

Трёхмерная сейсмическая поддержка проектирования скважин: интеграция моделей, геонавигации и оперативных измерений

Литературный обзор

Трёхмерная сейсмическая поддержка проектирования скважин: интеграция моделей, геонавигации и оперативных измерений

2026

Аннотация

Трёхмерная сейсмическая поддержка проектирования скважин рассматривается как сквозной процесс, в котором картирование залежи, геологическая интерпретация, построение траектории и геонавигация объединяются для управления неопределённостью.

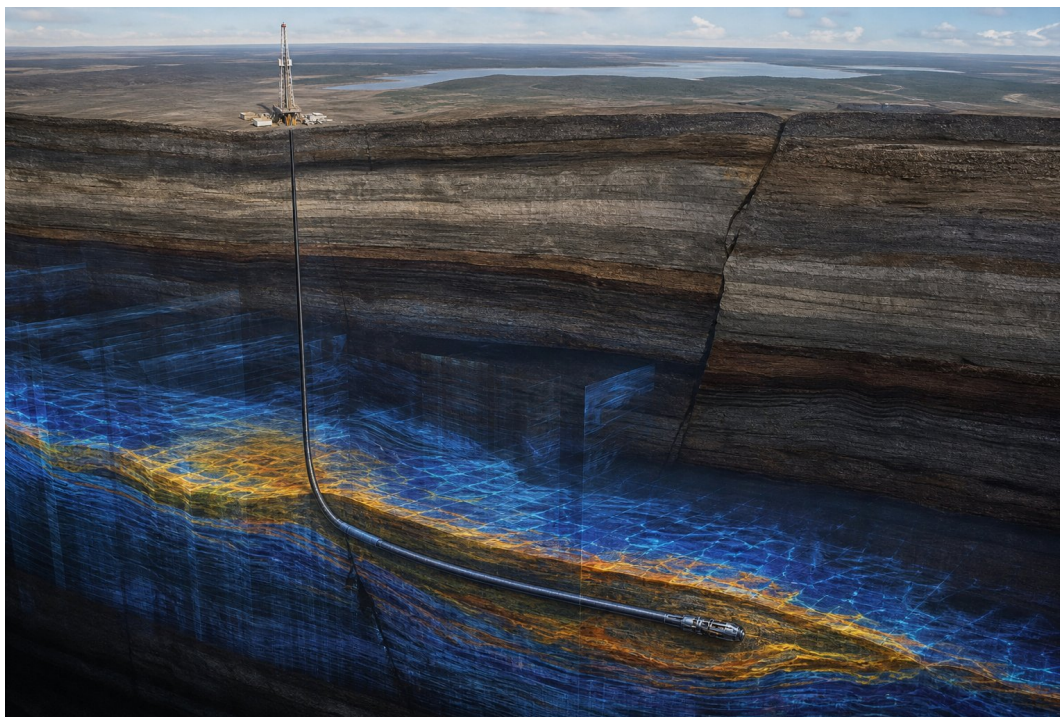


Рисунок 1. Трёхмерная сейсмическая поддержка проектирования скважин рассматривается как сквозной процесс, в котором картирование залежи, геологическая интерпретация, построение траектории и геонавигация объединяются для управления неопределённостью (иллюстрация сгенерирована ИИ)

Цель обзора заключается в систематизации основных понятий, технологических направлений, методов и типов доказательств, определяющих практическую ценность трёхмерных сейсмических данных. Рассмотрены предбурочная визуализация и инверсия, интеграция с каротажем в процессе бурения и глубокими электромагнитными измерениями, обновление геологических моделей в реальном времени, а также автоматизация интерпретации и поддержки решений. Показано, что наибольшая добавленная ценность возникает не от отдельного метода, а от согласования данных различного масштаба и времени получения: сейсмика задаёт пространственный контекст, а скважинные и оперативные измерения уточняют положение границ и свойства пласта вблизи ствола. Вместе с тем неопределённость скоростных моделей, ограниченность скважинного контроля, неоднородность геологических условий и недостаток сопоставимых количественных оценок препятствуют прямому переносу результатов между месторождениями. Перспективная задача состоит в создании проверяемого сквозного процесса, объединяющего физически обоснованные модели, алгоритмы обработки данных, явное представление неопределённости и экспертный контроль решений по траектории.

Ключевые слова: трёхмерная сейсмика; проектирование скважин; геонавигация; сейсмическая инверсия; каротаж в процессе бурения; глубокое электромагнитное зондирование; неопределённость; обновление геологической модели

1. Значение трёхмерной сейсмической поддержки для проектирования скважин

Проектирование скважины в сложной залежи представляет собой задачу согласования геологической модели с физически реализуемой траекторией. Предбурочная интерпретация должна определить положение структурных границ, перспективных объектов и

предполагаемых продуктивных интервалов, тогда как последующее бурение проверяет эти предположения и одновременно создаёт новые данные. Поэтому трёхмерная сейсмическая поддержка имеет смысл не как самостоятельная визуализация объёма, а как элемент рабочего процесса, связывающего интерпретацию, планирование ствола и принятие решений во время проходки.

