

Построение детальных сейсмогеологических 3D моделей на примере Западной Сибири

- Гуренцов Н.Е., Попова Л.А., Твердохлебов Д.Н., ООО «РН-Эксплорейшн»
- Шахно В.В., ООО «РН-Ванкор»

Статья посвящена обзору процессов построения и последующего анализа детальных сейсмогеологических моделей 3D с привлечением всей имеющейся геолого-геофизической информации на примере территории Западной Сибири. В работе представлен обзор процессов построения, масштабирования, тестирования и подбора параметров конечно-разностного 3D моделирования, а также описаны результаты обработки и интерпретации синтетических данных.

Введение

В современной практике сейсморазведочных работ специалисты-геологоразведчики нередко сталкиваются с необходимостью анализа и компенсации аномалиеобразующих объектов различной природы как в верхней части разреза (ВЧР), так и в целевых интервалах. Районы Крайнего Севера характеризуются сложными приповерхностными условиями, связанными как с повсеместным распространением слоя многолетнемерзлых пород (ММП), прорезанного зонами растепления под крупными реками и озёрами, так и с локальной газонасыщенностью разреза, обусловленной криогенной концентрацией газа, мигрирующего по тектоническим разломам. Доступные геофизические подходы и методики в области восстановления изображения ВЧР не всегда позволяют прогнозировать характеристики и геометрию аномалиеобразующих объектов и имеют многочисленные ограничения и допущения. В то же время, недоучет подобных аномалий приводит к ошибкам в обработке и интерпретации данных и, как следствие, к снижению успешности бурения поисково-разведочных скважин.

Современный вектор развития рынка сейсморазведочных работ направлен в сторону повышения плотности регистрируемых сейсмических данных для полу-

чения наиболее детального и качественного сейсмического изображения. При этом повышение плотности данных может достигаться как за счет уплотнения пунктов возбуждения (применение высокопроизводительных методик отработки площади, например, Flip-flop, Slip-sweep, ISS, GLIDE и др.), так и пунктов приема (применение беспроводных систем регистрации [4]). Параллельно с подобными изменениями в области полевых сейсморазведочных работ будут модернизироваться и подходы к планированию и проектированию работ [1,2,3], контролю качества материалов [6] и обработке больших массивов полевых материалов. И, вследствие всего вышеперечисленного, будет уделяться повышенное внимание планированию и обоснованию высокоплотных сейсморазведочных работ для минимизации всесторонних рисков на различных этапах геологоразведки и поиска оптимального решения для поставленных геологических задач.

Поэтому в современных и грядущих реалиях развития сейсморазведочного рынка построение детальных сейсмогеологических 3D моделей и последующее моделирование и обработка синтетических сейсмограмм является наиболее эффективным способом учёта и параметризации имеющихся априорных и выявленных геологических трендов не только

для обоснования и выбора оптимальной системы полевых наблюдения [7], но и для разработки оптимального графа обработки [5], тестировании отдельных времязатратных процедур, а также комплексной интерпретации сейсмических данных, что особенно актуально в условиях регистрации высокоплотных полевых данных.

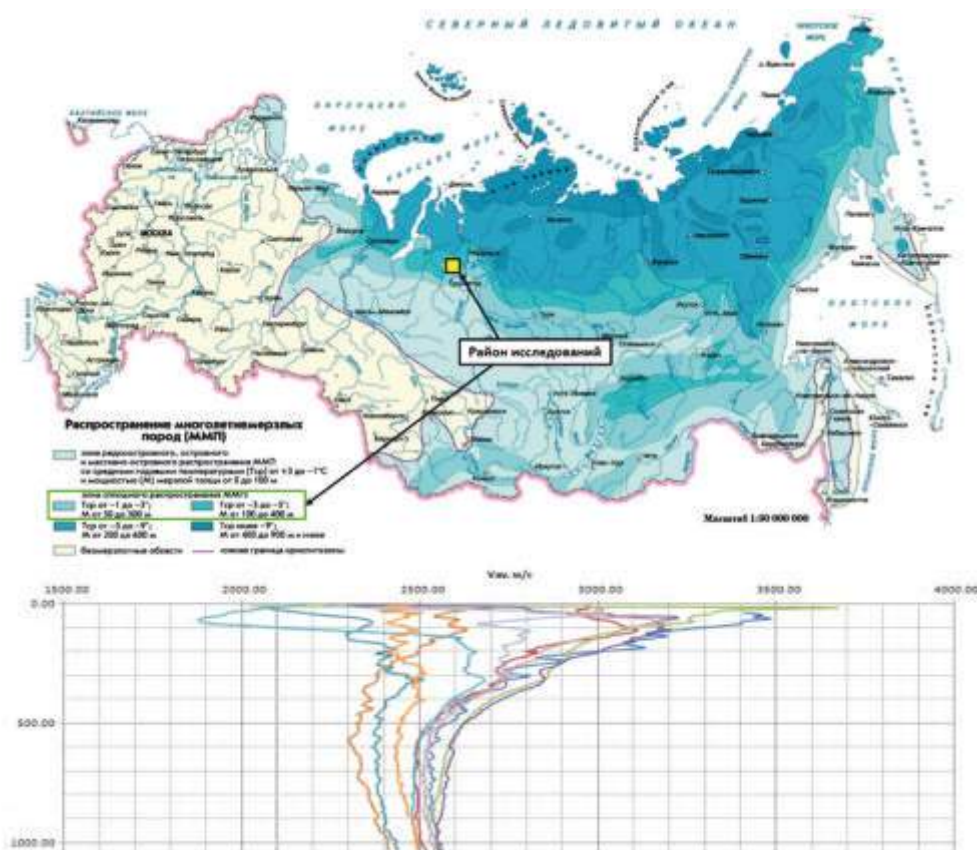
Обзор исследуемого участка в Западной Сибири

