www.geors.ru

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

DOI: https://doi.org/10.18599/grs.2026.3.15 УДК 550.3

Автоматизированное прослеживание сейсмических отражающих горизонтов по разреженной экспертной разметке методами глубокого обучения: апробация на клиноформных ачимовских отложениях севера Западной Сибири

Д.А. Богоедов[1,3], Н.С. Безухов[1], А.И. Павлюк[1], П.А. Авдеев[1], А.К. Базанов[1], И.И. Ефремов[1], Р.Р. Шакиров[2], М.Ю. Шаповалов[2]*

[1]ООО «ГРИДПОИНТ ДАЙНАМИКС», Москва, Россия
[2]ООО «НОВАТЭК НТЦ», Тюмень, Россия
[3]Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

Структурная корреляция отражающих горизонтов остаётся одной из наиболее трудоёмких операций интерпретации сейсморазведки 3D, особенно в клиноформных неокомских разрезах Западной Сибири, где целевые отражения характеризуются изменчивой динамикой, выклиниванием и осложнены разрывными нарушениями. Прослеживание сейсмического горизонта является последовательной задачей, поэтому в работе оно формализовано как марковский процесс принятия решений и решено методом обучения с подкреплением. Агент, наблюдая локальный сейсмический контекст и историю уже проставленных пиков, на каждом шаге выбирает смещение горизонта на соседней трассе, а функция награды кодирует геофизические критерии: сходство волновой формы с опорным отражением по нормированной взаимной корреляции, фазовую согласованность, гладкость и ослабление штрафа за негладкость в зонах разрывных нарушений. Метод реализован в виде двухэтапной схемы: на первом этапе агент выполняет корреляцию по системе опорных сечений с задаваемым шагом, формируя сеть опорных точек горизонта, на втором – уплотняет результат до сплошной поверхности по всему объёму. Агент обучен в синтетической среде: сначала имитацией известных эталонных траекторий, затем дообучением с подкреплением; на вход подаётся разметка на одном или двух пересекающихся сечениях, а в сложных зонах вводится доразметка. Апробация на ачимовских отложениях одного из месторождений севера Западной Сибири показала согласованность с ручной корреляцией в пределах 10 мс на выдержанных интервалах. Обсуждаются ограничения и направления развития.

Ключевые слова: отражающий горизонт, сейсмическая корреляция, обучение с подкреплением, марковский процесс принятия решений, синтетические данные, клиноформа, ачимовская толща, Западная Сибирь

Для цитирования: Богоедов Д.А., Безухов Н.С., Павлюк А.И., Авдеев П.А., Базанов А.К., Ефремов И.И., Шакиров Р.Р., Шаповалов М.Ю. (2026). Автоматизированное прослеживание сейсмических отражающих горизонтов по разреженной экспертной разметке методами глубокого обучения: апробация на клиноформных ачимовских отложениях севера Западной Сибири. *Георесурсы,* 28(3), с. 107–116. https://doi.org/10.18599/grs.2026.3.15

Введение

Прослеживание (корреляция) отражающих горизонтов по объёму сейсмических данных 3D – базовая операция структурной и сейсмостратиграфической интерпретации, определяющая каркас геологической модели и качество последующих построений. В условиях клиноформного строения неокома Западной Сибири эта операция особенно трудоёмка: целевые отражения ачимовской толщи отличаются латеральной изменчивостью амплитуд и фаз, эффектами проградации и выклинивания клиноформ, а также осложнены малоамплитудными разрывными нарушениями (Наумов, 1977; Нежданов и др., 2000). По оценкам специалистов-интерпретаторов, на ручную корреляцию полного набора целевых горизонтов крупной площади затрачивается до 10–15 рабочих дней, поэтому сокращение объёма ручной коррекции представляет практический интерес.

Классические алгоритмы автоматического прослеживания, основанные на отслеживании экстремума, фазы

* Ответственный автор: Даниил Александрович Богоедов
e-mail: d.bogoedov@geoplat.com

© 2026 Коллектив авторов
Статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution (CC BY) License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

или локальной волновой корреляции, а также методы построения объёмов относительного геологического времени (Stark, 2004; Wu, Hale, 2015), сохраняют устойчивость лишь при допущении локальной гладкости и непрерывности горизонта между опорными точками. В зонах резкой смены динамики волнового поля, у разрывных нарушений и на участках выклинивания такие методы теряют надёжность, что вынуждает специалиста проводить обширную ручную доработку результатов.

За последнее десятилетие для задач интерпретации активно развиваются методы глубокого обучения. Архитектуры кодер–декодер показали эффективность при полуавтоматическом прослеживании горизонтов (Wu et al., 2019; Tschannen et al., 2020) и при формировании объёмов горизонтов из 3D-данных (Abubakar et al., 2024); предложены свёрточные сети для трекинга горизонтов с обучением на малой доле объёма (Yang, Sun, 2020), подходы к устойчивому пикингу при ограниченных обучающих выборках (Mattos et al., 2021), мультизадачные схемы с последовательностными ограничениями (Luo et al., 2023) и методы трёхмерного трекинга на основе глобальной диффузии (Su et al., 2023). Базовым строительным блоком большинства решений выступает сеть семантической сегментации типа U-Net (Ronneberger et al., 2015). Вместе с тем ряд подходов сохраняет зависимость от больших размеченных выборок реальных данных и/или требует плотной априорной разметки, что ограничивает их применимость на новых площадях; кроме того, потрассная классификация или сегментация не учитывают явным образом последовательную природу прослеживания и подвержены накоплению ошибки – дрейфу и перескоку фазы (cycle skipping) при удалении от опорных точек.

Между тем прослеживание горизонта представляется как последовательный процесс принятия решений: положение пика на очередной трассе определяется накопленным контекстом, а не только локальным признаком в данной точке. Классическими аналогами такой постановки служат динамическое программирование и алгоритм Витерби, оптимизирующие интегральную стоимость траектории. Развитием этой идеи является обучение с подкреплением, в котором задача формализуется как марковский процесс принятия решений, а оптимальная стратегия (политика) обучается из данных по критерию максимума накопленной награды (Sutton, Barto, 2018). Применительно к данным сейсмики такая постановка показала способность преодолевать зоны резкой латеральной изменчивости и аномальные трассы за счёт учёта накопленного вознаграждения вдоль траектории, а не выбора положения горизонта только по локальному критерию на отдельной трассе (Sheng, 2023). В отличие от методов с заранее фиксированной функцией стоимости, обучение с подкреплением позволяет настроить функцию ценности под целевую геологическую обстановку.

В настоящей работе прослеживание горизонтов решается методом обучения с подкреплением при минимальном объёме исходной экспертной разметки (одно-два опорных сечения), а обучение агента проводится исключительно в синтетической среде, что обеспечивает воспроизводимость и снижает зависимость от размеченных данных конкретной площади. Новизна работы состоит в сочетании (1) формализации прослеживания как марковского процесса принятия решений с геофизически содержательной функцией награды, (2) двухэтапной схемы “политика корреляции по сечениям и последующее трёхмерное уплотнение” и (3) обучения в синтетической среде прямого полноволнового моделирования с предварительным имитационным обучением по эталонным траекториям и механизмом доразметки сложных зон. Цель исследования – разработка и апробация такого подхода на клиноформных ачимовских отложениях. Задачи: формализация постановки и архитектуры агента; организация синтетической среды и обучения; проведение серии экспериментов с различной конфигурацией входных сечений; оценка согласованности результата с эталонной ручной корреляцией и анализ ограничений.

