эти нерегулярные в пространстве волны-помехи оказываются вполне регулярными во временной шкале. Иными словами, при отсутствии интенсивных микросейсм, превышающих энергию возбужденного поля в интервале ожидания отраженных волн в несколько раз, сейсмограммы (коррелограммы), полученные через небольшие интервалы времени в одном пункте наблюдения, выглядят практически идентичными. Это доказывает сравнение ФАК одной сейсмограммы и ФВК двух последовательных во времени (рис.7.а.б). Сравнение ФАК и ФВК для набора всех трасс сейсмограммы показывает их удивительную схожесть в мельчайших деталях, так же, как и их численное сравнение.

Какой вывод напрашивается из выше изложенного? При отсутствии интенсивного поля микросейсм (что возможно при сильном ветре) нет смысла использовать большое количество накоплений сейсмограмм на одном пикете, без смены позиции источников между возбуждениями. Вполне достаточно осуществлять 3-4 накопления для страховки от технических нарушений.

Какая ширина спектра нам нужна?

Ширина амплитудно-частотного характеристики (АЧХ) полезной области волнового поля сейсмограммы напрямую связана с разрешающей способностью сейсморазведки: чем шире спектр, тем более тонкие пропластки продуктивной толщи отложений мы сможем проследить и оценить их физические и коллекторские свойства.

Диапазон регистрации отраженных волн с глубин более 1000м редко выходит за рамки 10-130 Гц. Если нам удастся регистрировать отражения на частотах выше 90 Гц, мы можем уже говорить о высокоразрешающей сейсморазведке. Даже очень хорошая сейсморазведка может обеспечить полное прямое разрешение пластов мощностью не менее 10-20 метров.

Как же лучше и корректнее контролировать присутствие в спектре полезного сигнала необходимых частот в рамках применения QC-технологий?

Здесь есть свои подводные камни. Часто в процессе выполнения полевого тестирования исполнитель выполняет измерение интересующих его спектральных компонент, не задумываясь или не отдавая себе отчет о применяемом алгоритме расчета АЧХ - какие виды регуляторов амплитуд заложены (или не заложены) в используемую программу, имеем ли мы дело с нормированным спектром или он рассчитывается без нормировок и т.п. Авторам статьи приходилось многократно сталкиваться с ситуациями, когда при модификации того или иного параметра методики полевых работ (число накоплений вибратора, увеличение заряда и др.) по измерениям на ненормированном спектре делался вывод об увеличении доли высоких частот в записи. Повторение этого же эксперимента с последующей нормировкой спектра приводило к противоположному выводу. Действительно, применение в современных телеметрических станциях 24-32 разрядного АЦП избавило геофизиков от необходимости заботиться об абсолютном уровне регистрируемого волнового поля. Мгновенный динамический диапазон современных сейсмостанций обеспечивает регистрацию interfering сигналов и помех

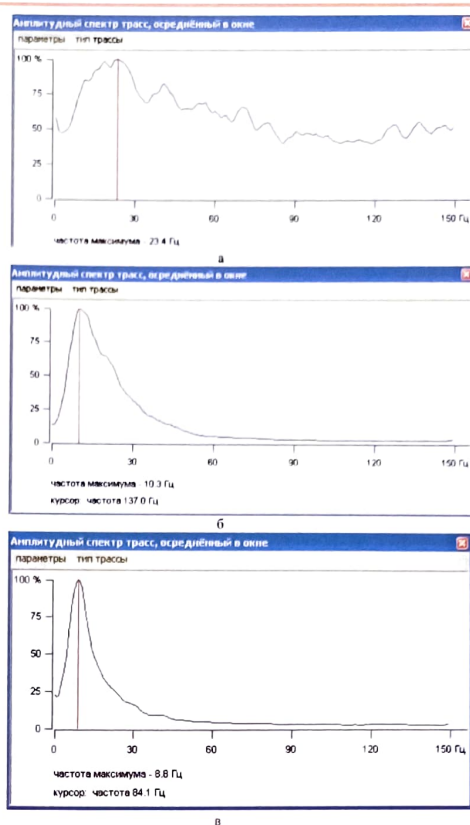


Рис. 6. Сравнение нормированных АЧ спектров сейсмограммы в различных окнах. а) В окне микросейсм; б) В окне отражений; в) В области «нерегулярных помех» в нижней части сейсмограммы