Интегрированный процесс трёхмерной визуализации включает выбор и кондиционирование данных, характеристику структур и фаций, оценку перспективных объектов и планирование ствола скважины. Такая последовательность переводит интерпретацию из режима просмотра отдельных изображений в режим последовательного уточнения геологической гипотезы и её проверки проектными решениями. В этом отношении практическая ценность сейсмике определяется тем, насколько непрерывно она соединяется с моделью залежи и данными бурения, а не только качеством исходного изображения [1].

На предбурочном этапе трёхмерные данные задают пространственную рамку для выбора целей и оценки возможных структурных рисков. На этапе проектирования траектории эта рамка используется совместно с ограничениями по буримости, положением соседних формаций и ожидаемой геометрией продуктивного интервала. Во время бурения сейсмическая модель становится исходной гипотезой, которую необходимо сопоставлять с измерениями свойств пласта, околобитовыми датчиками и каротажем в процессе бурения. В классическом описании геонавигации такое объединение управляемых буровых систем, измерений пласта, моделирования каротажных откликов и трёхмерного картирования необходимо для согласования геологии и траектории [2].

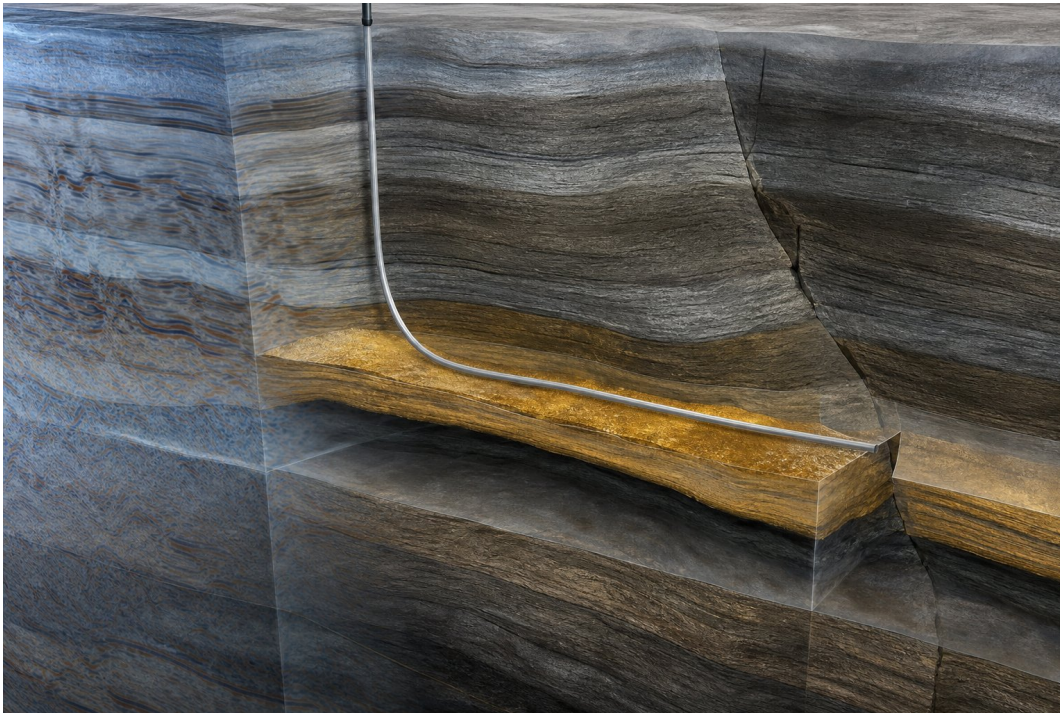


Рисунок 2. На предбурочном этапе трёхмерные данные задают пространственную рамку для выбора целей и оценки возможных структурных рисков. На этапе проектирования траектории эта рамка используется совместно с ограничениями по буримости, положением соседних формаций и ожидаемой геометрией продуктивного интервала. (AI-generated illustration)

Точность размещения ствола имеет одновременно геологическое и экономическое значение. Ошибка положения может уменьшить контакт с продуктивной частью пласта,

привести к пересечению нежелательных границ или потребовать корректирующего бокового ствола. Обзор методов оптимизации размещения скважин связывает точное планирование и отслеживание траектории с возможностью избежать дополнительных буровых работ и снизить суммарные затраты, особенно в условиях дорогого морского, глубоководного или удалённого бурения [3]. Однако этот эффект не следует трактовать как универсальный количественный результат: он зависит от строения залежи, качества модели, доступности измерений и ограничений конкретной операции.

