

УДК 550.8.053

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-2-117-125

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИНТЕРПРЕТАЦИОННОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОГНОЗА РУСЕЛ

Екатерина Андреевна Милентьева¹, Алексей Андреевич Баранцев²,
Алина Александровна Оболенская³, Антон Сергеевич Гриневский⁴

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; kate0808mm@yandex.ru

² ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Москва, Россия; Alexey.Barancev@lukoil.com

³ ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Москва, Россия; Alina.Obolenskaya@lukoil.com

⁴ ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Москва, Россия; Anton.Grinevskiy@lukoil.com

Аннотация. В данной статье представлены результаты переобработки материалов сейсморазведки 3D — объединенной сейсмической съемки, состоящей из съемок 4 отдельных лицензионных участков, расположенных на территории Западной Сибири. На примере данных материалов детально продемонстрирована важность роли интерпретационного сопровождения обработки для цели повышения качества сейсмических данных, подготовленных для последующей интерпретации. Постоянный мониторинг изменения качества сейсмических данных последовательно на каждом из этапов обработки учитывает анализ сейсмического сигнала и геологические особенности разреза, а регулярное взаимодействие со специалистами-обработчиками необходимо для контроля качества выполненных процедур, направленных на повышение разрешенности сейсмического разреза и, как следствие, улучшения прослеживаемости целевых объектов, в частности в данной статье — русловых тел. Для сравнения качества прослеживаемости русел на старых и новой съемках был применен частотный анализ сейсмических кубов на основе RGB частотного суммирования. По результатам переобработки 2023 г., проведенной на объединенной территории 4-х площадей, была отмечена существенная детализация русловых объектов в интервале целевых тюменских отложений. Также авторами была применена специально обученная для поиска русел нейронная сеть, показывающая, насколько лучше/хуже прослеживаются русловые объекты при применении той или иной процедуры обработки. На основании полученных результатов был сформирован единый граф, учитывающий степень влияния той или иной процедуры обработки на исследуемые геологические объекты.

Ключевые слова: интерпретационное сопровождение обработки, объединение съемок, нейронная сеть, русла, точность прогноза

Для цитирования: Милентьева Е.А., Баранцев А.А., Оболенская А.А., Гриневский А.С. Разработка методики интерпретационного сопровождения обработки сейсмических данных в Западной Сибири с целью улучшения качества прогноза русел // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 2. С. 117–125.

IMPROVEMENT OF A METHODOLOGY FOR INTERPRETATIVE CONTROL OF SEISMIC DATA PROCESSING IN WESTERN SIBERIA IN ORDER TO IMPROVE THE QUALITY OF RIVERBED FORECASTING

Ekaterina A. Milenteva¹, Aleksey A. Barantsev², Alina A. Obolenskaya³,
Anton S. Grinevskiy⁴

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; kate0808mm@yandex.ru

² LUKOIL-Engineering LLC, Moscow, Russia; Alexey.Barancev@lukoil.com

³ LUKOIL-Engineering LLC, Moscow, Russia; Alina.Obolenskaya@lukoil.com

⁴ LUKOIL-Engineering LLC, Moscow, Russia; Anton.Grinevskiy@lukoil.com

Abstract. This article presents the results of the reprocessing of the materials of the CDPM 3D seismic survey (using the common depth point method) of the combined seismic survey that is consisted of surveys of 4 separate license areas located in Western Siberia. Using the example of these materials, the importance of the role of interpretative processing control (IPC) for the purpose of improving the quality of seismic data prepared for subsequent interpretation is demonstrated in detail. IPS is the constant monitoring of changes in the quality of seismic data sequentially at each stage of processing. The constant interaction of the IPS group with processing specialists is necessary to control the quality of the performed procedures aimed at increasing the resolution of the seismic image and, as a result, improving the traceability of target objects, in particular in this article — channel objects. Frequency analysis of seismic data was used to compare the quality of paleochannels traceability in previous and new surveys. This analysis is based on RGB (red-green-blue) frequency summation. According to the results of the re-processing of 2023, significant detailing of paleochannel objects in the range of target Tyumen deposits was noted. The authors also used a specially trained neural network for searching for riverbeds, showing how much better/worse riverbed objects are traced when applying a particular processing procedure. Based on the results obtained, a consensus was formed on the acceptance or non-acceptance of the results of a particular procedure of the conducted IPS.

Keywords: interpretative control of processing, surveys merging, neural network, channels, forecast accuracy

For citation: Milenteva E.A., Barantsev A.A., Obolenskaya A.A., Grinevskiy A.S. Improvement of a methodology for interpretative control of seismic data processing in Western Siberia in order to improve the quality of riverbed forecasting. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 2: 117–125. (In Russ.).

Введение. С каждым годом в сфере контроля качества проводимой на проектах обработки данных сейсморазведки стремительно развивается направление супервайзинга и интерпретационного сопровождения обработки (ИСО), включающее в себя последовательность определенных процедур, способных вовремя отследить недочеты в сейсмических данных (например, сквозные амплитудно-частотные аномалии, остаточные помехи, недодавленные кратные волны и др.), проявляющиеся после выполнения того или иного этапа обработки. Например, в статье [Никольников и др., 2019] было проанализировано изменение формы сигнала на различных этапах обработки и предложен комплекс атрибутов контроля качества, который позволяет надежно оценить изменение спектральных и динамических характеристик сейсмической записи.

