

Опыт применения принципов статистического контроля качества при выполнении сейсморазведочных работ

■ Мамаев Д.А., Дагаев И.Л., АО «РИТЭК»

■ Крамаренко С.Ю., ООО «Ямальская геологическая экспедиция»

Вряд ли кто станет спорить, что сейсморазведка является наиболее массовым методом изучения геологического строения. Наряду с поисково-разведочным бурением это метод является основной статьёй затрат в нефтегазовой геологии.

Контроль качества полевого материала необходим для получения данных, пригодных для обработки и последующей интерпретации. Необходимость этого процесса продиктована ценой получения этих данных, а также тем неприятным фактом, что даже из низкокондиционных данных возможно получить какую-то информацию. Стоит отметить, что какое качество у полевых данных, таким будет и достоверность геологических построений, поэтому заказчик и желает получить максимальное качество. Подрядчик же пытается выдать полевые данные с наименьшими затратами и, при определённом опыте, так умело использует упомянутый факт, что даже низкокондиционные данные содержат геологическую информацию. С этого момента начинается конфликт интересов. Оставим в стороне вопрос применимости данных для обработки, точнее принципиально разделим две грани качества: качество выполнения работ и качество полученных данных. Первое подразумевает точное выполнение технологии работ: соблюдение всех нормативов и проектных величин, работу в рамках допусков и минимизация отклонений. Второе подразумевает применимость материала для обработки с целью решения поставленных геологических задач. В результате подмены первого вторым и происходит значитель-

ное количество недоразумений и проблем в паре заказчик-подрядчик. Несомненно, есть прямая связь между этими двумя понятиями, но второе зависит не только от первого, но и от соответствия проектной методики решаемым задачам, а также от присутствия геологических и технологических помех, о которых не было известно заранее.

Допуски традиционно выбираются Заказчиком на основе аналогичных работ, при их отсутствии – на основании консультаций со специалистами. Выбранные таким образом критерии заведомо несут погрешность для отдельно взятой площади. На практике допуски уточняются в результате опытных работ, однако в этом случае трудно говорить об объективности.

В настоящее время наиболее распространены методики, при которых качество полевого материала контролируется числовыми показателями (в противовес визуальному контролю), т.е. в процессе проводится сопоставление измеренных значений параметров и заранее заданных предельных значений. В этом случае предельные критерии качества отражают не столько реально достижимые значения, сколько значения, желаемые Заказчиком.

Примером оценки качества полученного материала для целей обработки могут служить «Методические рекомендации по использованию данных сейсморазведки (2D и 3D) для подсчета запасов нефти и газа» [1], которые содержат информацию о связи качества полевого сейсморазведочного материала с достоверностью подсчета запасов для работ в Западной Сибири. В частности

«...для достоверного определения запасов категории C1 и C2 на окончательных суммах, полученных на стационарном ВЦ в диапазоне частот 10-80 Гц для целевых горизонтов необходимо достичь в процессе обработки соотношения сигнал/помеха (S/N – отношение энергии когерентной составляющей волнового поля к энергии случайной составляющей) не менее 10, а для проведения AVO-анализа не менее 20. По опыту средне-частотных сейсморазведочных работ со взрывами под ЗМС на предварительных суммах на полевом ВЦ значение сигнал/помеха достигает значений 4-6. Соответственно на полевых сейсмограммах в интервале целевых отражений S/N должно быть не менее $\frac{S/N}{\sqrt{fold}}$, где fold – кратность наблюдений».

По опыту работ минимально допустимое значение S/N достигает значения 0.5-0.8. Данный критерий, найденный эмпирическим путем, не используется большинством заказчиков для оценки полевых сейсмограмм. Еще один критерий характеризующий качество окончательных сумм – ширина спектра в процессе предварительной обработки с 30-45 Гц на полевых сейсмограммах увеличивается до 50-60 Гц. На стационарном ВЦ ширина спектра еще более увеличивается – до 70-80 Гц, необходимых для построения тонко-слоистых моделей месторождений и подсчета запасов категории C1 и C2. Однако для оценки полевых сейсмограмм большинство заказчиков пользуется минимально-допустимым значением 15 Гц доминирующей частоты, не обращая внимания на ширину спектра, тем самым ограничивая достоверность интерпретационных построений тонкослоистых моделей месторождений.

