

УДК 550.834

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-1-97-104

ПРОГНОЗ МОЩНОСТИ ТОНКИХ ПЛАСТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЛНОВОЛНОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Юрий Петрович Ампилов¹✉, Анатолий Викторович Вершинин²,
Даниил Сергеевич Кунченко³, Константин Александрович Петровский⁴,
Карина Рауфовна Сафуанова⁵

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия; yury@ampilov.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3579-351X>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; versh1984@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3928-3864>

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; d.kunchenko@seismotech.ru, <https://istina.msu.ru/workers/489864888/>

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; petrovsky@cae-fidesys.com, <https://istina.msu.ru/workers/283955382/>

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; safuanova1999@mail.ru, <https://istina.msu.ru/workers/552892300/>

Аннотация. Целью работы является подбор метода изучения количественных характеристик коллекторских свойств доюрского нефтегазоносного комплекса Западной Сибири по данным 3D сейсморазведки и опробование его на реальных данных.

В качестве методического примера выбрана кора выветривания в доюрском комплексе Западной Сибири, поскольку при сравнительно небольшой ее мощности (от 0 до 50 м) отражения от кровли и подошвы не разделяются. Амплитудно-частотная характеристика данного интерференционного отражения зависит от толщины, и потому некоторые сейсмические атрибуты могут на это реагировать.

Для выяснения этих связей впервые применено полноволновое сейсмическое моделирование с использованием метода спектральных элементов в рамках передового отечественного программного комплекса «Фидесис», разработанного выпускниками и сотрудниками кафедры вычислительной механики МГУ имени М.В. Ломоносова и адаптированного сотрудниками и аспирантами Геологического ф-та МГУ для решения поставленных задач. В данной статье приведены первые результаты их практического использования. По сравнительным расчетам установлено, что применяемые до этого в сейсмике традиционные лучевые методы моделирования вкупе со сверткой с коэффициентами отражения дают ложные результаты и потому не рекомендуются для дальнейшего применения.

Предложенная и опробованная технология позволила построить прогнозную карту толщины потенциально нефтегазоносной коры выветривания в кровле доюрского комплекса на площади съемки 3D.

Ключевые слова: полноволновое моделирование, свертка сигнала, сейсморазведка, акустическое моделирование, сейсмические атрибуты, Западная Сибирь, доюрский комплекс

Для цитирования: Ампилов Ю.П., Вершинин А.В., Кунченко Д.С., Петровский К.А., Сафуанова К.Р. Прогноз мощности тонких пластов с использованием сейсмического полноволнового моделирования // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 1. С. 97–104.

PREDICTION OF THIN-LAYER THICKNESS USING SEISMIC FULL-WAVE MODELING

Yury P. Ampilov¹✉, Anatoly V. Vershinin², Denis S. Kunchenko³,
Konstantin A. Petrovsky⁴, Karina R. Safuanova⁵

¹ Lomonosov Moscow State University; Institute of Oil and Gas Problems RAS, Moscow, Russia; yury@ampilov.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3579-351X>

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; versh1984@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3928-3864>

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; d.kunchenko@seismotech.ru, <https://istina.msu.ru/workers/489864888/>

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; petrovsky@cae-fidesys.com, <https://istina.msu.ru/workers/283955382/>

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; safuanova1999@mail.ru, <https://istina.msu.ru/workers/552892300/>

Abstract. The aim of the work is to select a method for studying the quantitative characteristics of the reservoir properties of the pre-Jurassic oil and gas complex of Western Siberia according to 3D seismic data and testing it on real data.

The weathering crust in the Pre-Jurassic complex of Western Siberia was chosen as a methodological example, since with its relatively small capacity (from 0 to 50 meters) reflections from the roof and the sole are not separated. The amplitude-frequency response of this interference reflection depends on the thickness, and therefore some seismic attributes may react to this.

To clarify these connections, full-wave seismic modeling using the spectral element method was used for the first time within the framework of the advanced domestic CAE FIDESYS software developed by graduates and staff of the Chair of Computational Mechanics of Lomonosov Moscow State University and adapted by staff and graduate students of the Geological Faculty of Moscow State University to solve the tasks set. This article presents the first results of their practical use. According to comparative calculations, it has been established that the traditional beam modeling methods previously used in seismics, coupled with convolution with reflection coefficients, give false results and therefore are not recommended for further use.

The proposed and tested technology made it possible to build a forecast map of the thickness of the potentially oil and gas-bearing weathering crust in the roof of the of the Pre-Jurassic complex on the 3D survey area.

Keywords: full-wave modeling, signal convolution, seismic exploration, acoustic modeling, seismic attributes, Western Siberia, pre-Jurassic complex

For citation: Ampilov Yu.P., Vershinin A.V., Kunchenko D.S., Petrovsky K.A., Safuanova K.R. Prediction of thin-layer thickness using seismic full-wave modeling. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 1: 97–104. (In Russ.).

Введение. Значительная степень разведанности месторождений нефти и газа в Западной Сибири и истощение «классических» нефтегазоносных комплексов делает актуальным вопрос поиска дополнительных перспективных объектов. Нарастить ресурсную базу возможно с помощью активного освоения трудноизвлекаемых запасов нефти (ТРИЗ), поскольку обычные запасы во многом открыты и давно разрабатываются. Существенная часть ТРИЗ относится к глубокозалегающим резервуарам доюрского комплекса (ДЮК).

