УДК 550.3

Р.С. Мельников
ПАО «НК «Роснефть»[1]
управление сейсморазведочных работ
главный специалист
R_melnikov@rosneft.ru

Д.Н. Твердохлебов
канд. техн. наук
ООО «РН-Эксплорейшн»[2]
геолого-геофизическая служба
группа геофизических работ
руководитель
dntverdokhlebov@rn-exp.rosneft.ru

А.Б. Клешнин
ООО «РН-Эксплорейшн»[2]
геолого-геофизическая служба
группа геофизических работ
главный специалист
abkleshnin@rn-exp.rosneft.ru

С.Н. Голопапа
АО «Верхнечонскнефтегаз»[3]
ведущий геолог
sngolopapa@rosneft.ru

Специальная обработка широкоазимутальных данных сейсморазведочных работ 3D в сейсмогеологических условиях Восточной Сибири

[1]Россия, 115054, Москва, Дубининская, 31А.
[2]Россия, 121151, Москва, Можайский вал, д. 8, Б/ц «Атлантик».
[3]Россия, 664025, Иркутск, Большой Литейный пр–т, 3.

В статье рассматриваются результаты проведенных ПАО «НК «Роснефть» научно-исследовательских работ с использованием передовых технологий и оптимизацией существующих методик обработки сейсмических данных в сложных сейсмогеологических условиях Восточной Сибири. Полученные результаты предлагается использовать для разработки новых и актуализации действующих стандартов в области обработки сейсмических данных, а также для внедрения передовых технологий в производственный цикл с целью получения максимального качества сейсмического материала в схожих сейсмогеологических условиях

Ключевые слова: сейсморазведка; широкоазимутальная сейсморазведка; обработка сейсмических данных; азимутальный скоростной анализ; полноволновая инверсия

В настоящее время основным видом геологоразведочных исследований является сейсморазведка. В последние годы на лицензионных участках в Восточной Сибири выполнено большое количество 3D сейсморазведочных работ (СРР). В сложных поверхностных условиях, при сложной верхней части разреза (ВЧР) 3D-сейсморазведка дает значительные преимущества в сравнении с модификацией 2D в получении качественного сейсмического изображения. Однако использование традиционных узко- и среднеазимутальных съемок накладывает и ряд ограничений. Известно, что исследуемые площади характеризуются большим количеством поисковых объектов на разных структурных уровнях, а также с разной азимутальной ориентацией [5, 6]. В большинстве случаев нам неизвестно направление этих объектов. Встает вопрос о правильной ориентации съемки 3D для получения хорошей освещенности поисковых объектов. Также существует проблема учета азимутальных вариаций скоростей, связанных со сложной и изменчивой ВЧР. Решить эти задачи помогает использование широкоазимутальных съемок 3D с равномерным распределением азимутов по всем направлениям. Последние несколько лет ПАО «НК «Роснефть» на лицензионных участках в Восточной Сибири выполняет масштабные широкоазимутальные СРР 3D. Чтобы подчеркнуть все преимущества широкоазимутальных съемок, необходима специальная обработка таких данных. В работе рассмотрены особенности специальной обработки широкоазимутальных данных СРР 3D в сложных сейсмогеологических условиях Восточной Сибири.

Геологическое описание и характеристики района работ

Участок исследований, на примере которого будет описан подход, расположен в центральной части Непско-Ботуобинской антеклизы на территории Иркутской области. Известно, что площадь работ характеризуются сложным изменчивым строением приповерхностных условий и изрезанным гидросетями рек, а также рельефом с большими перепадами. Наблюдаемая на изучаемой площади волновая картина типична для всей территории Непско-Ботуобинской антеклизы. Разрез осадочного чехла достигает толщины 1700–1800 м, представлен в основном высокоскоростными галогено-карбонатными отложениями кембрия и венда, в основании залегает базальный слой терригенных отложений. Зона малых скоростей (ЗМС) имеет толщину от первых метров до 15–20 м и более. Скорости в ней изменяются от 800 до 2000 м/с и более. Верхняя часть разреза площади работ сложена терригенными, реже карбонатно-терригенными отложениями верхне-среднекембрийского и ордовикского возрастов. Исследуемая площадь находится в зоне выхода ангарской складчатости на поверхность. Такое существенное различие в приповерхностном строении ведет к появлению азимуталь-

