

ISSN 2074-8906

ПРИБОРЫ и СИСТЕМЫ РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ

ОБЩЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЕЖЕКВАРТАЛЬНЫЙ ЖУРНАЛ

ИЮЛЬ-СЕНТЯБРЬ

3/2026

Издается с 2002 г.

ТЕМА НОМЕРА:



ТАКЖЕ В НОМЕРЕ:

Оконтуривание кимберлитовой трубки на основании данных
сейсморазведочных работ МОГТ 3D

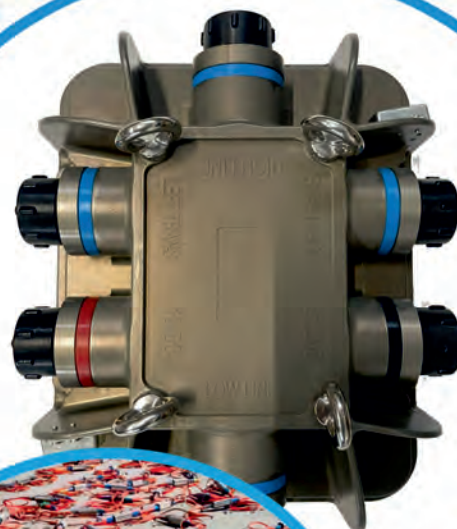
**ЛУЧШИЕ В МИРЕ
ТЕХНОЛОГИИ
для
РОССИЙСКОЙ
ГЕОФИЗИКИ!**



ООО «НОВЫЙ ВОСТОКГЕО» -
единственный официальный
представитель в России и СНГ группы
заводов производителей, которые
разрабатывают испытывают
внедряют новые технологии для
сейсморазведочной, геофизической,
буровой и нефтяной отраслей.

НОВЫЙ ВОСТОКГЕО
NEW EASTGEO Co. Ltd

**ВОЗМОЖНОСТИ для РОССИЙСКОЙ ГЕОФИЗИКИ в ПЕРИОД
ОТСУТСТВИЯ ПРЕДЛОЖЕНИЯ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА
РЫНКЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ для РАБОТЫ
в АКВАТОРИИ ULS 408-428, 508TZ.**



**ULS 408-428 (КОМПЛЕКТ ОБОРУДОВАНИЯ
КАБЕЛЬНЫЕ СЕКЦИИ, БЛОКИ, СОВРЕМЕННЫЕ
СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ, ГИДРОФОНЫ-ГЕОФОНЫ,
для ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛЕВОЙ СИСТЕМЫ в
ТРАНЗИТНЫХ ЗОНАХ до 50М)**

ТЕМА НОМЕРА «КОМПЛЕКСНЫЕ РЕШЕНИЯ В ГЕОЛОГОРАЗВЕДКЕ»**СОДЕРЖАНИЕ**

Наши партнеры	5
---------------------	---

КОЛОНКА РЕДАКТОРА

Главный редактор Слонов Д.Н.	7
-----------------------------------	---

ТЕМА НОМЕРА**Синергия сейсморазведки и электроразведки при комплексировании геофизических методов в нефтегазовой геологии**

Мисюркеева Н.В., Селяев В.А., Агафонов Ю.А., Токарева О.В., Давыденко С.А.	8
---	---

Электроразведка методом ЗСБ и машинное обучение: новые возможности для прогнозирования геологических рисков

Давыденко С.А., Поляков Д.В., Мисюркеева Н.В., Агафонов Ю.А., Селяев В.А.	19
--	----

Современные подходы к комплексным геофизическим исследованиям сложнопостроенных территорий

Самсонов М.Б., Богомолов Н.Ю., Скрыбин А.С., Артюгин А.И., Бухтеев Е.М.	29
--	----

Первые результаты комплексных геофизических исследований месторождения термальных вод Гоуджекит (участок «Солнечный», Северное Прибайкалье)

Шашкеева Л.П., Буддо И.В., Черных А.А., Часовитин П.А., Рукосуев Д.А., Добрынина А.А.	39
--	----

Опыт применения аппаратно-программного комплекса БПЛА-магниторазведки и аэротепловизионной съёмки в условиях высокогорной местности

Рукосуев Д.А., Юрьев А.А., Черных А.А., Рыбченко А.А., Буддо И.В.	45
--	----

ТЕХНОЛОГИИ И АППАРАТУРА**Пирамида потребностей «Геотом»**

Анкушев В.В.	52
-------------------	----

От экспертного опыта к математическому проектированию: новая парадигма подготовки проектов 3D-сейсморазведки

Федоров А.Б.	59
-------------------	----

Повышение эффективности региональных сейсмических исследований в сложнопостроенных средах с использованием технологии продольно-непродольного профилирования (широкого профиля)

Шушкевич Н.Ю., Гоц И.А., Каплан С.А., Лебедев Е.Б., Силаенков О.А.	67
---	----

Оконтуривание кимберлитовой трубки на основании данных сейсморазведочных работ МОГТ 3D

Душкин А.Б., Лаптев А.П., Мамедов О.Г., Мифтахутдинова Е.В., Пенделяк Р.Н., Пятунина Е.В., Спешиллов В.И., Устинов В.Н., Шелковникова И.Ф.	76
---	----

Техногенные помехи как источник сейсмических колебаний

Ягудин И.Р., Гафаров Р.М., Сираев И.А. 87

Разработка и обоснование камеральной методики подавления вторичных гармоник в технологии высокопроизводительной вибрационной сейсморазведки Slip-Sweep

Кибальчич А.С., Крайнова А.К., Коробкин В.С. 92

Автоматизация контроля данных электротомографии и магниторазведки с применением искусственного интеллекта

Кричинский А.К., Буддо И. В., Поспеев А. В., Черных А.А. 100

Гибридный алгоритм детектирования и локализации микросейсмических событий по данным DAS на основе MLE и 3D/2D-CNN: апробация на нагнетательной скважине и перспективы мониторинга

Емельянов Б.В., Рыжов В.А., Шарапов И.Р., Хабаров А.В., Рыков А.П., Моисеенков А.В. 108

Сейсмический амбиликал пневмоисточников: разработка и производство в России

Чураев С.А., Воронцов В.В., Казанин А.Г. 118

ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**Программная регулировка усиления в обработке данных метода преломлённых волн**

Романов В.В., Рыжков В.И., Аврамёнок А.В., Кирсанова В.С. 123

Методика определения физических свойств дисперсных грунтов в естественном залегании по результатам инженерной сейсморазведки

Романов В.В., Кауркин М.Д., Андреев Д.О., Иванов А.А. 127

Оценка объёмной плотности грунтов Московской агломерации при карстологическом прогнозе

Романов В.В., Новиков П.В., Матюшенко А.А., Посеренин А.И. 131

**Геофизика открывает историю. Тайны усыпальницы Николая Львова
Георадиолокационные исследования в усадьбе Никольское-Черенчицы**

Сергеев К.С., Севостьянов М.В., Бурский И.С., Словицкий С.Л., Слонов Д.Н. 137

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИДЕИ И РЕЗУЛЬТАТЫ**Методический подход к моделированию дискретных сетей трещин карбонатных коллекторов на основе комплексирования геофизических методов**

Брюшинкина Е.Г., Буддо И.В. 148

Способ повышения достоверности стратификации отражающих границ кайнозойских отложений Ферганской межгорной впадины по данным геофизических исследований

Урмонов А.Х., Кострыгин Ю.П. 156

Природный водород – топливо будущего!?

Череповский А.В. 160

ОБРАЗОВАНИЕ

Практика, которая помогает полюбить профессию

Фролов А.С., Дорошенко А.А., Игнатова А.С., Овчарюк М.А., Сталбо Л.А. 168

НОВОСТИ И СОБЫТИЯ

У Лукоморья снова вместе друзья сошлись на «Геофесте» 174

Некролог Кашика А.С. 181

НАШИ ПАРТНЕРЫ:**Главный редактор:**
Слонов Д.Н.**Редакционная коллегия:**
Абдулвалиев М.Т., к.т.н.
Александров П. Н., д.ф.-м.н.
Белоусов А.В., к.т.н.
Волкова Е.Н., к.г.-м.н.
Гафаров Р.М., к.т.н.
Гогоненков Г.Н., к.т.н.
Гурьев С.В.
Дагаев И.Л., к.т.н.
Детков В.А., к.т.н.
Жуков А.П., д.т.н.
Золотая Л.А., к.г.-м.н.
Кострыгин Ю.П., д.т.н.
Михеев С.И., д.г.-м.н.
Тарасов Н.В., к.т.н.
Циммерман В.В., к.т.н.
Череповский А.В., к.т.н.
Шехтман Г.А., д.т.н.
Шиманский С.В., к.г.-м.н.**Руководитель проекта**
Матвеев С.А.**Зам. главного редактора**
Горбачев С.В., к.т.н.**Корректор:**
Молчанова Д.В.**Учредитель:**
СРО МОО ЕАГО**Издатель:**
ООО «ПСРГео»**Адрес издательства:**
г. Саратов, ул. Крайняя, д. 129.
Телефон +7-987-822-68-37**Обложка и оформление:**
Мокроусов Д.В.**Вёрстка:**
Мокроусов Д.В.**Тираж отпечатан:**
ИП Волоконский
Андрей Викторович
Тел.: +7-905-326-0213
Тираж: 300 экз.**Подписано в печать:**
25.09.2026**Дата выпуска:**
30.09.2026

Ответственность за подбор и изложение фактов в статьях несут авторы. Редколлегия может публиковать статьи, не разделяя точки зрения авторов. Контакты с авторами статей ведутся через редакцию.

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати, телерадио вещания и средств массовых коммуникаций за номером ПИ № 77-7906 от 27.04.2001 г.
ISSN: 2074-8906
Web-сайт: psrgeo.ru**Организатор проекта:**
Турлов П.А.

Уважаемые коллеги!

Представляем вашему вниманию очередной номер журнала «Приборы и системы разведочной геофизики». Этот выпуск мы решили посвятить теме «Комплексные исследования в геолого-разведке».

Сегодня большинство геофизических проектов объединяет несколько методов и технологий, однако в этом выпуске мы сосредоточились именно на работах, в которых комплексирование становится основой методики исследования и позволяет получить новый практический результат.

Тема вызвала большой интерес у авторов и компаний, поэтому номер получился насыщенным и разнообразным. Открывает его статья специалистов компании «Сигма Гео» «Синергия методов при комплексировании для изучения нефтегазовых объектов». Это содержательная методическая работа, которая будет полезна не только практикам, но и преподавателям профильных дисциплин. Методическую линию продолжает публикация специалистов Института земной коры СО РАН о моделировании дискретных сетей трещин карбонатных коллекторов на основе комплекса геофизических данных.

