

Атрибуты компьютерного зрения при количественном контроле качества в ПО «QCVision»

■ Молчанов А. Б., Твердохлебов Д. Н., ООО «РН-Эксплорейшн»

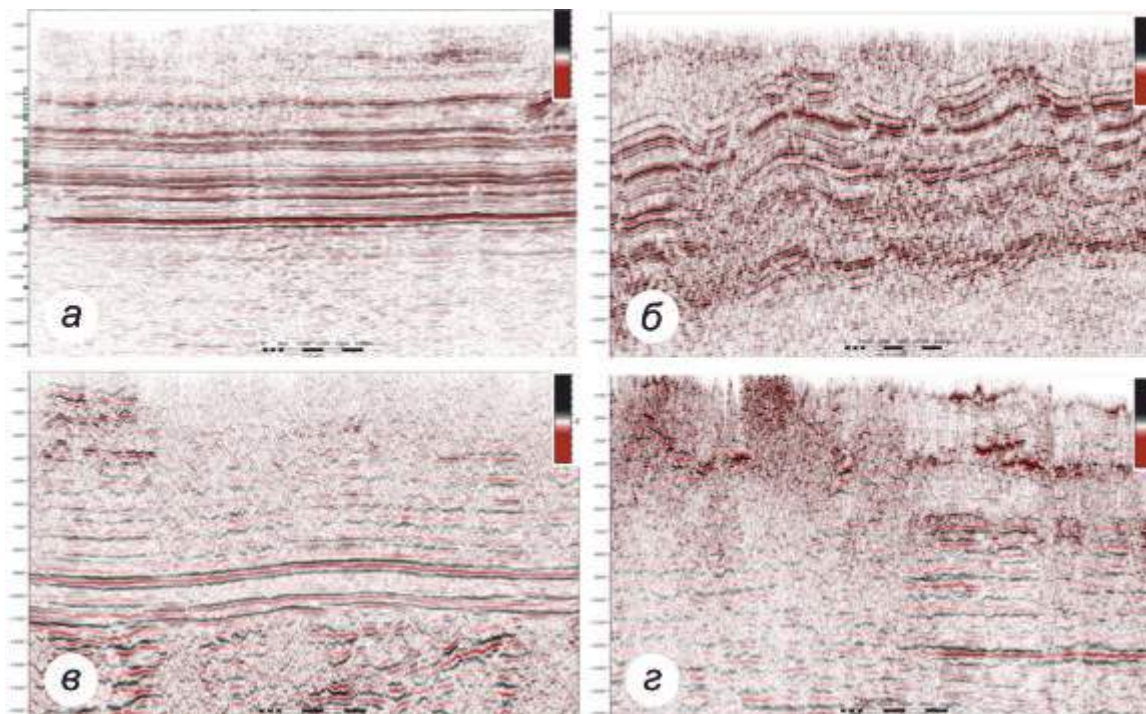
В данной работе приводятся результаты исследований по развитию количественного подхода к контролю качества сейсмических данных на различных этапах их обработки. Рассматриваются и анализируются используемые в настоящее время стандартные атрибуты сейсмической записи. В рамках проведенных исследований показано, что в ряде задач, связанных с оценкой качества разрезов и кубов в сложных сейсмогеологических условиях, стандартные атрибуты оказываются малоэффективны. Предложен новый класс атрибутов, основанных на применении алгоритмов компьютерного зрения (CV-атрибуты), проведено сравнение эффективности этих атрибутов со стандартными. Также создано независимое программное обеспечение (ПО) «QCVision», позволяющее вычислять как стандартные, так и CV-атрибуты и выполнять оконные оценки качества по сейсмограммам, 2D разрезам и 3D кубам.

Введение

В настоящее время активно ведутся исследования новых методик, способных повысить успешность геолого-разведочных работ (ГРР) в сложных сейсмогеологических условиях. В ходе районирования лицензионных участков (ЛУ) Восточной Сибири по качеству имеющихся архивных сейсмических данных было выделено четыре класса сложности [Гуренцов, 2020] (рис. 1). Первый и второй

классы характеризуются сравнительно высокой прослеживаемостью геологических структур на всей глубине исследования, в данных третьего класса присутствуют искажения и нарушения фокусировки малоглубинных горизонтов, четвертый класс представляет особые трудности для проведения интерпретации, поскольку в таких данных содержатся полностью слепые зоны, когда невозможно корректно проследить даже фундамент.

▼ Рис. 1. Классы сложности по качеству сейсмических данных на ЛУ Восточной Сибири: а – I класс, б – II класс, в – III класс, г – IV класс.