Таблица 1.
Параметры широкоазимутальной съемки

Параметры регистрации:	
Размер бина, м	25×25
Методика работ:	
Система наблюдения	Центральная – «крест»
Количество активных каналов	2704
Количество рабочих каналов на 1 линии приема	104
Ближайшие к линии возбуждения каналы	52,53
Количество приемных линий в 1 блоке	26
Способ перекрытия	по линиям приема
Количество линий перекрытия между блоками	25
Количество ПВ в 1 шаблоне отстрела	4
Номинальная кратность	169
Минимальное удаление взрыв–прием, м	35
Максимальное удаление взрыв–прием, м	3 642
Расстояние между ПВ на линии возбуждения, м	50
Расстояние между линиями возбуждения, м	200
Расстояние между ПП на линии возбуждения, м	50
Расстояние между линиями приема, м	200
Соотношение сторон продольного (L) и поперечного (L) размеров расстановки	0,97

ных вариаций скоростей и оказывает сильное влияние на качество получаемых сейсмических данных.

Особенности широкоазимутальных съемок

Наиболее распространёнными являются ортогональные, прямолинейные съемки 3D с центрально-симметричным расположением пунктов возбуждения и приемными расстановками в форме прямоугольника. Соотношение сторон продольного (L) и поперечного (M) размеров расстановки определяют азимутальность съемки. Так, широкоазимутальная съемка должна удовлетворять следующему соотношению размеров приемной расстановки: **L ~ M > 0,7**.

На исследуемой площади была использована система наблюдений со следующими параметрами, представленными в ***табл. 1***.

Соотношение сторон продольного и поперечного направления составляет 0,97. Такая съемка является широкоазимутальной и обеспечивает равномерное распределение азимутов по всем направлениям до удалений порядка 3000 м. Это делает возможным выполнение специальной обработки с сохранением информации об азимутах. Следует отметить, что такие параметры съемки практически не повышают стоимость квадратного километра по сравнению с традиционной среднеазимутальной съемкой, т.к. уплотнение происходит за счет добавления линий приема без увеличения количества пунктов взрыва. Такие широкоазимутальные съемки в настоящее время являются стандартными и широко используются ПАО «НК «Роснефть» при проведении СРР на лицензионных участках Восточной Сибири.

Использование широкоазимутальных съемок дает следующие преимущества:

– равномерное получение сейсмической информации по всем азимутальным направлениям, до определенных удалений (на исследуемой площади до ~3000 м);

– высокая кратность накапливания в сравнении с традиционными узко- и средне-азимутальными съемками (при несущественных различиях в стоимости);

– лучшая пространственная дискретизация данных;

– возможность азимутального анализа скоростей и исследования анизотропии.

Специальная обработка широкоазимутальных съемок

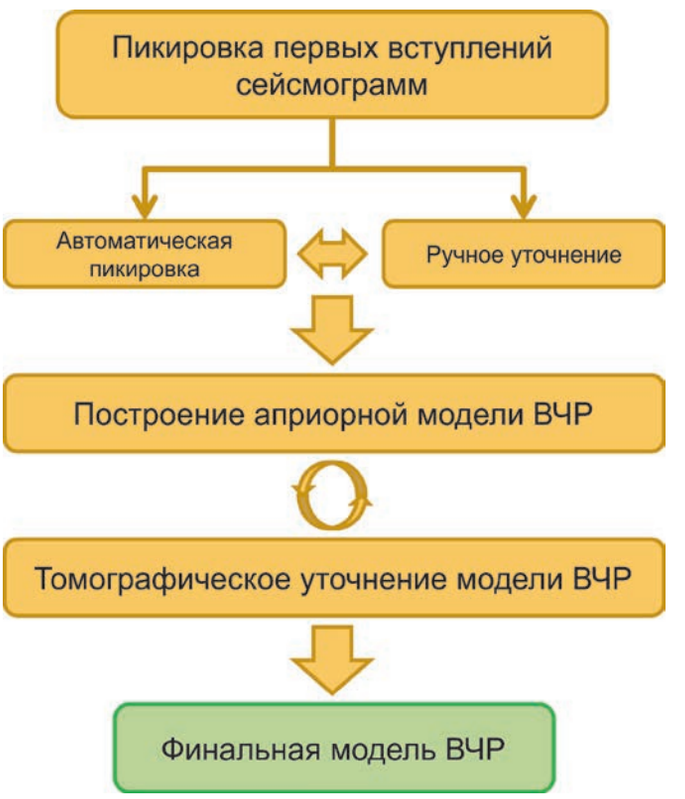
Специальную обработку широкоазимутальных данных можно разделить на два основных направления [4].