В данной статье рассмотрена возможность контроля качества обработки с помощью комплексирования методов расчета спектральной декомпозиции, сейсмических атрибутов и применения нейронной сети, специально обученной с целью поиска геологических объектов. Все перечисленные выше инструменты анализа позволяют своевременно заметить ошибку уже на ранних стадиях и предотвратить ее, таким образом сэкономив время и деньги на очередной итерации обработки, интерпретации или затраты на других, уже более поздних этапах геологоразведочных работ (ГРП) [Кирьянова и др., 2023]. Изучаемый район работ находится на территории Западной Сибири. Целевыми объектами района работ являются отложения тюменской свиты, имеющие сложное строение по площади распространения и по разрезу в пределах каждого из месторождений, в первую очередь связанное с развитием речных долин и осложняющими проявлениями доюрского комплекса. В ходе исследования была произведена переобработка материалов сейсморазведки МОГТ 3D (метод общей глубинной точки) объединенной сейсмической съемки, состоящей из съемок 4 отдельных лицензионных участков общим объемом 790 км². По этой причине задача осуществления переобработки и интерпретационного сопровождения осложнена необходимостью учета особенностей результатов обработки сейсмических данных при объединении разнородных съемок прошлых лет. В ходе работы были предложены идеи и методические подходы для повышения качества результатов обработки данных сейсморазведки, выбранные на основании проведенного на каждом этапе анализа ИСО и способствующие своевременному учету особенностей объединяемых съемок, улучшению качества прогноза русел. В последнее время в сейсморазведке, как и во многих других сферах, для целей

ускорения и автоматизации расчетов, а также для минимизации влияния человеческого фактора всё чаще применяются методы машинного обучения, в том числе и нейронные сети. В рамках данной работы авторы протестировали на исследуемых данных нейронную сеть, специально обученную для поиска и автоматического выделения палеорусел. С точки зрения ИСО применение данной нейронной сети позволило понять, насколько лучше или хуже прослеживаются русловые объекты при применении той или иной процедуры обработки [Алексеева, 2022].

Материалы и методы исследований. Исходными материалами для написания статьи стали данные сейсморазведки МОГТ 3D, полученные с единой сейсмической съемки в объеме 790 км² (3D данные 4-х съемок прошлых лет также были проанализированы и стали объектом сравнения с результатом новой обработки 2023 г. на предмет наличия прироста сейсмогеологической информации). Данная территория характеризуется большим объемом скважинных данных, включая 412 скважин с акустическим каротажем (АК), из которых 13 — с данными вертикального сейсмического профилирования (ВСП).

Все расчеты и сравнения сейсмической и скважинной информации проводились в ПО Petrel и Hampson Russell. Специально обученная нейронная сеть была использована как метод для объективной оценки прослеживаемости палеорусловых объектов и влияния процедур обработки на результаты их автоматического выделения. В работе использовалась нейронная сеть U-Net, обученная и запатентованная П.А. Алексеевой и Д.Е. Мирошниченко в управлении сейсмических исследований ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» в 2023 г. [Мирошниченко, 2023].

Результаты исследований и их обсуждение. Для контроля корректного выполнения обработки на каждом из ее этапов со стороны ИСО проводился анализ привнесенных в сейсмические данные изменений. В рамках контроля обработки инструменты ИСО применяются ради 2-х целей:

1 — выявление, доказательство наличия и экспресс-интерпретация новых геологических особенностей, отслеживание эволюции сейсмического разреза и сейсмограмм;

2 — поиск, предупреждение и недопущение «ошибок обработки» — применения неэффективных процедур или неоптимальных параметров процедур обработки, искажающих сейсмическое изображение или приводящих к потере полезной информации.

Одной из главных проблем проведения переобработки и ИСО на данной площади стала необходимость увязки 4-х разнородных съемок между собой: одновременного учета фазовых сдвигов съемок друг

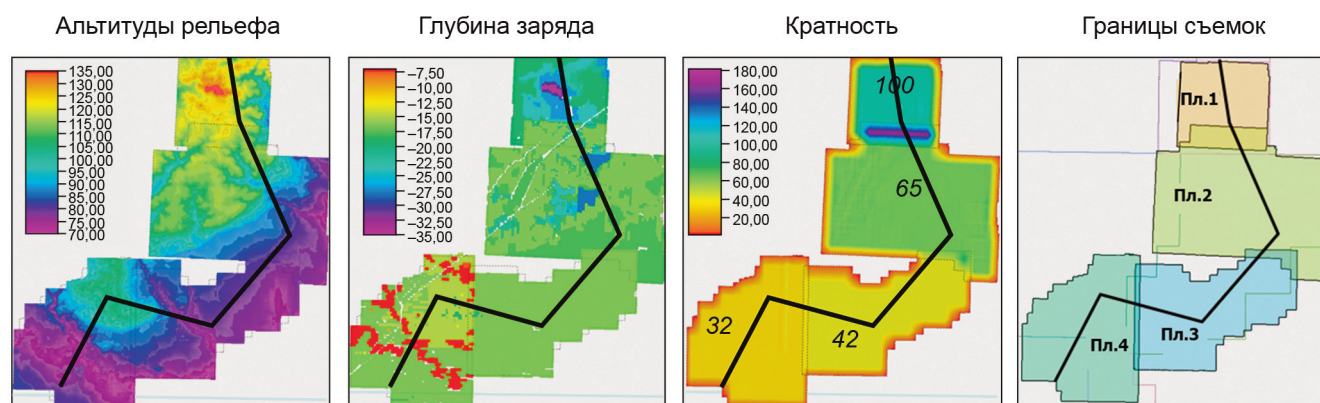


Рис. 1. Карты основных характеристик новой сейсмической съемки 2023 г. На карте кратности цифрами указана средняя кратность сейсмических съемок отдельно для каждой из площадей, на карте границ съемок — Пл. 1, Пл. 2 и т. п. — номера площадей съемок

относительно друга, ввод временных статических поправок с целью приведения их к общему уровню, выравнивание амплитуд по площади района работ. Кроме того, выполнялось постоянное отслеживание корреляции карт атрибутов с картой рельефа и с картой глубины заложения заряда для учета влияния поверхностных условий.