В географическом отношении территория исследования находится на Нижне-Енисейской возвышенности, в бассейне левого притока р. Енисей. В тектоническом отношении месторождение приурочено к поднятию, осложняющему Большехетскую структурную террасу Надым-Тазовской синеклизы.

В пределах территории широко развиты неблагоприятные физико-геологические процессы и явления: термокарст, заболачивание, мерзлотные бугры

пучения. Территория также находится в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород, средняя мощность которых достигает 500-550 м. Развитие ММП и слабая дренированность способствуют заболачиванию территории. Положение изучаемой территории на карте распространения многолетнемерзлых пород представлено на Рисунке 1. Анализ данных ГИС и ВСП также подтверждает наличие в ВЧР низко- и высокоскоростных объектов, которые отождествляются с зонами растепления и ММП.

Глубинные сейсмогеологические условия исследуемой территории являются достаточно благоприятными. В геологическом разрезе имеется не менее 10 достаточно выдержанных отражающих границ, характеризующих весь разрез осадочного чехла. Разрез осадочного чехла северо-восточной части Надым-Тазовской синеклизы состоит из трех структурно-тектонических этажей, которые характеризуются специфичес-



кой волновой картиной и выделены в сейсмолитологические этажи.

Продуктивные песчаные отложения приурочены к нижнемеловым отложениям нижнехетской (верхний берриас - нижний валанжин) и яковлевской (средний апт - средний альб) свит. В кровле долганской свиты (верхний альб - сеноман) установлены непромышленные скопления газа. В средне-верхнеюрских отложениях малышевской и сиговской свит установлено наличие коллекторов и доказано УВ насыщение.

Построение сейсмогеологической модели, тестирование параметров моделирования и анализ промежуточных результатов

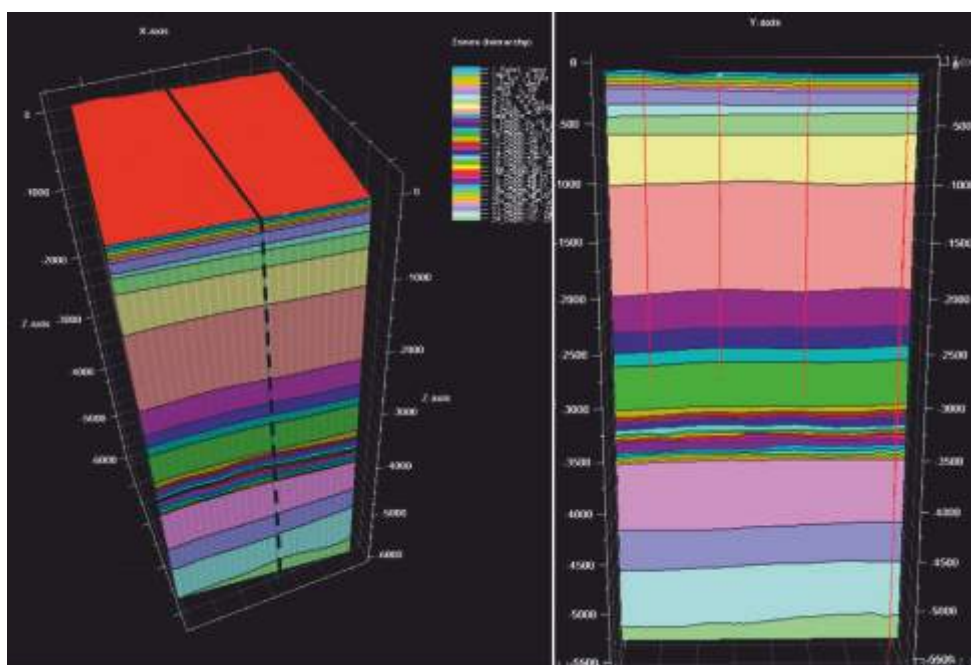
Построение исходных моделей продольных скоростей и плотности выполнялось на севере Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Площадь сейсмогеологической модели 3D составила 179 км². В пределах участка моделирования расположено 6 скважин, содержащих информацию по данным ГИС для наполнения модели упругими свойствами и позволяющих выполнить межскважинное распространение упругих