Геологический объект и исходные данные

Объектом апробации служат ачимовские и нижнемеловые (берриас-валанжинские) отражающие горизонты одного из месторождений севера Западной Сибири. Ачимовская толща относится к фондоформной части неокомского клиноформного комплекса и сложена относительно глубоководными песчано-алевритовыми телами, прилегающими к подошве баженовского горизонта (Наумов, 1977; Нежданов и др., 2000). Для разреза характерны сигмовидное строение клиноформ, проградационное наращивание, латеральная смена литологии и выклинивание песчаных тел, что формирует сложную, изменчивую волновую картину; ачимовские залежи относятся к сложнопостроенным, а связанные с ними запасы – к трудноизвлекаемым.

Исходные данные представлены амплитудным кубом сейсморазведки 3D (внутренний формат Pro-S) с шагом бинирования 25×25 м и набором целевых отражающих горизонтов. В качестве эталона для оценки качества использована ручная корреляция, выполненная интерпретатором по всему объёму. Обзорная схема площади и стратиграфическая приуроченность целевых горизонтов приведены на рис. 1.

Материалы и методы

Постановка задачи

Амплитудный куб сейсморазведки 3D обозначим $V(x, y, \tau)$, где x и y – пространственные координаты трассы, а τ – отсчёт двойного времени. Отражающий горизонт задаётся поверхностью $\tau = H(x,y)$. Экспертная интерпретация известна только на множестве опорных трасс, расположенных на одном или нескольких опорных сечениях. Требуется оценить $H(x,y)$ на всей площади так, чтобы полученная поверхность сохраняла приуроченность к выбранному отражению, не перескакивала на соседнюю фазу и допускала разрыв по времени в местах тектонических нарушений.

Прослеживание выполняется последовательно вдоль сейсмического сечения. На шаге k алгоритм переходит от текущей трассы к соседней и определяет изменение временной координаты горизонта $\Delta\tau(k)$. Индекс k далее обозначает шаг прослеживания и не совпадает с временной координатой τ. Такая запись устраняет неоднозначность между временем в сейсмическом кубе и временем шага в марковском процессе.

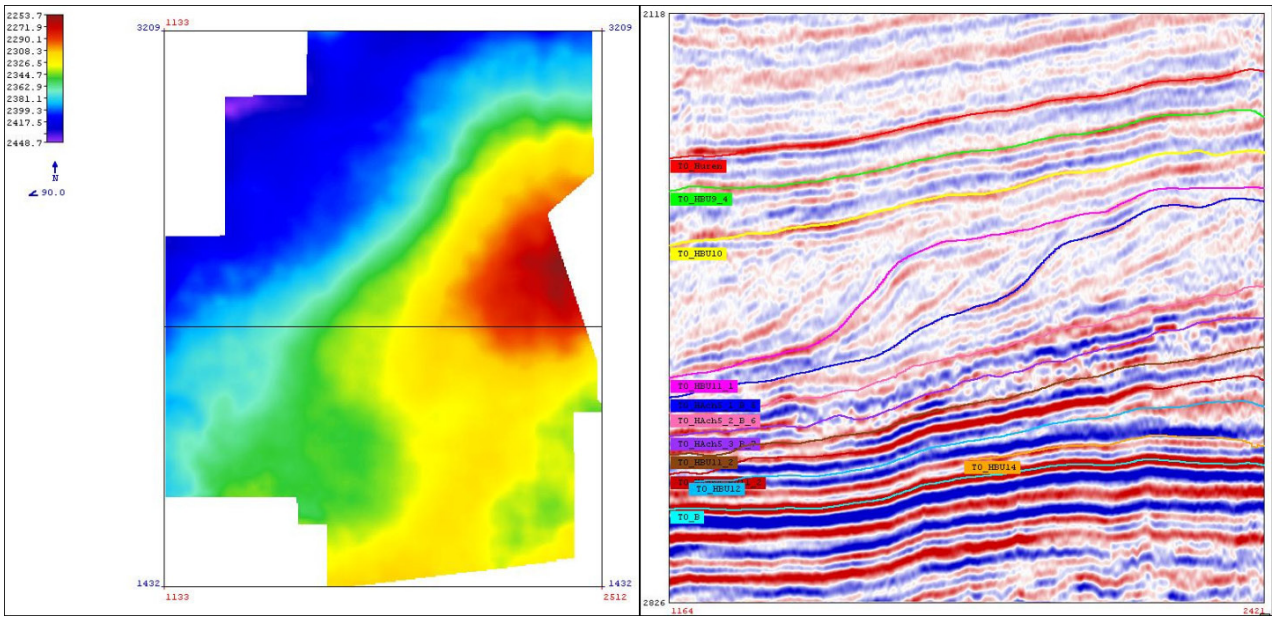

Рис. 1. Обзорная схема района исследования: контур площади сейсморазведки 3D, положение опорных сечений и стратиграфическая приуроченность целевых отражающих горизонтов

Марковский процесс принятия решений

Задача описывается марковским процессом принятия решений M = (S, A, P, R, γ), где S – множество состояний, характеризующих локальную сейсмическую запись, опорную разметку и историю прослеживания; A – множество допустимых действий, включающее смещения горизонта на соседней трассе и завершение прослеживания; P – правило перехода между состояниями при выполнении выбранного действия; R – функция награды, оценивающая результат действия; γ – коэффициент дисконтирования, определяющий вклад наград последующих шагов в накопленную награду. В рассматриваемой задаче переход между состояниями детерминирован. Состояние s(k) формируется из локального окна размером 33 трассы × 65 временных отсчётов, центрированного на текущем положении горизонта. При шаге трасс 25 м и дискретизации 2 мс окно охватывает 800 м по латерали и 128 мс по времени. Вход содержит пять каналов: нормированную амплитуду; синус и косинус мгновенной фазы; локальный наклон отражений; бинарную маску экспертных опорных точек. Последовательностная часть состояния включает восемь предыдущих смещений горизонта и соответствующие значения корреляционного сходства с опорной волновой формой.

Действие $a(k) = \Delta\tau(k)$ задаёт смещение временной координаты горизонта на соседней трассе. Используется дискретное пространство из 14 действий: 13 смещений $\Delta n \in \{-8, -6, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8\}$ временных отсчётов, что при дискретизации 2 мс соответствует диапазону от −16 до +16 мс, и отдельное действие завершения прослеживания. Последнее обучается на краях модели, в зонах выклинивания и на фрагментах без устойчивого отражения. Переход P детерминирован: после выбора $\Delta\tau(k)$ фронт прослеживания смещается на одну трассу, а новое положение горизонта принимается равным $\tau_{k+1} = \tau_k + \Delta\tau_k$. Эпизод завершается при выборе действия остановки либо при достижении границы сечения.