Сейсморазведка, безусловно, является основным геофизическим методом при поисках и разведке месторождений углеводородов, но и ее возможности для исследования глубокозалегающих ТРИЗ значительно ограничены в сравнении с традиционными продуктивными интервалами в меловой части разреза Западносибирской нефтегазоносной провинции.

В данной статье предпринята попытка оценить интерпретационные возможности сейсморазведки для глубоких горизонтов Западной Сибири на основе последних достижений полноволнового моделирования [Ампилов и др., 2024].

Целью работы является подбор метода изучения количественных характеристик коллекторских свойств ДЮК в межскважинном пространстве по данным 3D сейсморазведки.

Для моделирования впервые используется расчет полной сейсмической волновой картины на основе метода спектральных элементов [Левин, Вершинин, 2015; Vershinin, Charara, 2020; Vershinin, 2022]. Учитываются все типы волн, возникающих в трехмерной среде: продольные, поперечные, поверхностные, обменные, дифрагированные, в отличие от упрощенных сверточных и лучевых схем, применяемых в настоящее время и зачастую дающих результаты, приводящие к ошибочным выводам.

Анализ и выбор методов моделирования. Традиционно в сейсморазведке для моделирования волновых полей широко используется лучевой метод [Аки, Ричардс, 1983; Ампилов, Облогина, 1982], чаще всего, в рамках простой однороднослойной модели. В простейшем варианте это может быть даже одномерная модель свертки с коэффициентами отражения, которая меняется от трассы к трассе.

Никаких кратных волн или волн-спутников, неизбежно возникающих в тонкослойной среде, не учитывается, тем более обменных. Причем, такой весьма схематичный подход применяется даже в наиболее распространенном случае различных акустических инверсий. Получаемые результаты являются неадекватными реальной среде, и выводы, основанные на полученных виртуальных изображениях, могут оказаться ложными [Ampilov, 2010].

Часто не учитывается, что лучевой метод является асимптотическим и работает лишь в высокочастотном приближении, когда длина волны существенно меньше пути распространения. При типичных длинах волн в «нефтяной» сейсморазведке, примерно от 50 до 200 м, это не всегда корректно [Ампилов, 1992].

От большинства перечисленных ограничений свободны методы, основанные на моделировании волновых фронтов. Правда и они не полностью удовлетворяют некоторым геофизическим задачам, особенно, если в расчет принимаются только отдельные типы волн, например, однократные отраженные.

В способах расчета волновых полей тоже есть различные подходы, начиная от наиболее распространенного метода конечных элементов до наиболее практичного метода конечных разностей [Лисица и др., 2014]. Последний позволяет использовать модель-решетку любой сложности и дает качественный результат при менее значительных вычислительных ресурсах, чем в методах конечных элементов с прямоугольными сетками. Однако устойчивость конечноразностного метода зависит от шага матрицы конкретной модели, что вносит в алгоритм элемент неопределенности.

В связи с изложенным требуются новые решения для сейсмического моделирования, и они найдены. Основой послужил разработанный на кафедре вычислительной механики МГУ имени М.В. Ломоносова алгоритм для описания распространения сейсмических волн в произвольно-неоднородной среде на основе *метода спектральных элементов* (МСЭ) [Ampilov, et al., 2024, Левин, Вершинин, 2015]. В данной статье он адаптирован для достижения конкретной поставленной геологической цели на основе тесного межфакультетского сотрудничества

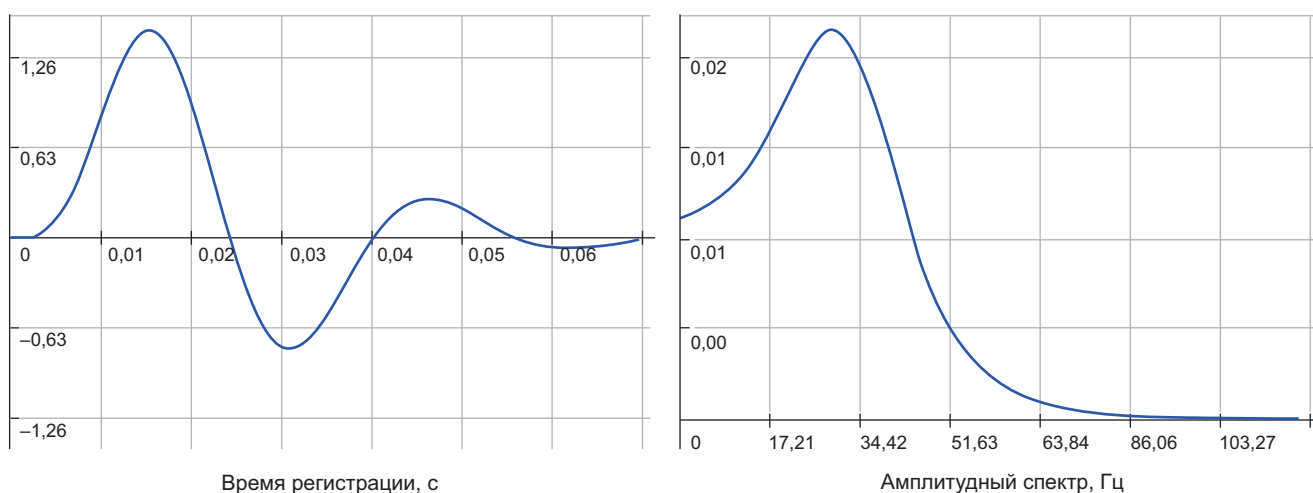


Рис. 1. Импульс Рикера. Форма сигнала (слева) и его спектр (справа)

между геологическим и механико-математическим факультетами МГУ, о чем свидетельствует и состав авторов статьи.