1. Кинематической обработка – на этом этапе выполняются построение модели ВЧР и расчет статических поправок, а также коррекция остаточных статических поправок и скоростной анализ. Обработка выполняется без сохранения соотношения амплитуд. Результатом этого этапа являются окончательные статические и кинематические поправки.

2. Сигнальная обработка – обработка с максимально эффективным и «аккуратным» помехоподавлением, сохранением динамической выразительности записи, применением алгоритмов, использующих информацию об азимутах.

Кинематическая обработка подразделяется на два этапа. Первый – построение модели ВЧР и расчет априорных статических поправок (***рис. 1***). Модель ВЧР строится на основе информации о первых вступлениях и последующей томографии. При сложном строении верхней части, а также при использовании неоптимальных источников возбуждения этап построения модели ВЧР занимает достаточно много времени. Проблема заключается в неоднозначности пикировок первых вступлений (в некоторых случаях – невозможности автоматической пикировки), что в свою очередь ведет к ошибкам в скоростной модели ВЧР и ошибочным статическим поправкам. Для минимизации подобных ошибок необходим итеративный подход с руч-

Рис. 1.
Построение модели ВЧР



ной коррекцией как самой модели, так и первых вступлений.

Второй этап – итеративная коррекция статических и кинематических поправок. Так, для особенно сложных участков количество итераций коррекции остаточных статических поправок и последующего скоростного анализа может достигать десятков. В случае крайне сложного строения ВЧР и неудовлетворительных результатах кинематической обработки возникает необходимость использованием передовых алгоритмов восстановления скоростей и учета ВЧР.

Так, для исследуемой площади специалистами ПАО «НК «Роснефть» впервые была успешно опробована технология полноволновой инверсии (*FWI*) для наземных данных. Основа метода *FWI* заключается в минимизации различия между рассчитанным (модельным) и зарегистрированным (реальным) сейсмическим полем (***рис. 2***). На вход подается исходная модель (скоростная модель после томографического уточнения преломленных волн) [1, 2]. По исходной модели происходит расчет синтетических сейсмограмм и сравнение с реальными сейсмограммами. В результате сравнения рассчитываются невязки между ними, и происходит обновление скоростной модели. После чего цикл многократно повторяется. Моделирование и обновление происходит итеративно, от низких частот к высоким. Количество итераций достигает многих десятков. Полученная модель скоростей ВЧР отличается высокой детальностью, как по вертикали, так и по латерали, имеет большую сходимость с геологией региона, а также ее корректность подтверждается результатами бурением (***рис. 3***).

Помимо технологии *FWI* для построения детальной модели ВЧР может применяться и технология инверсии поверхностных волн (*SWI*). Методика *SWI* заключается в анализе характеристик поверхностных волн. Оценка скорости выполняется путём анализа дисперсионных кривых поверхностных волн в пространстве частота и обратная скорости величина. Переход от дисперсионных кривых к скоростной модели поперечных волн выполняется с помощью инверсии. Полученная модель поперечных скоростей пересчитывается в продольные с использованием доступной информации через параметр гамма (соотношение продольных и поперечных скоростей) [3].

Детальная скоростная модель ВЧР может использоваться для уточнения статического и кинематического решения на этапе кинематической обработки как в качестве основы для построения глубинно-скоростной модели с целью последующей глубинной миграции, так и непосредственно для интерпретации ВЧР в местах, где получение сейсмического изображения невозможно (нехватка кратности, наличие крутых наклонов и т.п.).