На рис. 1 представлены карты рельефа района работ, глубины заложения заряда, распределения кратности и положения границ предшествующих съемок.

К основным типам помех на площади работ были отнесены: случайные амплитудные помехи, поверхностные волны, кратные волны, линейные помехи, техногенные помехи от линий электропередач. Амплитудные аномалии, связанные с влиянием поверхностных условий, были устранены с помощью процедуры SCAC (surface consistent amplitude correction — поверхностно-согласованная коррекция амплитуд) и амплитудно-частотной балансировки.

Обязательным шагом при ИСО является контроль качества подавления различных типов кратных волн. Данный контроль выполнялся через анализ атрибутов, сравнение сейсмограмм и временных разрезов на ближних, средних и дальних удалениях с целью возможного обнаружения остаточного фона кратных волн и для своевременного предотвращения случайного подавления полезного сигнала.

Помимо проиллюстрированных процедур была выполнена амплитудно-частотная балансировка, протестирован частотно-зависимый SCAC, выполнена 5D регуляризация, миграция до и после суммирования. Контроль результатов обработки, в частности, контроль качества привязки к скважинам (рис. 2), позволил выполнить главную задачу ИСО, состоящую в сохранении полезного сигнала, недопущении его подавления при устранении помех и повышении отношения сигнал/шум.

Применение нейронных сетей для повышения точности ИСО и улучшения качества прогноза русел. Для сравнения качества прослеживаемости русел к сейсмическим данным прошлых лет и к ре-

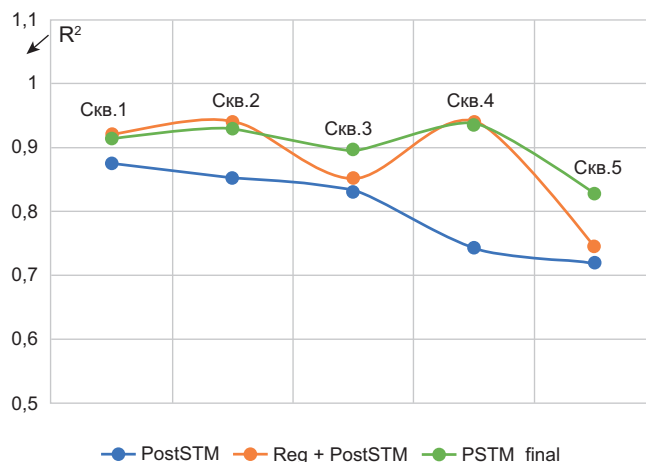


Рис. 2. Изменение квадрата коэффициента корреляции при привязке на разных этапах обработки. В легенде к графику указаны названия этапов обработки данных сейсморазведки (PostSTM — этап миграции после суммирования, Reg + PostSTM — этап миграции после суммирования и регуляризации, PSTM — финальный этап миграции после суммирования), по вертикальной оси R^2 отложены значения квадрата коэффициента корреляции сейсмических и скважинных данных

зультатам переобработки 2023 г. был применен метод спектральной декомпозиции и RGB суммирования различных частот. По результатам переобработки 2023 г. отмечается существенная детализация русловых тел в интервале целевых тюменских отложений (рис. 3).

Особое внимание уделялось ярко-выраженным русловым объектам, расположенным в северной и южной частях площади съемки (Пл. 1 и Пл. 4 на рис. 1). Они рассматривались как перспективные объекты для размещения эксплуатационных скважин под бурение. Исходя из целевых объектов изучения, авторами были предложены описанные ниже рекомендации к последовательности проведения ИСО, направленные на повышение степени прослеживаемости этих геологических тел. Важным моментом является то, что данные рекомендации учитывают постоянное итеративное взаимодействие групп обработки, супервайзеров и интерпретации.