свойств в модели. Подготовительный процесс к моделированию включал создание базы данных проекта, корректировку данных ГИС и экстраполяцию каротажа одной скважины до акустического фундамента на основе каротажей соседних скважин.

На первом этапе создания сейсмогеологической модели 3D был построен сеточный структурный каркас от дневной поверхности до глубины 6000 м (Рисунок 2), который включает 32 зоны с размерностью ячейки модели по направлению X и Y 50x50 м, размерность ячейки по глубине – 13,9 м с уплотнением сетки в целевых интервалах. Осреднение скважинных данных на сетку модели было выполнено для кривых интервальных скоростей, плотности и литологии. Всего трёхмерная сейсмогеологическая модель содержит 417 геологических слоёв и 35 529 728 ячеек.

Для структурного каркаса были выбраны поверхности, стратиграфически приуроченные к наиболее выраженным акустическим границам: кровле акустического фундамента, подошве юрских отложений, низам юрских отложений, кровле леонтьевской свиты, кровле

► Рис. 2.
Сеточный
структурный
каркас 3D
сейсмогеологической модели.



малышевской свиты, кровле аномальных глин в нижней части яновстановской свиты, кровле пласта Нх-III-IV в нижней части нижнехетской свиты, кровле нижнехетской свиты, кровле пласта пласта СД-IX суходудинской свиты, кровле суходудинской свиты, кровле яковлевской свиты, кровле долганской свиты, кровле насоновской свиты, подошве слоя ЗМС, подошве слоя ММП и рельефу дневной поверхности.

На втором этапе создания сейсмогеологической модели 3D была выполнена детализация упругих свойств модели в верхней части разреза и на уровне целевых интервалов. Модель пространственного распределения скорости и плотности в ВЧР была построена методом детерминистического моделирования на основе карты рельефа и принципиальных разрезов ММП и таликов региона, составленных по архивным и литературным данным (Рисунок 3). Интервальная скорость отложений в таликах была принята в диапазоне 2900-3100 м/с, плотность - 2150 кг/м³; интервальная

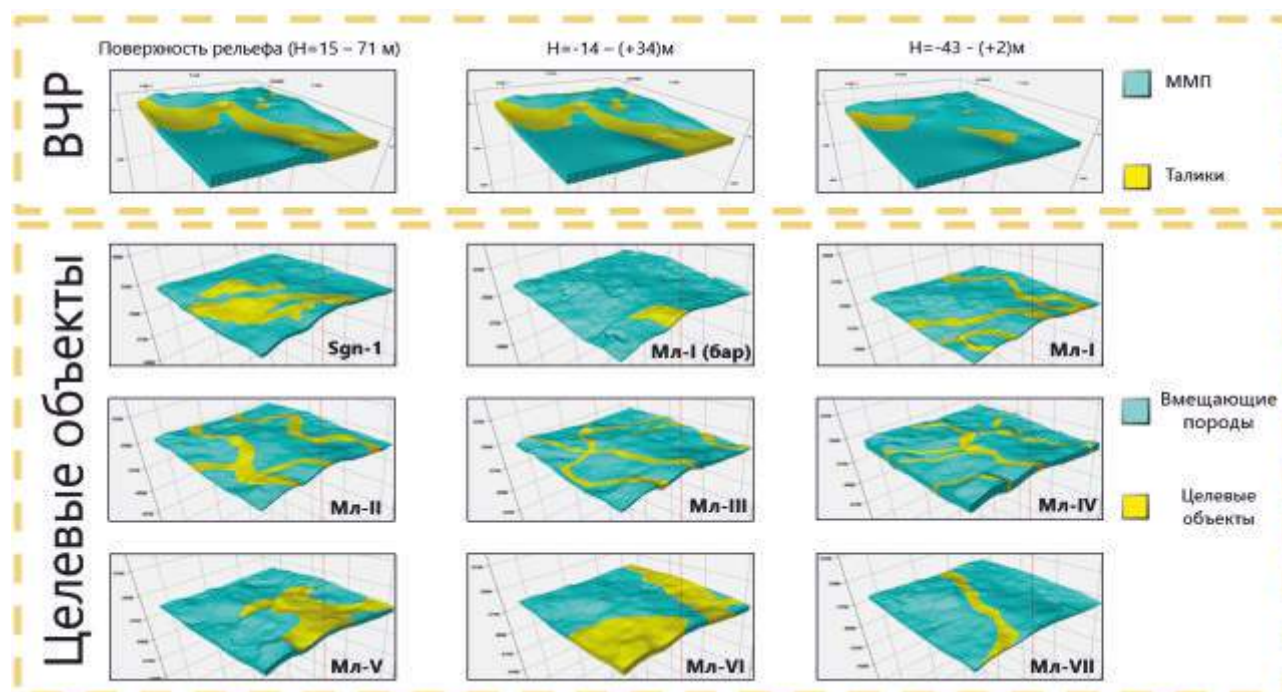
скорость в ММП: Винт. - 3300-3700 м/с, плотность - 2200 кг/м³.