Приведённая классификация является качественной. Она была выполнена специалистами геолого-геофизической службы ООО «РН-Эксплорейшн» и может быть использована для предварительной оценки потенциала того или иного ЛУ. Однако в ситуации, когда необходимо провести детальный анализ и выявить число перспективных на УВ объектов, следует использовать количественные критерии оценки качества, поскольку точность качественных критериев всегда довольно сильно ограничена.

Другим фактором, мотивирующим к использованию численных критериев качества, является их объективность по сравнению с качественными оценками. Можно привести ряд примеров, в которых результаты обработки одних и тех же сейсмических данных, проведённых различными компаниями, сравнивались между собой по качеству с привлечением сразу нескольких экспертов, и в результате оказывалось, что эксперты не могут сойтись во мнении относительно того, какой результат лучше, а какой – хуже. Кроме того, если в процессе обработки сравнение результатов применения тех или иных процедур с различными параметрами также производится на глаз, то результат будет сильно зависеть от опыта обработчика и от тех данных, с которыми он работал ранее, то есть будет субъективным. Если же критерии качества вычисляются по одним и тем же известным формулам, то оценка будет объективной и однозначной.

Третьим фактором в пользу количественных критериев является их автоматизируемость. Математические формулы для расчёта тех или иных атрибутов сейсмической записи не требуют ручных вычислений и легко могут быть реализованы во многих языках программирования, а современные технологии парал-

лельных вычислений позволяют применять эти критерии для оценки качества больших объёмов данных. Таким образом, могут быть созданы автономные и автоматизированные решения, выполняющие оценку качества без участия геолога/геофизика, не отнимая его рабочее время. Ряд таких решений уже существует и востребован геолого-разведочными компаниями.

Стандартные атрибуты качества

На сегодняшний день известно множество количественных критериев, основанных на вычислении конкретных атрибутов сейсмической записи. Существуют также стандартные наборы атрибутов качества, хотя нужно отметить, что разные авторы выделяют разные группы вычисляемых атрибутов. Так в работе [Белоусов, 2011], которая является канонической в этом направлении, обсуждается три группы атрибутов: амплитудные, корреляционные и спектральные. К первой группе относятся среднее и среднеквадратичное значения амплитуды сигнала в окне анализа. Эти атрибуты характеризуют соответственно уровень колебательных процессов и статистическую меру энергии сейсмического сигнала. Во вторую группу входят оценки доминирующей (доминантной) частоты и соотношения сигнал/помеха, вычисляемые по автокорреляционной функции (АКФ) для каждой трассы. Группа спектральных оценок включает в себя следующие атрибуты: энергия спектра (в том числе, в заданном диапазоне частот), пиковая частота, центральная частота, ширина спектра, процентная часть спектра. Пиковая и центральная частоты характеризуют соответственно наиболее выраженную частоту сейсмического сигнала и равномерность распределения частот в спектре. Ширина спектра опре-

деляет спектральную разрешённость записи. Процентная часть спектра является энергетической мерой выраженности выделенного диапазона частот.

В дополнение к приведённым атрибутам часто используются количественные оценки, описанные в работе [Araman, 2012], которые являются характеристиками временной разрешённости и динамических показателей сигнала. Данные атрибуты вычисляются по АКФ. Также для количественной оценки качества применяется атрибут когерентности, активно используемый на этапах интерпретации. Названные здесь величины мы далее будем относить к группе корреляционных оценок.