Рис. 2.
Построение детальной модели ВЧР с использованием технологии FWI

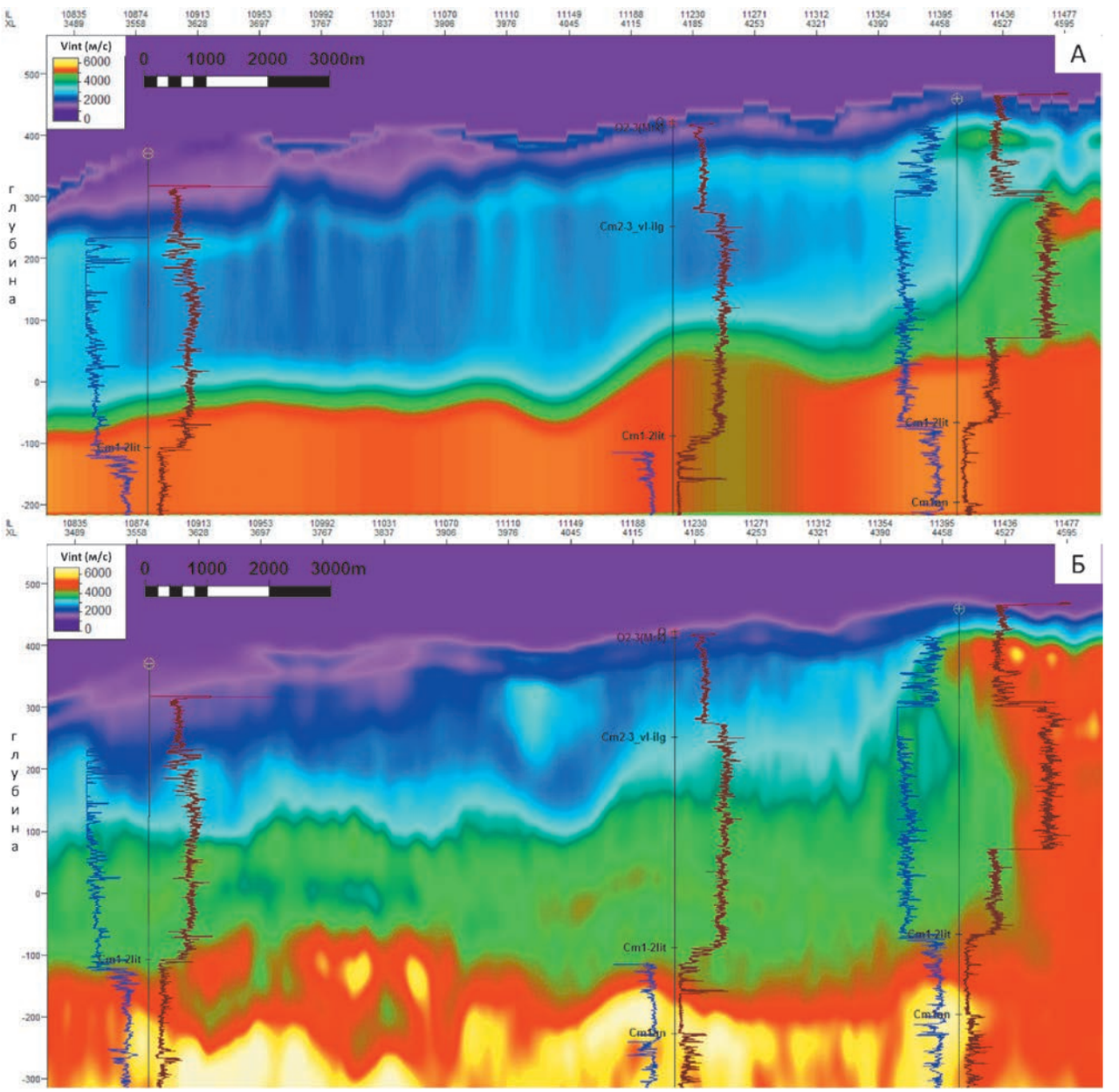
Результатом этапа кинематической обработки служат суммарные кубы, полученные с окончательными статическими и кинематическими поправками, пригодные для предварительного анализа и экспресс-интерпретации.

Сигнальная обработка данных также подразделяется на два основных направления: итеративное помехоподавление и поверхностно-согласованные процедуры.