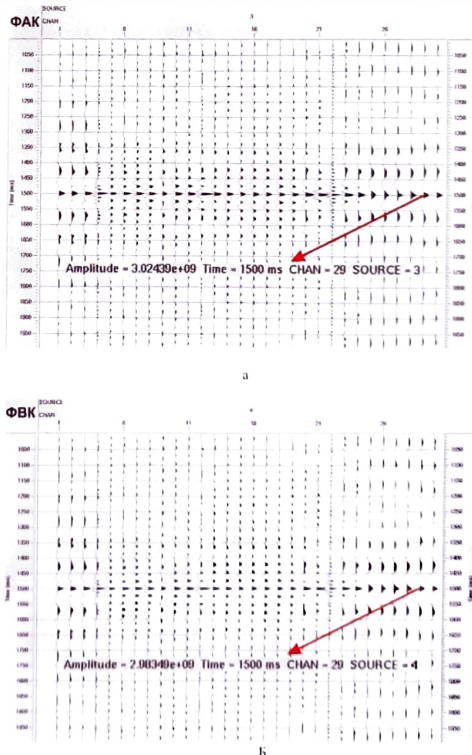


Рис. 7. Сравнение волнового поля на двух последовательных коррелограммах общего пикета. Почти полная идентичность ФАК одной С/Г и ФВК двух последовательных свидетельствует о регулярности шумов во временной шкале и неэффективности большого количества накоплений на одном ПВ

СУПЕРВАЙЗИНГ В РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКЕ РАБОТЫ

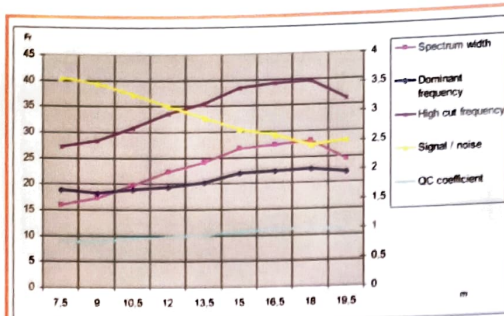


Рис.8. Зависимость характеристик сейсмической записи от глубины заложения заряда.

в широчайшем динамическом диапазоне. Потеря слабых сигналов в условиях даже очень сильных промышленных помех (например, под высоковольтными линиями электропередач) практически исключена. Геофизикам остаётся позаботиться лишь об относительном соотношении спектральных компонент сейсмической записи. Вот почему мы считаем необходимым, производить оценку спектральных компонент только на нормированном спектре. В этом случае само значение верхней частоты спектра, измеренное на определённом уровне, может служить индикатором качества сейсмограммы.

Очевидно также, что чем выше доминантная частота, тем выше разрешенность сейсмической записи.

Технология количественного контроля качества сейсмограмм с использованием многопараметри-

ческого критерия.

Очень часто измеряемые характеристики сейсмической записи оказываются противоречивыми. Рассмотрим пример полевых тестов, полученных в Западной Сибири.

Задачей тестирования был выбор оптимальной глубины погружения заряда. На графиках рис. 8 мы видим, что с увеличением глубины заложения заряда повышается доминантная частота и расширяется спектр. Вместе с тем, соотношение сигнал/помеха падает. Какое решение должен принять геофизик в условиях получения противоречивых оценок? Решение мы видим в использовании интегрированного критерия, построенного на основе взвешенной суммы значений отдельных характеристик записи:

$$QC = \frac{\text{сигнал}}{\text{помеха}} + \frac{\text{ширина спектра}}{60} + \frac{Fr \text{ максимума}}{35} + \frac{E_{SP}}{E_{AVG} \cdot k}$$

$$0.7 + 0.7 + 0.7 + 0.7$$

где E_{SP} - энергетическая характеристика сейсмограммы; E_{AVG} - средняя энергетическая оценка уровня всей совокупности сейсмограмм на профиле или площади работ; Fr - доминантная частота; K - нормировочный коэффициент; 0,7 - коэффициент приведения к уровню 70% от максимума.