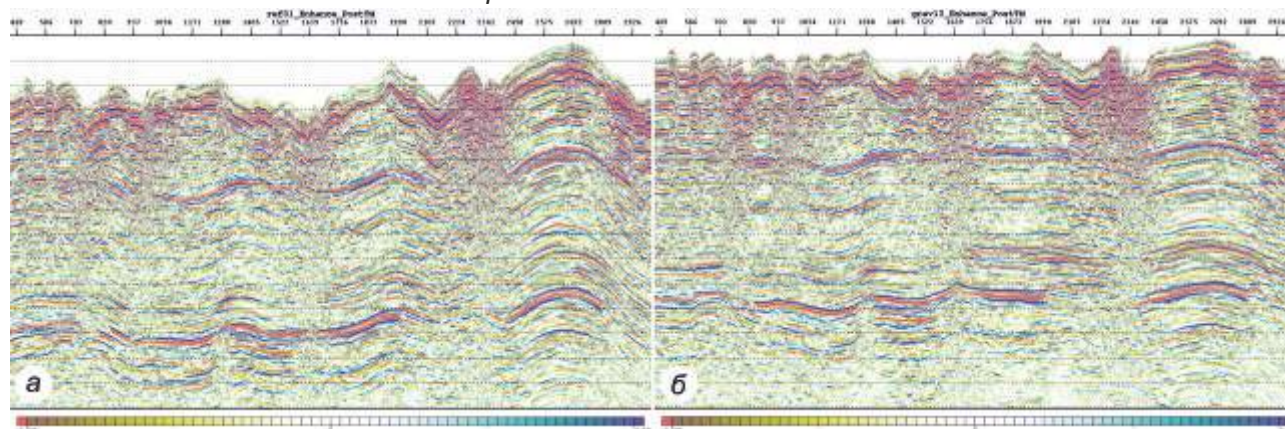
При выборе системы атрибутов для количественной оценки качества сейсмического материала в заданных условиях естественным образом возникают два вопроса: 1) достаточно ли эта система полна и 2) не является ли количество включённых в неё атрибутов избыточным? Ответ на первый вопрос почти всегда зависит от поставленной задачи, в то время как ответ на второй в большинстве случаев оказывается утвердительным, по крайней мере в смысле удобства представления результатов. Кроме того, независимость одних атрибутов от других никак не гарантирует корреляцию

их значений в конкретных случаях, так что и в этом вопросе постановка задачи играет ключевую роль.

В ходе исследований, проведённых в группе геофизических работ ООО «РН-Эксплорейшн», было показано, что в определённых задачах использование стандартных атрибутов сейсмической записи не позволяет в полной мере решить задачу оценки качества. В частности, в ранее опубликованных работах [Мостовой, 2021] [Молчанов, 2021] была представлена количественная методика комплексирования геофизических данных, позволяющая существенно улучшить качество сейсмических разрезов и кубов. Ключевой особенностью данной методики является модификация глубинно-скоростной модели верхней части разреза (ВЧР) с получением наиболее корректных априорных статических поправок. При использовании данной методики часто приходится сравнивать между собой разрезы, полученные при различных вариантах априорных статических поправок, имеющие отличия в основном на средних и длинных периодах. Пример пары таких разрезов, полученных по модельным данным, показан на рис. 2.

Наиболее часто используемые при оценке 2D разрезов стандартные атрибу-

▼ Рис. 2. Разрезы с разными априорными статическими поправками, отличающимися на средних и длинных периодах: а – по исходной ГСМ по сейсмической томографии, б – с использованием комплексирования.



Атрибут	Stat A	Stat B	Относительное изменение
Доминантная частота	34,83 Гц	36,67 Гц	+5,3 %
Пиковая частота	34,0 Гц	34,0 Гц	0,0 %
Ширина спектра	22,72 Гц	20,83 Гц	-8,3 %
Процентная часть спектра	83,99	84,26	+3,2 %
Динамическая выраженность	0,59	0,57	-3,3 %
Индекс полосы пропускания	0,82	0,77	-6,1%

▲ Табл. 1. Стандартные атрибуты качества и их относительное изменение для пары разрезов, полученных при различных вариантах априорных статических поправок.

ты качества для данной пары приведены в табл. 1. Из таблицы видно, что атрибуты меняются незначительно, причём в обе стороны, что не позволяет установить, какой из разрезов имеет наилучшее качество. В самом деле, ввод различных вариантов статических поправок не оказывает существенного влияния на амплитудные и спектральные характеристики сигнала; корреляционные атрибуты изменяются крайне слабо или вовсе не изменяются в случае длиннопериодных изменений статических поправок.

Одной из главных причин данной проблемы является локальность используемых атрибутов: все эти величины вычисляются по значениям каждого дискрета сейсмических данных вне зависимости от формы и положения того или иного события на временном разрезе/кубе/отдельной сейсмограмме, при том, что ввод статических поправок влияет прежде всего именно на морфологию сейсмических событий. Здесь под сейсмическим событием мы понимаем непрерывно прослеживаемый участок изображения отражающей или рассеивающей геологической структуры. Таким образом, решение состоит в том, чтобы подняться на более высокий уровень абстракции: от анализа дискретов к анализу отдельных сейсмических событий.