Работы этого научного учреждения представлены в номере и другими материалами. Авторы рассказывают о первых результатах комплексных исследований месторождения термальных вод Гоуджекит, об опыте совместного применения БПЛА-магниторазведки и аэрофотограмметрической съёмки в высокогорье, а также об автоматизации контроля данных электротомографии и магниторазведки с применением искусственного интеллекта.

Традиционно в журнале много практикоориентированных материалов. Компания «ВЕГА» в статье «Современные подходы к комплексным геофизическим

исследованиям сложнопостроенных территорий» рассказывает о своем опыте работ на ТПИ, проектах, где именно комплексирование стало основой успешных рекомендаций компании.

Специалистам-практикам будет, несомненно, интересен материал от ВНИГНИ, посвященный применению методики Широкий Профиль в рамках региональных исследований. Группа авторов рассказывает о своем опыте изучения кимберлитовых тел в Архангельской области сейсморазведкой 3D. Особо хочу отметить организационную составляющую данного проекта – работы были выполнены партией с составом менее 30 человек. Отличных опыт сейсморазведки «Лоукост». На фоне растущего спроса на малые и сверхмалые проекты такой опыт может быть полезен при планировании экономически эффективных исследований.

Нам всегда интересно представлять технологии и инструменты, повышающие экономическую эффективность. Андрей Федоров, главный геофизик АО «Геотек» в статье «Конец эпохи ручных расчетов при проектировании сейсморазведки» анонсирует свою разработку – ПО для проектирования, позволяющий быстро и вариативно оценить многообразие технологических решений, причем, как с точки зрения методики исследований, так и с точки зрения стоимости работ.

Вопросам технологической эффективности сейсморазведки также посвящен материал Анкушева В.В. (ООО «Сейстех») «Пирамида потребностей «Геотом». Как рождаются технологии, меняющие отрасль».

Быстрый рост рынка ГРП прогнозируется сегодня многими экспертами. Так объём рынка ГРП в 2025 году составил 223 млрд рублей, дается прогноз роста до 259 млрд рублей в текущем году и до

334 млрд рублей к 2028 году. Ежегодно в России выполняется порядка 5–6 тысяч операций ГРП. Увеличение числа таких операций делают особенно актуальными надёжное выделение и локализацию микросейсмических событий. Авторы из компании «Интегрированные Автоматизированные Системы» представляют гибридный алгоритм обработки данных DAS на основе MLE и нейронных сетей 3D/2D-CNN, апробированный на нагнетательной скважине.

Наполнение разделов «Технологии и аппаратура», «Инженерные исследования» и «Геологические идеи и результаты» заинтересует читателей разнообразием раскрываемых тем.

Отдельная тема номера — природный водород, который сегодня всё чаще рассматривается как возможное новое направление геологоразведки. Пока вокруг его происхождения, масштабов ресурсов и перспектив промышленной добычи остаётся немало дискуссионных вопросов. Тем важнее уже сейчас обсуждать, где и какими методами искать геологический водород, какие признаки могут указывать на зоны его миграции и какую роль в этих исследованиях способна сыграть геофизика.

Особое место занимает публикация «Геофизика открывает историю. Тайны усыпальницы Николая Львова». Редакция журнала вместе со специалистами РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина приняла участие в георадиолокационном обследовании нижнего храма-мавзолея церкви Воскресения Христова в усадьбе Никольское-Черенчицы Тверской области. Выявленные аномалии позволили наметить участки для последующей инженерно-археологической проверки — без вмешательства в исторические конструкции памятника. Этот материал выходит за привычные тематические рамки журнала, но точно отвечает духу геофизики — науки, которая помогает увидеть скрытое.

Николай Александрович Львов, создатель усадьбы и церкви-усыпальницы, был не только выдающимся архитектором русского классицизма, но и инженером, изобретателем, поэтом, переводчиком, художником и даже геологом. Современники и потомки не случайно называли его «русским Леонардо» и «гением вкуса».

В следующем номере мы продолжим разговор о развитии геофизических технологий, сосредоточившись на программном обеспечении и камеральных работах. Современная геофизика определяется уже не только возможностями полевой аппаратуры, но и тем, насколько быстро и качественно данные проходят контроль, обработку, интерпретацию и превращаются в обоснованные геологические выводы. Поэтому логичным продолжением нынешней темы комплексирования станет обзор российских программных решений и новых подходов к работе с геофизической информацией.

А пока — интересного вам прочтения журнала, посвященному комплексированию геофизических методов.



С уважением,
главный редактор
журнала «Приборы и
системы разведочной
геофизики»
Дмитрий Слонов.

УДК 550.83:553.98

Синергия сейсморазведки и электроразведки при комплексировании геофизических методов в нефтегазовой геологии

■ Мисюркеева Н.В.^{1,2}, Селяев В.А.¹, Агафонов Ю.А.¹, Токарева О.В.¹, Давыденко С.А.^{1,3}

¹ ООО «СИГМА-ГЕО», г. Иркутск.

² Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск.

³ Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск.

Аннотация. В статье комплексирование геофизических методов рассмотрено как многоуровневая методология. Систематизированы подходы к комплексированию геофизических методов в отечественной и зарубежной практиках, а также рассмотрена их практическая реализация для комплекса сейсморазведка-электроразведка. Основное внимание уделено использованию электроразведки в обработке и интерпретации сейсмических данных, совместному прогнозу строения, коллекторских свойств и насыщения, а также прогнозу условий бурения и развитию машинного обучения.

Ключевые слова: комплексирование геофизических методов, сейсморазведка МОГТ 3D, электроразведка, ЗСБ, физико-геологическая модель, joint inversion, машинное обучение.

1. Введение

Современные геологоразведочные работы на нефть и газ все чаще выполняются в условиях, когда структурный фактор перестает быть единственным надежным критерием перспективности. Сложнопостроенные карбонатные и трещинные резервуары, литологически и тектонически экранированные ловушки, неоднородные терригенные коллекторы, соленосные и трапповые толщи, многолетнемерзлые породы и сложный рельеф создают разные типы неопределенностей при поисках и разведке месторождений нефти и газа. В таких условиях принципиальное значение имеет не увеличение числа методов, а формирование рационального комплекса, в котором каждый метод отвечает за собственную часть геологического вопроса, а результаты взаимно ограничивают и проверяют друг друга.

2. История и развитие методологии комплексирования

В отечественной геофизике комплексирование сформировалось как самостоятельное методологическое направле-

ние задолго до появления современных алгоритмов совместной инверсии (joint inversion). Одним из ключевых основоположников является Г.С. Вахромеев, которым были сформулированы принципы согласованного использования нескольких физических полей. В монографии 1978 г. эти идеи получили систематическое развитие. Комплекс рассматривался не как фиксированный набор съемок, а как средство сокращения неоднозначности при решении конкретной геологической задачи [7].

В работах Г.С. Вахромеева и А.Ю. Давыденко физико-геологическая модель стала связующим звеном между геологическим объектом, физическими свойствами, полевым экспериментом и интерпретацией [8]. Такой подход принципиально важен и для современных геофизических исследований, например при комплексировании сейсморазведки и электроразведки.

Сначала формулируется модель ожидаемых структурных и петрофизических характеристик искомого объекта, затем выбираются методы и параметры съемки, способные этот объект обнаружить.

Иркутская школа внесла существенный вклад в развитие именно нефтегазового направления электроразведки и ее интеграции с сейсморазведкой. Выдающиеся Иркутские ученые Мандельбаум М.М., Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю., Поспеев А.В. стали основоположниками и разработчиками общих принципов комплексирования геофизических методов, что способствовало повышению эффективности ГРП. Большинство проектов ГРП с 70-х годов прошлого века в Восточной Сибири были именно комплексные, с применением электроразведки, благодаря которым было открыто много новых месторождений в Восточной Сибири (Ковыктинское, Верхнечонское, Ярактинское, Дулисьминское, Атовское и др.).

Исследования по выделению коллекторов в осадочном чехле юга Сибирской платформы [14], опыт Ковыктинского месторождения [1, 2], интегрирование электромагнитных и сейсморазведочных данных на разных стадиях ГРП [4] и развитие ЗСБ в форматах 2D, 3D и 4D [5] сформировали практическую линию от региональной геоэлектрической модели до площадной высокоплотной съемки и мониторинга. В этой логике комплексирование является не разовой процедурой сопоставления результатов, а последовательностью взаимосвязанных решений на региональном, поисковом, разведочном и эксплуатационном этапах.

Большой вклад в обобщение принципов комплексирования для нефтегазопроисковых, рудных, инженерных и других задач, перехода к системному и модельному представлению объекта внесли В.Е. Никитский, В.В. Бродов [11]. А.Г. Берзиным комплексирование переносится из общей методологии в практику многомерного анализа, использование накопленной геолого-геофизической информации и компьютерных технологий для совместной интерпретации [3]. М.И. Рыскин и К.Б.

Сокулина развивают модельный подход через согласованные ФГМ, комплексную интерпретацию полей и формализованный анализ многомерных признаков, сделан акцент на рациональном выборе методов именно для прогнозирования нефтегазовых залежей [15]. Современные обобщения А.А. Никитина и В.К. Хмелевского, а также А.С. Долгая связывают комплексирование с неоднозначностью обратных задач, оптимизацией наблюдений, комплексным анализом и выбором типовых, рациональных и оптимальных комплексов [10, 13].

В зарубежной нефтегазовой практике комплексирование СРП+ЭРП последовательно развивалось в морской технологии электроразведки CSEM (Controlled-Source Electromagnetic Method). L. MacGregor и J. Tomlinson подчеркивают необходимость интерпретации электромагнитных данных совместно с сейсморазведкой и скважинной информацией [20]. G. M. Hoversten и соавторы показали прямую оценку параметров коллектора при совместной инверсии сейсмических и электроразведочных данных в морских условиях [19].

3. Подходы к комплексированию. Методологическая основа и способы интеграции данных

Комплексирование представляет собой широкое понятие. Оно включает постановку геологической задачи, построение ФГМ, выбор рационального комплекса методов, согласование сети и последовательности наблюдений, совместную обработку, интерпретацию и моделирование [7, 8, 10, 11, 13, 15].

ФГМ и рациональный комплекс задают методологическую основу исследования. Классический подход Вахромеева и других отечественных исследователей начинается не с «наложения» результатов, а с постановки геологической задачи и построения ФГМ. В ФГМ фиксируются ожидаемые геометрия объекта, диапа-

зоны физических свойств, возможные мешающие факторы и характер аномального эффекта. На этой основе обосновываются состав рационального комплекса, очередность методов, параметры сети и критерии интерпретации [7, 8, 10, 11, 13,]. Таким образом, ФГМ выполняет управляющую и проверочную функцию. Она предшествует выбору методов и затем уточняется по мере накопления геофизических, скважинных и петрофизических данных.