Мощности слоя ММП изменяются от 200 м на возвышенностях рельефа до 70 м под тальвегом левого притока р. Енисей. Дополнительно в модель был встроен газонасыщенный объект, мощностью 13,7 м (с параметрами Винт - 2310 м/с, плотность - 2140 кг/м³) в интервале долганской свиты.

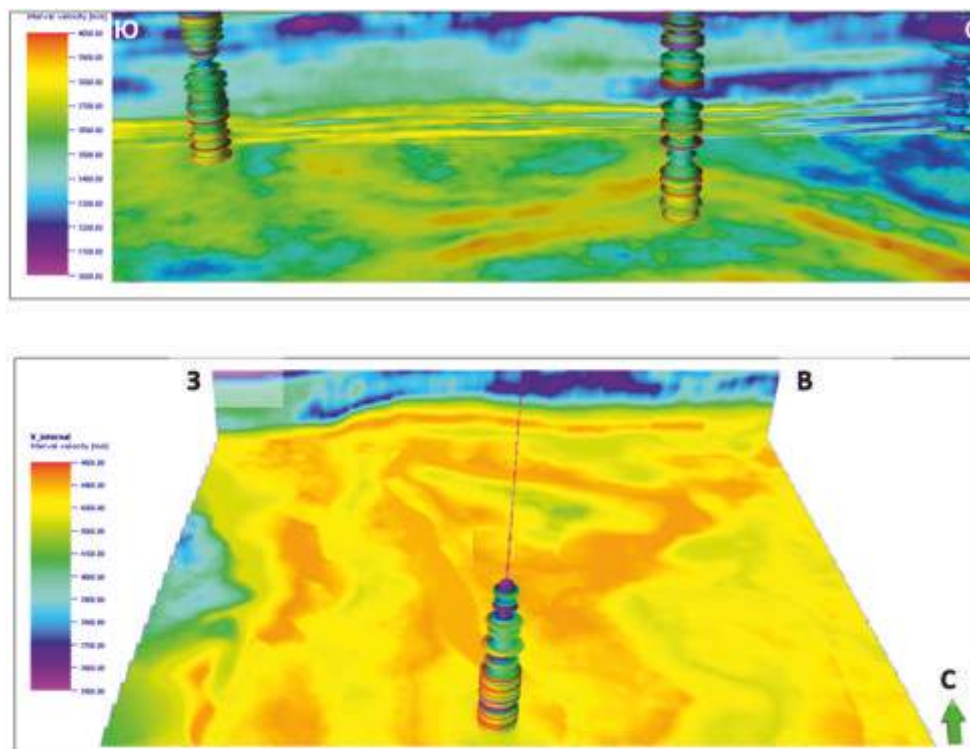
Выбор алгоритмов моделирования целевых интервалов определялся условиями седиментации отложений. Интервалы разреза малохетско-суходудинских прибрежно-морских и нижнехетских регрессивно-трансгрессивных отложений, для которых характерно частое переслаивание пород, были построены методом Гауссовского стохастического моделирования (Рисунок 4).