Настоящий обзор охватывает три взаимосвязанных уровня: предбурочную трёхмерную интерпретацию и инверсию, интеграцию с оперативными измерениями при геонавигации и использование обновляемых моделей для выбора траектории. Основное внимание уделено не последовательному описанию публикаций, а сопоставлению функций данных, масштабов наблюдения, времени получения информации и степени влияния на решение по скважине.

2. Ключевые понятия и постановка проблемы

Трёхмерная сейсмическая модель в контексте проектирования скважин — это пространственное представление отражающих границ, структурных элементов, фаций и, при наличии достаточных оснований, распределения свойств коллектора. Она не является непосредственной копией геологической реальности: её положение и свойства зависят от обработки данных, скоростной модели, скважинных привязок и выбранного способа интерпретации. Трёхмерная визуализация позволяет анализировать вертикальные, временные или глубинные, пластовые и разломные срезы, выявляя геометрию резервуара, стратиграфическую архитектуру и пространственную изменчивость [1].

Сейсмическая инверсия преобразует сейсмический отклик в оценку параметров среды, например акустического импеданса или связанных с ним признаков литологии и пористости. Постстековая инверсия не представляет единый универсальный метод: разные подходы имеют различные предпосылки, относительные характеристики и области применимости. Поэтому для проектирования скважин результат инверсии следует рассматривать как зависимую от метода оценку свойств недр, а не как бесспорное измерение. Сравнение методов постстековой инверсии специально подчёркивает необходимость сопоставлять их методологические возможности и ограничения [4].

Геонавигация означает оперативную корректировку положения ствола с учётом геологических и структурных вариаций, которые могут быть не разрешены предбурочной сейсмикой или данными соседних скважин. В отличие от статической проектной траектории, геонавигационная модель актуализируется по мере поступления каротажных и электромагнитных измерений. Глубокое направленное измерение дополняет эту модель оценкой положения границ на некотором расстоянии от прибора, используя контрасты электрического сопротивления. Интеграция этих данных с 3D/4D-сеймикой позволяет связывать крупномасштабную структуру с локальным распределением пласта и флюидов [5].

Ключевая проблема заключается в управлении неопределённостью. Разрешение сейсмической, неоднозначность преобразования времени в глубину и недостаток скважинных контролей ограничивают точность положения подземных объектов. Даже при дополнении сейсмических данных скважинными и несейсмическими наблюдениями скоростная модель может сохранять неоднозначность, причём неопределённость обычно возрастает по мере удаления от точек контроля [6]. Поэтому предбурочная модель и актуализируемая модель во время бурения должны рассматриваться как последовательные состояния знания, а не как две независимые карты.

Таблица 1. Возможности и ограничения основных типов данных при проектировании скважин

Тип данных	Основная функция	Пространственный масштаб	Временная роль	Ключевое ограничение
3D-сейсмика	Картирование структуры, горизонтов, разломов и потенциальных объектов	Полевой и месторожденный	Преимущественно предбурочный	Зависимость глубинного положения от скоростной модели
Сейсмическая инверсия	Оценка свойств среды и характеристик коллектора	Межскважинный и локальный	Предбурочный или обновляемый	Зависимость результата от метода, априорных ограничений и качества данных
LWD и каротажные измерения	Уточнение свойств пласта вдоль фактического ствола	Околоскважинный	Оперативный	Ограниченная дальность и задержка передачи либо обработки
Глубокие направленные ЭМ-измерения	Выявление границ и флюидных контактов впереди или сбоку от ствола	Околоствольный с удалённым зондированием	Оперативный	Зависимость от контраста сопротивления и геологических условий
Обновляемая геомодель	Согласование предбурочных предположений и новых наблюдений	От локального до месторожденного	Итеративный	Неопределённость сохраняется и должна быть явно представлена

Таким образом, интеграция не сводится к механическому объединению файлов или визуальных слоёв. Её задача — сопоставить независимые наблюдения, определить расхождение между моделью и измерениями и передать это расхождение в решение по траектории. В системах поддержки решений неопределённость может представляться ансамблем реализаций геомодели, которые последовательно обновляются по данным каротажа во время бурения [7].

3. Основные направления исследований и технологические подходы

Исследования в области трёхмерной сейсмической поддержки образуют несколько функциональных направлений. Первое связано с извлечением геологической информации из сейсмического объёма: интерпретацией разломов, горизонтов и фаций, реконструкцией геометрии резервуара и оценкой свойств коллектора. Второе объединяет сейсмику с измерениями LWD, синтетическими каротажными откликами и глубоким электромагнитным зондированием. Третье ориентировано на автоматизацию интерпретации и фор-

мализацию выбора траектории с помощью машинного обучения и систем поддержки решений.