Как и любой метод, МСЭ имеет свои ограничения. Основной сложностью является необходимость построения качественной расчетной сетки без сильно искаженных элементов. Также метод требует тщательного выбора параметров (порядок МСЭ, степень измельчения сетки, число Куранта и др.) для конкретной задачи.

Несмотря на это метод спектральных элементов представляет собой мощный инструмент для решения уравнений в частных производных, который сочетает в себе преимущества классического метода конечных и спектральных методов на основе рядов Фурье. Его высокая точность и гибкость делают его привлекательным для сложных научных и инженерных задач. В то же время, при использовании МСЭ для решения трехмерных промышленных задач сейсмологии его высокая вычислительная сложность требует значительных высокопроизводительных компьютерных ресурсов.

При достаточно точных расчетах (высоких порядках полиномов Лежандра) полноволновое моделирование на основе спектральных элементов значительно превосходит конечноразностный метод по соответствию результатов моделирования реальным данным. Главным преимуществом данных методик перед акустическим случаем является более точное описание откликов от структур неоднородностей, при образовании которых волновая природа сейсмических волн играет важную роль.

Детальное исследование различных аспектов МСЭ проведено в фундаментальной монографии ученых МГУ имени М.В. Ломоносова [Левин, Вершинин, 2015]. На этой основе был разработан отечественный многофункциональный пакет инженерного анализа CAE Fidesys, используемый при проектировании деталей и конструкций в различных отраслях, включая машиностроение, строительство, горное дело и т. п.

В данной статье приводятся первые прикладные результаты его применения в сейсморазведке. В качестве альтернативы дополнительно использовался также широко известный импортный пакет Tesserat, но только применительно к акустическому моделированию (случай однократных продольных волн).

Входные данные для полноволнового моделирования — модуль упругости и коэффициент Пуассона — были получены пересчетом из скоростей продольных, поперечных волн, а также плотности, определенных с использованием кривых акустического и плотностного каротажа в опорной скважине на изучаемой площади с забоем на глубине 2912 м. Для целей данного эксперимента модель в скважине предполагалась безграничной во всех направлениях.

Шаг между приемниками в сейсмограмме был выбран 25 м, а в качестве зондирующего импульса был взят импульс Рикера частотой 30 Гц (рис. 1), сдвинутый на $(-\pi)$. В данной задаче было решено по результатам тестирования аппроксимировать вектор поля упругих смещений и скоростей полиномами Лагранжа 11 порядка. Это давало высокую точность решений и приемлемую скорость расчетов.

При моделировании можно наблюдать процесс распространения волновых фронтов в любой текущий момент времени (рис. 2).

Акустическое моделирование однократных продольных волн было выполнено в ПО Tesserat. Настройки моделирования те же, что и для полноволнового моделирования, за исключением задания степени полинома, так как акустическое моделирование основано на методе конечных разностей. Моделирование в ПО Tesserat не учитывало обменных и кратных волн, в отличие от полноволнового моделирования, где все они рассчитывались. Так что сейсмограммы, полученные в результате этих двух видов моделирования, существенно различаются (рис. 3).

Кроме них в рамках исследования была рассчитана сейсмотрасса как свертка зондирующего импульса с коэффициентами отражения при нормальном падении, чтобы сравнить все три резуль-