Атрибуты компьютерного зрения

Возникает вопрос, как сохранить количественный подход к оценке качества при такой смене «системы отсчёта»? Ответ состоит в использовании технологий компьютерного зрения (Computer Vision, CV), которые позволяют выделить сейсмические события и описать их свойства математически. Причём существующие алгоритмы позволяют это делать однозначным образом. Введём на этой основе новый класс атрибутов (CV-атрибуты), которые будут определяться для отдельных сейсмических событий. В него прежде всего войдут основные геометрические характеристики сейсмических событий:

- 1) Прослеживаемость – величина, определяемая по латеральной протяжённости события;
- 2) Спрямлённость – соотношение между временной и латеральной протяжённостью;
- 3) Гладкость – величина, обратная кривизне сегментов линии, аппроксимирующей сейсмическое событие. Последний атрибут эффективен для оценки качества сейсмике в регионах с круто падающими границами геологических горизонтов, как например в морских данных. Можно также определить характеристики более высокого порядка (содержащие производные), такие как,

Атрибут	Stat A	Stat B	Относительное изменение
Прослеживаемость	18,49	24,57	+32,9 %
Спряmlённость	0,25	0,32	+28,0 %

▲ Табл. 2. CV-атрибуты и их относительное изменение для пары разрезов, полученных при различных вариантах априорных статических поправок.

например, коэффициенты полиномиального разложения при аппроксимации кривой сейсмического события полиномом заданного порядка. Это позволит наиболее точно описать форму события, однако на практике оказывается достаточно и приведённых здесь атрибутов. Значения средней прослеживаемости и средней спряmlённости по разрезам, показанным на рис. 2, приведены в таб. 2. Видно, что данные атрибуты явно показывают прирост качества разреза, полученного при помощи комплексирования, по сравнению с исходным разрезом по сейсмической томографии.

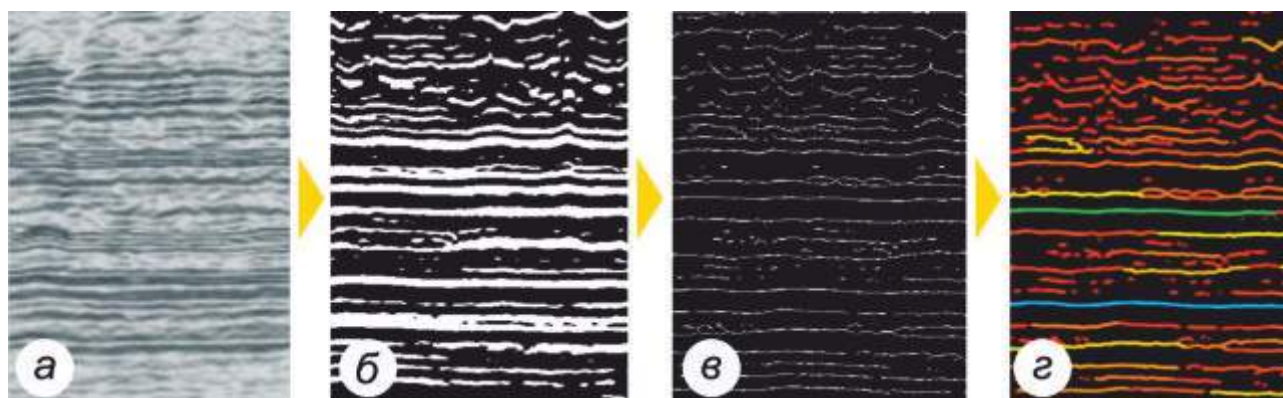
Вычисление CV-атрибутов по сейсмическому изображению может быть проведено в несколько этапов (рис. 3). Прежде всего, необходимо подготовить данные к использованию алгоритма, выделяющего контуры на изображении. Первым шагом является конвертация изображения сейсмического разреза в чёрно-белое представление по заданному порогу. Поскольку сейсмические

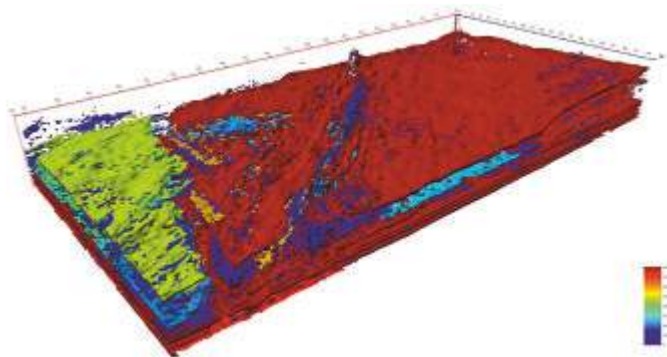
события представляют собой незамкнутые контуры, необходимо провести так называемую процедуру скелетизации – истончения белых участков бинаризованного изображения до линий толщиной в один пиксель. После скелетизации может быть применён алгоритм поиска контуров. Контуры аппроксимируются ломаными линиями, для которых нетрудно вычислить значения предложенных атрибутов.