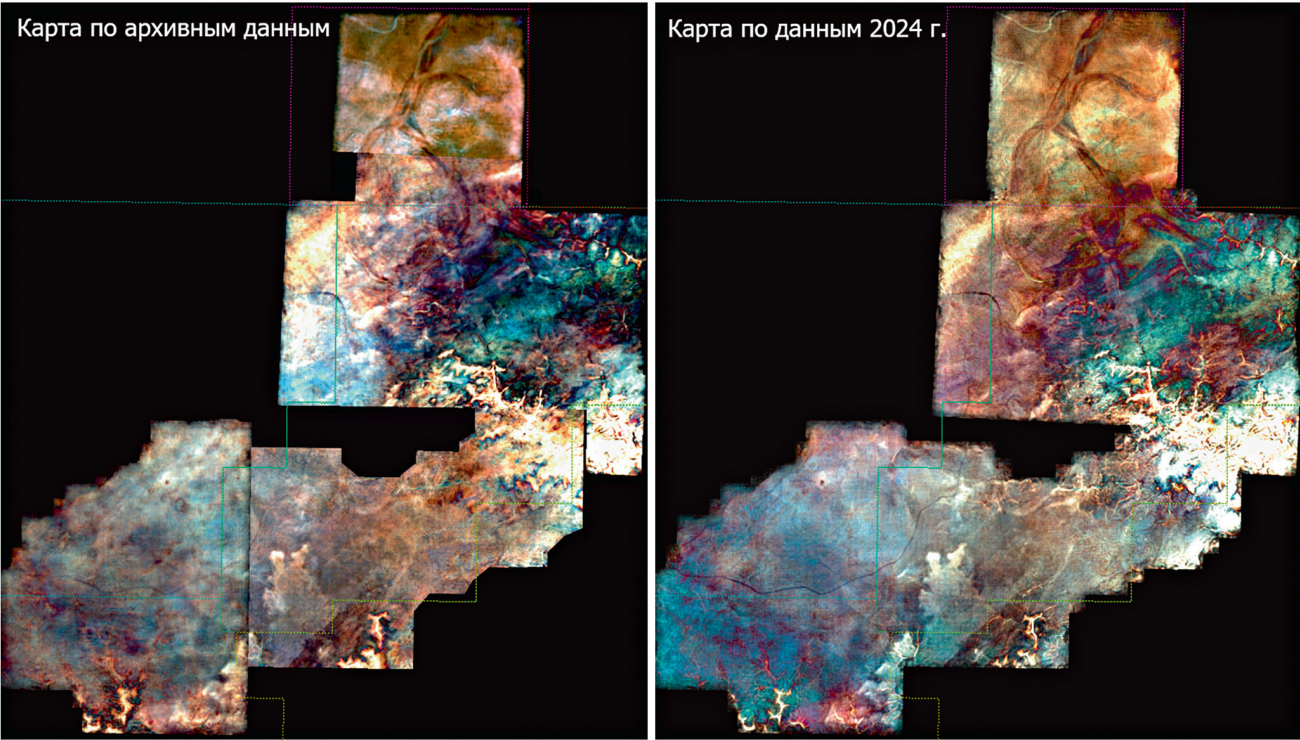


Рис. 3. Сравнение результатов RGB суммирования на старых и новой съемках

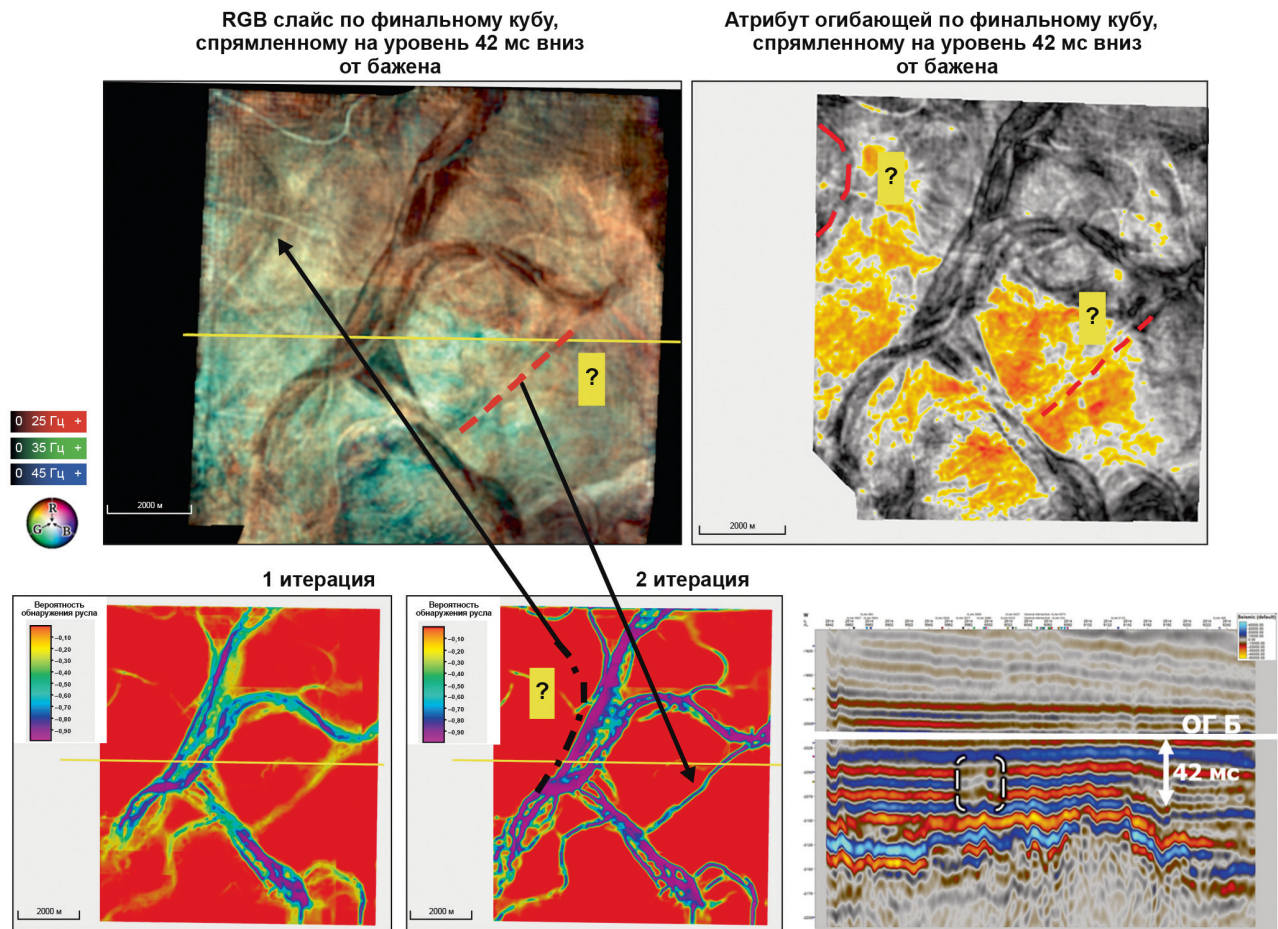


Рис. 4. Сопоставление примененных методов интерпретации русловых объектов на примере финального куба: ОГ Б — отражающий горизонт баженовской свиты; финальный куб был спрямлен на ОГ Б, после чего был рассчитан атрибут огибающей и спектральная декомпозиция на уровне ниже ОГ Б на 42 мс; итерация 1 и итерация 2 — итерации расчета нейронной сети U-Net (на вход 2-ой итерации работы нейронной сети был подан результат 1-ой итерации); знаками вопроса обозначены неопределенные, уточняемые области, представляющие интерес для исследований