Итеративное помехоподавление выполняется с использованием современных алгоритмов и программных комплексов для эффективного и «аккуратного» шумоподавления. Помехи ослабляются в различных сортировках (ОПВ, ОПП, ОГТ, COV/OVT, *Cross Spread*) с тщательным контролем качества. На сегодняшний день наблюдается тенденция перехода от использования многомерной фильтрации для подавления волн-помех к моделированию помех и последующему адаптивному вычитанию из исходных данных. Подобный подход позволяет максимально эффективно выполнить помехоподавление с сохранением полезного сигнала.

Поверхностно-согласованные процедуры включают итеративную поверхностно-согласованную коррекцию амплитуд и поверхностно-согласованную деконволюцию. В некоторых случаях при наличии сложных поверхностных условий может потребоваться поверхностно-согласованная коррекция амплитуд в различных частотных

Рис. 3.
Скоростная модель ВЧР с наложенными каротажными кривыми после томографического уточнения (А) и после FWI (Б)



диапазонах. Необходимость такой коррекции следует из предположения, что амплитудные аномалии по-разному ведут себя в различных частотных диапазонах. Для корректного учета подобных аномалий следует выполнять поверхностно-согласованную коррекцию в выбранных частотных диапазонах по отдельности.

Следующим этапом обработки является подготовка данных к временной миграции, временная миграция до суммирования и миграционная обработка.

При подготовке данных к миграции выполняется разделение на векторы общих удалений (COV/OVT). Выполнять эту процедуру необходимо для того, чтобы сохранить информацию об азимутах при последующей миграции. Для интерполяции и регуляризация данных используются алгоритмы как 3D, так и 5D регуляризации. В каждом конкретном случае алгоритм подбирается по результатам тестирования.

Временная миграция Кирхгофа до суммирования выполняется по векторам общих удалений. Использование подобного алгоритма позволяет сохранять информацию об азимутах и впоследствии выполнять азимутальный анализ скоростей и учет изменения амплитуд отражений в азимутальных секторах.

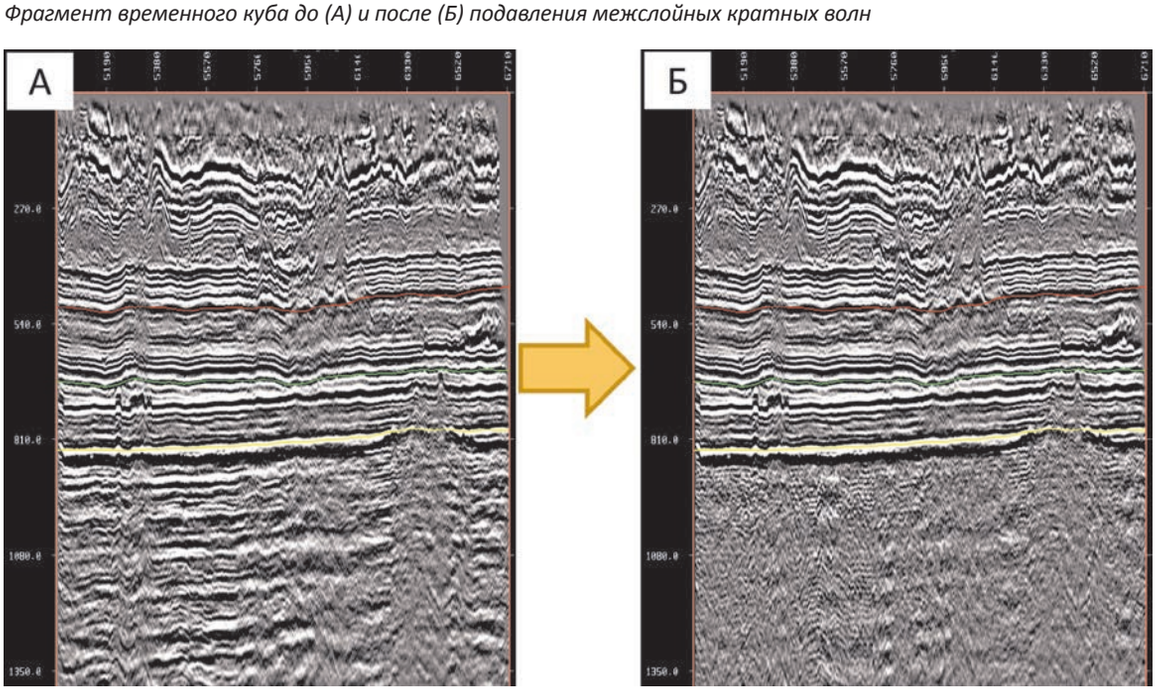
Для учета азимутальных вариаций скоростей выполняется азимутальный скоростной анализ. Подобный анализ выполняется в два этапа: на первом выполняется коррекция кинематических сдвигов, вызванных горизонтальной анизотропией (*HTI*), на втором – высокоплотный автоматический анализ скоростей (*VTI*).