Перспективные объекты флювиально-барового типов, пластов Sgn-1 (J2-3) нижне-сиговской подсвиты и Мл-1-Мл-МлVIII (J2) малышевской свиты, выделенные на основе динамического анализа, были встроены в модель методом детер-

▼ Рис. 3. Детализация слоев модели в верхней части разреза (сверху) и в целевом интервале разреза (снизу).



► Рис. 4.
Срез куба
скоростей
в интервалах
суходудинской
(сверху)
и малышевской
(снизу) свит.



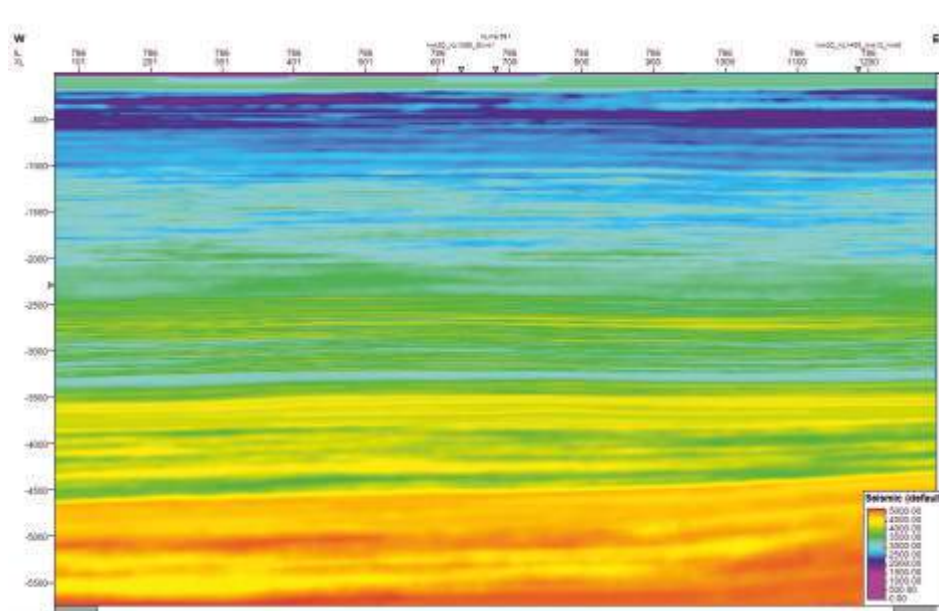
министического моделирования (Рисунок 3).

На заключительном этапе создания сейсмогеологической модели 3D кубы упругих свойств (Винт, ГГК-П) были конвертированы в сейсмические кубы с размерами ячейки 10x10x10 м по X-, Y- и Z-направлениям для последующего решения прямой задачи по расчету синтетических сейсмограмм (Рисунок 5).

Непосредственно перед моделированием полного объема синтетических данных было выполнено тестирование и подбор параметров моделирования (режим моделирования, длина записи, частота и форма входного импульса, размер ячейки моделирования и некоторые другие оптимизационные параметры расчета) для оценки качества синтетических сейсмограмм и требуемого вре-

▼ Табл. 1. Выбранные параметры 3D моделирования и используемая система наблюдения

Параметры моделирования	
Объем моделирования по ПВ/ПП, км ²	30/179
Количество ПВ (физ.наблюдений)	6264
Режим моделирования	Акустический
Тип свободной поверхности	invisible (дневная поверхность не образует кратные волны)
Шаг ячейки в направлении dx, dy и dz, м	10
Такт расчета по времени dt, мс	0,9
Модельный импульс/частота, Гц	Импульс Рикера/30 Гц
Система наблюдения МОГТ-3D	
Шаг ЛПВ/ЛПП/ПВ/ПП, м	200/200/25/25
Шаблон активной расстановки	34 ЛПП x 272 канала в линии
Суммарное кол-во активных каналов	9248
Минимальное/максимальное удаление, м	265,17/4790,65
Кратность (для бина 12,5x12,5 м)	289



◀ **Рис. 5.**
Итоговая модель
продольных
скоростей
по одному
из сечений куба.

мени расчета полного объема данных.