Установить связь между критериями качества окончательных сумм, идущих в

интерпретацию, и критериями полевых сейсмограмм возможно эмпирическим путем или методом моделирования решения поставленной геологической задачи, начиная с моделирования полевых сейсмограмм. А можно определить максимально достижимые критерии качества полевых сейсмограмм в данном районе с текущей методикой наблюдений методом статистического анализа оптимального количества параметров.

Как правило, заказчик ограничивается в оценке качества полевых сейсмограмм соотношением сигнал/микросейсм и доминирующей частотой. Ниже предлагается методика расчета критериев качества сейсмограмм по максимальному количеству параметров с привлечением статистического анализа результатов опытных работ и 10% первых отработанных физических наблюдений для определения максимально-возможных значений для любого района проведения сейсморазведочных работ по разным технологиям.

В середине прошлого столетия доктор Эдвардс Деминг предложил совершенно новый подход к управлению качеством. Э. Деминг не ориентировался на какую-то конкретную отрасль, но его труды нашли применение в первую очередь там, где относительно просто контролировать соответствие допусков – в машиностроении. Об эффективности этого подхода можно судить по экономическим результатам, которых добилась современная Япония [2].

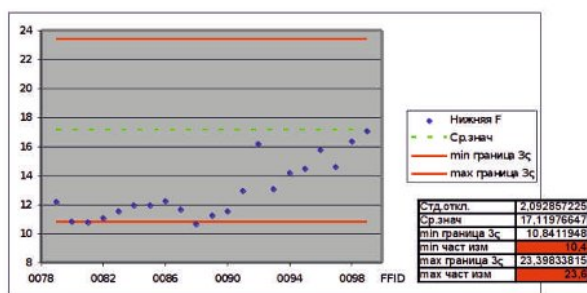
Основой для построения этого подхода явились принципы статистического контроля за технологическими показателями. Эти принципы были заложены Уолтером Шухартом [3] и впоследствии развиты Эдвардсом Демингом [4]. Основопологающим принципом статистического контроля является анализ причин

выхода процесса из статистически предсказуемого состояния в рамках нормального распределения (Рис. 1-2). Критериями выхода предлагались такие события: выход наблюдаемой величины за границу 3σ (где σ – среднеквадратическое отклонение), а также попадание девяти точек по одну сторону от матожидания [5].

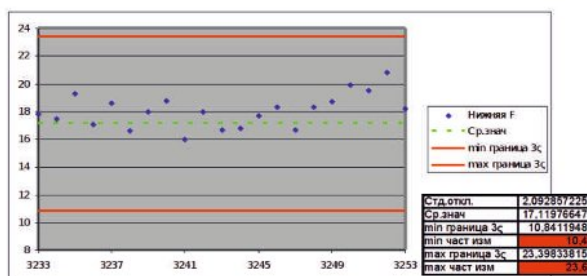
Границы в три сигмы были определены Шухартом – он решил, что это разумные границы. В самом деле, если проинтегрировать функцию плотности вероятности в интервале $[-3\sigma; 3\sigma]$, то для стандартного нормального распределения получим:

$$\int_{-3}^3 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} dx = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right) \right) \Big|_{-3}^3 = 0,9973$$