Помимо получения кинематического решения (спрямленных годографов на сейсмограммах), азимутальный скоростной анализ позволяет получать атрибуты анизотропии. Так, на исследуемой площади, проанализировав атрибут соотношения быстрых и медленных скоростей (Vfast/Vslow), выяснилось, что азимутальные вариации скоростей напрямую связаны со сложнопостроенной ВЧР и имеют не локальных характер в определенных толщах, а простираются по всему разрезу.

На этапе постмиграционной обработки выполняется остаточное шумоподавление в различных сортировках, подавление следов расстановки. При необходимости выполняется подавление остаточных кратных волн и межслойных кратных волн. В случае, если целевой интервал осложнен обширным фоном кратных волн, которые не поддаются ослаблению традиционными методиками ввиду слабой дифференциации скоростей, применяется специальная методика на основе моделирования и адаптивного вычитания межслойных кратных волн от заданных кратнообразующих границ в выбранном временном интервале (***рис. 4***). Данная методика успешно опробована специалистами ПАО «НК «Роснефть» в рамках специальных научно-производственных работ ООО «РН-Эксплорейшн» [7].

В сложных приповерхностных условиях на сейсмических данных может присутствовать

Рис. 4.
Фрагмент временного куба до (А) и после (Б) подавления межслойных кратных волн



большое количество амплитудно-частотных аномалий. При большой интенсивности таких аномалий поверхностно-согласованных процедур порой недостаточно для их компенсации. В этом случае на окончательном этапе специальной обработки выполняется амплитудно-частотная балансировка. Методика такой балансировки строится на двух предположениях:

– на амплитуду сейсмических данных влияют две составляющие – одна связана с упругими свойствами горных пород, слагающих разрез, и изменяется в зависимости от этих свойств; вторая составляющая включает влияние неоднородностей ВЧР, она постоянна по всему разрезу, начиная с глубины залегания неоднородностей;

– влияние неоднородностей на амплитуду сейсмических данных зависит от частоты входного сигнала.

Для того чтобы учесть эти факторы, балансировка производится в различных частотных диапазонах. Применение такого подхода позволяет компенсировать большую часть амплитудно-частотных аномалий, что в дальнейшем позволяет получать более надежные результаты динамической интерпретации.

На всех этапах специальной обработки выполняется интерпретационное сопровождение, заключающееся в анализе данных на разных этапах обработки, и состоит из:

– визуального анализа разрезов во временной области;

– анализа амплитудных спектров в разных точках площади;

– анализа амплитудных разрезов в различных частотных диапазонах;

– оценки качества привязки скважин;

– анализа распределения *RMS* амплитуд и частот по площади;

– визуального анализа сейсмограмм;

– анализа *AVO*-откликов и их соответствия модельным.

Таким образом, выполняя интерпретационное сопровождение обработки, можно оперативно оценивать качество материала с точки зрения интерпретации и при необходимости – вносить изменения в граф обработки для получения более корректного результата.

Выводы

Разработанный специалистами ПАО «НК «Роснефть» граф специальной обработки позволяет успешно решать следующие задачи:

– компенсация скоростных аномалий сложно-построенной ВЧР;

– эффективное и «аккуратное» помехоподавление с сохранением полезного сигнала во всем диапазоне частот;

– учет и компенсация амплитудных и частотных неоднородностей, связанных с влиянием поверхностных условий и ВЧР;

– учет азимутальной вариации скоростей и получение сейсмического изображения в зонах со сложными сейсмогеологическими условиями.