Функция награды связывает решение агента с измеримыми признаками прослеживаемого отражения. Для шага k она записывается в виде:

$$r(k) = w_C \cdot C(k) + w_P \cdot P(k) + w_A \cdot A(k) - w_S \cdot (1 - F(k)) \cdot S(k) - w_D \cdot D(k).$$

Корреляционный член C(k) рассчитывается как нормированная взаимная корреляция 17-отсчётного фрагмента волновой формы с медианной опорной формой, построенной по пяти ближайшим размеченным трассам. Фазовый член P(k) определяется как $(1 + \cos\Delta\varphi)/2$, амплитудный член A(k) – как $\exp\left(-\left|\ln\left(\frac{|u(k)|}{|u_{оп}|}\right)\right|\right)$, где u обозначает амплитуду. Штраф S(k) равен нормированной абсолютной второй разности траектории и ограничивается единицей. Индикатор разрывности F(k) вычисляется как единица минус локальная когерентность в окне 5 × 9 отсчётов; при F(k) > 0,6 штраф за негладкость ослабляется. Коэффициенты фиксированы на уровне $w_C = 1{,}00$, $w_P = 0{,}35$, $w_A = 0{,}15$, $w_S = 0{,}25$ и $w_D = 0{,}80$. Они выбраны перебором 180 комбинаций на независимой синтетической валидационной выборке по минимуму медианной абсолютной ошибки.

Для дискретного пространства действий аппроксимируется функция $Q\theta(s, a)$, а политика определяется как $\pi\theta(s) = \arg\max_a Q\theta(s, a)$. Локальное окно обрабатывается свёрточным энкодером: входная свёртка 5 × 5 с 32 каналами, затем три остаточных блока с 32, 64 и 128 каналами; во втором и третьем блоках пространственный размер уменьшается свёрткой с шагом 2. После глобального усреднения формируется 128-мерный вектор признаков. История восьми предыдущих шагов обрабатывается однослойным GRU с 64 скрытыми состояниями. Оба представления объединяются и подаются в полносвязный слой размерности 128. Выходной блок с раздельной оценкой ценности состояния и преимуществ действий формирует

одно значение состояния и 14 преимуществ действий, из которых рассчитываются Q-значения. Модель содержит 1,08 млн обучаемых параметров.

Двухэтапная схема прослеживания

Подход реализован в виде двухэтапной схемы (рис. 2). На первом этапе обученная политика выполняет корреляцию по системе опорных сечений: агент стартует из центрального пересечения и распространяет горизонт наружу по сечениям с задаваемым шагом (как правило, 50–100 линий), формируя разреженную сеть якорных точек. За счёт этого окупается последовательное планирование – устойчивое прохождение зон смены динамики поля и разрывных нарушений. Результатом первого этапа является разреженная система отсчётов горизонта на опорных сечениях, используемая как набор пространственных ограничений для последующего заполнения объёма.

На втором этапе выполняется трёхмерное уплотнение: Агент прослеживает отражение от каждой ограничивающей линии в прямом и обратном направлениях; допустимый временной интервал задаётся линейной интерполяцией между ближайшими опорными значениями с дополнительным допуском ±12 мс. Для каждой трассы формируется до четырёх оценок. Если их разброс не превышает 4 мс, принимается среднее, взвешенное по разности между максимальным и вторым Q-значениями; при большем разбросе выбирается оценка с наибольшим запасом Q-значения. Затем выполняется один проход медианного фильтра 3 × 3. Соседние отсчёты не включаются в фильтр, если между ними индикатор разрывности F превышает 0,6. Такая обработка подавляет одиночные выбросы, но не переносит значения через выявленные нарушения.

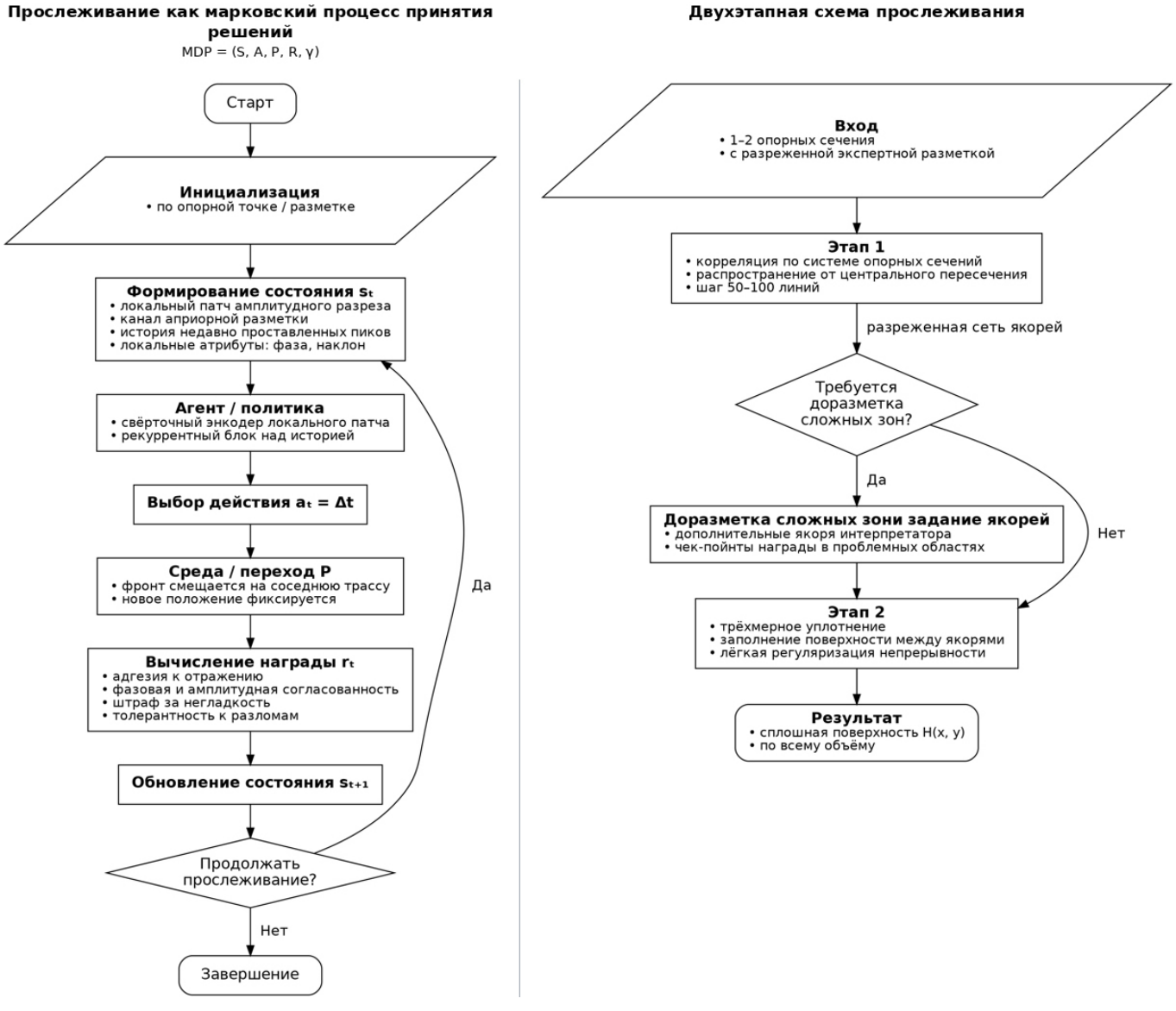

Рис. 2. Прослеживание отражающего горизонта как марковский процесс принятия решений M = (S, A, P, R, γ) и двухэтапная схема построения поверхности. На каждом шаге состояние s(k) включает локальное амплитудное окно, опорную разметку, историю предыдущих отсчётов и локальные атрибуты. Политика выбирает смещение a(k) = Δτ(k) на соседней трассе, после чего рассчитывается награда, включающая корреляционное сходство волновой формы с опорным отражением, фазовую и амплитудную согласованность, штраф за негладкость и ослабление этого штрафа в зоне нарушения. На первом этапе выполняется корреляция по системе сечений с шагом 50 линий; на втором – заполнение промежутков между опорными сечениями до сплошной поверхности H(x, y).