CV-атрибуты естественным образом обобщаются на 3D данные. Если на 2D разрезе сейсмическое событие представляет собой криволинейный отрезок, то в 3D кубе оно будет являться криволинейной поверхностью. Поэтому прежде всего применяется алгоритм «Marching cubes» [Lorensen, 1987], выделяющий поверхности в объёмных данных. Суть его в следующем. Прежде всего, задаётся значение амплитуды, которое будет определять искомую поверхность. Далее для каждой ячейки размером 2x2x2 дискрета сравниваются значения ампли-

▼ Рис. 3. Этапы вычисления CV-атрибутов для 2D данных:

а – исходное сейсмическое изображение, б – бинаризация, в – скелетизация, г – выделенные контуры событий (цветом показан атрибут прослеживаемости).





▲ Рис. 4. Визуализация атрибута прослеживаемости для фрагмента 3D куба.

туд между дискретами из данной ячейки. Если в ячейке присутствуют дискреты с амплитудами как меньшими, так и большими заданного значения, то между соответствующими точками ячейки строится фрагмент поверхности, состоящий из одного или нескольких треугольников. Таким образом, при анализе всех ячеек в кубе удаётся выделить искомую поверхность.

Введённые CV-атрибуты в 3D задаются аналогичным образом. Пример вычисления атрибута прослеживаемости для фрагмента 3D куба показан на рис. 4.

Подход к оценке качества с использованием алгоритмов компьютерного зрения не только решает описанную выше проблему оценки качества комплексов, но и открывает ряд новых возможностей. Так, например, в

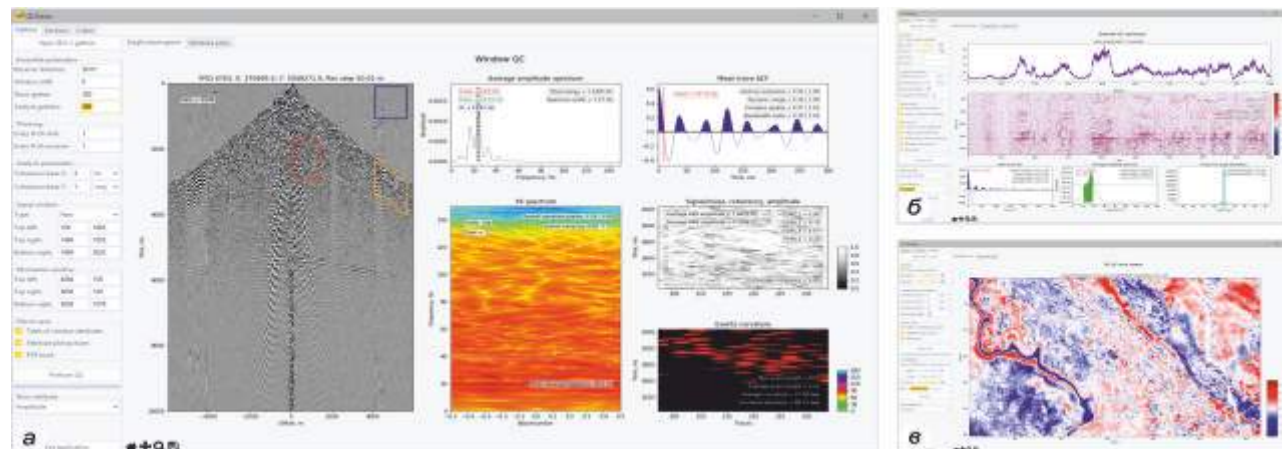
задаче, связанной с поиском оптимальной системы наблюдения, когда требуется определить такую плотность расстановки приёмников, при которой будет подавляться определённый тип волн-помех, часто анализируют FK-спектры модельных сейсмограмм. Целью анализа является нахождение частоты, начиная с которой, в спектре появляются помехи, связанные с пространственным алейсингом. Такая (критическая) частота определяется визуально по пересечению наклонных прямых линий в FK-спектре (отвечающих помехам) с осью частот. С помощью алгоритмов компьютерного зрения, осуществляющих поиск линейных элементов на изображении, стало возможным автоматизировать этот процесс и сократить время выполнения задачи.