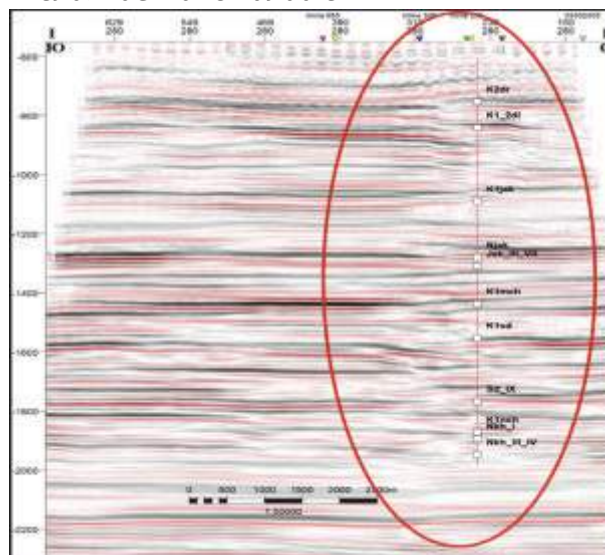
По результатам итеративного процесса тестирования параметров моделирования были выбраны оптимальные значения (Таблица 1) и выполнен расчет полного объема сейсмограмм (6264 физ.наблюдений).

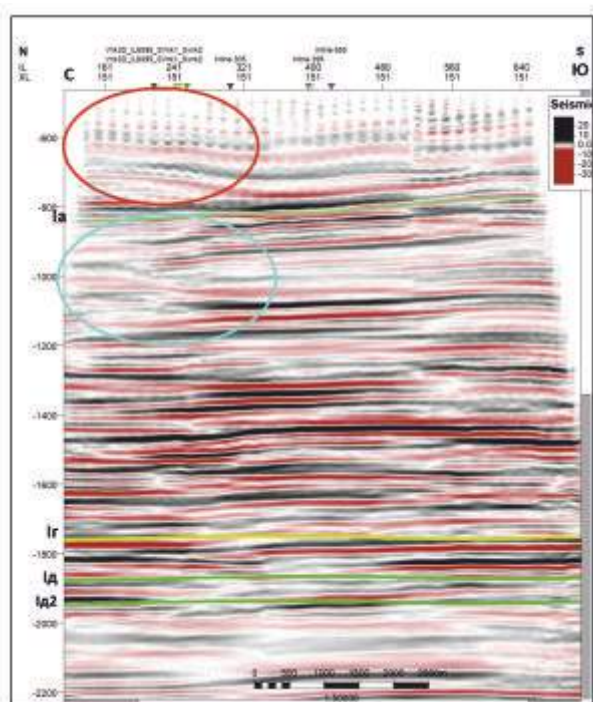
Обработка и интерпретация синтетических данных. Анализ результатов

Построение детальной сейсмогеологической 3D модели и последующее моделирование сейсмограмм методом конечных разностей, позволили детально исследовать влияние скоростных неоднородностей ВЧР (ММП, таликовые зоны и газовые включения) на динамические характеристики сейсмической записи. Помимо ожидаемого временно-го прогиба, совпадающего в плане с депоцентрами зоны растепления, на временных разрезах обращает на себя внимание область некогерентной записи в интервале 0-2000 мс, приуроченная к краям таликовых зон, ширина данной области составляет около 1 км. Очевидно, что при стандартном учёте длиннопериодных статических поправок, область некогерентности будет по-прежнему наблюдаться на временных сейсмичес-

ких разрезах (Рисунок 6) и может быть ошибочно проинтерпретирована как тектоническое нарушение. Влияние талика в ВЧР также отчётливо проявляется в изменении амплитуды и частоты отражений выше кровли долганской свиты. Интенсивное отражение, приуроченное к кровле долганской свиты, прослеживается с небольшими смещениями. В интервале долганской свиты и ниже, примерно до времени 1200 мс, отмечаются локальные изменения динамики записи.

▼ **Рис. 6.** Пример временного разреза через зону талика. Красным цветом показана зона некогерентности, обусловленная влиянием аномалий в ВЧР.





▲ Рис. 7. Пример временного разреза, пересекающего газовую шапку в интервале долганской свиты. Красным цветом показана зона влияния талика, голубым цветом – зона влияния газовых включений.

Значительно более неоднозначная волновая картина наблюдается при пересечении газовой аномалии в долганской свите и талика (Рисунок 7). Области скопления газа характеризуются понижением частотного состава и ослаблением динамики отражений, а также влияние газовой шапки проявляется в существенных смещениях осей синфазности и смене полярности. Сопоставление сейсмограмм в интервале долганской свиты без газа и с газом приведены соответственно на Рисунке 8. На сейсмограммах, в интервале с газовыми скоплениями, волновая картина приобретает хаотический вид. Кинематические сдвиги и ослабление динамики отражений прослеживается вниз по разрезу вплоть до кровли суходудинской свиты.