Инверсионные методы занимают промежуточное положение между визуальной интерпретацией и количественной характеристикой пласта. В исследовании мелководно-морского коллектора инверсия разреженных когерентных пиков по данным 3D-сеймики и каротажа использовалась для выявления литофаций, неоднородности, акустического импеданса, пористости и толщины песчаных интервалов. Такой результат показывает, как сейсмическая информация может быть преобразована в признаки, пригодные для выбора целей бурения, но не отменяет необходимости скважинной проверки и учёта локальной геологии [8].

Второе направление связано с переходом от статического изображения к обновляемой модели. В рабочем процессе геонавигации «впереди долота» поверхностная сейсмика сопоставляется с синтетической сейсмикой, рассчитанной по данным LWD. Нерегидное сопоставление позволяет оценить расхождение глубин и перенести соответствующее смещение на горизонты, разломы и геологические тела модели [9]. Тем самым предбурочная интерпретация не заменяется оперативными измерениями, а получает механизм локального уточнения.

Глубокие направленные электромагнитные методы расширяют область наблюдения за пределы непосредственно вскрытого стволом интервала. Для разработанного резистивиметрического LWD-инструмента описан расчёт расстояния до литологических границ и флюидных контактов по контрасту проводимости; радиус исследования значительно превышает дальность традиционных датчиков и в благоприятных условиях достигает десятков метров [10]. В более поздних рабочих процессах ультраглубокие азимутальные измерения использовались для удалённого картирования сопротивления и обновления локальной трёхмерной модели залежи [11].

Третье направление — автоматическая интерпретация. Распознавание разломов формулируется как попиксельная классификация областей разлома и неразлома с применением глубокой свёрточной нейронной сети. Такой подход способен ускорить выделение структурных границ, однако его результат зависит от качества разметки, репрезентативности обучающих данных и переносимости признаков между месторождениями [12]. Для преодоления дефицита размеченных данных предлагается строить реалистичные синтетические структурные модели со складками и разломами и использовать их для обучения сетей, которые затем применяются к полевым изображениям [13].

Машинное обучение используется не только для интерпретации, но и для выбора действий по траектории. Обзор интеллектуального бурения выделяет в качестве перспективных направлений объединение моделей, основанных на данных и физических принципах, обучение на малых выборках, явное моделирование неопределённости, интерпретируемость и переносимость алгоритмов [14]. В этой логике автоматизация должна рассматриваться как слой поддержки решения, а не как основание для устранения экспертного контроля.

Таблица 2. Функциональная матрица технологических подходов

Направление	Основная задача	Масштаб наблюдения	Время получения	Влияние на проектирование
3D-визуализация и интерпретация	Выделение структуры, фаций и перспективных объектов	Месторождение	До бурения	Выбор цели и исходной траектории

Направление	Основная задача	Масштаб наблюдения	Время получения	Влияние на проектирование
Сейсмическая инверсия	Оценка свойств и неоднородности коллектора	Межскважинный	До бурения или при обновлении	Уточнение качества цели и геологической модели
Интеграция LWD и поверхностной сейсмоки	Уточнение глубины и структуры впереди долота	Локальный и околоствольный	Реальное или близкое к реальному времени	Корректировка траектории
Глубокая направленная резистивиметрия	Определение границ и флюидных контактов	Удалённый околоствольный	Во время бурения	Проактивное удержание ствола в целевой зоне
Машинное обучение	Автоматизация интерпретации и классификации решений	Зависит от задачи и данных	От автономной обработки до оперативного режима	Ускорение анализа при сохранении контроля качества

4. Методы и доказательная база

Методы трёхмерной поддержки различаются не только физическим принципом, но и типом решения, которое они должны обеспечить. Визуализация и структурная интерпретация отвечают прежде всего на вопрос о геометрии объекта; инверсия связывает сейсмический отклик со свойствами среды; глубокое электромагнитное зондирование помогает определить положение границ относительно ствола; обновление модели объединяет наблюдения в последовательную процедуру принятия решений.

Визуализационные методы используют произвольные вертикальные, временные или глубинные, пластовые и разломные срезы. Выравнивание объёма, восстановление структуры, прозрачность, совместный рендеринг, анализ атрибутов и выделение атрибутивных тел поддерживают реконструкцию палеоструктуры, оценку связности и анализ перспективных объектов [1]. Сильной стороной этой группы является пространственная целостность представления; ограничением — зависимостью интерпретации от качества исходного сигнала, динамического диапазона, отношения сигнал/шум и визуальных настроек.

Постстековая инверсия применяется для получения оценок свойств недр из сейсмических данных. Её доказательная база часто включает методологические сравнения и отдельные примеры применения, но не всегда содержит единые количественные критерии, которые позволяли бы ранжировать методы вне конкретной геологической обстановки. Поэтому результаты инверсии должны сопоставляться с каротажем, геологическими предположениями и, по возможности, промысловыми наблюдениями [4].