Граф специальной обработки широкоазимутальных данных постоянно модифицируется, т.к. с каждым годом появляются новые алгоритмы и методики обработки сейсмических данных. Большая часть нововведений внедряется после тщательного тестирования как на модельных данных, так и на реальных. Только после того, как подтверждается эффективность тестируемой методики, она применяется в производственном режиме.

Разработанный ПАО «НК «Роснефть» подход к специальной обработке с применением передовых технологий успешно опробован и широко используется на лицензионных участках в Иркутской области, а также планируется к внедрению на площадях Сибирской платформы со схожими условиями. Получаемые результаты, позволили существенно повысить качество интерпретации, что снизило неопределенность сейсмического прогноза. Использование подхода на лицензионных участках ПАО «НК Роснефть» в Иркутской области позволило существенно повысить успешность поисково-разведочного бурения [8].

Литература

1. Sirgue, L., Full waveform inversion: the next leap forward in imaging at Valhall. Sirgue, L., Barkved, O.I., Dellinger, J., Etgen, J., Albertin, U. and Kommedal, J.H. First Break, 2010, no. 28 (4), pp. 65–70.

2. V. Korobkin, Application of SWI and FWI for Building Near-surface Velocity Model and Improving Seismic Image Quality/ V. Korobkin, A. Burlakov, K. Kudryavtsev, D. Tverdokhlebov. Conf. EAGE, Saint Petersburg, 2018.

3. Claudio Strobbia, Alexander Zarkhidze, Roger May, John Quigley and Phil Bilsby. Multiple Coherent Noise Suppression: Model-Based Complex Dispersed Wave Suppression. First Break, 2011, no. (8).

4. Клешнин А.Б., Твердохлебов Д.Н., Чиргун А.С., Филичев А.В., Голопапа С.Н. Специальная обработка широкоазимутальных СРР 3D в сейсмогеологических условиях Сибирской платформы //Конференция EAGE «Геобайкал 2018». 2018.

5. Гайдук А.В., Каширина Е.Г., Редькин Н.А. и др. Закономерности развития перспективных карбонатных объектов в венд-кембрийском осадочном чехле южной части Сибирской платформы //Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». 2016. № 3. С. 28–31.

6. Гайдук А.В., Фомин А.Е., Твердохлебов Д.Н. [и др.]. Выявление перспективных на нефть и газ объектов в подсолевом карбонатном комплексе Непско-Ботуобинской антеклизы по результатам переобработки и переинтерпретации архивных данных МОГТ-2D //Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». 2016. № 3. С. 44–48.
7. Твердохлебов Д.Н., Данько Е.А., Каширина Е.Г., Коробкин В.С., Филичев А.В., Гайдук А.В. Возможность подавления кратных волн на основе алгоритмов моделирования в условиях высокоскоростного разреза сибирской платформы //Геофизика. 2018. № 1. С. 2–14.
8. Гордеев Я.И., Гайдук А.В., Митюков А.В., Филичев А.А. Результаты проведения геологоразведочных работ ПАО «НК «Роснефть» на лицензионных участках в Иркутской области за 10 лет //Нефтяное хозяйство. 2016.

UDC 550.3

R.S. Melnikov, Chief Specialist of the Seismic Exploration Department, PJSC NK Rosneft[1], R_melnikov@rosneft.ru
D.N. Tverdokhlebov, PhD, Head of the Group of Geophysical Works of the Geological and Geophysical Service, OOO RN–Exploration[2], dntverdokhlebov@rn–exp.rosneft.ru
A.B. Kleshnin, Chief Specialist of the Group of Geophysical Works of the Geological and Geophysical Service, OOO RN–Exploration[2], abkleshnin@rn–exp.rosneft.ru
S.N. Golopapa, Lead Geologist, JSC Verkhnechonskneftegaz[3], sngolopapa@rosneft.

[1]8 Mozhaisk Val str., Business Center "Atlantic", Moscow, 121151, Russia.
[2]8/6, Mozhaisky val, Moscow, 121151, Russia.
[3]3 Bolshoi Liteiny prospect, Irkutsk, 664025, Russia.