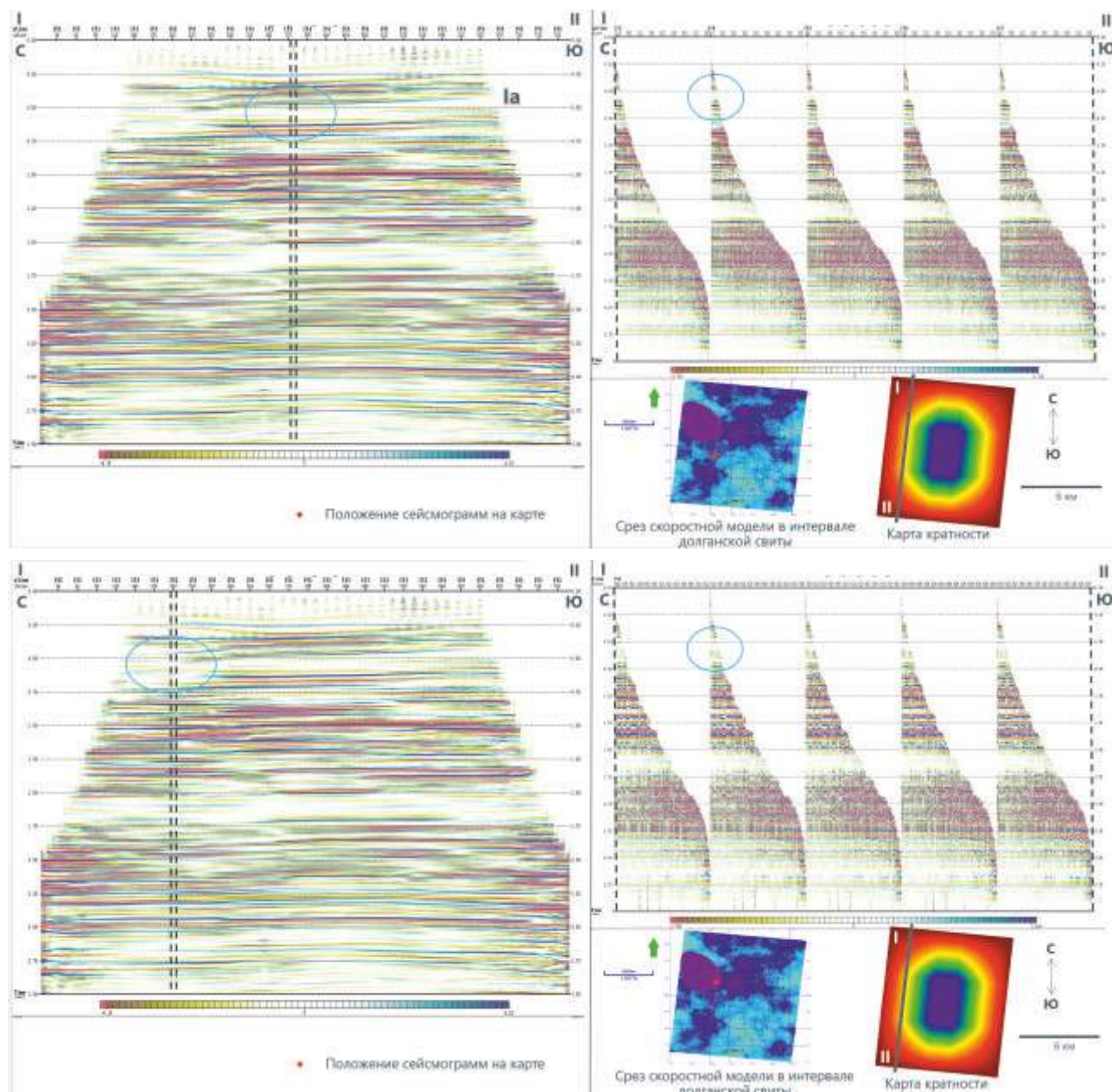
По результатам проведенного анализа сформированы следующие выводы и рекомендации:

- для повышения качества записи в области ВЧР и зонах газопроявления, а также для нивелирования влияния подобных аномалии на нижележащие горизонты, рекомендуется проводить анализ горизонтальных спектров интервальных скоростей и выполнять расчет корректирующих статических поправок методом последующего замещения.
- для устранения влияния газового фактора и зон растепления на нижележащие горизонты на этапе обработки рекомендуется применять расчет главных компонент в частотной области.