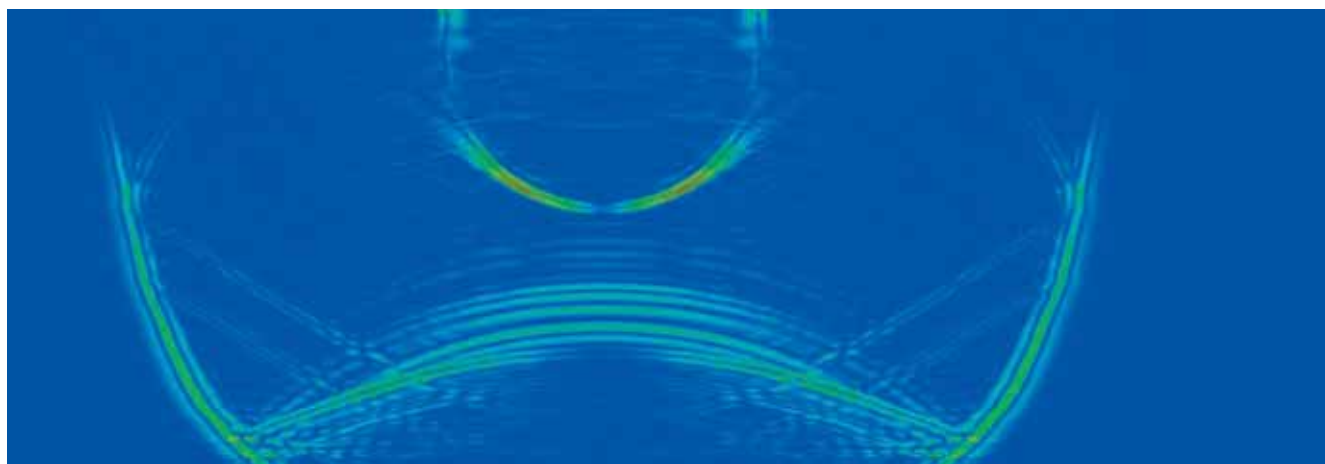


Рис. 2. Распространение волновых фронтов всех типов волн

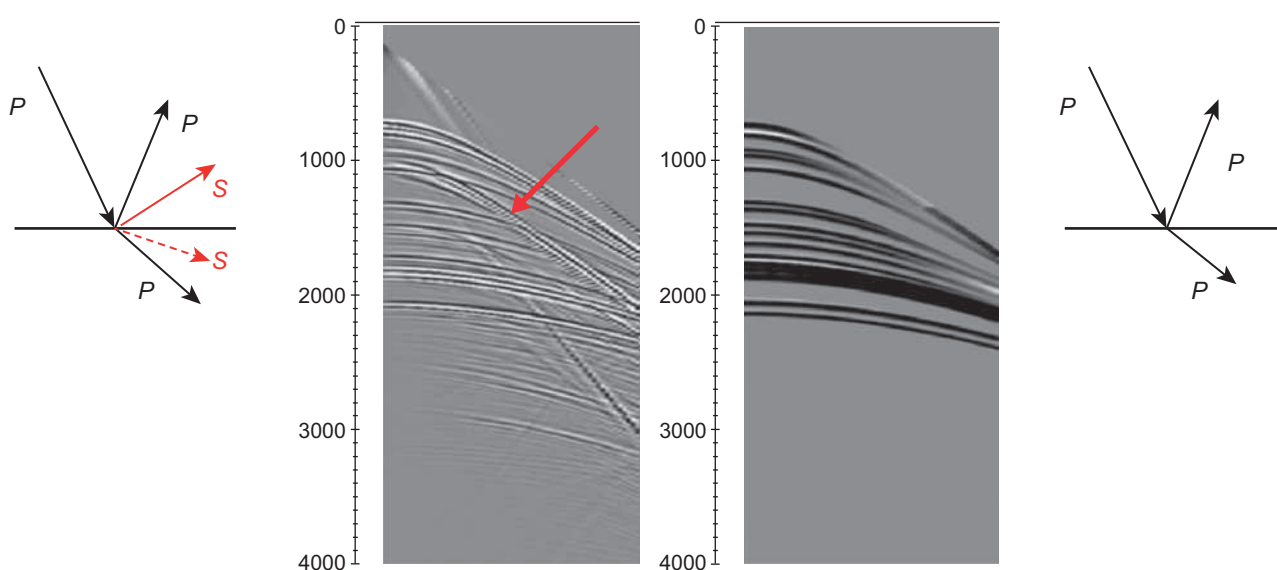


Рис. 3. Сейсмограмма, полученная при полноволновом моделировании в ПО Фидесис (слева) в сравнении с сейсмограммой однократных продольных волн, полученной в ПО Tesseral (справа). Красной стрелкой показана обменная отраженная волна

тата и сделать вывод о том, можно ли использовать для реальной среды аппроксимацию в виде акустической модели или свертки с целью дальнейшего атрибутного анализа.

В процессе обработки сейсмограмм, полученных в результате полноволнового и акустического моделирования, был сделан мьютинг, скоростной анализ (рис. 4), суммирование сейсмотрасс и получение одиночной суммотрассы.

Можно увидеть существенные отличия полученных временных разрезов друг от друга, что объясняется наличием или отсутствием волн того или иного типа на них.

Динамический анализ синтетических сейсмограмм. Динамический анализ сейсмических записей стал неотъемлемой частью процессов обработки и интерпретации [Ампилов, 2008]. Это связано с тем, что стандартная обработка ограничивается лишь решением кинематических задач — построением структурного плана сейсмических границ,

привязанных к некоторым стратиграфическим поверхностям. Динамический анализ и последующая динамическая интерпретация способны дополнить сведения о геологическом разрезе информацией о литологии, пористости, флюидонасыщенности пластов и их мощности, даже если последняя меньше разрешающей способности сейсморазведки [Amplitude, Baturin, 2012].

Определение мощности продуктивных отложений имеет принципиальную важность для оценки запасов нефтяных и газовых месторождений. Однако из-за ограниченной вертикальной разрешающей способности сейсморазведочных данных оценка толщин маломощных отложений является в классическом понимании практически нерешаемой задачей. Для ее эмпирического решения могут быть в благоприятных сейсмогеологических условиях использованы некоторые сейсмические атрибуты, которые чувствительны к изменению мощности пластов. Они особенно полезны в районах с низкой