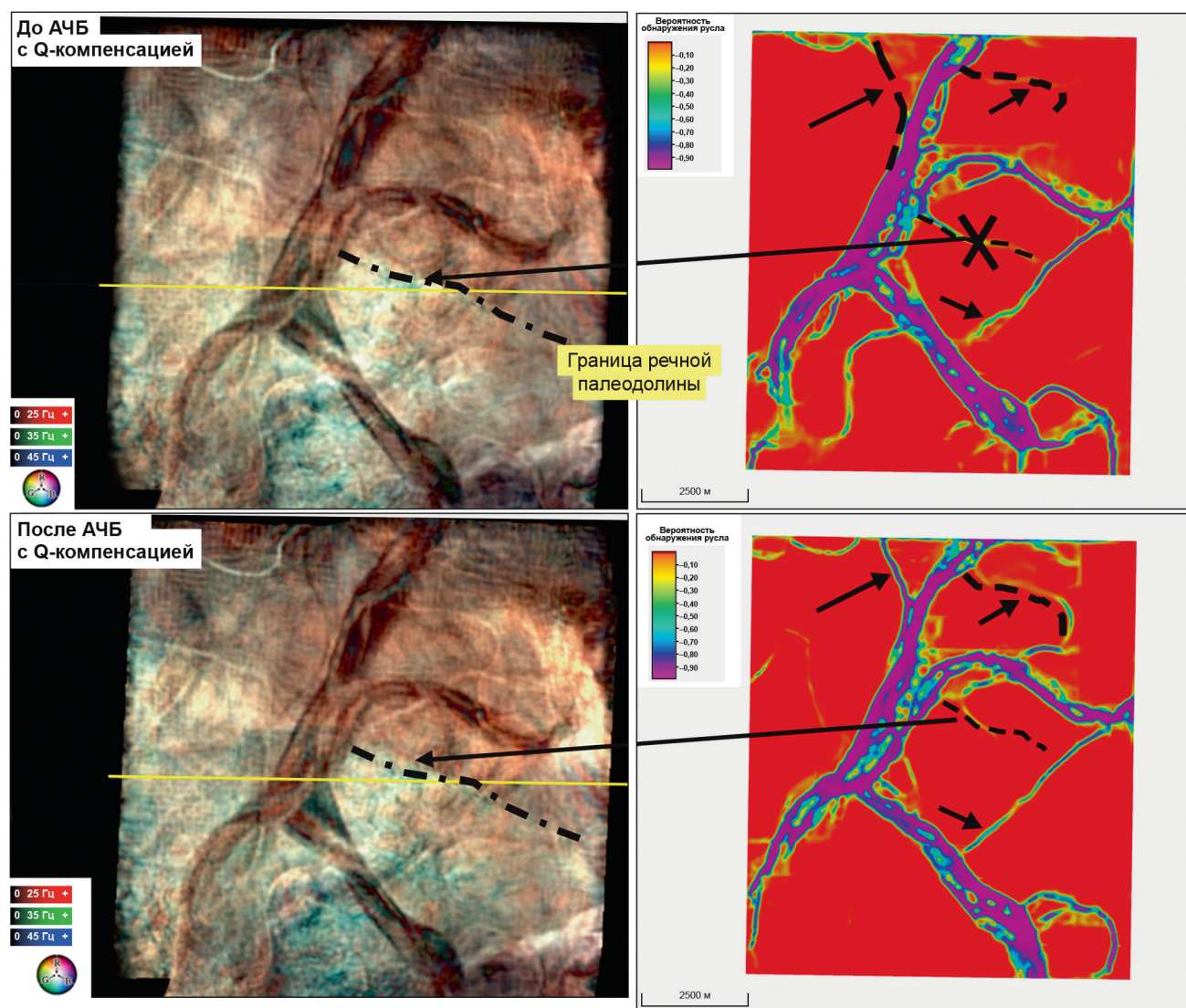


Рис. 5. Сравнение результатов расчета спектральной декомпозиции и работы нейронной сети U-Net до и после АЧБ: АЧБ — амплитудно-частотная балансировка, Q-компенсация — метод компенсации частотно-зависимого затухания сейсмической записи

Последовательность методов ИСО.

1. Анализ карт атрибутов (RMS-амплитуды, мгновенные частоты, half energy, огибающая) на каждом из этапов обработки сейсмических данных в широких/узких окнах. Данный анализ направлен на повышение отношения сигнал/помеха и, как следствие, улучшение прослеживаемости целевых объектов.