На следующем уровне располагаются уже способы фактического комплексирования разнородных данных, начиная с сопоставления моделей после инверсии, инверсией с ограничением («constrained inversion»), совместной инверсией («joint inversion») и заканчивая одним из наиболее распространенных, это петрофизическая, вероятностная и машинно-обучаемая интеграция [18, 21] (Рисунок 1).

3.1. Совместная интерпретация

Наиболее распространенный тип комплексирования предполагает независимую обработку и инверсию каждого метода с последующим совместным

анализом карт, разрезов и кубов. Такой подход особенно эффективен, когда требуется проверить устойчивость геологической гипотезы по независимым физическим полям. При этом сохраняется риск ложных корреляций, поскольку похожее положение аномалий не гарантирует единства их геологической природы. Поэтому совместная интерпретация должна опираться на структурно-вещественные комплексы, согласованную стратиграфическую разбивку и калибровку на скважины [2, 11, 15, 21].

В работах А.Г. Берзина и М.И. Рыскина важное место занимает формализация этого этапа, включая работу с многомерным массивом признаков, комплексными показателями, статистическими зависимостями и согласованными моделями [3, 15].

Современным развитием являются методы кластеризации, главных компонент, вероятностной классификации и машинного обучения, однако эти алгоритмы не отменяют ФГМ.

Выбор признаков, классов и обучающих примеров должен быть геологически обоснован.

▼ Рис. 1. Методологическая основа комплексирования и основные способы интеграции геофизических данных



3.2. Комплексирование с априорными ограничениями

При комплексировании с априорными ограничениями модель, границы или параметры, полученные одним методом, используются как фиксированная либо допускающая заданное отклонение априорная информация при инверсии другого метода. М. Moorkamp отделяет так называемую инверсию с ограничениями («constrained inversion») от «joint inversion» [21]. В первом случае информация другого метода рассматривается как опорная и не изменяется за счет обратной связи в ходе инверсии. В joint inversion связанные модели обновляются совместно.

Для комплекса СРР+ЭРР типичными примерами служат задание геометрии горизонтов по МОГТ при инверсии ЗСБ, фиксация глубин границ по стратиграфическим отбивкам в скважинах и использование диапазонов параметров, откалиброванных по ГИС.

3.3. Совместная инверсия (joint inversion)

Совместная инверсия (joint inversion) предполагает единую вычислительную постановку, в которой одновременно оптимизируются модели, описывающие разные физические свойства и минимизируется общая целевая функция [18, 19, 21]. Связь между моделями может задаваться разными способами. Наиболее распространена структурная связь, предполагающая пространственную согласованность границ или градиентов физических свойств.

Другой распространенный способ основан на петрофизической связи. Сейсмические и электрические параметры в этом случае выражаются через общий набор характеристик породы, например пористость, эффективная мощность, параметр насыщения, минерализация флюида, сопротивление

коллектора и вмещающей среды, либо связываются эмпирическим отношением [19,21]. Такое деление на структурное и петрофизическое связывание удобно для задач СРР+ЭРР, но не исчерпывает все варианты joint inversion.

3.4. Петрофизическая, вероятностная и машинно-обучаемая интеграция

Для электроразведки нефтегазовых месторождений принципиальна петрофизическая интерпретация УЭС. Классические зависимости Archie и разработки В.Н. Дахнова связывают электрические свойства с пористостью, минерализацией пластовой воды и водонасыщенностью [9, 17]. Здесь важно различать два уровня. Если сначала независимо получена модель УЭС, а затем по локально откалиброванным зависимостям выполняется пересчет в Кп, Кв/Кнг или другие параметры, это постинверсионная петрофизическая интерпретация, а не joint inversion. Петрофизически связанной joint inversion такая схема становится только тогда, когда петрофизическая зависимость включена непосредственно в общую инверсионную постановку и связанные модели обновляются совместно. В обоих случаях обязательна калибровка по скважинам (ГИС, керну, испытаниям и т.д.), поскольку одинаковые значения УЭС могут иметь различную геологическую природу.

Получаемые вероятностные модели позволяют учитывать не одну детерминированную зависимость, а набор признаков и неопределенностей. В такой постановке сейсмические атрибуты, структурное положение, УЭС, разломная модель, ГИС и результаты испытаний используются как независимые или условно зависимые параметры. Машинное обучение является частным развитием этой идеологии. Его преимущество состоит в возможности работать с многомерными нелинейными связями, а основное огра-

ничество связано с полнотой и репрезентативностью обучающей выборки, утечкой информации и пространственной автокорреляцией. Поэтому результат должен сопровождаться пространственно корректной кросс-валидацией и вероятностной оценкой, а не только картой класса.

4. Рациональный комплекс геофизических методов в нефтегазовой геологии

Оптимальный набор методов определяется прежде всего геологической задачей. Для регионального районирования важны грави- и магниторазведка, сейсморазведка и электроразведка ЗСБ, МТЗ по редкой сети наблюдений. При подготовке локального объекта основную роль играют детальная сейсморазведка МОГТ и электроразведка ЗСБ. На разведочном и эксплуатационном этапах возрастает значение высокоплотных 3D наблюдений. Данные ГИС, керн, испытаний и бурения обеспечивают обязательную калибровку всех полевых геофизических методов. Рациональный комплекс в этом смысле динамичен, то есть состав и плотность наблюдений должны меняться по мере роста априорной информации [5, 10, 11, 13, 16].

5. Почему комплекс СРР+ЭРР является наиболее информативным в нефтегазовой геологии

Сейсмические и электромагнитные методы чувствительны к различным физическим свойствам, поэтому их неопределенности во многих случаях взаимодополняемы. Сейсмика локализует границы, обусловленные контрастами упругих свойств, тогда как электроразведка реагирует на распределение электрической проводимости, связанное с минеральным скелетом, поровым пространством, составом и насыщением флюида. Совмещение этих характери-

стик особенно важно там, где разные по литологическому составу породы имеют близкий сейсмический отклик, но различаются по УЭС, либо наоборот [9, 16, 17, 21]. Поэтому ценность комплекса заключается в независимости физических полей и их совместной калибровке, а не в замене одного метода другим.

С позиций управления неопределенностями задача комплексирования СРР и ЭРР состоит в последовательном сокращении множества допустимых геологических моделей. Сейсморазведка прежде всего ограничивает геометрию объекта. Электроразведка сужает диапазон его электрических свойств и при наличии петрофизической калибровки помогает оценивать характер насыщения. Скважинные данные обеспечивают независимую проверку. На результат влияет независимость физических полей, корректность передачи ограниченный между моделями и учет различий в разрешающей способности методов.

6. Современная 3D электроразведка как компонент интегрированной модели

Развитие высокоплотных 3D наблюдений ЗСБ изменило роль электроразведки в нефтегазовых проектах. Уплотнение сети, повышение мощности источников, повышение точности измерительной аппаратуры, рост вычислительных ресурсов и развитие регуляризованной инверсии позволяют перейти от редких зондирований к объемным моделям УЭС, которые можно сопоставлять с 3D сейсмическим кубом на уровне отдельных горизонтов [5, 16]. Это принципиально важно, поскольку интеграция становится пространственно согласованной и не ограничивается сопоставлением нескольких профилей.

В то же время рост плотности наблюдений сам по себе не снимает неоднозначность ЭРР. Устойчивость модели зависит

от геометрии установки, чувствительности к целевому интервалу и возможностей функционала аппарата инверсии. Поэтому структурная информация МОГТ, привязка к ГИС и петрофизическая регуляризация становятся частью методики интерпретации 3D ЗСБ [5, 16, 21].

7. Практические сценарии комплексирования СРР и ЭРР

7.1. Электроразведка в поддержку сейсморазведки

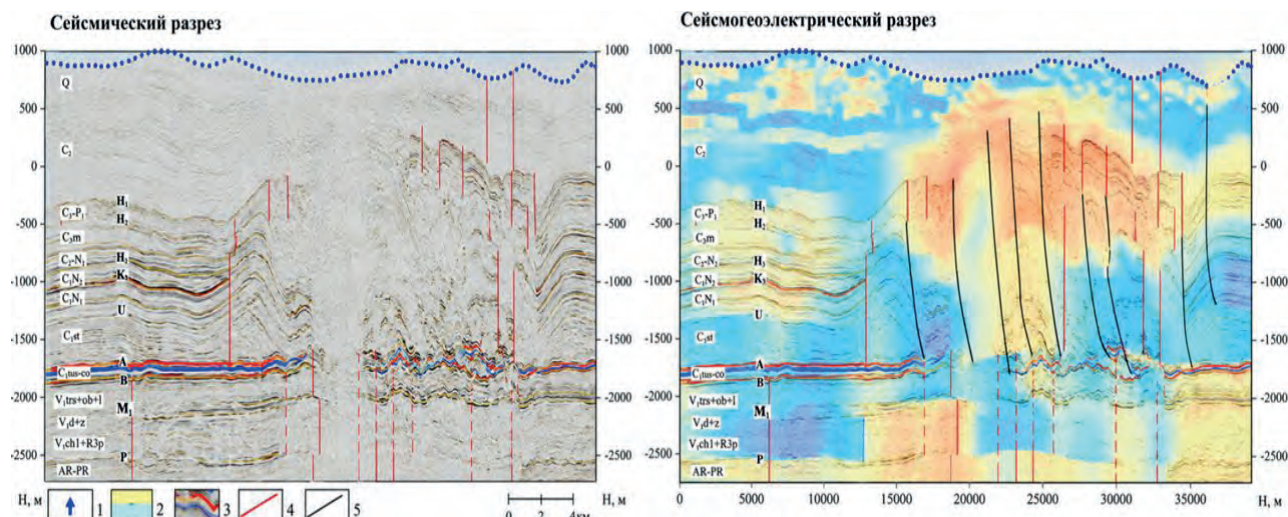
Первое направление связано с использованием независимой геоэлектрической информации в зонах, где сейсмическая модель недостаточно устойчива. В соленосных и тектонически нарушенных разрезах изменения сопротивления могут маркировать зоны вторичного изменения, разуплотнения и флюидопроницаемости, которые слабо или неоднозначно выражены в волновом поле [12] (Рисунок 2). Сопоставление геоэлектрического и сейсмического разрезов в таких участках помогает проверять положение разломов и границ и формировать более устойчивую геологическую гипотезу [1, 2, 12, 16].