Формирование синтетической обучающей выборки

Обучение проводится на синтетических сейсмических данных, для которых положение целевого горизонта известно из геологической модели. Это позволяет рассчитывать плотный обучающий сигнал без сплошной ручной интерпретации реальных кубов. Синтетическое обучение не устраняет различие между модельными и полевыми данными; переносимость метода поэтому оценивается отдельно на реальном сейсмическом объёме, который не используется при оптимизации параметров агента.

Генерация каждой реализации включает построение структурно-стратиграфической модели, задание физических свойств и расчёт синтетического сейсмического изображения. Число слоёв выбирается равномерно от 6 до 28, их мощность – от 8 до 80 м. Региональный наклон изменяется от −5 до +5°, локальный – до 12°. Складчатые деформации задаются синусоидальными и асимметричными изгибами с амплитудой 10 – 120 м и длиной волны 0,8–5,0 км. В одну реализацию включается от нуля до шести сбросов или взбросов с углом падения 45–85° и вертикальной амплитудой 4–80 м. Число зон выклинивания и прилегания изменяется от нуля до четырёх. Для клиноформных моделей угол наклона клинотем составляет 1–5°, вертикальная мощность комплекса – 40–180 м, длина проградации – 0,5–3,0 км. В модель добавляется до пяти геологических тел мощностью 8–60 м и латеральным размером 100–900 м. Скорость продольной волны варьируется от 1800 до 4500 м/с, плотность – от 1,90 до 2,65 г/см^3. Параметры выбираются независимо из равномерных распределений, за исключением мощности слоёв и амплитуды смещения по разломам, для которых используется логарифмически равномерное распределение.

В модель также включаются линзовидные, рукавообразные и лопастевидные геологические тела с контрастными физическими свойствами. Они используются для формирования локальной изменчивости амплитуд, интерференции и участков пониженной прослеживаемости отражения. Отдельное подмножество реализаций воспроизводит клиноформное строение ачимовской толщи: проградационное наращивание, сигмовидную геометрию клинотем, латеральную смену свойств вдоль склона и выклинивание песчаных тел. Эти реализации повышают представленность целевых структурных конфигураций в обучающей выборке, но не рассматриваются как доказательство автоматической переносимости на другие площади.

Синтетические данные рассчитываются в двумерной акустической постановке с переменной плотностью. Размер моделей составляет 1,5–3,2 × 0,9–1,8 км, пространственный шаг по обеим координатам – 5 м, временной шаг – 1–2 мс. Волновое уравнение решается конечно-разностной схемой восьмого порядка по пространству и второго порядка по времени с поглощающей границей PML. Используется импульс Рикера с доминирующей частотой, случайно выбираемой в диапазоне 18–35 Гц. Источники размещаются на поверхности с шагом 50 м, приёмники – с шагом 25 м; максимальное удаление составляет 2,5 км, длительность записи – 2000 мс. Сейсмическое изображение формировалось методом акустической обратной временной миграции синтетических сейсмограмм. В качестве миграционной модели использовалась сглаженная версия исходной скоростной модели, построенной на предыдущем этапе. После миграции разрез дискретизируется с шагом 25 м по латерали и 2 мс по времени. Такая схема воспроизводит дифракции на разломах и кромках тел, интерференцию тонких слоёв и искажения волновой формы при латеральном изменении скоростей, но не моделирует обменные волны и анизотропию.

После миграции к изображению добавляются полосовой гауссов шум и слабая регулярная помеха, имитирующая остаточный след системы наблюдений. Отношение сигнал/шум выбирается от 3 до 20 дБ, амплитуда регулярной составляющей – от 2 до 8% среднеквадратичной амплитуды сигнала. Аугментации включают горизонтальное отражение с вероятностью 0,5, инверсию полярности с вероятностью 0,5, масштабирование по времени в диапазоне 0,9–1,1, по латерали – 0,85–1,15 и амплитудный коэффициент 0,70–1,30. Сформировано 400 независимых геологических реализаций: 320 использованы для обучения, 40 – для выбора гиперпараметров и ранней остановки, ещё 40 – как закрытая синтетическая тестовая выборка. Разбиение выполнялось до извлечения локальных окон, поэтому фрагменты одной геологической модели не попадали в разные части выборки. Из реализаций извлечено 720 тыс. обучающих, 90 тыс. валидационных и 90 тыс. тестовых состояний.

Обучение агента

Обучение состоит из двух последовательных стадий. На первой стадии выполняется имитационное обучение по известным траекториям синтетических горизонтов. Для каждого состояния целевым действием служит смещение, переводящее интерпретацию на истинное положение горизонта на соседней трассе. Эта стадия задаёт начальную политику и уменьшает число неинформативных эпизодов в начале обучения с подкреплением.

На второй стадии модель оптимизируется алгоритмом Double DQN с дуэльной архитектурой и приоритетным буфером воспроизведения (Schulman et al., 2017; Mnih et al., 2015). Обучение проводится по программе постепенного усложнения: первый миллион переходов формируется на согласных слоях без нарушений, второй – с добавлением шума и плавных деформаций, третий – с разломами, четвёртый – с выклиниваниями и геологическими телами, пятый – на полном наборе сценариев, включая клиноформные модели. Имитационное предобучение проводилось в течение 60 эпох с размером пакета 256 примеров. Для оптимизации использовали алгоритм AdamW с начальной скоростью обучения $3 \cdot 10^{-4}$ и коэффициентом затухания весов 10^{-4}.

Доразметка сложных зон

В участках с резкой сменой волновой картины интерпретатор может добавить отдельные точки или короткие фрагменты горизонта. При повторном расчёте они используются как жёсткие опорные условия: эпизод прослеживания завершается в заданной точке либо начинается заново от неё. Дополнительно применяется контрольная награда: прохождение траектории в пределах ±2 мс от заданной точки увеличивает награду на 2,0, а отклонение более 2 мс уменьшает её на 1,0. Доразметка изменяет только локальные условия запуска и ограничения траектории.

Дизайн апробации

Метод испытан на отражающем горизонте ачимовской толщи одного из месторождений севера Западной Сибири. Основной эксперимент использует два взаимно пересекающихся опорных сечения – инлайн и кросслайн, проходящие через центральную часть площади (рис. 3). Экспертная разметка на этих сечениях служит единственным входом для первого запуска. После корреляции по системе сечений выполняется трёхмерное уплотнение до поверхности H(x, y).