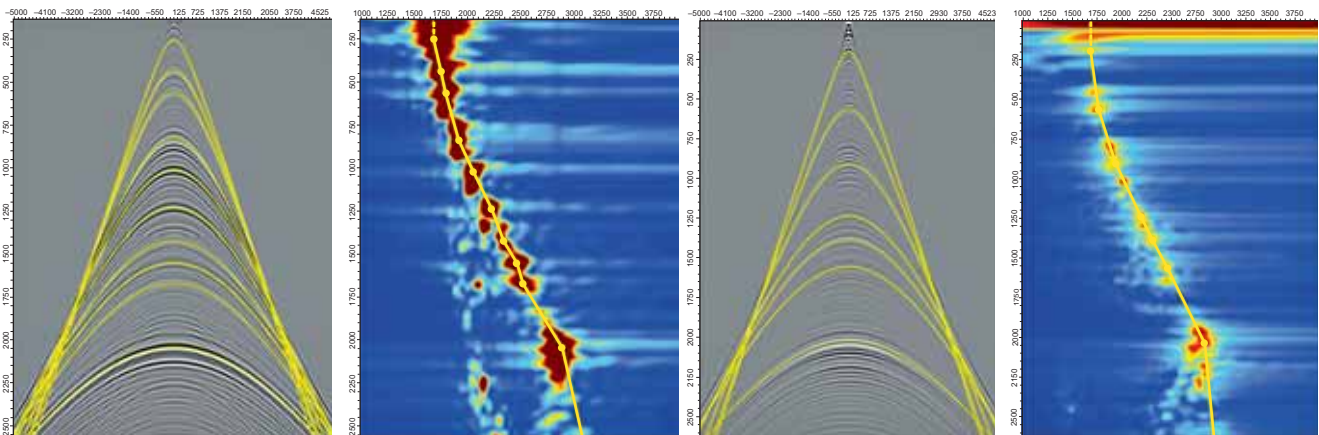


Рис. 4. Сейсмограммы и спектры скоростей для полноволнового случая (слева) и для акустического случая (справа)



Рис. 5. Разрезы, полученные по свертке (а), акустическому моделированию (б) и полноволновому моделированию (в) для модели среды из опорной скважины.

плотностью скважин, где традиционные методы могут не дать достаточной информации для надежных геологических выводов.

Целью данного методического исследования являлась попытка дать прогноз толщин коры выветривания доюрского комплекса на площади 3D сейсморазведки, основываясь на атрибутивном анализе сейсмической записи с использованием полноволнового моделирования для поиска наиболее информативных атрибутов.

Суть атрибутивного анализа синтетических суммотрасс на первом этапе сводится к следующему:

- 1) получают набор синтетических суммотрасс всеми тремя методами (рис. 5) при вариации толщины коры выветривания ДЮК от 5 до 50 м;
- 2) вычисляется множество сейсмических атрибутов для интервала регистрации отражений, находится линейная зависимость величины мощности коры выветривания от каждого из атрибутов. Выбираются атрибуты, которые имеют наиболее высокий коэф-

фициент корреляции с параметром мощности коры выветривания (КВ).

По полученным временным разрезам были рассчитаны несколько сейсмических атрибутов в интервале регистрации отражений от КВ (более 2 с), один из которых Original amplitude (исходная амплитуда) изображен на рис. 6.

Интервал коры выветривания ДЮК, мощность которой по опорной скважине составляет 15 м, находится на времени 2080–2090 мс [Ахиярова, 2023].

Анализируя данные расчеты, можно сказать, что не наблюдается единообразия значений атрибутов для трех случаев: «свертки», акустического и полноволнового моделирования. И поскольку полноволновое моделирование наиболее адекватно по сравнению с остальными двумя методами описывает реальную среду, можно сделать вывод о невозможности применения первых двух для дальнейшего динамического анализа волнового поля. Ввиду этого для прогноза мощности КВ по значениям атрибутов