Глубокие направленные электромагнитные измерения имеют иную функцию: они дают локальную информацию о границах и контрастах сопротивления в направлении, значимом для движения ствола. В полевых испытаниях описано определение расстояния до границ коллектора и флюидных контактов в нескольких горизонтальных скважинах; испытания более чем на 10 скважинах на Норвежском континентальном шельфе продемонстрировали использование технологии для проактивной геонавигации и характеристики коллектора [10][15]. Эти результаты имеют более непосредственную связь с оператив-

ным решением, чем чисто синтетические эксперименты, но остаются зависимыми от контраста сопротивления и условий конкретного объекта.

В сложной геологии трёхмерная инверсия может быть предпочтительнее одномерной, если пласты круто падают, прерываются подсейсмическими разломами или имеют выраженную боковую неоднородность. В таких условиях одномерное приближение теряет точность, тогда как 3D- и 1D-инверсии в реальном времени применялись для выявления неоднородных фронтов воды и улучшения картирования флюидов и структуры [16]. Это не означает, что трёхмерная инверсия устраняет неопределённость: она меняет пространственную постановку задачи и должна быть проверена по независимым данным.

Обновление модели представляет собой наиболее явно интегрированный класс методов. В системе поддержки решений неопределённость задаётся ансамблем геологических реализаций, а ансамблевый фильтр Калмана последовательно корректирует их по данным каротажа во время бурения [7]. В рабочем процессе с интеграцией LWD и поверхностной сейсмики актуализация дополнительно использует сопоставление синтетического и фактического откликов. Такой подход превращает неопределённость из скрытого недостатка модели в параметр, который может учитываться при выборе между продолжением бурения, изменением направления и остановкой.

Таблица 3. Метод, входные данные, решаемая задача, проверка и ограничение

Метод	Входные данные	Решаемая задача	Форма проверки	Ограничение
3D-визуализация	Сейсмические объёмы и атрибуты	Структурная и стратиграфическая интерпретация	Сопоставление с геологическими и скважинными данными	Зависимость от качества изображения и интерпретатора
Постстековая инверсия	Сейсмические данные и априорные ограничения	Оценка свойств среды и качества коллектора	Сравнение методов, каротаж и промысловые наблюдения	Нет универсального рейтинга применимости
Глубокая резистивиметрия	Азимутальные ЭМ-измерения и модель сопротивления	Расстояние до границ и флюидных контактов	Полевые скважинные испытания	Зависимость от контраста проводимости
Интеграция LWD и сейсмики	Поверхностная сейсмика, синтетические и фактические LWD-отклики	Уточнение структуры впереди долота	Нерегидное сопоставление и проверка по скважинным данным	Задержка, масштабная несогласованность и неоднозначность глубины
Ансамблевое обновление	Набор геомodelей и новые каротажные измерения	Управление неопределённостью при выборе действия	Синтетические замкнутые эксперименты и полевые сценарии	Зависимость от качества ансамбля и физической правдоподобности моделей

Доказательная база в рассматриваемой области неоднородна. Она включает синтетические эксперименты, методологические сравнения, промысловые примеры, скважинную верификацию и результаты работы в реальном времени. Синтетические эксперименты

полезны для проверки алгоритма при контролируемых условиях, но не показывают полностью, как метод будет работать при ошибочной геологической гипотезе. Промысловые примеры демонстрируют реализуемость и связь с операционным решением, однако обычно относятся к ограниченному числу месторождений. Наиболее убедительными являются случаи, где прогноз сопоставлен с последующими наблюдениями в скважинах или с независимыми промысловыми показателями.

5. Синтез результатов и ключевые дискуссии

Сопоставление исследований показывает, что эффект трёхмерной поддержки проявляется на трёх уровнях: в уточнении геологической модели, в повышении точности размещения ствола и в изменении производственно-экономических результатов. Эти уровни связаны, но не эквивалентны. Более детальная модель может улучшить интерпретацию, однако её влияние на добычу или стоимость должно быть подтверждено отдельным анализом траектории, разработки и ограничений бурения.

На уровне геологической модели наиболее убедительны примеры, где сейсмические наблюдения проверялись независимыми данными. В исследовании Гулфакса перемещения фронта воды, предсказанные по данным 4D-сейсмического мониторинга, были подтверждены последующими наблюдениями в скважинах. Интерпретации дренирования в целом согласовывались с традиционным инженерным анализом и локально уточняли понимание процессов разработки [17]. Этот пример показывает, что временная сейсмика особенно ценна там, где пространственную модель необходимо дополнить динамической информацией о состоянии залежи.