Дополнительно выполняется уточнённый вариант расчёта, в котором интерпретатор добавляет опорные точки и локально уменьшает шаг между сечениями в зонах сложной волновой картины. Такое сравнение позволяет разделить качество при минимальной исходной разметке и качество после стандартной экспертной корректировки. В качестве референсной поверхности используется ручная корреляция, выполненная по всему объёму и не доступная алгоритму во время расчёта.

Оценка качества

Отклонение результата от референсной интерпретации рассчитывается на каждой трассе как $\Delta H(x, y) = H_{мод}(x, y) - H_{эт}(x, y)$ в миллисекундах двойного времени. Для количественной оценки используются среднее смещение, средняя и медианная абсолютные ошибки, среднеквадратичная ошибка. Все показатели рассчитываются для основного эксперимента с двумя исходными сечениями и повторно после локальной доразметки; численные значения приведены в разделе «Результаты».

Качество прослеживания оценивалось сопоставлением полученной поверхности с эталонной ручной корреляцией. Использованы: структурные карты горизонта по обоим вариантам корреляции; карта разности, кросс-плот соответствия времён горизонта автоматическим ИИ прослеживанием против интерпретатора; контрольные разрезы с совместным нанесением вариантов корреляции. Дополнительно контролировались воспроизводимость результата при повторных запусках и вычислительная производительность.

Рис. 3. Схема апробации: два опорных сечения, инлайн и кросслайн, пересекаются в центральной части площади и содержат исходную экспертную интерпретацию. Контур соответствует границе куба сейсморазведки 3D.

Результаты

По двум опорным сечениям, пересекающимся вкрест в центре площади, последовательное выполнение обоих этапов восстановило сплошную поверхность целевого горизонта на 2 327 958 трассах (95% объёма куба за вычетом краёв съёмки). Среднее смещение относительно ручной корреляции составило 1,2 мс, средняя абсолютная ошибка – 5,9 мс, медианная абсолютная ошибка – 4,2 мс, среднеквадратичная ошибка – 9,2 мс. На выдержанных интервалах средняя абсолютная ошибка снижалась до 1,3 мс, а 89,1% отсчётов находились в пределах 10 мс. Наибольшие расхождения приурочены к разрывным нарушениям, зонам выклинивания и краевой полосе куба. При этом следует учитывать, что ручная корреляция сохраняет субъективность, поэтому выявленные расхождения целесообразно рассматривать предметно в каждом отдельном случае, а не трактовать как однозначную ошибку прослеживания. Структурные карты горизонта, полученные в результате работы алгоритма и в результате ручной интерпретации близки по морфологии: воспроизведены как региональный структурный план, так и локальные особенности рельефа отражения (рис. 4, а, б). Коэффициент корреляции между значениями поверхностей равен 0,988, однако он используется только как характеристика общего структурного тренда.

На кросс-плоте (рис. 4г) значения автоматической и ручной корреляции сосредоточены в узкой полосе вдоль линии 1:1, без выраженного систематического смещения. Небольшое расширение облака относительно линии 1:1 соответствует локальным расхождениям, показанным на карте разности (рис. 4в), и связано преимущественно с зонами разрывных нарушений, выклинивания и краевыми частями куба.

После добавления 16 опорных точек на 10 прогнозных сечениях и уменьшения шага сетки до 25 линий в трёх сложных зонах средняя абсолютная ошибка снизилась с 5,9 до 3,1 мс, а доля трасс с отклонением не более 10 мс увеличилась до 92,2%. На контрольном разрезе линии автоматической и ручной корреляции совпадают в пределах одного-двух временных отсчётов для большинства протяжённости горизонтов, включая интервалы с изменением углов наклона (рис. 5). Локальные значения свыше 4 мс наблюдались преимущественно у разломов и в краевой полосе.

Построение сети опорных сечений на рабочей станции с 32 ГБ оперативной памяти без использования графического процессора заняло 14 мин, трёхмерное уплотнение – 12 мин, согласование направленных проходов и постобработка – 2,1 мин. Суммарное время вычислений составило 28,1 мин (без учёта загрузки данных, формирования выходных поверхностей и визуального контроля). Эти значения относятся к одному горизонту на кубе 1777 × 1379 × 2000 отсчётов.

Обсуждение и выводы

Результаты апробации подтверждают применимость предложенного подхода для прослеживания опорных и целевых горизонтов в условиях относительно выдержанных границ. Ключевое практическое преимущество – минимальный объём исходной разметки и отсутствие необходимости использовать полевую ручную корреляцию