ПО «QCVision»

В рамках исследований в группе геофизических работ ООО «РН-Эксплорейшн» было разработано ПО «QCVision», позволяющее проводить контроль качества сейсмических данных в окнах анализа по сейсмограммам, 2D разрезам и 3D кубам, с вычислением стандартных и CV-атрибутов. ПО содержит в себе функции известных программ для контроля качества сейсмических

▼ Рис. 5. Основные вкладки интерфейса ПО «QCVision»:

а – анализ сейсмограмм, б – анализ разрезов, в – анализ кубов.



данных, имея при этом дополнительные возможности в части реализации алгоритмов компьютерного зрения. Программа имеет интуитивно понятный интерфейс, разделённый на три части (workflows) для анализа сейсмограмм, 2D разрезов и 3D кубов (рис. 5).

Общий порядок работы с программой довольно прост. На нужной вкладке пользователю прежде всего необходимо загрузить SEG-Y файл с данными в программу. Далее следует указать окно анализа. Для сейсмограмм возможно сразу задать два окна: по ближним и дальним выносам, указав выносы и времена вручную, либо щелчками мыши по сейсмограмме. Также присутствует возможность смещения окон по времени для разных FFID по заданным контрольным точкам (если глубина залегания целевых горизонтов сильно меняется). Для разрезов и кубов задаются прямоугольные окна по времени. Затем нужно выбрать, какие файлы программа должна будет сохранять при вычислении атрибутов: предусмотрено сохранение таблиц атрибутов, изображений их графиков, а также сшивка всех визуализируемых изображений в единую PDF книгу. Для 2D разрезов есть возможность

сохранять общую таблицу по всем профилям, в которой значения атрибутов будут привязаны к номерам ОГТ и их координатам. Наконец, пользователю остаётся нажать кнопку запуска вычислений.

После вычисления всех атрибутов их средние значения между разрезами или кубами можно будет сравнить на интерактивной лепестковой диаграмме (рис. 6), которая строится по списку атрибутов, указанному пользователем в соответствующем диалоговом окне. При визуализации атрибуты разделяются на четыре группы, соответствующие амплитудным, корреляционным, спектральным и CV-атрибутам.

Результаты тестирования и выводы

Тестирование ПО «QCVision» и методики оценки качества по CV-атрибутам проводилось как на модельных, так и на реальных 2D и 3D данных. Большая часть данных представляет собой архивные профили по ЛУ Восточной Сибири (свыше 17 000 профилей). По этим профилям ранее была сделана выборка из 384 профилей, по которой специалистами ООО «РН-Эксплорейшн» было визуально

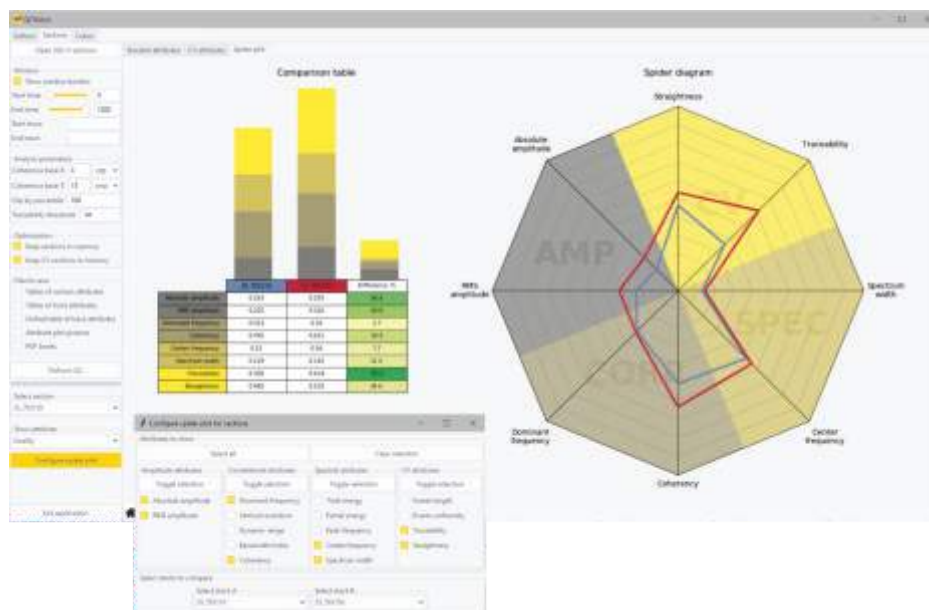


Рис. 6. Визуализация интерактивной лепестковой диаграммы для сравнения разрезов в ПО «QCVision».