На уровне размещения ствола добавленная ценность возникает, когда измерения позволяют обнаружить границу до того, как она будет пересечена. В полевых применениях глубокая резистивиметрия обеспечивала оценку границ коллектора и флюидных контактов, а раннее обнаружение разломов и границ связывалось с уменьшением потребности в дорогостоящем бурении боковых стволов [10][18]. В тонких пластах интегрированный подход позволяет удерживать ствол в наиболее продуктивной зоне при сохранении заданного расстояния от соседних формаций; максимальный контакт с такой зоной связывается с улучшением добычи и эффективности дренирования [19][18].

Экономические результаты зависят от того, как геологическая информация включена в целевую функцию и какие ограничения заданы для траектории. В трёхмерной неоднородной модели наклонной антиклинали с тонкой нефтяной оторочкой оптимизация траектории повысила чистую приведённую стоимость скважины, но направление экономически оптимальной траектории менялось в зависимости от предположений о судьбе газа: при его утилизации траектория направлялась от газовой шапки, а при продаже газа — к ней [20]. Следовательно, эффективность размещения не может оцениваться независимо от сценария разработки и ценности различных флюидов.

Сходный вывод следует из оптимизации горизонтальных скважин. Сравнение с традиционными вертикальными скважинами показывает улучшение экономической прибыли и накопленной добычи в рассмотренных моделях, тогда как распределение скважин определяется одновременно межскважинным взаимодействием и неоднородностью проницаемости [21][22]. Это результат моделирования и оптимизации, поэтому его нельзя автоматически переносить на любую залежь. Он, однако, показывает, что сейсмическая модель становится практически значимой только после включения в многокритериальную задачу размещения и эксплуатации.

Одним из центральных противоречий остаётся компромисс между глубиной исследования и оперативностью измерений. Поверхностная 3D-сейсмика охватывает большой объём и задаёт региональный контекст, но может иметь неоднозначное положение границ между скважинами. Глубокие электромагнитные измерения дают более локальный и

непосредственно применимый сигнал, но зависят от физического контраста и ограничены областью вокруг ствола. Поэтому глубокое зондирование не заменяет сейсмику, а уточняет её в наиболее критический момент — при выборе направления дальнейшего бурения.

Другой спорный вопрос связан с автоматизацией. Алгоритмы глубокого обучения могут ускорять выделение разломов и уменьшать трудоёмкость интерпретации, а системы поддержки решений — сравнивать траектории на ансамбле геологических реализаций. Но автоматическая обработка многомасштабных и разнотипных данных остаётся нерешённой задачей интеллектуального бурения [14]. Кроме того, высокая точность на одном наборе данных не гарантирует переносимость на другой объект: меняются сейсмический сигнал, масштаб неоднородности, качество разметки и характер контактов. Поэтому экспертный контроль необходим не только для окончательного выбора траектории, но и для оценки физической правдоподобности входных данных и результата модели.

Таблица 4. Критерии эффективности трёхмерной поддержки и связанные ограничения

Уровень эффекта	Положительный результат	Тип подтверждения	Условие применимости	Ограничение интерпретации
Геологическая модель	Уточнение структуры, фаций, флюидов и неоднородности	Скважинные данные и независимые наблюдения	Согласование сейсмических и петрофизических признаков	Неоднозначность глубины и масштаба
Размещение ствола	Удержание траектории в продуктивной зоне и раннее обнаружение границ	Полевые испытания и фактическая траектория	Достаточный контраст и своевременная передача данных	Локальность и зависимость от геологических условий
Экономика	Снижение затрат, рост контакта с пластом или добычи	Оптимизация, промысловый результат или сценарный анализ	Корректная целевая функция и заданные ограничения	Непереносимость результата без калибровки
Автоматизация	Ускорение интерпретации и сравнения решений	Тестирование на синтетических и полевых данных	Репрезентативное обучение и контроль качества	Смещение данных и ограниченная объяснимость

6. Ограничения, исследовательские пробелы и перспективы

Главное ограничение трёхмерной поддержки связано с тем, что детальность изображения не равна точности геологического знания. Для надёжного изображения в сложных условиях требуются скоростные модели высокого разрешения, однако они остаются неоднозначными даже после включения скважинных и других несейсмических наблюдений. Ошибка возрастает вне зоны скважинного контроля и может повлиять не только на положение горизонта, но и на оценку истинной глубины подземных объектов [6].

Второе ограничение — неполнота сопоставимых количественных сравнений методов. Например, методологическое сравнение постстековой инверсии указывает на относительные характеристики и применимость подходов, но представленный реферат не содержит

количественных результатов, описания набора данных или явного рейтинга эффективности [4]. Это препятствует формулированию универсального правила выбора метода и усиливает значение контекстной валидации на конкретном месторождении.