То есть с вероятностью 99,73% измерение попадает в эти границы. С другой



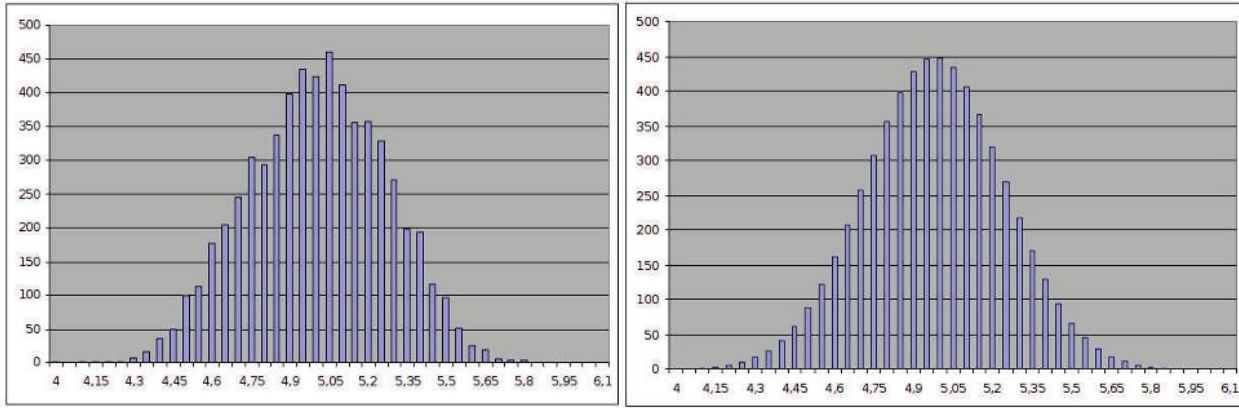
▲ Рис. 1. Контрольная карта Шухарта — нижняя частота спектра (границы определены по первым 1200 ф.н.). Вхождение процесса в статистически управляемое состояние.



▲ Рис. 2. Контрольная карта Шухарта — нижняя частота спектра (границы определены по первым 1200 ф.н.). Процесс находится в статистически управляемом состоянии.

стороны, вероятность того, что при нормальном протекании процесса измеренное значение выйдет за пределы, составляет всего 0,27%. Таким образом, зафиксировав измерение вне интервала $[\mu-3\sigma; \mu+3\sigma]$, можно считать, что с высокой долей вероятности утеряно управление процессом (пока однократно). Иными словами, во главу угла поставлен не контроль результатов, а мониторинг устойчивости процесса. Применение данного метода для задач сейсморазведки уже описывалось ранее [6].

Применимость статистического подхода к контролю качества в сейсморазведке основана на предположении, что измеряемые физические величины имеют одно из основных распределений математической статистики (нормальное/логнормальное). Анализ фактических результатов в целом подтвердил это предположение (Рис.3). В приведённом случае вызывает настороженность достаточно высокое значение $\chi^2 = 149,06$, при количестве степеней свободы 43. Но было бы весьма неожиданно получить более привычные значения распределения χ^2 , поскольку это будет означать, что в реальности получено идеальное гауссово распределение. И хотя центральная предельная теорема утверждает, что в случае n независимых одинаково-распределённых случайных величин итогом будет нормальное распределение, в практике нельзя сказать, что все величины, с которыми приходится иметь дело, абсолютно независимы. Амплитуда зависима от частоты исходного сигнала, спектр исходного сигнала зависим от возбуждения, возбуждение зависимо от геологического строения среды, геология имеет некие тренды, даже характеристики вибраторов меняются в процессе отстрела по некоему



▲ Рис. 3. Реальное распределение и смоделированное с теми же параметрами нормальное распределение. $v=43$; статистика $\chi^2 = 149,06$; Ккорр = 0,99

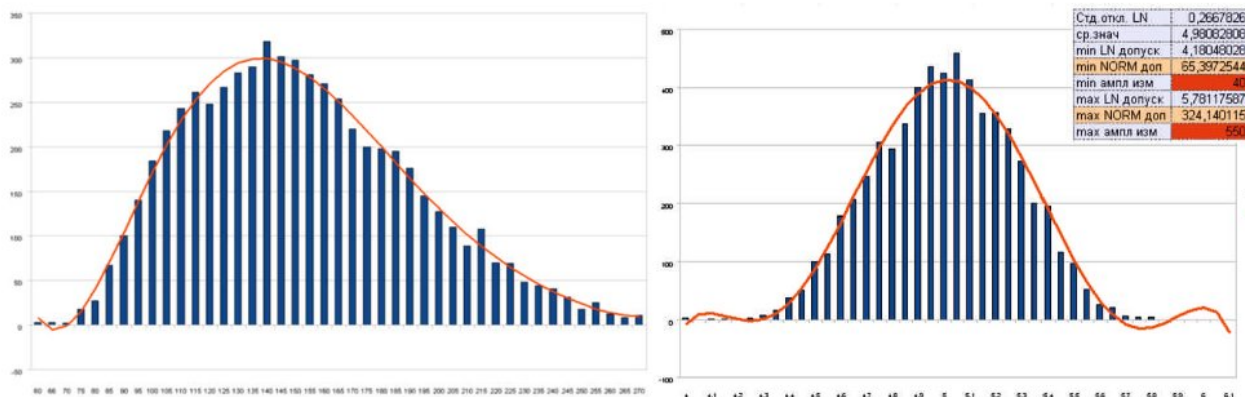
сложному закону, а не стохастически. Итог – распределение отклоняется от идеального, но при этом его характеристики остаются весьма предсказуемыми. Взаимная корреляция огибающих демонстрирует степень свыше 0,99. Шухарт в своём труде [3] демонстрирует аналогичное поведение статистики χ^2 , на что даёт комментарий: «Для наших текущих задач, однако, значение χ^2 не представляет интереса; нас не беспокоит функциональный закон совокупности, а, лишь, предполагаем, что некая совокупность существует»*.