определено качество материала: произведена классификация в соответствии с описанными в начале статьи четырьмя классами сложности. После вычисления атрибутов в ПО «QCVision» было проведено сравнение оценок по профилям из данной выборки. В качестве основного атрибута, характеризующего качество данных, была выбрана прослеживаемость. Разделение шкалы прослеживаемости на интервалы, соответствующие классам, определённым вручную, было выбрано так, чтобы максимизировать корреляцию между ручной q_m и автоматической q_a оценками. При сравнении оценок представляется возможным вычислить долю ошибок второго рода, возникающих при планировании ГРП на основе ручной оценки. В математической статистике ошибкой второго рода называется ситуация, когда нулевая гипотеза была неверно принята. В нашем случае нулевая гипотеза H_0 – утверждение о хорошем качестве данных ($q=1; 2$),

альтернативная H_1 – утверждение о плохом качестве ($q=3; 4$). Ошибкой второго рода является ситуация, когда ГРП спланированы в предположении хорошего качества данных (следуя ручной оценке), но на деле (при количественной оценке) оказывается, что качество плохое, и требуются дополнительные затраты на их обработку. Условие ошибки второго рода: $q_m < q_a - 1$. Доля таких ошибок в выборке из 384 профилей составила **9,14%**. Эта доля хотя и невелика, является заметной в масштабах всей Восточной Сибири. В результате исследования была построена новая карта классификации сложности сейсмического материала по Восточной Сибири (рис. 7).

Приведём также один из примеров, когда при контроле качества комплексирования геофизических методов стандартные атрибуты качества дают неправильную оценку. На рис. 8 показано сравнение двух профилей после обработки, приведённых в предыдущей

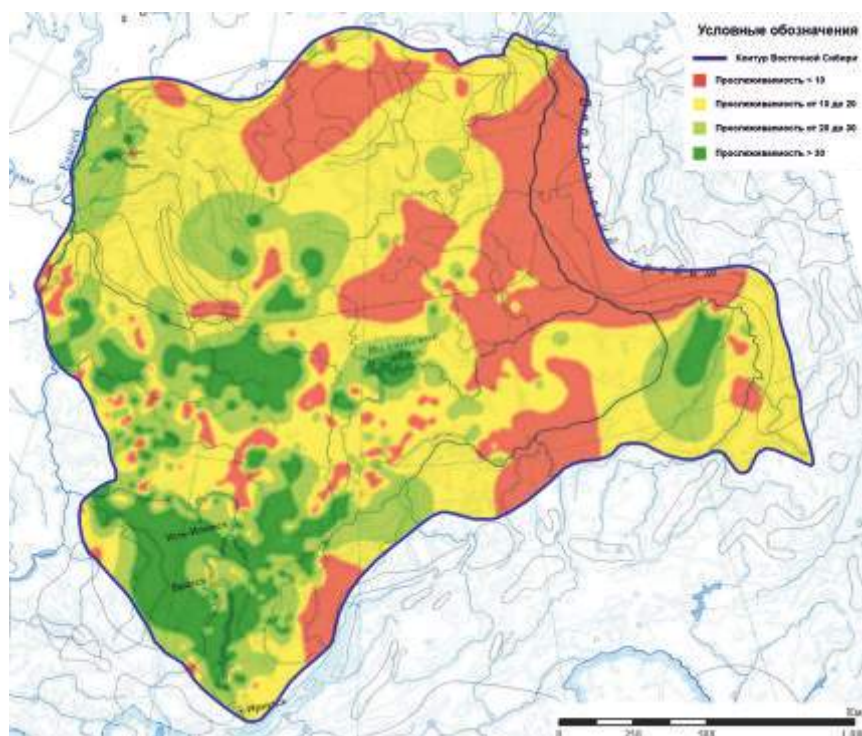
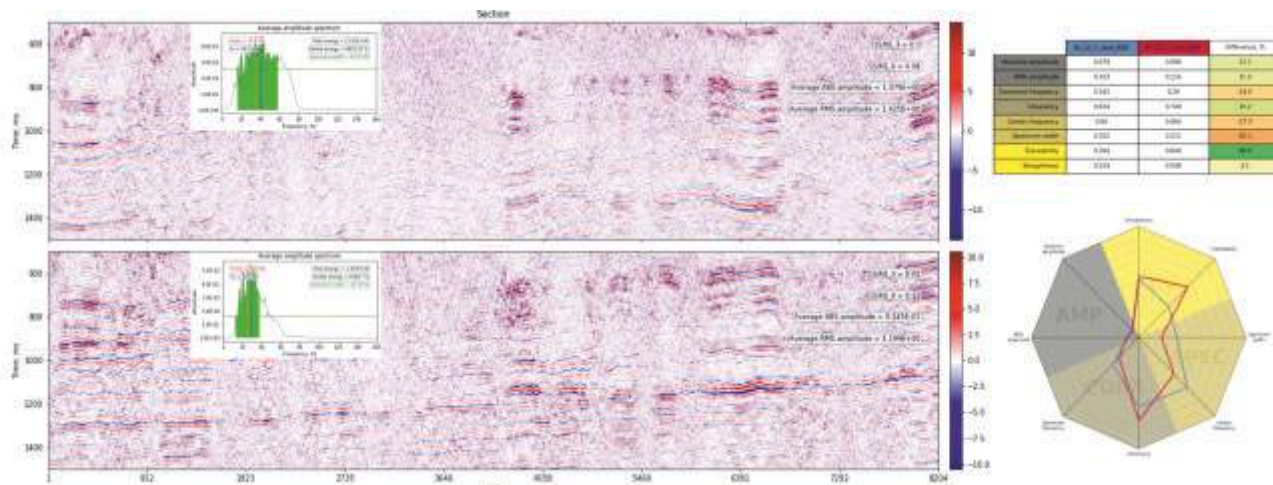