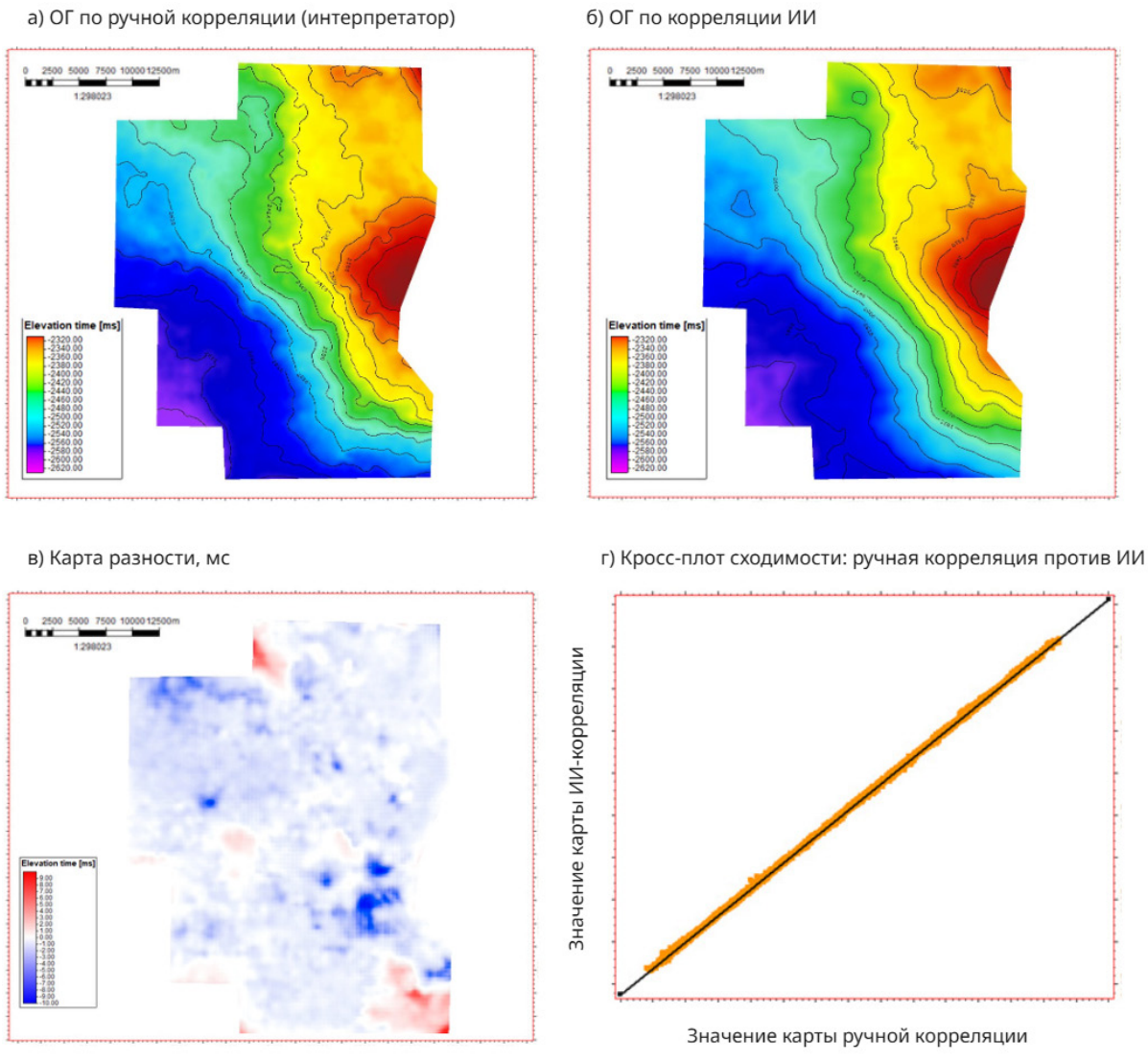

Рис. 4. Сопоставление результата ИИ-корреляции с ручной интерпретацией по целевому горизонту при минимальном входе из двух опорных сечений (инлайн и кросслайн): а – структурная карта по ручной корреляции (интерпретатор); б – структурная карта по ИИ-корреляции; в – карта разности, мс; г – кросс-плот значений карт (карта от карты): ручная корреляция против ИИ

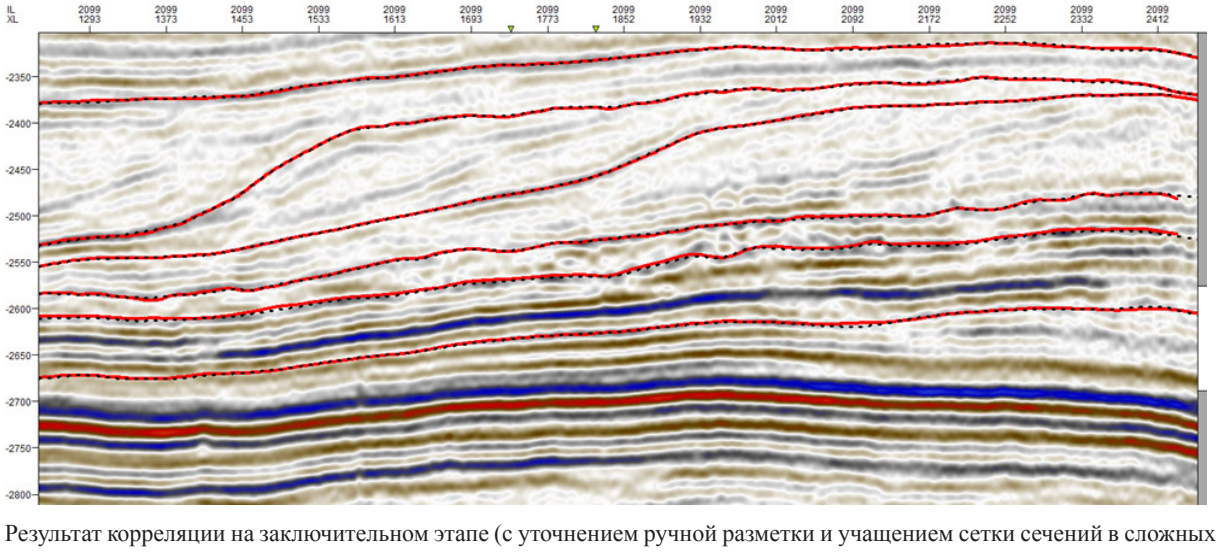

Рис. 5. Результат корреляции на заключительном этапе (с уточнением ручной разметки и учащением сетки сечений в сложных зонах): совместное нанесение вариантов прослеживания – ИИ (сплошная линия) и интерпретатора (пунктир) – для набора отражающих горизонтов. Линии практически совпадают по всей длине разреза.

при обучении модели. Испытание на одной площади показывает перенос от синтетических данных к конкретному полевому кубу, но не доказывает межплощадочную переносимость; для такой оценки необходима валидация на независимых месторождениях и данных различных систем наблюдений. Двухэтапная организация «корреляция по сечениям → трёхмерное уплотнение» разделяет построение пространственного каркаса и заполнение промежутков, а механизм доразметки сохраняет экспертный контроль в сложных зонах.

Формализация прослеживания как марковского процесса принятия решений отвечает последовательной природе задачи: оптимизируется накопленная награда вдоль траектории, а не точность отдельного пика, что снижает дрейф и перескок фазы при удалении от опорных точек. По сравнению с методами с заранее фиксированной функцией стоимости (динамическое программирование, алгоритм Витерби) обучаемая функция ценности адаптируется к целевой геологической обстановке, заданной синтетической средой, а толерантный к разломам член награды препятствует сглаживанию реальных нарушений. Дополнительным преимуществом является возможность интерпретировать выходную функцию ценности как меру достоверности прослеживания.

Представленная апробация относится к горизонту с относительно выдержанной волновой картиной, для которого минимального входа из двух пересекающихся сечений оказалось достаточно. По результатам более широкого тестирования к ограничениям метода относятся сглаживание резких структурных перегибов в зонах интенсивной тектоники (сдвиги, надвиги) с занижением амплитуд смещения по нарушениям, а также краевые эффекты (“задир” прослеживаемых горизонтов) в приграничных частях куба, устраняемые обрезкой краевой полосы. Согласованность с эталоном в сложных обстановках закономерно повышается с увеличением числа и плотности опорных сечений и при их ориентации по съёмке. Эти наблюдения определяют рекомендуемый порядок применения метода. Для относительно выдержанных опорных горизонтов используют два пересекающихся сечения. В зонах сложной волновой картины задают дополнительные опорные сечения, выполняют локальную доразметку и повторный расчёт.

С практической точки зрения для относительно выдержанных горизонтов базовый шаг опорных сечений 50 линий (1,25 км при шаге бинирования 25 м) обеспечивает приемлемую точность: в основном эксперименте средняя абсолютная ошибка составила 5,9 мс, а 89,1% отсчётов находились в пределах 10 мс от ручной корреляции. В локально сложных зонах шаг целесообразно уменьшать до 25 линий (625 м): после такой доразметки и добавления 16 опорных точек средняя абсолютная ошибка снизилась до 3,1 мс, а доля отсчётов с отклонением не более 10 мс увеличилась до 92,2%. Для одного горизонта на кубе 1777 × 1379 × 2000 отсчётов вычислительная часть заняла 28,1 мин на рабочей станции с 32 ГБ ОЗУ. При ручной корреляции полного набора целевых горизонтов аналогичной площади затрачивается до 10–15 рабочих дней; предлагаемый подход сокращает этот этап до единиц рабочих дней за счёт переноса основного объёма работы интерпретатора на задание опорных сечений, локальную доразметку и итоговый контроль качества.

Направления развития включают: учёт тектоники с типовыми для региона амплитудами вертикального смещения; реализацию атрибута достоверности прослеживания (confidence) на основе выходной функции ценности агента; возможность запуска расчёта от части существующего горизонта; ограничение выклинивающихся горизонтов местом их прилегания к базису эрозии. Перспективны также уточнение функции награды (в том числе усиление разломно-ориентированного члена) и обогащение синтетической среды более реалистичной моделью разломообразования и динамики поля для снижения эффекта сглаживания.