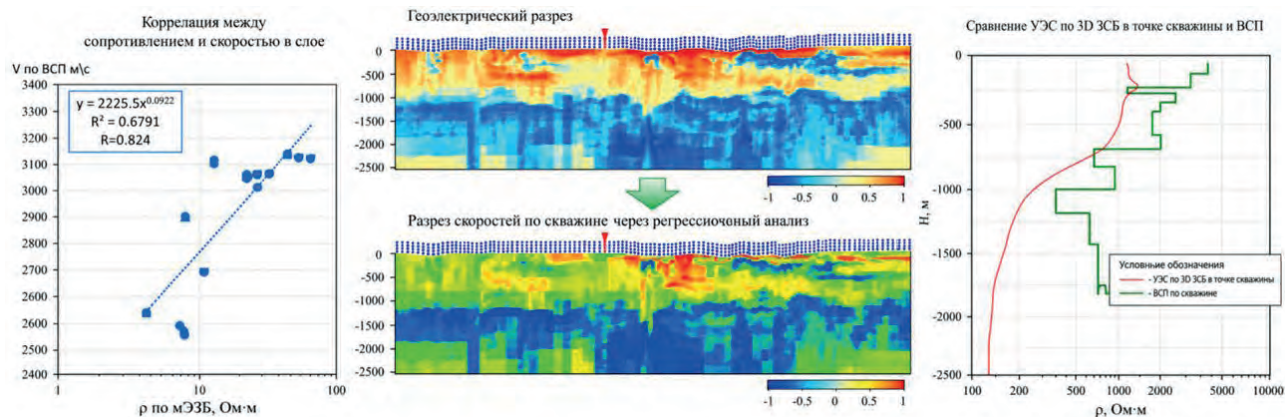
Существует еще один современный способ использования электроразвед-

ки (ЭРР) в поддержку сейсморазведки (СРР), связанный с передачей параметров модели верхней части разреза от ЭРР к обработке СРР. При наличии локальной калибровки между электрическими и акустическими параметрами (например, по АК или ВСП) модель мЗСБ может быть пересчитана в приближенную скоростную модель. Полученные скорости используются как дополнительная информация для расчета длиннопериодных статических поправок и снижения неопределенности скоростной модели ВЧР. Здесь результат ЭРР непосредственно входит в технологический цикл обработки СРР, поэтому такой пример методологически относится к последовательной интеграции с априорными ограничениями, а не к обычной постинверсионной совместной интерпретации [4, 16]. На представленном профиле подтверждается взаимосвязь между удельным сопротивлением и скоростями ВЧР. На «сейсмсоэлектромографической» модели уточнились пониженные скорости в восточной части профиля (зона протайки). Наблюдается компенсация среднего/длинного периода при расчете статических поправок по объединённой модели ВЧР (Рисунок 3).

▼ Рис. 2. Сейсмогеоэлектрическая картина в складчато-надвиговой зоне.

Условные обозначения: 1 – пикеты 3D ЗСБ; 2 – геоэлектрические горизонты и их сопротивление, Ом·м; 3 – волновая картина по МОГТ 3D; 4 – тектонические нарушения по данным МОГТ 3D; 5 – тектонические нарушения по данным 3D ЗСБ.





▲ Рис. 3. Расчет скоростей по скважине через регрессионный анализ.

7.2. СРР + ЭРР как единый комплекс прогноза коллектора и насыщения

Наиболее содержательный вариант комплексирования возникает, когда детальный структурный каркас 3D МОГТ используется при интерпретации высокоплотной 3D ЗСБ. Сейсмическая модель задает геометрию пластов, тектонические нарушения и интервалы анализа, после чего в этих интервалах оценивается УЭС. Такая последовательность снижает эквивалентность геоэлектрической модели по мощности слоев и облегчает переход от «аномалии в объеме» к электрическим свойствам конкретного горизонта. С привлечением скважинных данных, УЭС может быть сопоставлено с ФЕС и типом насыщения [2, 4, 5, 14, 16].

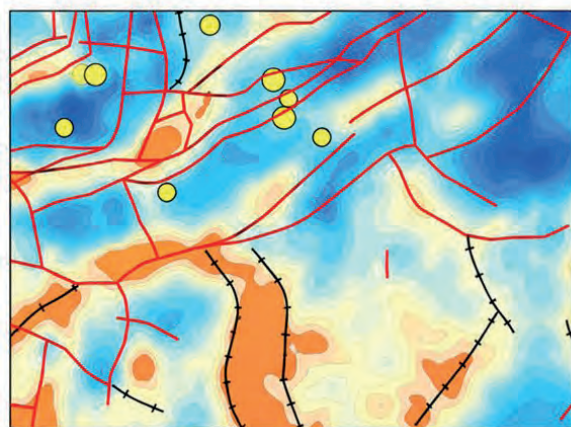
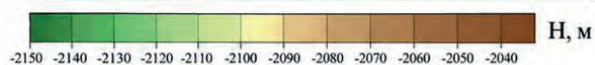
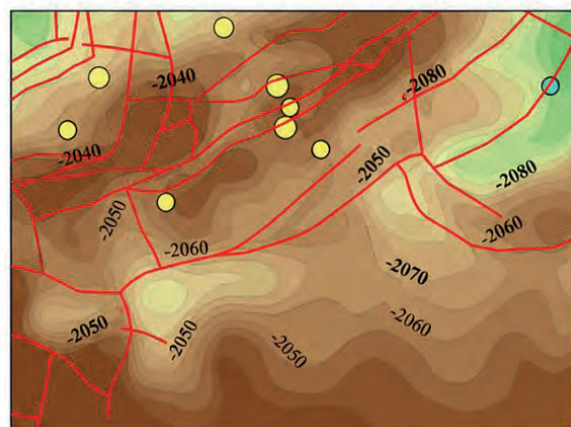
Важно, что комплексирование должно выполняться на уровне согласованной координатной и стратиграфической модели. Недостаточно сопоставить две карты. Необходимо обеспечить единую геометрию горизонтов, корректный переход время-глубина, одинаковую систему разломов и сопоставимый интервал пространственного осреднения свойств. После этого возможно построение карты УЭС по пласту, рассчитанных карт Кнг/Кв, совместный анализ с сейсмическими атрибутами и построение объемной модели нефтегазоносного комплекса [4, 5, 21].

Для количественного прогноза газоносности целевого горизонта на одном

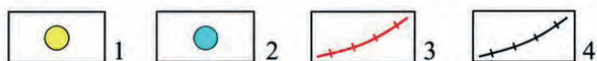
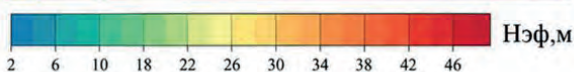
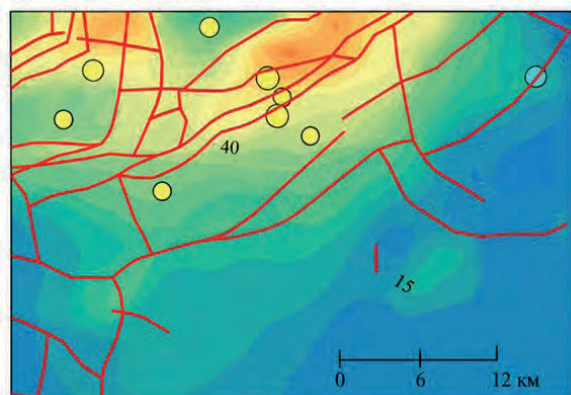
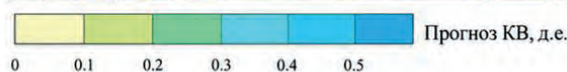
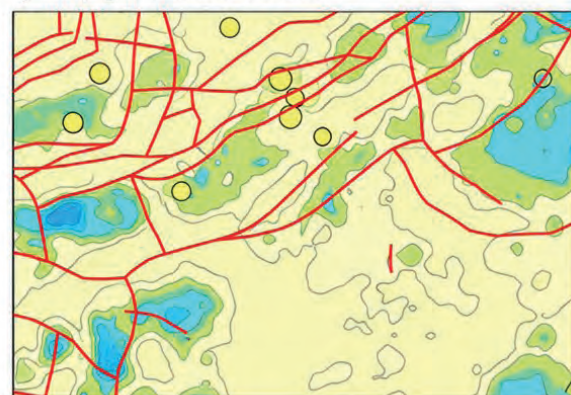
из месторождений Сибирской платформы использованы данные 3D ЗСБ совместно со структурной моделью 3D МОГТ и петрофизическими зависимостями. Продольная проводимость целевого интервала была разделена на вклад коллектора и вмещающих пород, после чего с учетом эффективной мощности и пористости рассчитан прогнозный коэффициент водонасыщенности (Кв). Распределение параметра согласуется с разломно-блоковым строением территории, что подтверждает эффективность совместной интерпретации 3D МОГТ, 3D ЗСБ и петрофизических данных (Рисунок 4).

Такой подход не следует автоматически называть joint inversion. Если структурная модель СРР фиксирована и используется при инверсии или параметризации ЗСБ, это интеграция с априорными структурными ограничениями (constrained inversion). Joint inversion начинается там, где сейсмическая и электромагнитная модели участвуют в одной целевой функции и их связанные параметры изменяются одновременно [30]. Один и тот же геологический замысел, основанный на общности структуры, может быть реализован математически двумя способами. Первый использует фиксированное априорное ограничение, второй представляет собой структурно-связанную совместную инверсию. Для производственных проектов это раз-

а) Карта проводимости парфеновского горизонта

б) Структурная карта по кровле чорской свиты (ОГ М₂)

в) Нэф коллектора по 3D МОГТ

г) К_в прогнозные по 3D ЗСБ▲ Рис. 4. Расчет К_в по 3D ЗСБ через петрофизическую зависимость и данные МОГТ 3D.

Условные обозначения:

- 1 – скважины с газом; 2 – скважины с водой; 3 – тектонические нарушения по данным МОГТ 3D;
4 – тектонические нарушения по данным 3D ЗСБ.