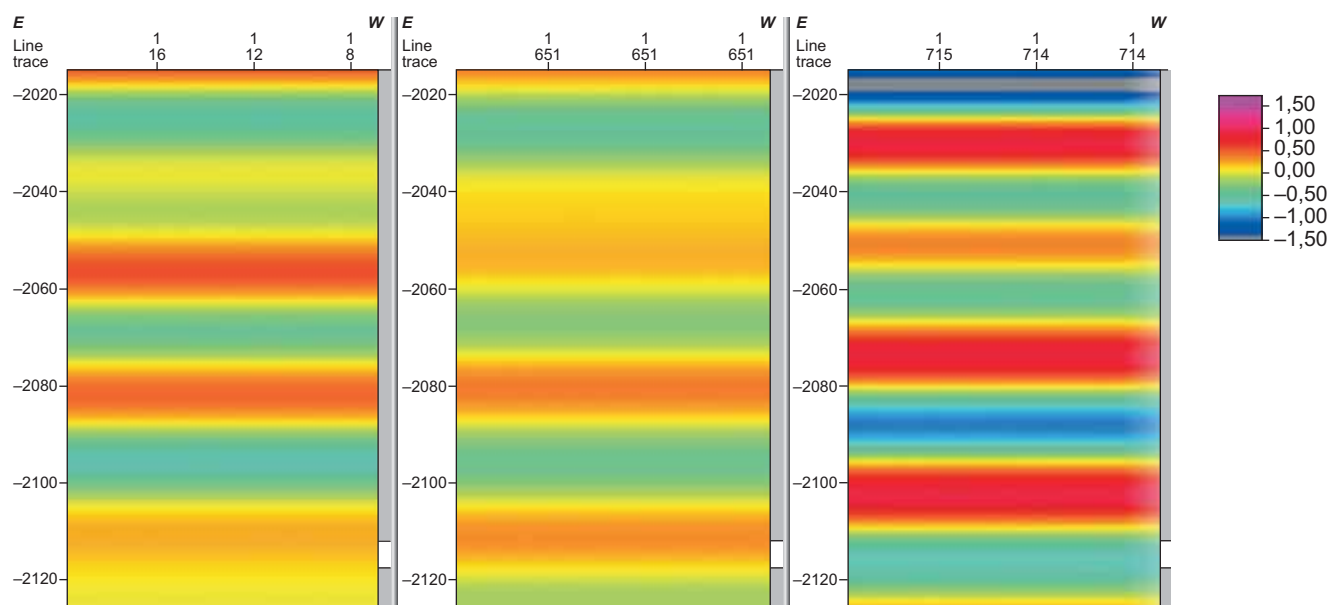


Рис. 6. Атрибут Original Amplitude на временах более 2 секунд (слева — модель «свертки», в центре — акустическое моделирование, справа — полноволновое моделирование)

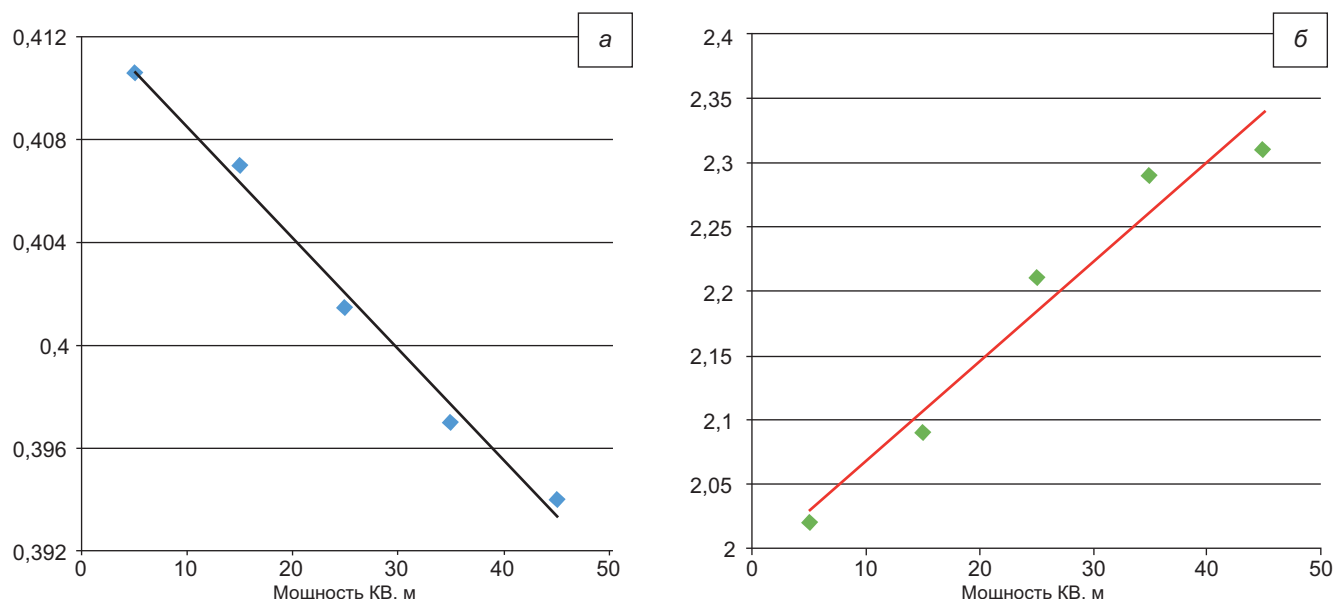


Рис. 7. Зависимость атрибута Envelope (а) и атрибута Instantaneous Bandwidth (б) от толщины KB в м по результатам моделирования

будем использовать только полноволновое моделирование.

Оценка толщины коры выветривания с учетом полноволнового моделирования. Выше был сделан вывод о некорректности методов «свертки» и лучевого моделирования для задач динамического анализа. Поэтому для прогноза мощности коры выветривания меньше, чем разрешающая способность сейсморазведки, использовалось исключительно полноволновое моделирование.

В пределах исследуемого района вертикальная разрешающая способность сейсморазведки применительно к KB оценивается примерно в 60 м. То есть, при значениях мощности KB меньше 60 м, от кровли и подошвы формируется единое отражение, называемое в зарубежной литературе тюнинг-эффектом.

Для изучения зависимости значений атрибутов от мощности KB было выполнено полноволновое моделирование для пяти ее мощностей: 5, 15, 25, 35 и 45 м. Затем были посчитаны наиболее употребительные атрибуты в этом регионе от кровли KB в окнах 15, 25 и 40 мс: Envelope, Instantaneous Bandwidth, Instantaneous Frequency, Amplitude, RMS Amplitude.

Среди перечисленных атрибутов информативных оказалось только 2: Envelope (оглабающая) в окне 40 мс (рис. 7, а) и Instantaneous Bandwidth (мгновенная ширина спектра) в окне 15 мс (рис. 7, б). На графиках этих атрибутов можно наблюдать близкую к линейной зависимость значения атрибута от мощности KB. В дальнейшем использовались только эти два атрибута, поскольку остальные не показывают значимой связи с изменением толщины KB.