В 2012-2013 годах в полевых условиях на Наримановском ЛУ авторами впервые проводилось опробование методики статистического контроля качества. Для определения критериев оценки качества сейсмограмм, после отработки опытных работ и первых 10% физических наблюдений (ф.н.), был проведен анализ гистограмм распределения соотношения сигнал-микросейсм (S/N) и доминирующей частоты. Предельные значения, рассчитанные по итогам первых 600 физических наблюдений (10%), использовались как предельные допуски для всего объема работ. Это не совсем соответствует идеологии Деминга, он гораздо глубже подходит к самому вопросу качества и управления: «Использование

допусков (спецификаций, ТЗ, ТУ) – не ошибка. Просто этого недостаточно» [5]. В качестве отправной точки расчет допусков выглядит весьма перспективно, но развитие в область всеобщего управления качеством (TQM) должно исходить не от одной из сторон заказчик-подрядчик и, тем более, не от супервайзеров, а от всех заинтересованных в сотрудничестве сторон.

Полученные в результате первых оценок данные, как и ожидалось, приняли вид одного из распределений: нормальное либо логнормальное. В случае логнормального распределения производится логарифмирование измеряемой величины по основанию e и последующая работа ведётся с ней, как с нормальной величиной. Действительно, эти распределения связаны следующим соотношением:

$\eta = e^{\xi}$, [7], где η – логнормально распределённая величина, ξ – нормально распределённая величина. Следовательно, $\xi = \ln \eta$. Рассчитанные в логарифмической шкале допуски пересчитываются по экспоненте в шкалу измеряемой величины. Конечно, возможно рассчитывать допуски и в нелогарифмированной шкале, но удобнее использовать единый математический аппарат для всех параметров.



▲ Рис. 4. Распределение амплитуды в естественной шкале и после логарифмирования.

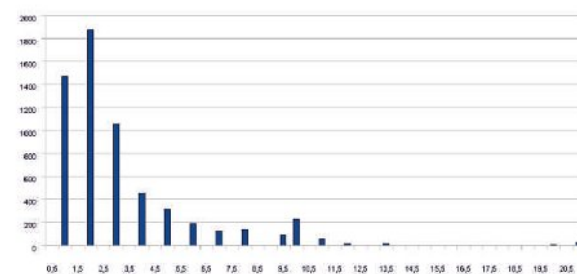
В процессе работы контролировались параметры частоты, амплитуда и другие параметры сигнала. Как показала практика, именно эти статистические значения границ наиболее близко отражают реальные достижимые показатели качества.

Именно на основании статистического анализа первых 10% были определены критерии качества, которые позволили объективно оценивать сейсмограммы с учетом реально достижимого качества в текущих геологических условиях.

Амплитуда и частота хорошо зарекомендовали себя как критерии качества. Плохо поддаются статистическому контролю соотношение сигнал / микросейсмы и уровень микросейсм, по той причине, что уровень микросейсм в обрабатываемом комплексе измерялся на уровне микровольт, в то время, как требуется точность до нановольт, чтобы получалось неразрывное распределение. Кроме того, отношение двух нормально распределённых величин не является гауссовым распределением [8].