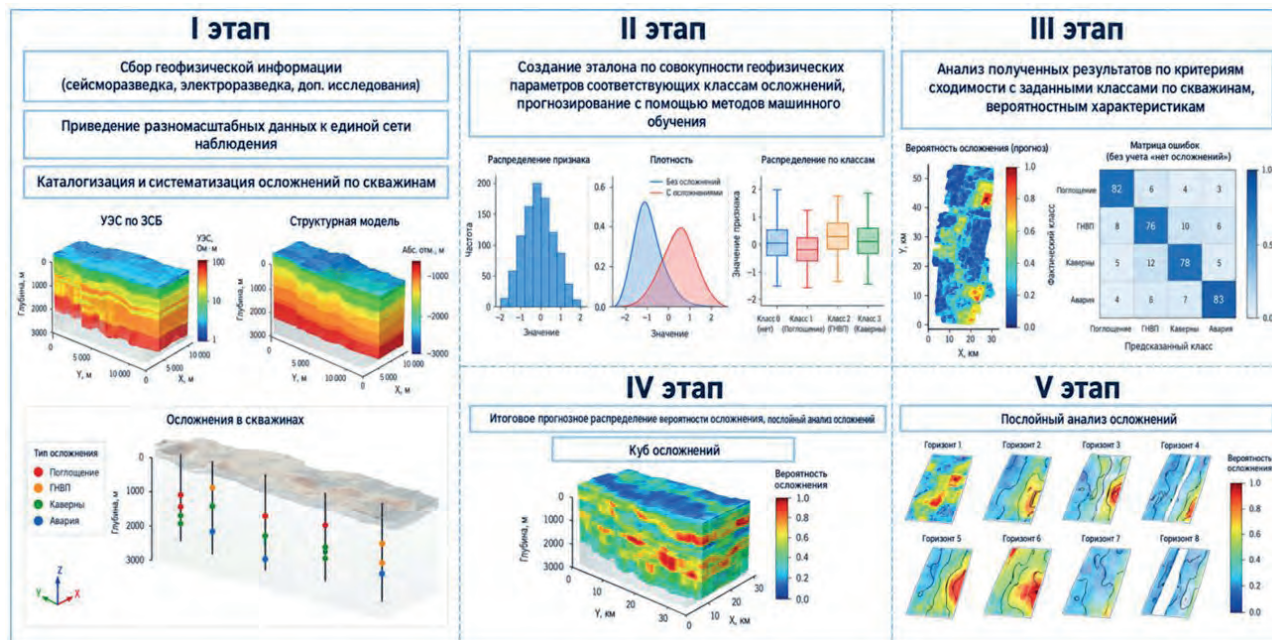
личие важно, поскольку оно определяет, передается ли неопределенность СРР в ЭРР и обратно.

7.3. Прогноз условий бурения и задач разработки

Интегрированная модель может использоваться не только для прогноза залежи, но и для снижения технологических рисков. В сложных галогенно-карбонатных разрезах зоны трещиноватости, карста, вторичных изменений и минерализованных флюидов способны

формировать проводящие аномалии, тогда как массивные соли и ангидриты часто характеризуются высокими сопротивлениями. В сочетании со структурой и разломной моделью 3D МОГТ это дает основу для локального прогноза потенциально осложненных интервалов [1, 9, 12, 16]. Конкретные поисковые признаки должны рассматриваться как регионально и стратиграфически обусловленные, а не универсальные.

Для перехода от экспертного районирования к воспроизводимому прогнозу



▲ Рис. 5. Схема прогнозирования ГГУ с помощью машинного обучения.

может применяться машинное обучение (рис. 5). Рабочая последовательность включает каталогизацию фактических осложнений по скважинам, сведение разномасштабных геофизических параметров к общей 3D сетке, формирование обучающих классов, оценку информативности признаков и их вклад в вероятностную модель. В качестве признаков могут использоваться УЭС ЗСБ, структурные отметки, расстояние до разломов, сейсмические атрибуты и геологические параметры. Результатом должна быть не только классификация, но и куб вероятности осложнений с контролем ошибок по независимым скважинам.

8. Перспективы развития

Ближайшее развитие комплексирования СРР и ЭРР связано с переходом от последовательной интерпретации к более сильной связи моделей. Перспективны 3D структурно-связанные инверсии, петрофизически связанная совместная инверсия, вероятностные ансамбли моделей и методы оценки апостериорной неопределенности. Для производственной практики особенно важны автоматизированные рабочие процессы, в которых сейсмические горизонты, разломы,

ГИС и ограничения по петрофизике могут безопасно передаваться в электроразведочную инверсию с контролем влияния каждого ограничения.

Еще одно направление связано с 4D наблюдениями. Электрические параметры чувствительны к изменению флюидонасыщения, а 4D сейсмика реагирует на изменения упругих свойств, обусловленные насыщением и давлением. Их совместное использование позволяет лучше разделять флюидальные и геомеханические эффекты при мониторинге разработки [6].

9. Выводы

1. Комплексирование геофизических методов в отечественной научной школе изначально сформировалось как широкая методология, включающая физико-геологическое моделирование, выбор рационального комплекса, согласование наблюдений и совместную интерпретацию.

2. Комплекс СРР+ЭРР наиболее эффективен при использовании взаимодополняемой чувствительности методов. Сейсмика формирует детальный структурный каркас, а электроразведка добавляет независимую информацию об элек-

трических свойствах. Ни один из методов не должен трактоваться как универсальный индикатор литологии или насыщения.

3. Для практики выделяются три ключевых сценария. Первый предполагает использование ЭРР в поддержку СРР, включая уточнение сложной ВЧР и зон пониженной сейсмической информативности. Второй связан с совместным прогнозом коллектора и насыщения в структурном каркасе 3D МОГТ. Третий охватывает прогноз горно-геологических условий бурения и задачи разработки.

4. Ключевыми условиями достоверности являются скважинная и петрофизическая калибровка, единая геометрическая и стратиграфическая основа, сопоставимость масштаба параметров, явный анализ неопределенности и независимая верификация по результатам бурения.

Важно понимать, что комплексирование уменьшает неоднозначность только тогда, когда учитываются ограничения каждого входного метода. Наиболее критичны различная пространственная разрешающая способность СРР и ЭРР, различный объем осреднения параметров, ошибки совмещения в пространстве и перехода время-глубина, эквивалентность геоэлектрических моделей, неполная петрофизическая калибровка и неравномерная плотность наблюдений [10, 13, 16, 21]. Простое увеличение количества слоев данных без анализа этих факторов может создать иллюзию подтверждения, а не повысить достоверность.

Литература

1. Агафонов Ю. А., Поспеев А. В., Вахромеев А. Г. Возможности нестационарных электромагнитных зондирований при изучении коллекторских свойств осадочного чехла // Геомодель-2005: материалы VII Международной научно-практической конференции. - Геленджик, 2005. - С. 86.
2. Барышев Л. А. Комплексирование сейсморазведки и электроразведки на Ковыктинском месторождении // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. - 2015. - № 3 (52). - С. 36–42.
3. Берзин А. Г. Комплексирование геофизических методов (примеры решения геологических и нефтегазопроисловых задач): учебное пособие. - Якутск: Изд-во Якутского университета, 2003. - 70 с.
4. Буддо И. В., Смирнов А. С., Мисюркеева Н. В., Шелохов И. А., Поспеев А. В., Касьянов В. В., Агафонов Ю. А. Интегрирование данных электромагнитных и сейсморазведочных исследований на всех стадиях геологоразведочных работ: от поисково-оценочного этапа до разработки месторождения углеводородов // Экспозиция Нефть Газ. - 2018. - № 6 (66). - С. 24–28.
5. Буддо И. В., Шелохов И. А., Мисюркеева Н. В., Агафонов Ю. А. Электромагнитные исследования методом ЗСБ 2D, 3D, 4D: последовательность постановки геологоразведочных работ // Геодинамика и тектонофизика. - 2021. - Т. 12, № 3S. - С. 715–730. - DOI: 10.5800/GT-2021-12-3s-0549.
6. Бурдаков Д. А., Сибилев В. Н., Токарева О. В., Колесов В. А., Агафонов Ю. А. Мониторинг фронта заводнения карбонатных коллекторов нижнего кембрия методом 4D электроразведки // Нефтяное хозяйство. - 2020. - № 9. - С. 30–34. - DOI: 10.24887/0028-2448-2020-9-30-34.
7. Вахромеев Г. С. Основы методологии комплексирования геофизических исследований при поисках рудных месторождений. - М.: Недра, 1978. - 153 с.
8. Вахромеев Г. С., Давыденко А. Ю. Комплексирование геофизических методов и физико-геологические модели: учебное пособие. - Иркутск: ИПИ, 1989. - 88 с.

9. Дахнов В. Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1985. - 310 с.

10. Долгаль А. С. Комплексование геофизических методов: учебное пособие. - Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2012. - 167 с. - ISBN 978-5-7944-2025-8.

11. Комплексование геофизических методов при решении геологических задач / под ред. В. Е. Никитского, В. В. Бродового. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1987. - 471 с.

12. Мисюркеева Н. В., Вахромеев А. Г., Агафонов Ю.А., Буддо И. В. Роль надвиговой тектоники в формировании природных залежей углеводородов и гидроминерального сырья зоны перехода Сибирский кратон - Центрально-Азиатский складчатый пояс//. Геодинамика и тектонофизика. 2026. Т. 17. № 2. С. 881.

13. Никитин А. А., Хмелевской В. К. Комплексование геофизических методов. - 2-е изд. - М.: ВНИИгеосистем, 2012. - 346 с. - ISBN 978-5-8481-0121-8.

14. Поспеев А. В., Буддо И. В., Агафонов Ю. А., Кожевников Н. О. Выделение пластов-коллекторов в разрезе осадочного чехла юга Сибирской платформы по данным зондирования становлением электромагнитного поля в ближней зоне // Геофизика. - 2010. - № 6. - С. 47–52.

15. Рыскин М. И., Сокулина К. Б. Комплексная интерпретация геофизических данных: учебное пособие. - Саратов: Изд-во Саратовского университета, 2006. - 153 с.

16. Современная практическая электроразведка / Ю. А. Агафонов, И. В. Буддо, А. Г. Вахромеев [и др.]; под ред. Д. П. Гладкочуба. - Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2018. - 231 с. - ISBN 978-5-9909584-1-8. - DOI: 10.21782/B978-5-9909584-1-8.

17. Archie G. E. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics // Transactions of the AIME. - 1942. - Vol. 146. - P. 54–62. - DOI: 10.2118/942054-G.

18. Gallardo L. A., Meju M. A. Characterization of Heterogeneous Near-Surface Materials by Joint 2D Inversion of DC Resistivity and Seismic Data // Geophysical Research Letters. - 2003. - Vol. 30, No. 13. - Art. 1658. - DOI: 10.1029/2003GL017370.

19. Hoversten G. M., Cassassuce F., Gasperikova E., Newman G. A., Chen J., Rubin Y., Hou Z., Vasco D. Direct Reservoir Parameter Estimation Using Joint Inversion of Marine Seismic AVA and CSEM Data // Geophysics. - 2006. - Vol. 71, No. 3. - P. C1–C13. - DOI: 10.1190/1.2194510.

20. MacGregor L., Tomlinson J. Marine Controlled-Source Electromagnetic Methods in the Hydrocarbon Industry: A Tutorial on Method and Practice // Interpretation. - 2014. - Vol. 2, No. 3. - P. SH13–SH32. - DOI: 10.1190/INT-2013-0163.1.