2. Анализ RGB срезов спектральной декомпозиции (мультидисциплинарный метод совместно с геологами и петрофизиками) также позволяет выделить геологические тела в результате разложения спектра сейсмической волны на частоты и соотнесения каждой из частот с определенным цветом.

3. Постоянный контроль над улучшением привязки синтетических и сейсмических данных на последовательных этапах обработки (особенно — в целевом интервале), проводимый с целью отслеживания соответствия целевых сейсмических горизонтов и геологических отбивок в скважинах и увеличения квадрата коэффициента корреляции между скважинной и сейсмической информацией.

Кроме того, авторы статьи сопоставили результаты работы нейронной сети и других методов интерпретации русловых объектов на примере сейсмического куба, полученного на финальном этапе обработки (рис. 4).

Как видно из рисунка, карты вероятности палеорусел, рассчитанные с применением нейронной сети, не уступают традиционным атрибутам, предназначенным для картирования палеорусловых объектов (RGB-срезы спектральной декомпозиции, огибающая и т. д.). Для максимально подробного картирования объектов нейронная сеть обрабатывала изображение дважды, вследствие чего на рисунке указаны две итерации. В некоторых отдельных зонах нейронная сеть позволяет выделить более тонкие элементы, что может свидетельствовать о большей чувствительности к изменениям в геологии. Данный метод имеет ряд преимуществ, однако есть и определенные ограничения его применения, которые будут описаны далее в статье.

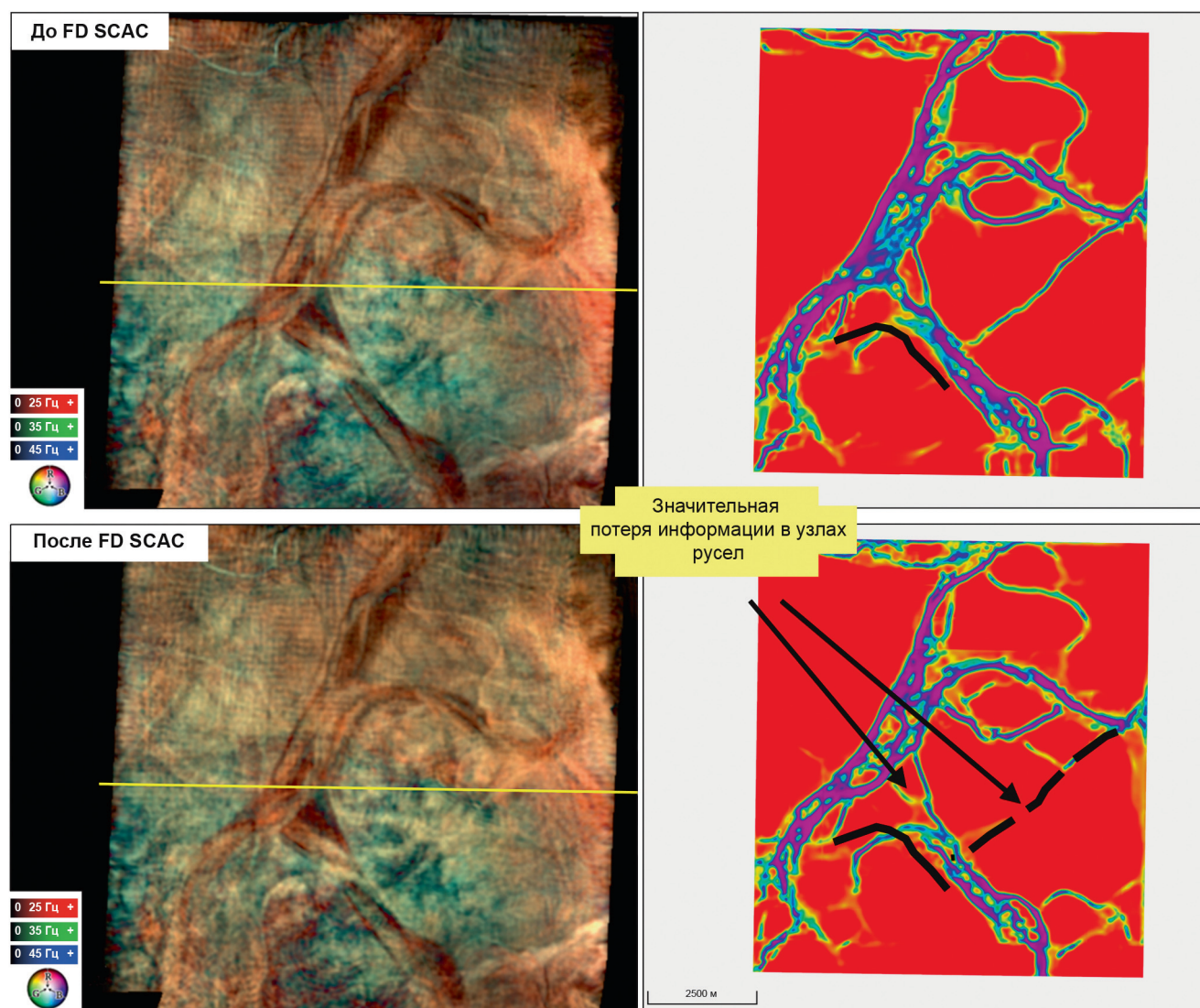


Рис. 6. Сравнение результатов расчета спектральной декомпозиции и работы нейронной сети U-Net до и после частотно-зависимой поверхностно-согласованной коррекции амплитуд (FD SCAC — frequency-dependent surface-consistent amplitude correction — частотно-зависимая поверхностно-согласованная коррекция амплитуд)

На одном из этапов обработки были сравнены кубы до и после амплитудно-частотной балансировки (АЧБ) (рис. 5).