В практике работы супервайзера, благодаря анализу характера плотности распределения амплитуды и доминантной частоты, были определены критерии отбраковки по неполной детонации. Заказчику предложено дифференцировать оценку качества сейсмограмм по доминантной частоте, с целью мотива-

ции подрядной организации к достижению наибольшей разрешающей способности.



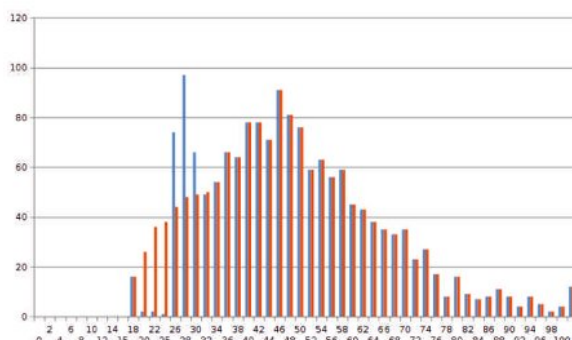
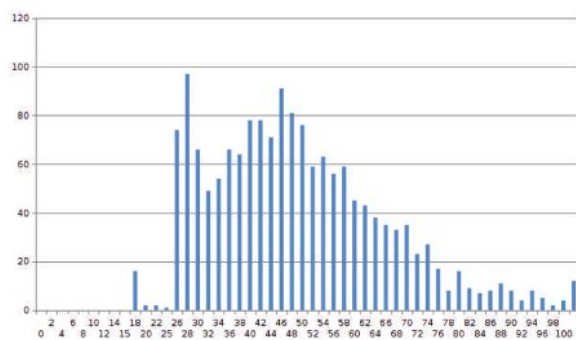
▲ Рис. 5. Распределение микросейсм дискретно и не описывается аналитически.

Однако, несмотря на проблемы с распределением соотношения сигнал / шум, благодаря анализу характера плотности распределения был выявлен факт манипуляций с соотношением геофизиками сопровождения (рис. 6).

Как один из свежих примеров уточнения параметров по результатам 10% объёмов приведем работы на Апрельском ЛУ в 2015 году.

Большая часть площади была выполнена в зимний сезон 2014-2015 г.г., меньшая – в 2015-2016 г.г.

С целью определения наиболее оптимальных и реалистичных критериев оценки качества выбор и их согласование предусматривается по более представительной выборке (после отработки 10% проектного объема), основанной на анализе атрибутов записи производственных наблюдений, выполненных на начальном этапе работ 2014-2015 г.г.



▲ Рис. 6. Манипуляции с соотношением сигнал/микросейсмы. Слева — распределение, построенное по оценкам геофизиков сопровождения (явно заметен провал в оценках ниже 25). Справа красным — перераспределение плотности в соответствии с теорией.

Для определения предельных допусков характеристик сигнала (доминантная частота, амплитуда и соотношение сигнал/микросейсм) использовались принципы статистического контроля качества.

На момент статистического анализа было отработано 20% ф.н. от проектного объема 2015-2016 г.г. Результаты статистического анализа доминантной частоты с целью выбора критерия качества представлены на Рис.7. Гистограмма распределения доминантной частоты имеет нормальный вид. Определение критериев качества не вызвало особых затруднений.

В процессе отработки площади на отдельных пунктах возбуждения (ПВ) наблюдалось резкое уменьшение амплитуды целевых отражений. Основной причиной (85%) явилась неполная детонация взрывчатого материала (ВМ), что и подтвердили повторные отработки ПВ. На аномалии ВЧР и уменьшение глубины заложения ВМ от проектной осталось 15% брака.

С целью определения методом статистического анализа критерия уменьшения глубины заложения ВМ или неполной детонации (НДТ) был проведен статистический анализ амплитуды целевых отражений (Рис.8). Выявленные признаки НДТ позволили определить причину