21. Moorkamp M. Integrating Electromagnetic Data with Other Geophysical Observations for Enhanced Imaging of the Earth: A Tutorial and Review // Surveys in Geophysics. - 2017. - Vol. 38. - P. 935–962. - DOI: 10.1007/s10712-017-9413-7.

УДК 550.837.82:004.85

Электроразведка методом ЗСБ и машинное обучение: новые возможности для прогнозирования геологических рисков

■ Давыденко С.А.^{1,2}, Поляков Д.В.¹, Мисюркеева Н.В.^{1,3}, Агафонов Ю.А.¹, Селяев В.А.¹, Агафонов Е.А.¹

¹ ООО «СИГМА-ГЕО», г. Иркутск.

² Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск.

³ Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск.

Аннотация. В работе представлен комплексный подход к прогнозированию геологических рисков на основе совместного анализа данных электроразведки методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), сейсморазведки 3D и скважинной информации с применением методов машинного обучения с учителем. Показана эволюция методов машинного обучения в геофизике — от первых нейросетевых моделей до современных ансамблевых алгоритмов, таких как случайный лес (Random Forest). Подробно описана методология прогнозирования, включающая формирование многомерного признакового пространства (геоэлектрические параметры, их градиенты, структурные характеристики), подготовку эталонных выборок по скважинам, обучение моделей и оценку качества с использованием ООВ-оценки и кросс-валидации с группировкой по скважинам. Все вычислительные процедуры реализованы в специализированном программном комплексе X-Search (разработка ООО «СИГМА-ГЕО»), обеспечивающем сквозной цикл обработки и интерпретации данных. Эффективность подхода продемонстрирована на двух практически значимых задачах: прогнозирование осложнений бурения (поглощений бурового раствора) на газоконденсатном месторождении в Восточной Сибири и прогнозирование распространения многолетнемерзлых пород (ММП) на участках в Якутии. Для поглощений достигнута ООВ-точность 87,53%, для ММП — 98,13%. Показано, что существенный вклад в прогноз вносят геоэлектрические параметры (проводимость и её градиент), что подтверждает высокую чувствительность электромагнитных методов к флюидонасыщению и трещиноватости. Разработанный подход может быть рекомендован для использования в производственных геофизических и геологических организациях при решении широкого круга прогнозных задач.

Ключевые слова: электроразведка, зондирование становлением поля (ЗСБ), машинное обучение (ML), случайный лес (Random Forest), прогнозирование осложнений бурения, поглощения бурового раствора, многолетнемерзлые породы (ММП), комплексная интерпретация, программный комплекс X-Search, нефтегазовая геология, геокриология.

Актуальность

Геофизические исследования являются ключевым инструментом при изучении строения земной коры, поиске и разведке полезных ископаемых, а также при решении инженерно-геологических задач. За последние десятилетия объёмы получаемых данных колоссально выросли: сейсморазведка 3D, электроразведка, грави- и

магниторазведка, результаты исследования скважин, генерируют терабайты информации. Однако традиционные методы интерпретации, основанные на эмпирических корреляциях и упрощённых аналитических моделях, часто не справляются с нелинейностью, многомерностью и гетерогенностью геологических сред.

В этих условиях методы машинного

обучения (МО) становятся не просто полезным дополнением, а необходимым инструментом, позволяющим выявлять скрытые закономерности, строить прогнозные модели с высокой точностью и количественно оценивать неопределённости. Особую ценность МО представляет при комплексировании данных различных геофизических методов, когда необходимо совместно анализировать электрические, сейсмические, плотностные и магнитные характеристики среды [6].

Таким образом, решение перечисленных задач требует разработки и практической апробации комплексного подхода, базирующегося на совместном анализе данных электроразведки методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) и сейсморазведки с применением методов машинного обучения с учителем (в частности, алгоритма случайного леса). Предлагаемый подход не является данью современным тенденциям, а представляет собой объективную необходимость, обусловленную сложностью и многомерностью геолого-геофизической информации.

Особое внимание уделено эволюции методов машинного обучения в геофизике, методологии прогнозирования на основе случайного леса, а также перспективам дальнейшего развития интеллектуальных технологий — от глубокого обучения до создания цифровых двойников месторождений.

Эволюция методов машинного обучения в геофизике

Применение методов искусственного интеллекта в геофизике имеет более чем полувековую историю. 1960–1980-е годы: появление персептрона [9] и алгоритма обратного распространения ошибки [10] заложило теоретические основы. В геофизике нейронные сети применялись для классификации типов пород по данным каротажа и интерпретации сейс-

мических атрибутов. 1990-е годы: активно развиваются методы опорных векторов [11], ансамблевые методы — бэггинг и бустинг. Наряду с методами обучения с учителем развиваются и методы кластеризации без учителя, в частности алгоритм k-means++ [2], который находит применение для выделения однородных групп объектов по совокупности геофизических признаков [6]. Появляются первые коммерческие системы автоматической интерпретации сейсмических данных. 2000-е годы: предложен алгоритм случайного леса [1], быстро завоевавший популярность благодаря устойчивости к переобучению, встроенной оценке важности признаков и способности работать с разнородными данными. 2010-е годы — настоящее время: эпоха глубокого обучения. Многослойные нейронные сети, свёрточные сети, рекуррентные сети (LSTM) [12,13] находят широкое применение в обработке сейсмических кубов, автоматическом выделении горизонтов, инверсии электромагнитных данных. В бурении активно внедряются системы прогнозирования осложнений в реальном времени [3,5]. Прогнозирование зон геологических осложнений при бурении с использованием искусственного интеллекта на основе скважинных и сейсморазведочных данных [4].

Методология прогнозирования на основе случайного леса

Случайный лес (Random Forest) — ансамблевый алгоритм машинного обучения, формирующий множество решающих деревьев на основе бутстрап-выборок и случайного подмножества признаков на каждом разбиении. Ключевые преимущества метода применительно к геологическим задачам: устойчивость к переобучению, способность работать с разнородными данными без сложной предобработки, встроенная оценка важности признаков и

внутренняя ООВ-оценка (Out-of-Bag), не требующая отдельной валидационной выборки.

Все вычислительные процедуры — от формирования многомерного признакового пространства и подготовки эталонных выборок по скважинам до обучения моделей и построения прогнозных 3D-кубов — реализованы в специализированном программном комплексе X-Search (разработка ООО «СИГМА-ГЕО»). Комплекс обеспечивает сквозной цикл обработки и интерпретации геофизических данных: загрузку исходных скважинных материалов и наборов признаков, представленных в виде кубов как с регулярной, так и с нерегулярной сеткой, обучение моделей и построение прогнозных трёхмерных моделей. Архитектура комплекса предусматривает расширяемый функционал — набор алгоритмов, методов оценки качества и форматов данных может пополняться под новые задачи, а активная разработка ведётся в направлении интеграции дополнительных геологических и геофизических параметров, развития средств визуализации и автоматизации интерпретацион-

ной цепочки.

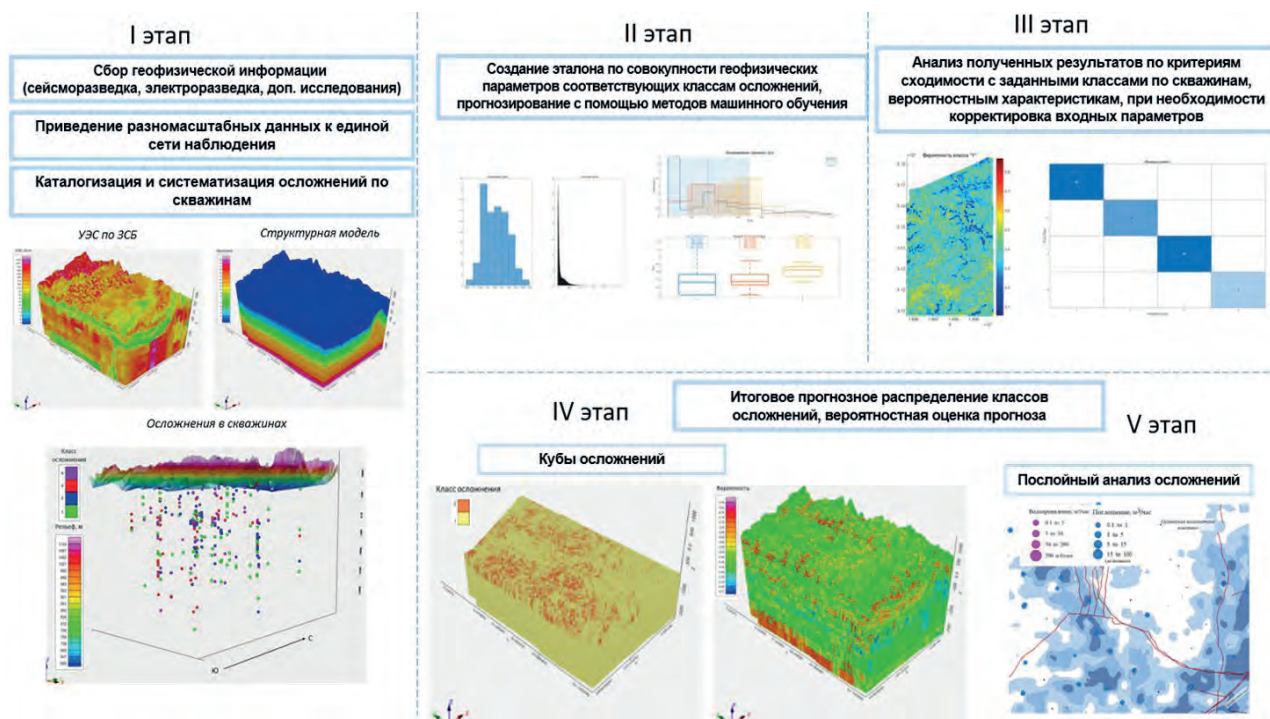
В основе двух представленных примеров лежат данные электроразведочных работ методом ЗСБ, площадных 3D-сейсморазведочных работ и скважинная информация. Совместное использование этих данных позволяет получать:

- распределение удельного электрического сопротивления (УЭС) по данным ЗСБ;
- структурный каркас по данным сейсморазведки (возможно также привлечение сейсмических атрибутов);
- скважинную информацию об искомым объектах (интервалах осложнений, глубине подошвы ММП и т.д.).

Обработка и инверсия данных ЗСБ выполнялись с использованием программного обеспечения TEM-Processing и Model 5 [7, 8]. Сейсмические кубы, структурные построения и данные бурения использовались для формирования признакового пространства и валидации прогнозных моделей.

Схематично процесс прогнозирования, проиллюстрированный на примере горно-геологических условий (ГГУ), показан на Рис 1.