Процедура АЧБ предназначена для выравнивания амплитудно-частотного спектра в пределах определенной площади работ с помощью осреднения значений амплитуд в заданном временном окне и в диапазоне выбранных частотных панелей. После сравнительного анализа этих кубов с применением нейронной сети и сопоставления полученных результатов с соответствующими срезами спектральной декомпозиции, было выявлено первое ограничение работы алгоритма нейронной сети, а именно: до АЧБ на срезах атрибута в целевых отложениях наблюдается граница речной долины, датируемая более ранним возрастом, то есть в данном случае нейронная сеть выделяет ее как русло. Таким образом, можно сделать вывод о том, что АЧБ выравнивала амплитудно-частотный спектр сейсмического куба и предотвратила проявления

ложных границ, относящихся к разновозрастным геологическим объектам.

Процедура частотно-зависимой поверхностно-согласованной коррекции амплитуд (FD SCAC — frequency-dependent Surface Consistent Amplitude Correction) (аналогично АЧБ выравнивающая амплитудный спектр в зависимости от частоты), неблагоприятным образом подействовала на исследуемые сейсмические данные, ухудшив прослеживаемость основных русел и продемонстрировав значительную потерю информации даже в узлах русел (рис. 6).

Исходя из данного рисунка, можно сделать вывод, что к процедуре частотно-зависимой поверхностно-согласованной коррекции амплитуд следует относиться с особым вниманием с точки зрения прослеживаемости палеорусел и тщательно тестировать параметры перед применением данной процедуры.

Как отмечалось выше, одной из главных проблем проведения переобработки и ИСО на исследуемой площади стала необходимость увязки 4-х разно-

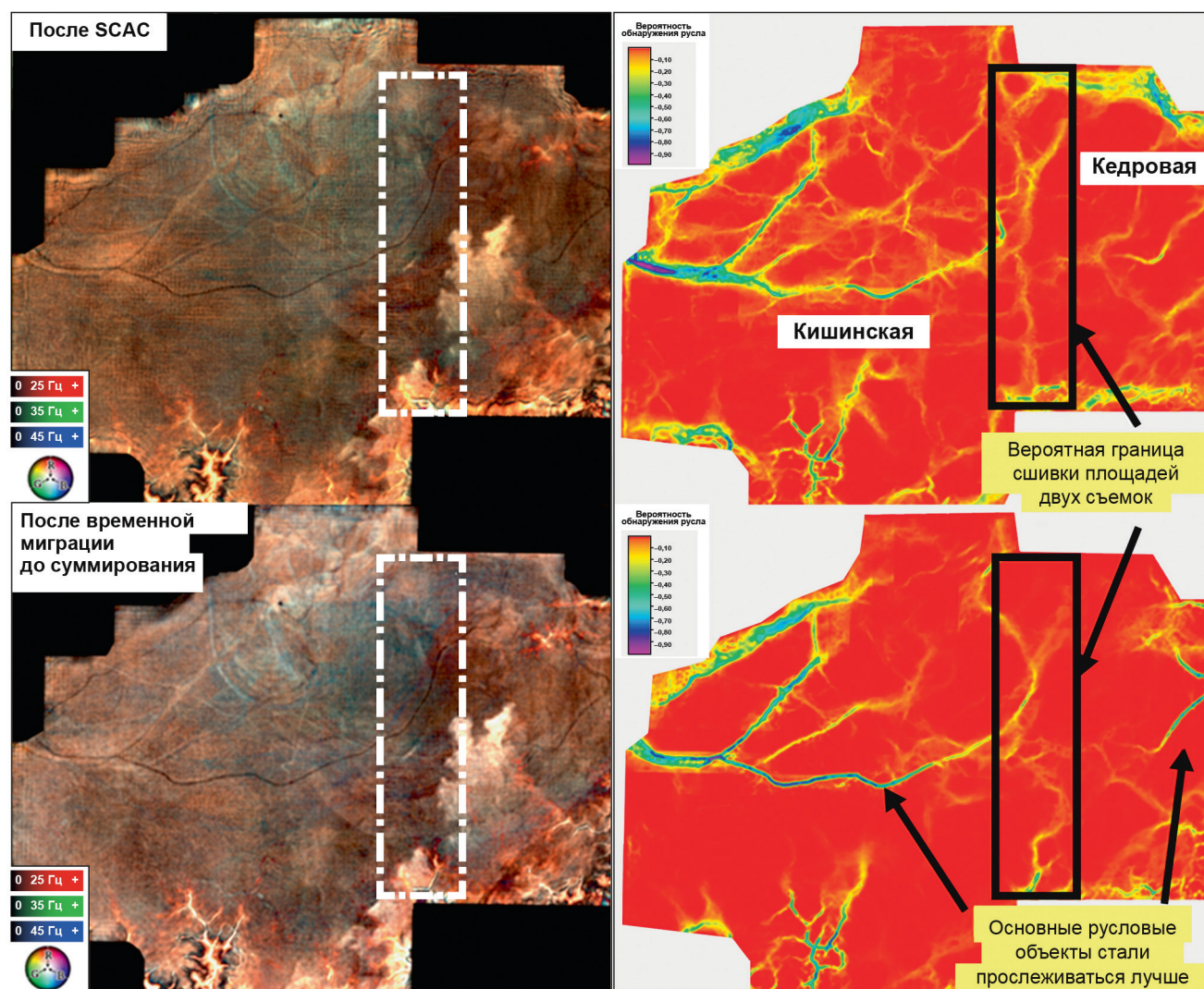


Рис. 7. Сравнение результатов расчета спектральной декомпозиции и работы нейронной сети U-Net до и после временной миграции до суммирования (SCAC — surface-consistent amplitude correction — частотно-зависимая поверхностно-согласованная коррекция амплитуд)