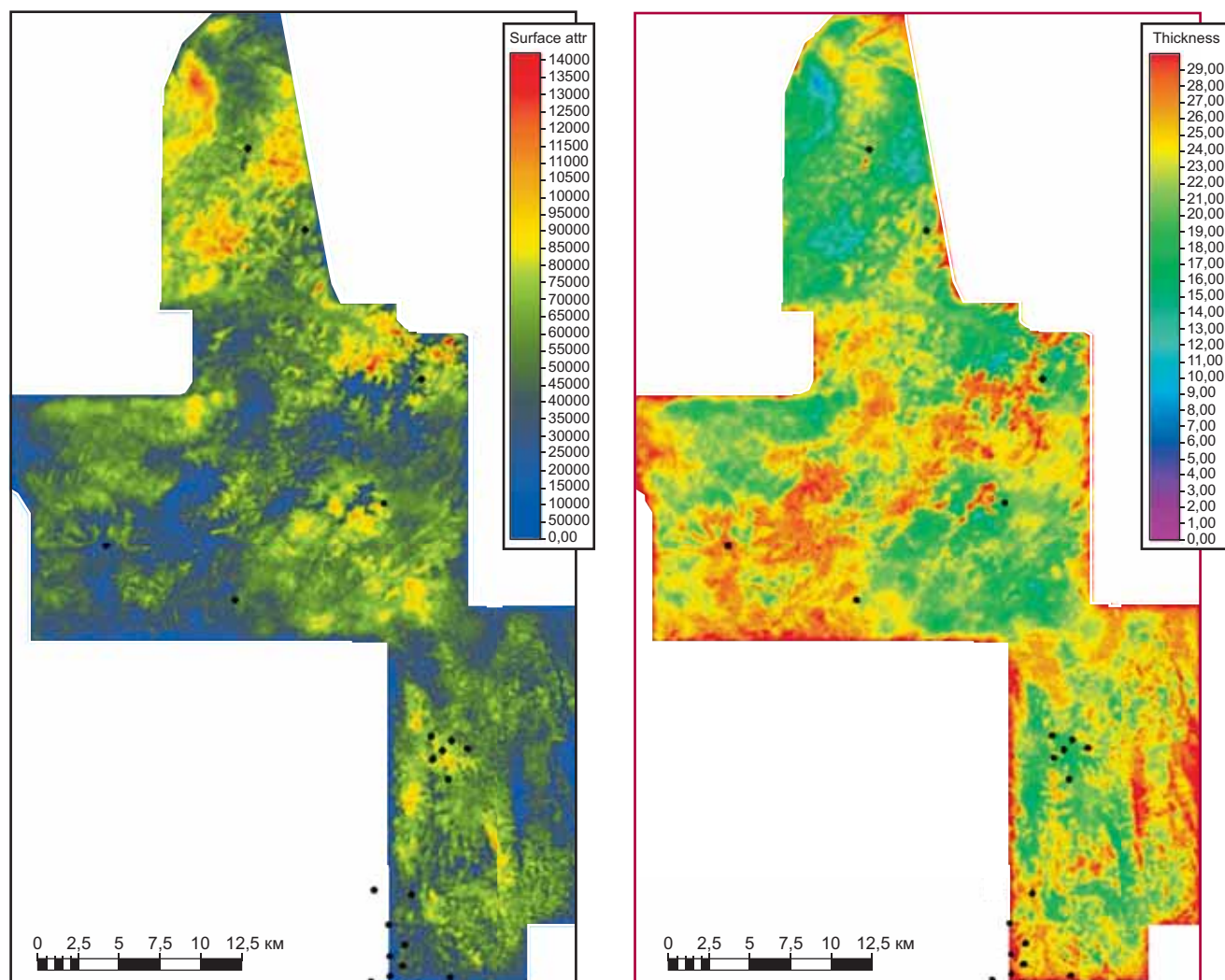


Рис. 8. Атрибут Envelope в окне 40 мс (слева) и карта мощности коры выветривания (в м) на исследуемом участке, полученная по нему с использованием зависимости на рис. 7 (справа). Точками показано положение скважин

Для атрибута Envelope в окне 40 мс наиболее близкой аппроксимирующей линейной зависимостью оказалась следующая:

$$h(x) = -2338,6x + 965,96,$$

где h — значение мощности коры выветривания, x — значение атрибута. Квадрат коэффициента корреляции практически равен единице $R^2 = 0,9911$, что действительно говорит о возможности такой аппроксимации.

Для атрибута Instantaneous Bandwidth в окне 15 мс также хорошо подходит линейная зависимость:

$$h(x) = 122,5x - 242,48,$$

где h — значение мощности коры выветривания, x — значение атрибута, $R^2 = 0,9568$.

Далее была рассчитана карта первого атрибута в указанном интервале вдоль отражающего горизонта, связанного с КВ. По найденной выше корреляционной зависимости она была пересчитана в карту мощностей коры выветривания (рис. 8) на исследуемом участке. Предварительно потребова-

лось произвести нормировку карты атрибута, чтобы она по средним значениям совпадала со значением атрибута Envelope на синтетических сейсмограммах. В целом, прогнозная картина качественно совпадает с трендом значений толщины коры выветривания по пробуренным скважинам, однако среднее квадратическое отклонение прогнозных значений от измеренных в скважинах составляет 8,2 м, что не так и мало при интервале изменения данной величины от 0 до 58 м по всем скважинам. Причина в том, что исходный атрибут Envelope, который принят основным по результатам моделирования, характеризуется весьма контрастными изменениями на площади исследований, и его линейная аппроксимация не вполне этому соответствует.