▼ Рис. 1. Общая схема прогнозирования ГГУ с помощью машинного обучения.



Обобщенная последовательность действий при прогнозировании ГГУ:

1. Систематизация и классификация: унификация всех известных осложнений по типам в поисковых, поисково-оценочных и разведочных скважинах, а также кустовым площадкам, пробуренным на территории исследования.

2. Интеграция данных в единое геоинформационное пространство: приведение разнородных геофизических данных (сейсморазведка, электроразведка) к общей 3D-сетке с равным шагом.

3. Формирование обучающей выборки: выделение эталонных значений геофизических параметров в точках скважин, где были зафиксированы осложнения.

4. Геостатистический анализ и прогноз: применение алгоритмов машинного обучения для построения прогнозной модели распространения осложнений/других параметров в межскважинном пространстве на основе эталонной выборки.

5. Анализ распределения вероятностей: оценка неопределенности и достоверности полученного прогнозного решения.

6. Верификация модели: проверка полученных результатов на соответствие критериям сходимости и известным данным.

7. Построение итоговых прогнозных карт в целевых интервалах исследования

Формирование признакового пространства

На основе априорных геологических представлений и работ предыдущих исследователей [14,15], был сформирован набор признаков для задачи прогнозирования поглощений бурового раствора: удельное электрическое сопротивление ($\text{Ом}\cdot\text{м}$), проводимость (См), градиенты (градиент проводимости, градиент УЭС, градиент кровли, градиент толщин) —

характеризуют зоны контрастных изменений, связанные с тектоническими нарушениями, фаціальными переходами, трещиноватостью.

Для каждого узла сетки был сформирован набор признаков на основе данных малоглубинных исследований ЗСБ, загружены скважинные данные. При прогнозировании ММП были использованы следующие признаки: удельное электрическое сопротивление, проводимость, градиент проводимости, абсолютная глубина.

Процесс включает загрузку скважинных данных, извлечение значений признаков из 3D-кубов в точках инклинометрии и обучение модели с оптимизацией гиперпараметров. Для оценки прогнозной способности модели и выбора оптимальных гиперпараметров используется кросс-валидация с группировкой по скважинам (Group K-Fold). Это означает, что данные одной скважины (все точки её инклинометрии) целиком попадали либо в обучающую, либо в валидационную подвыборку.

Такой подход исключает утечку данных (data leakage), когда пространственно близкие точки из одной скважины могли бы одновременно оказаться и в обучении, и в контроле. Количество фолдов: 5. Для каждой задачи выполнялось 5 последовательных разбиений, после чего вычислялись среднее значение метрики и стандартное отклонение.

После выбора оптимальных гиперпараметров итоговая модель обучается на 100% доступных скважинных данных и используется для построения прогноза с использованием всей имеющейся информации.

Оценка качества классификационных моделей выполняется с использованием точности (Accuracy), матрицы неточностей (Confusion Matrix), ООВ-точности и кросс-валидации.

В данном случае приведена средняя

точность (Accuracy) по фолдам кросс-валидации. Формат записи «значение $\pm$ отклонение» означает: значение — средняя точность по 5 фолдам; отклонение — стандартное отклонение точности между фолдами. Например, для задачи ММП: $94,02\% \pm 1,64\%$ означает, что средняя точность составила $94,02\%$, а стандартное отклонение — $1,64$ процентных пункта. Небольшое отклонение свидетельствует о стабильности модели на разных подвыборках.

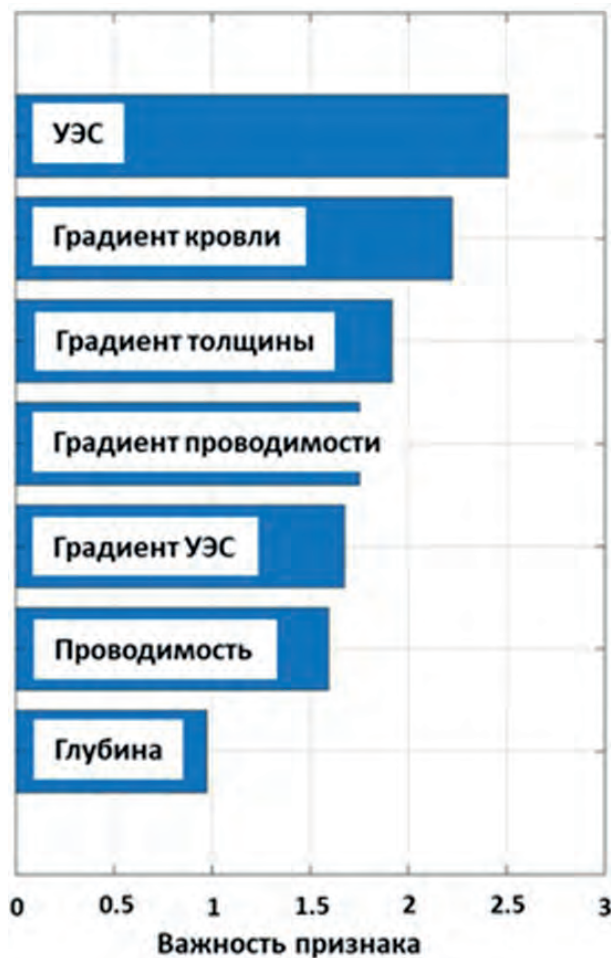
Оценка качества регрессионных моделей выполняется с использованием MAE, RMSE и Bias, а также кросс-валидации и OOB-оценки.

Способ расчёта важности признаков: важность признаков рассчитывалась с использованием встроенного в Random Forest показателя Mean Decrease in Impurity (MDI) — среднего уменьшения неопределённости (критерия Джини) по всем деревьям ансамбля.

Для каждого признака суммировались уменьшения неопределённости во всех узлах, где он использовался для разбиения, с последующей нормировкой на общее количество деревьев. В задаче прогнозирования поглощений суммарный вклад признаков, производных от данных ЗСБ (проводимость S и её полный градиент), вносит существенный вклад в итоговый результат (Рис. 2).

Для задач с учителем формируется обучающая выборка, где для каждой точки 3D-сетки известна метка класса. Для осложнений бурения метка определяется по интервалам с зафиксированными осложнениями в скважинах. Для ММП — по глубине подошвы ММП: выше подошвы — класс 1 (ММП), ниже — класс 0 (отсутствие ММП).

В задаче прогнозирования поглощений на газоконденсатном месторождении использованы данные по более чем 100 скважинам (поисково-разведочным и эксплуатационным с кустовыми ответ-



▲ Рис. 2. Гистограмма оценки вклада каждого из признаков в результат прогнозирования осложнений ГГУ.

влениями). Соотношение классов (наличие/отсутствие поглощения) в выборке является несимметричным: доля интервалов с зафиксированными поглощениями составляет порядка 10–15% от общего числа точек. Для борьбы с дисбалансом классов применялась стратифицированная разбивка выборки и настройка весов классов в алгоритме Random Forest.

В задаче прогнозирования ММП использованы кубы УЭС и проводимости (сетка $300 \times 300 \times 10$ м), данные бурения по 31 скважине с зафиксированной глубиной подошвы ММП. Формирование классов выполнялось следующим образом: каждая точка вертикального столбца (с шагом 10 м) относилась к классу 1 (ММП), если её абсолютная глубина была выше подошвы ММП, и к классу 0 (отсутствие ММП) — если ниже. Таким

образом, задача сводилась к бинарной классификации каждой точки, а поверхность подошвы ММП строилась как граница между классами.

Прогнозирование осложнений бурения на газоконденсатном месторождении

Рассматриваемое газоконденсатное месторождение — одно из крупнейших на востоке России. Разрез представлен сложным чередованием карбонатных, терригенных и галогенных пород кембрия с развитием зон аномально высокого пластового давления (АВПД). При бурении часто возникают поглощения бурового раствора. Использованы данные сейсморазведки 3D ($>5000 \text{ км}^2$), электроразведки ЗСБ ($>3000 \text{ км}^2$) и данные по осложнениям из >100 скважин.

По результатам прогнозирования построена модель бинарной классификации. Получены следующие показатели: ООВ-точность 87,53%, кросс-валидация $73,85\% \pm 2,49\%$.

Наибольший вклад в прогноз вносят проводимость и её градиент (суммар-

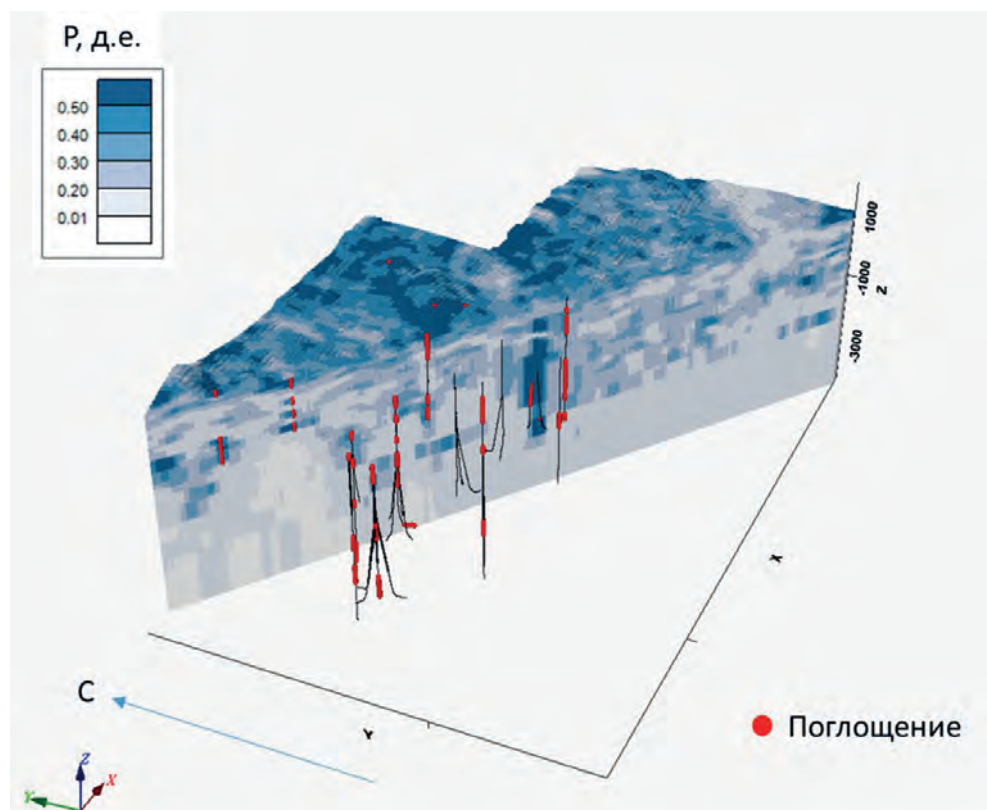
но $>60\%$), что подтверждает чувствительность электромагнитных методов к флюидонасыщению и трещиноватости. Прогнозные кубы вероятности позволяют оконтуривать зоны риска и оптимизировать траектории новых скважин (Рис 3.). Помимо поглощений, разработанная методика может быть адаптирована для прогнозирования газо- и рапопроявлений, что расширяет область её применения.