Выводы и рекомендации

Описанный в работе подход к построению детальных сейсмогеологических моделей 3D на основе комплекса доступных геолого-геофизических данных и последующее синтезирование сейсмограмм могут быть использованы на различных этапах геологоразведки: на этапе проектирования и планирования работ для обоснования параметров оптимальной системы полевых наблюдений; на этапе обработки данных для тестирования различных процедур и алгоритмов; на этапе интерпретации для оценки возможности выделения перспективных поисковых объектов в волновом поле и влияния аномалиеобразующих объектов на различных уровнях геологического разреза на получаемое сейсмическое изображение. В результате выполнения блока работ по сейсмогеологическому моделированию возможно формирование наилучшего понимания геологического строения района работ за счет повышения качества прогноза и надежности сейсмического изображения.

Сейсмогеологическое моделирование в ближайшем будущем будет набирать популярность, параллельно с модернизацией полевых сейсмических методик, в сторону уплотнением и повышения



▲ Рис. 8. Временной разрез через интервал долганской свиты без газовых аномалий (сверху) и с газовой аномалией (снизу)

плотности трасс в связи с нарастающими, в свою очередь, рисками и необходимостью иметь максимально достоверное и детальное обоснование проведения подобных высокоплотных работ. Соответственно, и степень необходимой детальности построения исходных сейсмогеологических моделей также будет возрастать с течением времени. Наибольшее внимание при этом будет уделяться построению модели ВЧР и ЗМС, так как именно в этом интервале залегает подавляющее большинство

аномалиеобразующих объектов, которые оказывают существенное искажающее влияние на целевые пласты и объекты. В связи с этим анализ и поиск возможных путей компенсации подобных аномалий необходимо выполнять еще перед непосредственным проведением полевых сейсморазведочных работ 3D на этапе планирования и проектирования. И подобный путь обоснования высокоплотных полевых методик является наиболее грамотным с точки зрения решения главной, геологической, задачи.

Литература

1. Гуренцов Н.Е., Твердохлебов Д.Н. Расчет эталонной системы наблюдения сейсморазведочных работ МОГТ-3D на основе сейсмогеологического моделирования для лицензионных участков ПАО «НК «Роснефть» в Самарской области. Москва. Нефтяное хозяйство. 11. 2018. 32-35 с.
2. Гуренцов Н.Е., Твердохлебов Д.Н., Мельников Р.С. Комплексный подход к проектированию оптимальных систем наблюдения CPP-2D/3D на основе сейсмогеологического моделирования. Москва. Геофизика. 3. 2020. 31-37 с.
3. Гуренцов Н.Е., Твердохлебов Д.Н., Мельников Р.С., Молчанов А.Б., Мостовой Д.В., Емельянова К.Л. Новые технологии – ключ к получению качественных данных сейсморазведки. Москва. Геофизика. 2. 2021. 2-8 с.
4. Твердохлебов Д.Н., Аблязина Д.И., Давыдова Е.А., Гуренцов Н.Е., Колескин Д.С., Porham M., Einchcomb C., Ourabah A. Беспроводная регистрирующая система STRYDE – будущее наземной сейсморазведки. Москва. Приборы и системы разведочной геофизики. 2. 2021. 73-86 с.
5. Твердохлебов Д.Н., Данько Е.А., Каширина Е.Г. Конечно-разностное сейсмогеологическое моделирование с целью повышения эффективности обработки и качества интерпретации сейсмических данных. Москва. Геофизика. 6. 2017. 10–18 с.
6. A. Crosby, T. Manning, A. Ourabah, C. Brooks, D. Dieulangard, J. Quigley, C. Vasile, D. Ablyazina, 2020, In-field quality control of very high channel count autonomous nodal systems, SEG Technical Program Expanded Abstracts 2020.
7. J. Naranjo, N. Gurentsov, D. Tverdokhlebov, O. Adamovich and R. Melnikov Designing High Density Land Acquisition Surveys in Complex Environments; A Case Study from East Siberia, Russia. EAGE 2020 Annual Conference & Exhibition Online, Dec 2020, Volume 2020, 1–5 p.

Подробнее об авторах



Гуренцов
Никита Евгеньевич

Ведущий специалист группы геофизических работ
ООО «РН-Эксплорейшн»



Твердохлебов
Данила Николаевич

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



Попова
Людмила Андреевна

Старший геофизик группы моделирования и баз данных
ООО «РН-Эксплорейшн»



Шахно
Виктор Владимирович

Начальник сектора по сейсморазведочным работам управления геологоразведочных работ, ресурсной базы и лицензирования
ООО «РН-Ванкор»