Рис. 7.
Карта классов сложности сейсмического материала по Восточной Сибири.



▲ Рис. 8. Сравнение стандартных и CV-атрибутов качества для реальных разрезов 2D по Восточной Сибири, полученных по сейсмической томографии (сверху, синий контур) и при помощи комплексирования (снизу, красный контур).

работе [Молчанов, 2021], с визуализацией вычисленных атрибутов.

Видно, что спектральные атрибуты показывают ухудшение качества: до -40% по ширине спектра, однако при этом CV-атрибуты демонстрируют существенное улучшение (что видно и невооружённым глазом): до +64% по прослеживаемости. Такая ситуация объясняется тем, что с применением комплексирования и получением более корректных априорных статических поправок после обработки удаётся получить сфокусированное изображение горизонтов, которое присутствует лишь на низких частотах (порядка 30 Гц). Ввиду сложного строения ВЧР на данном ЛУ на более высоких частотах интенсивнее происходит рассеивание, и полезная информация не сохраняется.

Таким образом, к настоящему моменту появилась возможность объективной и однозначной количественной оценки сейсмического материала, которая вполне пригодна для применения в сложных сейсмогеологических условиях и даёт корректный результат. Предло-

женная группа атрибутов реализована в специализированном ПО, которое успешно протестировано как на модельных, так и на реальных сейсмических данных.

Литература

1. Araman A., Paternoster B., Isakov D., Shchukina N. Seismic quality monitoring during processing: what should we measure? // SEG Las Vegas 2012 Annual Meeting, P.1-5.
2. Lorensen W.E., Cline H.E. Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm // Computer Graphics, Vol. 21, Nr. 4, July 1987
3. Белоусов А.В. Стандартные оценки качества полевого сейсмического материала // Приборы и системы разведочной геофизики, №03(37)/2011, С. 31–36.
4. Гуренцов Н.Е., Твердохлебов Д.Н., Мельников Р.С. Повышение качества регистрируемых сейсмических данных на основе передовых технологий 2D/3D моделирования // Труды III Международной геолого-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия 2020. Совре-

менные технологии изучения и освоения недр Евразии» Том III (III) [сборник]. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2020, С. 22-25.

5. Молчанов А.Б., Лыгин И.В., Твердохлебов Д.Н., Мостовой Д.В. Комплексирование геофизических методов для 2D и 3D данных в ПО «Tomplex» // Приборы и системы разведочной геофизики, №3/2021, С. 43-52.

6. Мостовой Д.В., Твердохлебов Д.Н., Лыгин И.В., Молчанов А.Б., Габова М.Н., Гвоздик С.А., Емельянова К.Л., Мельников Р.С. Построение модели ВЧР на основе комплекса геофизических методов с целью улучшения качества данных сейсморазведки // Геофизика, №2/2021, С. 25-35.

7. Тищенко И.В., Тищенко А.И., Жуков А.А. Алгоритмы и критерии оценки качества полевых сейсмических записей // Технологии сейсморазведки, №2/2011, С. 40-48.

Подробнее об авторах



Молчанов
Алексей Борисович

специалист группы
геофизических работ
ООО «РН-Эксплорейшн»



Твердохлебов
Данила Николаевич

к.т.н., руководитель группы
геофизических работ
ООО «РН-Эксплорейшн»