Значения 60, 35 и «K» характеризуют параметры усреднённой эталонной сейсмограммы, характерной для конкретного района работ, и могут изменяться пользователем или автоматически на основе полученных статистических данных.

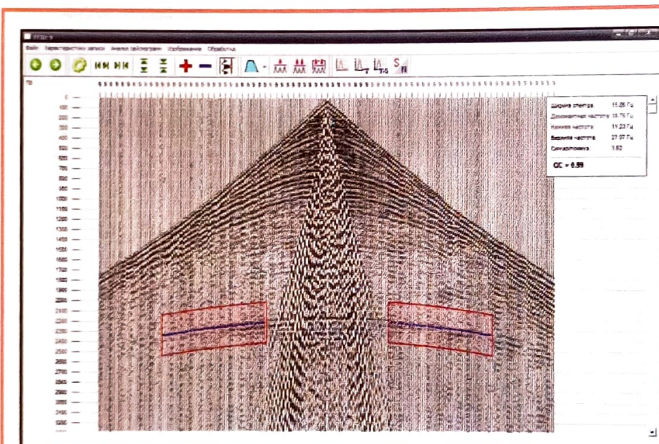
Использование интегральной оценки QC позволяет геофизику принять правильное решение. Для приведенного выше примера оптимальное значение соответствует глубине заложения заряда 16,5 метров. Для больших глубин значение QC меняется незначительно.

Сравнение сейсмограмм, полученных при глубине заложения заряда 7,5 метров и 16,5 метров, представлено на рис.9.

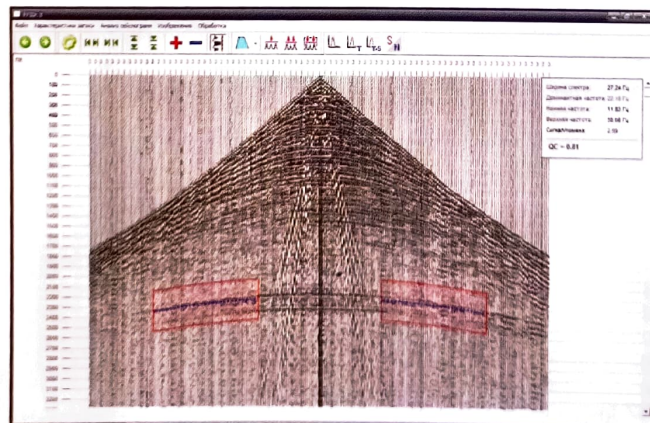
Программный комплекс "SeisWin-QC", реализующий изложенный выше подход, разработан в ООО «Геофизические системы данных» и широко используется сервисными и нефтяными компаниями в России.

Выводы.

- Контроль «геофизического качества» полевых сейсмоданных является важнейшим этапом всего цикла сейморазведочных работ, определяющим их экономическую эффективность, успешность и результативность последующей обработки и интерпретации данных;
- Визуальные оценки качества сейсмозаписей и использование некорректных алгоритмов расчёта отдельных характеристик записи часто оказываются несостоятельными;
- Современные научные представления о структуре и свойствах волнового поля сейсмограммы позволяют построить адекватные алгоритмы оценки его атрибутов;
- Для получения достоверных оценок качества сейсмограммы по набору основных атрибутов рекомендуется использовать интегральный коэффициент качества, построенный на основе взвешенной суммы отдельных характеристик волнового поля.



а



б

Рис.9. Сопоставление сейсмограмм при различных глубинах погружения заряда 0,5 кг: а - глубина погружения заряда 7,5 метров; б - глубина погружения заряда 16,5 метров.