Проводимые далее исследования с помощью нейросетевых алгоритмов, свободных от линейных ограничений, показывают более адекватные результаты, но этому посвящена отдельная статья [Ампилов и др., 2025].

Традиционно для решения подобных задач в сейсморазведке используются различные методы

инверсии [Ампилов и др., 2008, 2009; Яковлев и др., 2011], однако в данном случае приемлемый результат получен на основе простых атрибутов, но впервые с предварительным их подбором на основе полно-волнового моделирования.

Заключение. В процессе достижения поставленной в работе цели решены следующие прикладные задачи:

- детально исследованы сейсмические эффекты от изменения коллекторских свойств пород доюрского комплекса Западной Сибири различными методами моделирования;

- установлено, что наиболее объективные результаты дают методы полноволнового моделирования на основе МСЭ;

- предложена и опробована методология оценки толщины коры выветривания в кровле ДЮК на осно-

ве моделирования интерференционного волнового поля от ее кровли и подошвы;

- построена прогнозная карта толщины коры выветривания в межскважинном пространстве на площади, покрытой данными 3D сейсморазведки.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках бюджетной темы «Разработка теории и технологии комплексных геофизических исследований приповерхностной части разреза естественных и техногенных сред» (номер ЦИТИС: АААА-А16-116033010107-1), а также при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-11-00110) в части разработки математической модели и проведения численного моделирования в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы. Т. 1. Пер. с англ. М.: Мир, 1983. 520 с., ил.

Ампилов Ю.П. От сейсмической интерпретации к моделированию и оценке месторождений нефти и газа. М.: ООО «Центральное издательство геофизической литературы» — «Спектр», 2008. 384 с.

Ампилов Ю.П. Поглощение и рассеяние сейсмических волн в неоднородных средах. М., Недра, 1992, 140 с.

Ампилов Ю.П., Барков А.Ю., Яковлев И.В. и др. Почти все о сейсмической инверсии. Часть 1 // Технологии сейсморазведки. 2009. № 4. С. 3–16.

Ампилов Ю.П., Вершинин А.В., Левин В.А. и др. Полноволновое моделирование в сейсморазведке на основе цифровой геологической модели с использованием метода спектральных элементов // Геология и геофизика, издательство СО РАН, 2024. DOI: 10.15372/GiG2024115

Ампилов Ю.П., Владов М.Л., Токарев М.Ю. Технологии морской сейсморазведки в широком частотном диапазоне: проблемы и возможности // Сейсмические приборы. 2018. Т. 54. № 4. С. 42–65; DOI: 10.21455/si2018.4-4

Ампилов Ю.П., Облогина Т.И. Метод определения поглощения по рефрагированным волнам // Известия АН СССР. Физика Земли. 1982. № 10. С. 31–41.

Ампилов Ю.П., Сафуанова К.Р., Штейн Я.И. Сопоставление методов количественного атрибутивного анализа для прогноза толщин коллекторов по сейсмическим данным // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025.

Ахиярова Е.Р. Методика динамического анализа сейсмических данных для изучения строения доюрского комплекса Нюрольской структурно-фациальной зоны Западной Сибири: Автореф. дисс. ... канд. техн. н. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2023.

Левин В.А., Вершинин А.В. Численные методы. Параллельные вычисления на ЭВМ Т. 2 // Нелинейная вычисли-

тельная механика прочности. Цикл монографий в 5 томах под ред. В.А. Левина. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 544 с.

Лисица В.В., Чеверда В.А. Комбинирование разрывного метода Галеркина и метода конечных разностей для учета сложного строения верхней части разреза при численном моделировании сейсмических полей // Технологии сейсморазведки. 2014. № 4. С. 60–67.

Яковлев И.В., Ампилов Ю.П., Филиппова К.Е. Почти все о сейсмической инверсии. Часть 2 // Технологии сейсморазведки. 2011. № 1. С. 5–15.

Ampilov Yu.P. From Seismic Interpretation to Modelling and Assessment of Oil and Gas Fields // EAGE Publ. 2010. P. 1–274, doi: 10.3997/9789073781825

Ampilov Yu.P., Baturin D.G. Latest Marine Geophysical Technologies for Comprehensive Study of Natural Hydrocarbon Reservoirs and Monitoring of Production // Society of Petroleum Engineers — SPE Russian Oil and Gas Exploration and Production Technical Conference and Exhibition. 2012. P. 2056–2063.

Ampilov Yu.P., Vershinin A.V., Levin V.A., et al. Full-Waveform Seismic Modeling Based on Digital Geological Model Using Spectral Element Method: Applications to Seismic Exploration // Russian Geology and Geophysics, 2024, ELSEVIER SCIENCE BV, DOI: 10.2113/RGG20244728

Vershinin A. Poroelastoplastic modeling of a borehole stability under small and finite strains using isoparametric spectral element method. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00161-022-01117-4>

Vershinin A., Charara M. Modeling of acoustic logging in poroelastic media using spectral element method. AIP Conference Proceedings, (2310): 020347, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/5.0034443>

Статья поступила в редакцию 21.08.2024,
одобрена после рецензирования 30.10.2024,
принята к публикации 28.02.2025