Заключение

Предложен и апробирован подход к прослеживанию сейсмических отражающих горизонтов по разреженной экспертной разметке, в котором задача формализована как марковский процесс принятия решений и решена методом обучения с подкреплением. Подход реализован в виде двухэтапной схемы (обучаемая политика корреляции по опорным сечениям и трёхмерное уплотнение), агент обучен в синтетической среде прямого полноволнового моделирования с предварительным имитационным обучением по эталонным траекториям и допускает доразметку сложных зон через опорные точки горизонта и контрольные точки, учитываемые при вычислении награды. Апробация на клиноформных ачимовских отложениях севера Западной Сибири показала согласованность с ручной корреляцией в пределах 10 мс на выдержанных интервалах при возрастании расхождений в зонах смены динамики поля и у разрывных нарушений. Оптимизация накопленной награды повышает устойчивость прослеживания и обеспечивает воспроизводимость результата при существенном сокращении времени структурной корреляции; обозначены ограничения и направления дальнейшего развития. Для практического применения рекомендуется использовать шаг опорных сечений около 50 линий на выдержанных интервалах и уменьшать его до 25 линий в зонах сложной волновой картины; в проведённой апробации это соответствовало средней абсолютной ошибке 5,9 и 3,1 мс соответственно, при времени вычислений 28,1 мин на один горизонт.

Благодарности

Авторы благодарят коллег из ООО «НОВАТЭК НТЦ» за помощь в экспертной интерпретации и обсуждение результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Использование инструментов с искусственным интеллектом

При подготовке рукописи авторы использовали инструменты на основе искусственного интеллекта (большие языковые модели) на вспомогательных этапах: для первичного поиска и подбора литературных

источников и для проверки и редактирования текста (грамматика, стиль, связность изложения, перевод отдельных фрагментов на английский язык). Инструменты ИИ не использовались для получения, обработки и интерпретации сейсмических данных, а также для формирования научных результатов и выводов.

Литература

Наумов А.Л. (1977). К методике реконструкции рельефа дна Западно-Сибирского раннемелового бассейна. *Геология и геофизика*, 18(10), с. 38–47.

Нежданов А.А., Пономарёв В.А., Туренков Н.А., Горбунов С.А. (2000). Геология и нефтегазоносность ачимовской толщи Западной Сибири. М.: Изд-во Академии горных наук, 247 с.

Abubakar A., Di H., Li Z., Maniar H., Zhao T. (2024). An artificial intelligence workflow for horizon volume generation from 3D seismic data. *The Leading Edge*, 43(4), pp. 235–243. https://doi.org/10.1190/tle43040235.1

Luo Y., Zhang G., Zhang J., Li Y., Lin Y., Li B., Liang C., Li L. (2023). Sequence-constrained multitask horizon tracking. *Geophysics*, 88(2), pp. IM15–IM27.

Mattos A.B., Civitarese D., Szwarcman D., Oliveira M., Zaytsev S., Semin D.G., Oliveira D.A.B. (2021). Enabling robust horizon picking from small training sets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(6), pp. 5317–5324. https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3010124

Mnih V., Kavukcuoglu K., Silver D., Rusu A.A., Veness J., Bellemare M.G., Graves A., Riedmiller M., Fidjeland A.K., Ostrovski G., Petersen S., Beattie C., Sadik A., Antonoglou I., King H., Kumaran D., Wierstra D., Legg S., Hassabis D. (2015). Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, 518(7540), pp. 529–533. https://doi.org/10.1038/nature14236

Ronneberger O., Fischer P., Brox T. (2015). U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015, *Lecture Notes in Computer Science*, 9351, pp. 234–241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28

Schulman J., Wolski F., Dhariwal P., Radford A., Klimov O. (2017). Proximal policy optimization algorithms. arXiv preprint arXiv:1707.06347. https://doi.org/10.48550/arXiv.1707.06347

Sheng S. (2023). Automatic horizon picking using multiple seismic attributes and Markov decision process. *Remote Sensing*, 15(3), 552. https://doi.org/10.3390/rs15030552

Stark T.J. (2004). Relative geologic time (age) volumes – relating every seismic sample to a geologically reasonable horizon. *The Leading Edge*, 23(9), pp. 928–932. https://doi.org/10.1190/1.1803499

Su M., Qian F., Cui S., Yuan C., Cui X. (2023). Research on a 3D seismic horizon automatic-tracking method based on corrugated global diffusion. *Applied Sciences*, 13(10), 6155. https://doi.org/10.3390/app13106155

Sutton R.S., Barto A.G. (2018). Reinforcement learning: an introduction. 2nd ed. Cambridge, MA: MIT Press, 552 p.

Tschannen V., Delescluse M., Ettrich N., Keuper J. (2020). Extracting horizon surfaces from 3D seismic data using deep learning. *Geophysics*, 85(3), pp. N17–N26. https://doi.org/10.1190/geo2019-0569.1

Wu H., Zhang B., Lin T., Cao D., Lou Y. (2019). Semiautomated seismic horizon interpretation using the encoder–decoder convolutional neural network. *Geophysics*, 84(5), pp. B403–B417. https://doi.org/10.1190/geo2018-0672.1

Wu X., Hale D. (2015). Horizon volumes with interpreted constraints. *Geophysics*, 80(2), pp. IM21–IM33. https://doi.org/10.1190/geo2014-0212.1

Yang L., Sun S.Z. (2020). Seismic horizon tracking using a deep convolutional neural network. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 187, 106709. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106709

Сведения об авторах

Даниил Александрович Богоедов – руководитель отдела R&D, ООО «ГРИДПОИНТ ДАЙНАМИКС»; специалист, Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

e-mail: d.bogoedov@geoplat.com

ORCID: 0000-0003-3276-7508

Никита Сергеевич Безухов – ведущий специалист по Data Science, ООО «ГРИДПОИНТ ДАЙНАМИКС», Москва, Россия

Анастасия Игоревна Павлюк – руководитель проектов, ООО «ГРИДПОИНТ ДАЙНАМИКС», Москва, Россия

Павел Александрович Авдеев – старший менеджер отдела продаж, ООО «ГРИДПОИНТ ДАЙНАМИКС», Москва, Россия

Андрей Константинович Базанов – директор по развитию бизнеса, ООО «ГРИДПОИНТ ДАЙНАМИКС», Москва, Россия

Игорь Иванович Ефремов – генеральный директор, ООО «ГРИДПОИНТ ДАЙНАМИКС», Москва, Россия

Равиль Рамильевич Шакиров – директор департамента подготовки ресурсной базы, ООО «НОВАТЭК НТЦ», Тюмень, Россия

Михаил Юрьевич Шаповалов – кандидат геол.-минерал. наук, старший эксперт, ООО «НОВАТЭК НТЦ», Тюмень, Россия

Статья поступила в редакцию 30.06.2026;
Принята к публикации 31.08.2026;
Опубликована 30.09.2026

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

Reinforcement-Learning Tracking of Seismic Horizons From Sparse Expert Interpretation: A Case Study on the Achimov Clinoform Deposits of Northern West Siberia