Третье ограничение возникает при автоматизации. Многомасштабные сейсмические объёмы, каротажные записи, электромагнитные измерения и траекторные данные имеют различную размерность, частоту обновления и уровень неопределённости. Их автоматическое объединение остаётся одной из нерешённых задач интеллектуального бурения [14]. Перспективные алгоритмы должны не только выдавать классификацию или рекомендацию, но и показывать, какие наблюдения определили результат, насколько он устойчив к изменению модели и в каких условиях его применение становится ненадёжным.

При проектировании и мониторинге скважин необходимо учитывать также риск индуцированной сейсмичности. Для подземных промышленных операций сохраняются нерешённые задачи мониторинга, различения индуцированных и природных событий и управления связанными рисками; фрагментарная документация ограничивает понимание физических механизмов и возможностей снижения опасности [23]. В отдельных моделях показано, что пороупругие напряжения могут активировать гидравлически изолированные или малопроницаемые разломы без непосредственного повышения порового давления в них [24]. Поэтому геологическая модель для проектирования должна учитывать не только качество продуктивного интервала, но и структурные элементы, потенциально значимые для безопасности.

Исследовательский пробел имеет конкретную сквозную форму. Отдельные элементы процесса уже получили методическое и полевое обоснование: 3D-сейсмика поддерживает структурное картирование, глубокие измерения позволяют выявлять удалённые границы, а ансамблевые системы обновляют модель по данным бурения. Однако недостаточно разработан проверяемый механизм, который связывал бы эти элементы в единую процедуру: от предбурочной сейсмической модели через оперативные наблюдения и явное представление неопределённости к изменению траектории и последующей оценке результата.

Перспективными направлениями являются физически направляемые модели, обучение на малых и неоднородных выборках, ансамблевое представление неопределённости, интерпретируемые алгоритмы и проверка переносимости между месторождениями. Особое значение имеет согласование критериев валидации: точность структурной интерпретации, ошибка положения границы, качество размещения ствола и экономический эффект должны оцениваться отдельно, но в рамках одного рабочего процесса. Такой подход позволит отличать улучшение изображения от реального улучшения решения по скважине.

Заключение

Трёхмерная сейсмическая поддержка проектирования скважин представляет собой не отдельную технологию визуализации, а систему последовательного согласования геологической модели, траектории и оперативных измерений. Предбурочная сейсмика обеспечивает пространственный контекст, инверсия связывает отражательный образ со свойствами среды, а LWD и глубокие электромагнитные измерения уточняют положение границ вблизи движущегося ствола.

Наиболее устойчивый результат наблюдается там, где данные интегрируются с ясным назначением: сейсмика используется для картирования и построения исходной модели, оперативные измерения — для локального уточнения, а обновляемая модель — для выбора действия по траектории. Полевые примеры подтверждают возможность улучшения

размещения ствола и характеристики коллектора, тогда как экономические преимущества зависят от конкретной геологии, сценария разработки и заданных ограничений.

Хорошо обоснованным является потенциал интеграции разномасштабных данных и явного учёта неопределённости. Условно поддержанными остаются переносимость автоматических алгоритмов и универсальность количественных преимуществ отдельных методов. Наименее решённой является задача создания сквозного, проверяемого и интерпретируемого процесса, в котором трёхмерная сейсмика, оперативные измерения, обновление модели и решение по траектории образуют единую систему при сохранении контроля над геологическими и сейсмическими рисками.