Specialized Processing of Wide-azimuth 3D Seismic Data in Geoseismic Settings of Eastern Siberia

Abstract. The paper discusses the results of research carried out in Rosneft Company with the use of the cutting–edge technologies and optimisation of the existing methods for seismic data processing in the complicated geoseismic settings of the Eastern Siberia. The authors propose to use the obtained results to develop new and update the current standards in the area of seismic data processing, and to introduce these technologies in production cycle for obtaining seismic data of the highest quality in similar geoseismic settings

Keywords: seismic exploration; wide–azimuth seismics; seismic data processing; azimuth–based velocity analysis; full–waveform inversion

References

1. Sirgue, L., Full waveform inversion: the next leap forward in imaging at Valhall. Sirgue, L., Barkved, O.I., Dellinger, J., Etgen, J., Albertin, U. and Kommedal, J.H. First Break, 2010, no. 28 (4), pp. 65–70.
2. V. Korobkin, Application of SWI and FWI for Building Near-surface Velocity Model and Improving Seismic Image Quality/ V. Korobkin, A. Burlakov, K. Kudryavtsev, D. Tverdokhlebov. Conf. EAGE, Saint Petersburg, 2018.
3. Claudio Strobbia, Alexander Zarkhidze, Roger May, John Quigley and Phil Bilsby. Multiple Coherent Noise Suppression: Model-Based Complex Dispersed Wave Suppression. First Break, 2011, no. (8).
4. Kleshnin A.B., Tverdokhlebov D.N., Chirgun A.S., Filichev A.V., Golopapa S.N. ***Spetsial'naia obrabotka shirokoazimutal'nykh SRR 3D v seismogeologicheskikh usloviiakh Sibirskoi platform*** [Special processing of wide-azimuth CPP 3D in seismic and geological conditions of the Siberian platform]. Conf. EAGE «Geobaikal 2018». 2018.
5. Gaiduk A.V., Kashirina E.G., Red'kin N.A. i dr. ***Zakonomernosti razvitiia perspektivnykh karbonatnykh ob"ektov v vend-kembriiskom osadochnom chekhle iuzhnoi chasti Sibirskoi platform*** [Patterns of development of promising carbonate objects in the Vendian-Cambrian sedimentary cover of the southern part of the Siberian Platform]. ***Nauchno-tekhnicheskii vestnik OAO «NK «Rosneft'»*** [Scientific and Technical Bulletin of Rosneft Oil Company], 2016, no. 3, pp. 28–31.
6. Gaiduk A.V., Fomin A.E., Tverdokhlebov D.N. [i dr.]. ***Vyiavlenie perspektivnykh na neft' i gaz ob"ektov v podsolevom karbonatnom komplekse Nepsko-Botuobinskoi anteklizy po rezul'tatam pereobrabotki i pereinterpretatsii arkhivnykh dannykh MOGT-2D*** [Identification of oil and gas promising objects in the subsalt carbonate complex of the Nepa-Botuobinsky anteclise based on the results of re-processing and re-interpretation of archival data MOGT-2D]. ***Nauchno-tekhnicheskii vestnik OAO «NK «Rosneft'»*** [Scientific and Technical Bulletin of Rosneft Oil Company], 2016, no. 3, pp. 44–48.
7. Tverdokhlebov D.N., Dan'ko E.A., Kashirina E.G., Korobkin V.S., Filichev A.V., Gaiduk A.V. ***Vozmozhnost' podavleniia kratnykh voln na osnove algoritmov modelirovaniia v usloviiakh vysokoskorostnogo razreza sibirskoi platform*** [The ability to suppress multiple waves based on modeling algorithms in a high-speed section of the Siberian platform]. ***Geofizika*** [Geophysics], 2018, no. 1, pp. 2–14.
8. Gordeev Ia.I., Gaiduk A.V., Mitiukov A.V., Filichev A.A. ***Rezul'taty provedeniia geologorazvedochnykh rabot PAO «NK «Rosneft'» na litsenzionnykh uchastkakh v Irkutskoi oblasti za 10 let*** [The results of geological exploration of PJSC "NK" Rosneft "in the licensed areas in the Irkutsk region for 10 years]. ***Neftianoe khoziaistvo*** [Oil industry], 2016.