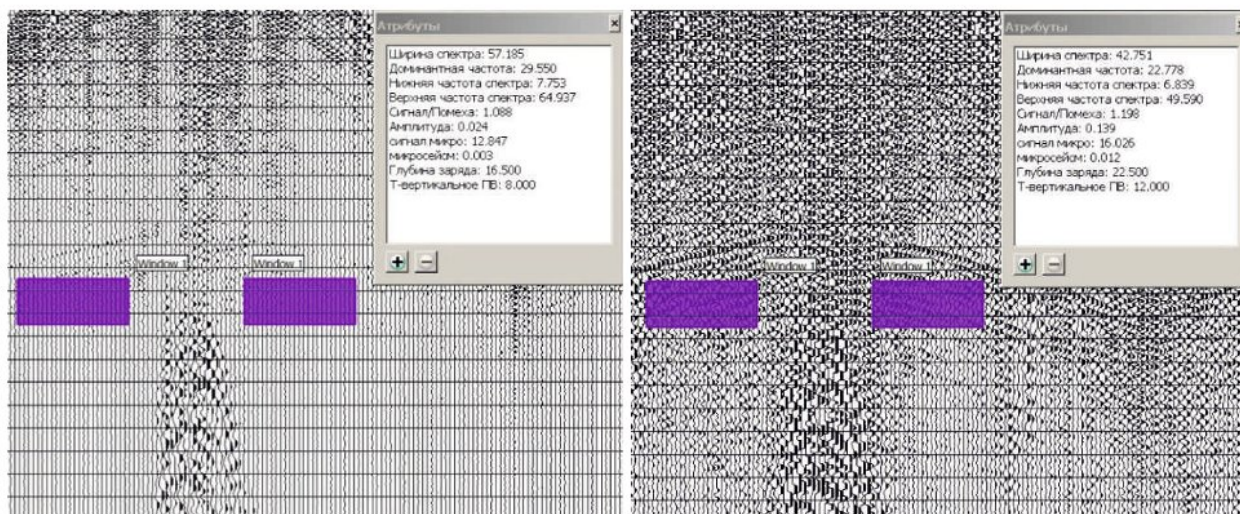
▲ Рис. 7. Гистограмма распределения доминантной частоты и уточненные критерии качества.

технологического брака — некачественный взрывчатый материал, а также переотработать с положительным результатом около 10% всего объема (Рис.9 и 10).

Определен критерий неполной детонации (доминантная частота больше 29гц, а амплитуда меньше 0.06мв), по которому определялись ПВ с недостатками, которые по требованию Заказчика характеризуют сейсмограмму с оценкой «брак» — грубые нарушения методики работ (условий возбуждения и приёма колебаний, параметров системы наблюдений, необоснованное нарушение коммутации каналов или геометрии расстановки).

Как уже упоминалось, соотношение сигнал/микросейсмы имеет более сложное распределение и не описывается стандартными законами распределе-

- Рис. 8. Гистограмма распределения амплитуды целевых отражений (мв) и определение критерия неполной детонации или несоблюдения проектной глубины погружения заряда.



- ▲ Рис. 9. Пример неполной детонации и переотработки. Слева – неполная детонация (амплитуда 24 мкв, доминантная частота 29.5гц), справа- результат перебур на том же пикете (амплитуда 139мкв., доминанатная частота 22.7 Гц).



- ▲ Рис. 10. Гистограмма плотности распределения соотношения сигнал/ /микросейсм. Логнормальное распределение.

ния [8] (Рис. 10.). Для того чтобы стало возможно работать с этим параметром – аппроксимируем зависимость логнормальным распределением.



- ▲ Рис. 11. Гистограмма плотности распределения натурального логарифма соотношения сигнал/микросейсм и расчета критериев качества по соотношению сигнал/микросейсм

Форма распределения имеет логнормальный вид, поэтому было применено логарифмирование значений S/N с последующим расчетом экспоненты рассчитан-

ных допусков, то есть выполняем экспоненцирование значений (Рис. 11.).

Учитывая новые критерии качества по соотношению сигнал/микросейсм, амплитуде и доминирующей частоте, заказчик уточнил для подрядчика новые значения для оценки сейсмограмм во избежание разбраковки физ. наблюдений по соотношению сигнал / микросейсм:

На основании результатов анализа материала, отработанного в зимний полевой сезон 2014/15гг, для выполнения оставшегося объема работ устанавливаются следующие критерии приемки сейсмозаписей материала МОГТ-3Д:

- сейсмограмма принимается с оценкой «1» (отлично) при соотношении сигнал/микросейсм более 26;
- сейсмограмма принимается с оценкой «0.9» (хорошо) при соотношении сигнал/микросейсм не менее 5;
- при соотношении сигнал/микросейсм менее «5» - сейсмограмма бракуется (оценка «0», брак) и подлежит переработке;
- сейсмограмма принимается с оценкой «1», если частота сигнала больше 20Гц;
- сейсмограмма принимается с оценкой «0.9» (хорошо), если частота сигнала более 15Гц;
- если частота сигнала менее 15Гц, сейсмограмма бракуется (оценка «0», брак) и подлежит переработке;
- если частота сигнала больше 29Гц, сейсмограмма бракуется. Данное условие справедливо при амплитуде сигнала менее 0.06мВ.