Список литературы

1. Gao D. 3D seismic volume visualization and interpretation: An integrated workflow with case studies. *Geophysics*. 2008. SCID: 54.1/gr8e3538.
2. Lesso W. G., Kashikar S. The Principles and Procedures of Geosteering. 1996. SCID: 54.1/c3bu3vch.
3. Ayodele O. R. Optimization of Well Placement and/or Borehole Trajectory for Minimum Drilling Cost (A Critical Review of Field Case Studies). *Canadian International Petroleum Conference*. 2004. SCID: 54.1/spktquwq.
4. Russell B., Hampson D. Comparison of poststack seismic inversion methods. 1991. SCID: 54.1/zty5jklf2.
5. Hermanrud K., Antonsen F., Teixeira De Oliveira M. E., Petersen S. A., Constable M. V. Future Geosteering and Well Placement Solutions from an Operator Perspective. 2019. SCID: 54.1/hd83hpcy.
6. Osypov K. S., Yang Y., Fournier A., Ivanova N., Bachrach R., Yarman C. E., You Y., Nichols D., Woodward M. J. Model-uncertainty quantification in seismic tomography: method and applications. *Geophysical Prospecting*. 2013. SCID: 54.1/rqgxnvwc.
7. Alyaev S., Suter E., Bratvold R. B., Hong A., Luo X., Fossum K. A decision support system for multi-target geosteering. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019. SCID: 54.1/7755yt8f.
8. Ashraf U., Zhang H., Anees A., Ali M. S., Zhang X., Abbasi S. S., Mangi H. N. Controls on Reservoir Heterogeneity of a Shallow-Marine Reservoir in Sawan Gas Field, SE Pakistan: Implications for Reservoir Quality Prediction Using Acoustic Impedance Inversion. *Water*. 2020. SCID: 54.1/6a2ykzed.
9. Arata F., Mele M., Tarchiani C., Tosi G., Chinellato F., Nickel M., Athmer W., Salim D., Dahl G. V. Look Ahead Geosteering via Real Time Integration of Logging While Drilling Measurements with Surface Seismic. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 2017. SCID: 54.1/krscuks2.
10. Seydoux J., Tabanou J. R., Ortenzi L., Denichou J.-M., De Laet Y., Omeragić D., Iversen M., Fejerskov M. A Deep-Resistivity Logging-While-Drilling Device for Proactive Geosteering. *Offshore Technology Conference*. 2003. SCID: 54.1/kj3hqtax.
11. Arata F., Gangemi G., Mele M., Tagliamonte R. L., Tarchiani C., Chinellato F., Denichou J. M., Maggs D. High-Resolution Reservoir Mapping: From Ultradeep Geosteering Tools to Real-Time Updating of Reservoir Models. 2016. SCID: 54.1/nkzztbfw.
12. An Y., Guo J., Ye Q., Childs C. J., Walsh J. J., Dong R. Deep convolutional neural network for automatic fault recognition from 3D seismic datasets. *Computers & Geosciences*. 2021. SCID: 54.1/wv45nnrq.
13. Wu X., Geng Z., Shi Y., Pham N. H., Fomel S. B., Caumon G. Building realistic structure models to train convolutional neural networks for seismic structural interpretation. *Geophysics*. 2019. SCID: 54.1/5bz3qpw8.
14. Li G., Song X., Tian S., Zhu Z. Intelligent Drilling and Completion: A Review. *Engineering*. 2022. SCID: 54.1/hcrnj2z.
15. Constable M. V., Antonsen F., Olsen P. A., Myhr G. M., Nygård A., Krogh M., Spotkoeff

- M., Mirto E., Dupuis C., Viandante M. Improving Well Placement and Reservoir Characterization with Deep Directional Resistivity Measurements. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 2012. SCID: 54.1/az3fgzeq.
16. Singh M., Thakur P. D., Al Baloushi M. N. M., Al Saadi H. A., Al Mansoori M. M., Al Mesafri A. S., Al Arfi S., Pandey V. K., Al Shalabi A., Maire F. Real-Time 3D Ultra Deep Directional Electromagnetic LWD Inversions: An Innovative Approach for Geosteering and Geomapping Water Slumping Movement Around Sub-Seismic Fault, Onshore Abu Dhabi. 2021. SCID: 54.1/6nvxz9hr.
 17. Landrø M., Solheim O. A., Hilde E., Ekren B. O., Strønen L. K. The Gullfaks 4D seismic study. *Petroleum Geoscience*. 1999. SCID: 54.1/6gqwgs84.
 18. Bittar M. S., Aki A. Advancement and economic benefit of geosteering and well-placement technology. *The Leading Edge*. 2015. SCID: 54.1/wdvcrdzp.
 19. Bittar M. S., Chemali R. E., Pitcher J., Cook R. C., Knutson C. Real Time Proactive Optimal Well Placement using Geosignal and Deep Images. *Offshore Technology Conference*. 2010. SCID: 54.1/gs6xaqps.
 20. Vlemmix S., Joosten G. J. P., Brouwer D. R., Jansen J.-D.. -D. J. Adjoint-Based Well Trajectory Optimization in a Thin Oil Rim. 2009. SCID: 54.1/h2qtrxge.
 21. Lee J. W., Park C., Kang J. M., Jeong C. Horizontal Well Design Incorporated with Interwell Interference, Drilling Location, and Trajectory for the Recovery Optimization. 2009. SCID: 54.1/a99s3ay6.
 22. Lee J. W., Park C., Kang J. M., Jeong C. H. Horizontal Well Design Incorporated with Interwell Interference, Drilling Location, and Trajectory for the Recovery Optimization. *SPE/EAGE Reservoir Characterization and Simulation Conference*. 2009. SCID: 54.1/ycz5vj64.
 23. Grigoli F., Cesca S., Priolo E., Rinaldi A. P., Clinton J., Stabile T. A., Dost B., García-Fernández M., Wiemer S., Dahm T. Current challenges in monitoring, discrimination, and management of induced seismicity related to underground industrial activities: A European perspective. *Reviews of Geophysics*. 2017. SCID: 54.1/mccyu28g.
 24. Chang K. W., Segall P. E. Injection-induced seismicity on basement faults including poroelastic stressing. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*. 2016. SCID: 54.1/r564fjsu.