родных съемок между собой. Вследствие сшивки площадей двух соседних съемок, на различных атрибутах возникла заметная граница в зоне сочленения площадей, особенно привлекавшая к себе внимание группы ИСО. На этапе временной миграции до суммирования после применения сопутствующих ей итераций АЧБ вышеописанную проблему удалось разрешить. Цель сейсмической миграции — перемещение (или миграция) сейсмического сигнала отраженных волн с поверхности в реальное местоположение отражающих границ или дифрагирующих объектов в глубине. В случае миграции до суммирования некогерентные помехи подавляются уже на стадии предварительной обработки, и далее еще тщательнее фильтруются при суммировании трасс мигрированных сейсмограмм. Проведенный на следующих этапах обработки скоростной анализ и коррекция кинематики позволяют детальнее учесть скоростную модель среды, и, как следствие, корректнее восстановить отражающую границу в глубине. Итеративно выполненные процедуры

АЧБ с подобранными для каждого этапа обработки параметрами позволили выровнять АЧХ сейсмических данных различных съемок.

Исходя из полученных результатов можно заключить, что нейронная сеть хорошо «чувствует» границы разных съемок, поэтому очень важно выровнять по площади отличающиеся амплитудно-частотные характеристики (рис. 7).

Подводя итог выполненного исследования, авторы обобщили рекомендации по усовершенствованию методики ИСО с целью повышения качества прослеживаемости целевых русловых объектов, сделав акцент на особенностях изучаемых геологических тел. Палеорусловая система данного участка характеризуется сложным строением: чередованием зон хорошо сортированного материала с зонами ухудшенного коллектора. Максимальные эффективные толщины были встречены только в средне- и высокоамплитудных зонах русел в пределах речной долины. Минимальные толщины встречены в заиленных руслах за пределами речной долины. Для



Рис. 8. Схема рекомендаций по ИСО с целью повышения качества прослеживаемости русловых объектов

проводимых геологоразведочных работ основной интерес представляют неяркие и широкие русла, так как они предположительно обладают лучшими фильтрационно-емкостными свойствами. В зависимости от признаков целевых объектов были подобраны подходящие способы структурного или динамического анализов и отвечающие их требованиям тестируемые процедуры обработки, а также даны рекомендации по применению или неприменению этих процедур (рис. 8).

Методы структурного и динамического анализов, представленные в данной схеме, универсальны для анализа различных интервалов временного разреза, но параметры, использованные в каждой отдельной процедуре, тщательно подбирались группой обработки и ИСО с целью наиболее точного выделения именно палеорусловых объектов.

Заключение. В результате выполнения данной исследовательской работы была выполнена ее основная цель — разработка методического подхода ИСО с целью улучшения качества прослеживаемости русел. Применяя для анализа различные интерпретационные атрибуты, метод спектральной декомпозиции и специально обученную для поиска русел нейронную сеть U-Net, было проанализировано качество сейсмических данных после каждого из этапов обработки на предмет ухудшения/улучшения

прослеживаемости основных геологических тел, подавления техногенных некогерентных шумов и кратных волн, сохранения полезного сигнала, контроля корреляции данных с поверхностными условиями и др. Кроме того, авторы выявили ограничения протестированной сети U-Net, заключенные в том, что данная сеть отслеживает на одном срезе атрибута разновременные геологические тела и прорисовывает границу сшивки соседних съемок с разными АЧХ. Были учтены особенности результатов обработки сейсмических данных при объединении разнородных съемок прошлых лет и обобщены рекомендации по выбору способов структурного или динамического анализов и соответствующих им процедур обработки, направленных на детализацию и уточнение структурного плана.

Благодарности. Авторы выражают признательность геофизической компании CGG и ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» за профессиональную обработку данных сейсморазведки, контроль качества этих данных и предоставление их для написания статьи. Также авторы благодарны Алексеевой П.А., Мирошниченко Д.Е., Калугину А.А. и Кирияновой Т.Н. за исследования в области выделения палеорусел в отложениях тюменской свиты с использованием нейронной сети по данным сейсморазведки 3D.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеева П.А. Выделение и прогноз свойств палеорусел по сейсмическим данным с использованием нейронной сети и методов спектрального анализа: Канд. дисс. М., 2022.

Кириянова Т.Н., Оболенская А.А., Золотой Н.В. и др. Роль супервайзинга и интерпретационного сопровождения обработки сейсмических данных на различных этапах жизни месторождения от открытия до разработки, Сборник научных трудов специалистов ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг». М., 2023. 84 с.

Мирошниченко Д.Е., Алексеева П.А., Кириянова Т.Н. и др. Опыт исследования строения русловых систем с использованием свёрточных нейронных сетей, 11-я международная конференция «Геонауки: современные вызовы и пути решений». СПб., 2023.

Никульников А.Ю., Горбачев С.В., Мясоедов Д.Н., Нурмухамедов Т.В. Применение количественного контроля качества в процессе обработки данных сейсморазведки // Геофизика. 2019. Т. 1. С. 55–64.

Статья поступила в редакцию 13.10.2024,
одобрена после рецензирования 30.10.2024,
принята к публикации 23.05.2025