D.A. Bogoedov[1,3], N.S. Bezukhov[1], A.I. Pavliuk[1], P.A. Avdeev[1], A.K. Bazanov[1], I.I. Efremov[1], R.R. Shakirov[2], M.Yu. Shapovalov[2]*

[1]GridPoint Dynamics LLC, Moscow, Russian Federation

[2]NOVATEK NTC LLC, Tyumen, Russian Federation

[3]Skolkovo Institute of Science and Technology (Skoltech), Moscow, Russian Federation

[*]Corresponding author: Daniil A. Bogoedov, e-mail: d.bogoedov@geoplat.com

Abstract. Structural correlation of reflection horizons remains one of the most labour-intensive operations in 3D seismic interpretation, particularly within the clinoform Neocomian sections of West Siberia, where target reflections show variable dynamics, pinch-outs and are complicated by faulting. Because horizon tracking is inherently sequential, we formulate it as a Markov decision process and solve it with reinforcement learning. Observing a local seismic context and the history of previously picked samples, an agent chooses, at each step, the vertical shift of the horizon on the adjacent trace; the reward function encodes geophysical criteria – waveform similarity to the reference reflection, phase consistency, lateral smoothness and fault tolerance. The method is implemented as a two-stage scheme: a policy first correlates the horizon over a grid of reference sections with a user-defined spacing, building a reliable network of anchors, and then densifies the result into a continuous surface across the whole volume. The agent is trained in a synthetic environment produced by forward full-wavefield modelling, with imitation pretraining on reference horizon trajectories; one or two intersecting reference sections suffice as input, and additional interpretation is introduced in complex zones. Tested on Achimov deposits of a field in Northern West Siberia, the approach agrees with manual correlation within 10 ms over conformable intervals. Limitations and directions for development are discussed.

Keywords: reflection horizon, seismic correlation, reinforcement learning, Markov decision process, synthetic data, clinoform, Achimov formation, West Siberia

Recommended citation: Bogoedov D.A., Bezukhov N.S., Pavliuk A.I., Avdeev P.A., Bazanov A.K., Efremov I.I., Shakirov R.R., Shapovalov M.Yu. (2026). Reinforcement-Learning Tracking of Seismic Horizons From Sparse Expert Interpretation: A Case Study on the Achimov Clinoform Deposits of Northern West Siberia. *Georesursy = Georesources*, 28(3), pp. 107–116. https://doi.org/10.18599/grs.2026.3.15

References

Abubakar A., Di H., Li Z., Maniar H., Zhao T. (2024). An artificial intelligence workflow for horizon volume generation from 3D seismic data. *The Leading Edge*, 43(4), pp. 235–243. https://doi.org/10.1190/tle43040235.1

Luo Y., Zhang G., Zhang J., Li Y., Lin Y., Li B., Liang C., Li L. (2023). Sequence-constrained multitask horizon tracking. *Geophysics*, 88(2), pp. IM15–IM27.

Mattos A.B., Civitarese D., Szwarcman D., Oliveira M., Zaytsev S., Semin D.G., Oliveira D.A.B. (2021). Enabling robust horizon picking from small training sets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(6), pp. 5317–5324. https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3010124

Mnih V., Kavukcuoglu K., Silver D., Rusu A.A., Veness J., Bellemare M.G., Graves A., Riedmiller M., Fidjeland A.K., Ostrovski G., Petersen S., Beattie C., Sadik A., Antonoglou I., King H., Kumaran D., Wierstra D., Legg S., Hassabis D. (2015). Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, 518(7540), pp. 529–533. https://doi.org/10.1038/nature14236

Naumov A.L. (1977). On the methodology for reconstructing the bottom relief of the West Siberian Early Cretaceous basin. *Russian Geology and Geophysics*, 18(10), pp. 38–47. (In Russ.)

Nezhdanov A.A., Ponomarev V.A., Turenkov N.A., Gorbunov S.A. (2000). Geology and petroleum potential of the Achimov strata of West Siberia. Moscow: Academy of Mining Sciences Publ., 247 p. (In Russ.)

Ronneberger O., Fischer P., Brox T. (2015). U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015, *Lecture Notes in Computer Science*, 9351, pp. 234–241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28

Schulman J., Wolski F., Dhariwal P., Radford A., Klimov O. (2017). Proximal policy optimization algorithms. arXiv preprint arXiv:1707.06347. https://doi.org/10.48550/arXiv.1707.06347

Sheng S. (2023). Automatic horizon picking using multiple seismic attributes and Markov decision process. *Remote Sensing*, 15(3), 552. https://doi.org/10.3390/rs15030552

Stark T.J. (2004). Relative geologic time (age) volumes – relating every seismic sample to a geologically reasonable horizon. *The Leading Edge*, 23(9), pp. 928–932. https://doi.org/10.1190/1.1803499

Su M., Qian F., Cui S., Yuan C., Cui X. (2023). Research on a 3D seismic horizon automatic-tracking method based on corrugated global diffusion. *Applied Sciences*, 13(10), 6155. https://doi.org/10.3390/app13106155

Sutton R.S., Barto A.G. (2018). Reinforcement learning: an introduction. 2nd ed. Cambridge, MA: MIT Press, 552 p.

Tschannen V., Delescluse M., Ettrich N., Keuper J. (2020). Extracting horizon surfaces from 3D seismic data using deep learning. *Geophysics*, 85(3), pp. N17–N26. https://doi.org/10.1190/geo2019-0569.1

Wu H., Zhang B., Lin T., Cao D., Lou Y. (2019). Semiautomated seismic horizon interpretation using the encoder–decoder convolutional neural network. *Geophysics*, 84(5), pp. B403–B417. https://doi.org/10.1190/geo2018-0672.1

Wu X., Hale D. (2015). Horizon volumes with interpreted constraints. *Geophysics*, 80(2), pp. IM21–IM33. https://doi.org/10.1190/geo2014-0212.1

Yang L., Sun S.Z. (2020). Seismic horizon tracking using a deep convolutional neural network. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 187, 106709. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106709

About the Authors

Daniil Bogoedov – Head of R&D, GridPoint Dynamics LLC; Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russian Federation

e-mail: d.bogoedov@geoplat.com

ORCID: 0000-0003-3276-7508

Nikita Bezukhov – Lead Data Scientist, GridPoint Dynamics LLC, Moscow, Russian Federation

Anastasia Pavliuk – Head of Projects, GridPoint Dynamics LLC, Moscow, Russian Federation

Pavel Avdeev – Senior Sales Manager, GridPoint Dynamics LLC, Moscow, Russian Federation

Andrey Bazanov – Chief Business Development Officer (CBDO), GridPoint Dynamics LLC, Moscow, Russian Federation

Igor Efremov – Chief Executive Officer (CEO), GridPoint Dynamics LLC, Moscow, Russian Federation

Ravil R. Shakirov – Head of the Resource Base Department, NOVATEK NTC LLC, Tyumen, Russian Federation

Mikhail Yu. Shapovalov – Cand Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Expert, NOVATEK NTC LLC, Tyumen, Russian Federation

Manuscript received 30 June 2026;
Accepted 31 August 2026; Published 30 September 2026

© 2026 The Authors. This article is published in open access under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)