При оценке материала по двум критериям (частота, соотношение сигнал/микросейсм), выставляется наименьшая оценка.

Расчет атрибутов сейсмической записи выполняется в утвержденных Заказчиком окнах анализа.

Рис. 12. Фрагмент дополнения к заданию на регистрацию после проведения статистического анализа.

Для внедрения в практику оценки сейсмограмм по критерию соотношения сигнал/помеха проведен статистический анализ первых 10% физических наблюдений. (Рис.13.) Умножая минимально-допустимое значение S/N (отношение

Рис. 13. Гистограмма распределения соотношения сигнал\помеха.



энергии когерентной составляющей волнового поля к энергии случайной составляющей) 0.6 на $\sqrt{fold}$ (кратность=144), получаем $0.6 \cdot 12 = 7.2$, что вполне достаточно для хорошей оценки качества предварительной суммы. Этого достаточно, потому что из опыта контроля хода обработки на стационарном ВЦ S/N возрастает как минимум в 2-3 раза, а значение 14 дает возможность интерпре-

таторам оценить запасы категории C1 и C2 с достаточной достоверностью

Статистический подход к оценке предельных допусков применялся на нескольких площадях в различных регионах России: в Волгоградской и Астраханской областях, ХМАО-Югре, ЯНАО при различных источниках и системах наблюдений. В целом, методика зарекомендовала себя, как надёжный способ определения реально достижимых показателей.

Перспективой развития данного подхода можно назвать внедрение инструментов статистического контроля качества в оборудование для производства сейсмозаписей работ — это позволит минимизировать ошибки персонала и оценивать не результат работ, а устойчивость технологического процесса.

Литература

1. В.Б.Левянт, Ю.П.Ампилов, В.М. Глоговский, В.В. Колесов М.Б. Коростышевский, С.Н.Птецов. «Методические рекомендации по использованию данных сейсморазведки (2D и 3D) для подсчета запасов нефти и газа», - Москва 2006г.
2. Leitner P. Japan's post-war economic success: Deming, quality, and contextual realities.// Journal of Management History (Archive), Vol. 5 Iss: 8, 1999. - pp.489 — 505
3. Shewhart W. Statistical method from the viewpoint of quality control. — Washington, The Graduate School, the Department of Agriculture, 1939. — P.155.
4. Деминг Э. Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами, пер. с англ., - М.:Альпина Паблишер, 2011. - 419с.
5. Нив Г. Пространство доктора Деминга, пер. с англ., - М.:Альпина бизнес букс, 2005.-370с.
6. Запорожец Б.В., Мамаев Д.А., Крутов А.Л. Принципы статистического контроля качества при сейсморазведочных работах.// Приборы и системы разведочной геофизики: общероссийский научно-технический ежеквартальный журнал.- 2012.- №1. - с.17-19.
7. Ивченко Г.И., Медведев Ю.И. Введение в математическую статистику. - М.: Издательство ЛКИ, 2015. - 600 с.
8. Cedilnik A., Košmelj K. and Blejec A. The Distribution of the Ratio of Jointly Normal Variables// Metodološki zvezki, Vol. 1, No. 1, 2004,99-108

**Перев. автора статьи*

Подробнее об авторах



Мамаев
Дмитрий Александрович

Ведущий геолог
Отдела геофизики
АО «РИТЭК»



Крамаренко
Сергей Юрьевич

Ведущий геофизик
ООО «Ямальская
геологическая
экспедиция»



Дагаев
Игорь Львович

Ведущий геолог
Отдела геофизики
АО «РИТЭК» канд.
геол.-минерал. наук
доцент