Прогнозирование распространения многолетнемерзлых пород (ммп)

Участки исследования расположены в Республике Саха (Якутия), где в 2016–2022 гг. выполнены работы методом ЗСБ в малоглубинном варианте. Основная задача — определение таликовых зон и подошвы ММП. Использованы кубы УЭС и проводимости (сетка $300 \times 300 \times 10 \text{ м}$), данные бурения по 31 скважине с зафиксированной глубиной подошвы ММП.

Получены следующие показатели: ООВ-точность 98,13%, кросс-валидация $94,02\% \pm 1,64\%$. Построена поверхность подошвы ММП двумя способами: по ми-

► Рис. 3.
Фрагмент
прогнозного куба
вероятности
осложнений по
поглощению с
визуализацией
скважин.



нимальной отметке 1-го класса (подошва ММП) и по максимальной отметке 0-го класса (кровля таликов).

Контрольные данные для расчёта MAE и RMSE: из 31 скважины часть (около 25%) была исключена из обучения и использовалась как независимая тестовая выборка. MAE (средняя абсолютная ошибка) и RMSE (среднеквадратическая ошибка) рассчитывались как разница между прогнозной глубиной подошвы

ММП (из построенной поверхности) и фактической глубиной, зафиксированной в скважине. Полученные значения: MAE = 7–12 м, RMSE = 10–18 м, что находится в пределах погрешности исходных геофизических данных.

Пример прогноза в формате плана и разреза, детализируют структуру ММП, выделяют зоны прерывистого и сплошного распространения, а также области сквозных таликов (Рис. 4).

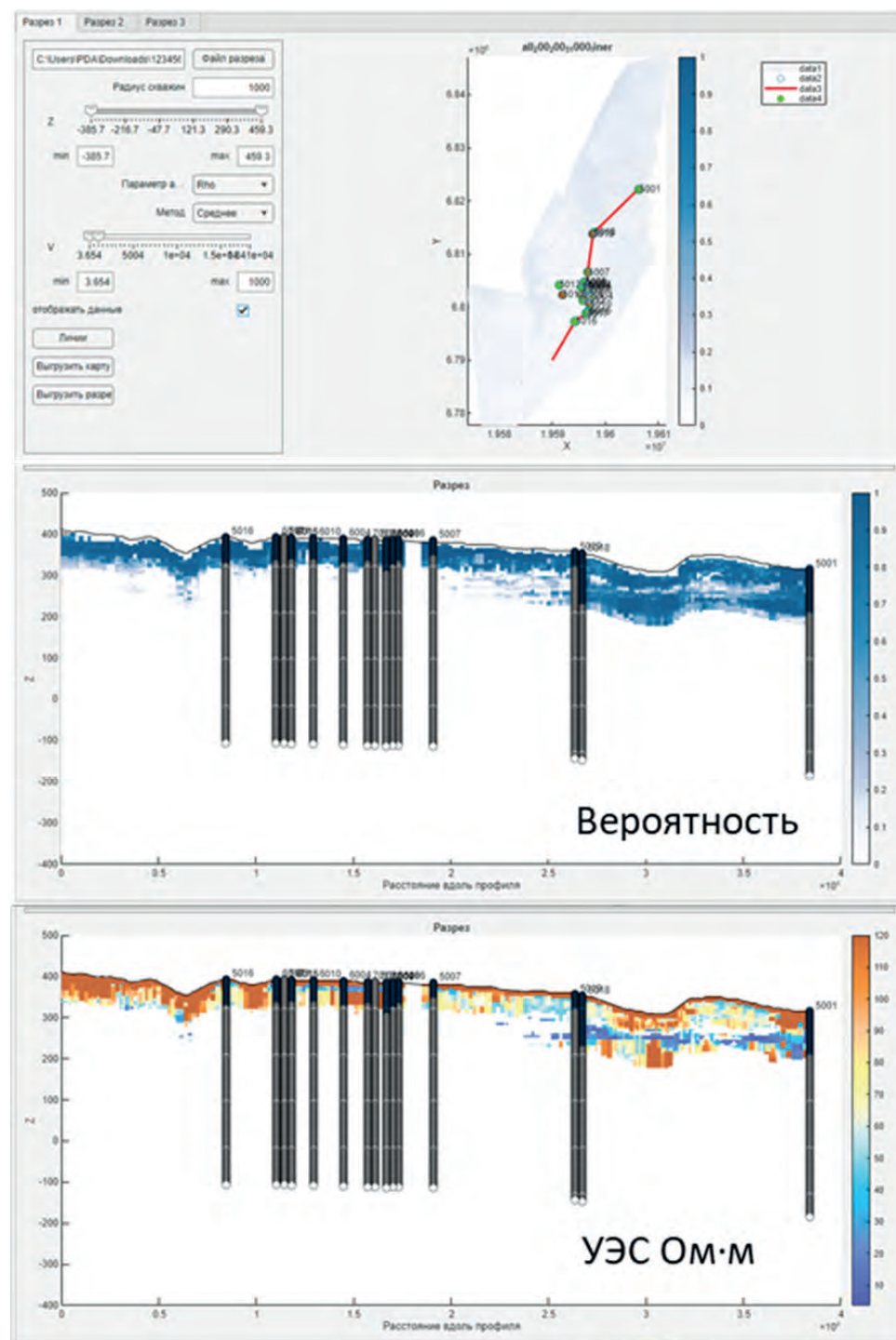


Рис. 4. Окно интерфейса программы с результатами прогнозирования распространения ММП, с визуализацией скважинных данных.

Обсуждение результатов и перспективы

Представленные примеры демонстрируют, что методы машинного обучения, реализованные в программном комплексе X-Search, повышают точность прогнозирования при комплексировании геофизических данных, дают независимый прогноз на основе скрытых зависимостей. Ключевые факторы успеха: многомерность признаков пространства (использование не только первичных параметров, но и их градиентов), ансамблевые методы (устойчивость к шуму и переобучению), интеграция разнородных данных.

Основные ограничения: дефицит эталонных данных, неоднородность данных (разновременные съёмки, разные методики инверсии), интерпретируемость сложных моделей.

Пути решения: использование трансферного обучения и полуавтоматической разметки, калибровка через опорные скважины, применение методов объяснимого ИИ.

Перспективы развития: интеграция геологических моделей (литология, пористость, давление); глубокое обучение для анализа 3D-кубов; прогнозирование в реальном времени с использованием буровых параметров; создание цифровых двойников месторождений; автоматизация всей цепочки интерпретации в рамках единого программного комплекса X-Search. Реализация этих направлений уже ведётся в рамках развития программного комплекса X-Search.

Выводы

Разработан и апробирован комплексный подход к прогнозированию геологических рисков на основе методов машинного обучения (случайный лес) с использованием данных электроразведки ЗСБ и сейсморазведки, данных скважин. Подход показал высокую эф-

фективность на двух практически значимых задачах. Все расчёты выполнены в специализированном программном комплексе X-Search, разработанном в ООО «СИГМА-ГЕО», который обеспечивает полный цикл обработки и интерпретации данных.

В задаче прогнозирования осложнений бурения по поглощениям достигнута ООВ-точность 87,5% и кросс-валидация $73,85\% \pm 2,49\%$. Наибольший вклад вносят геоэлектрические параметры (проводимость и её градиент, $>60\%$).

В задаче прогнозирования ММП получена ООВ-точность 98,13% и кросс-валидация $94,02\% \pm 1,64\%$. Ошибки по сравнению с эталонными скважинами ($MAE = 7-12$ м) находятся в пределах погрешности исходных данных.

Показана устойчивость алгоритма случайного леса к неоднородности исходных данных, связанной с разновременностью съёмок и различиями в методиках инверсии, что подтверждает его пригодность для работы в реальных производственных условиях.

Разработанный подход может быть рекомендован для использования в производственных геофизических и геологических организациях при решении широкого круга прогнозных задач.

Литература

1. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. 2001. Vol. 45, No. 1. P. 5–32.
2. Arthur D., Vassilvitskii S. k-means++: The Advantages of Careful Seeding // SODA '07. 2007. P. 1027–1035.
3. Guoli Huang, Sarah Kanaan Hamzah, Data-driven prediction of rate of penetration (ROP) in drilling operations using advanced machine learning models // Scientific Reports. 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-17588-9.
4. Бугаев А.С., Ерохин Г.Н., Рябых С.А., Смирнов А.С. Прогноз зон флюидо-попоявлений методами искусственно-

го интеллекта на основе сейсмических атрибутов нового поколения RTH и данных бурения на Ковыктинском ГКМ // Доклады РАН. Науки о Земле. 2024. Т. 514, № 1. С. 131–140.

5. Mohammad J Aljubran, Jothibas Ramasamy Deep Learning and Time-Series Analysis for the Early Detection of Lost Circulation Incidents During Drilling Operations // IEEE Access. 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3082557.

6. Давыденко С.А., Мисюркеева Н.В., Давыденко А.Ю., Агафонов Ю.А. и др. Комплексный подход к интерпретации геофизических данных при уточнении модели кристаллического фундамента в Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции // (в печати, 2026).

7. Емельянов В.С., Кердан А.В., Мурзина Е.В., Шелохов И.А. Свидетельство о регистрации программы ЭВМ № 2023663275 Model 5. 2023.

8. Шарлов М.В. Интегрированная система обработки и инверсии данных нестационарных электромагнитных зондирований // Приборы и системы разведочной геофизики. 2017. Т. 60. № 2. С. 24–35.

9. Rosenblatt F. The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain // Psychological Review. 1958. Vol. 65, No. 6. P. 386–408.

10. Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J. Learning representations by back-propagating errors // Nature. 1986. Vol. 323. P. 533–536.

11. Vapnik V. The Nature of Statistical Learning Theory. – Springer, 1995.

12. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning. – 2nd ed. – Springer, 2009.

13. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. – MIT Press, 2016.

14. Вахромеев А.Г. Закономерности формирования и локализации место-

рождений промышленных рассолов в карбонатных каверново-трещинных резервуарах кембрия юга Сибирской платформы (по данным глубокого бурения, испытания скважин и полевой геофизики): Монография. Иркутск: Изд-во ИрННТУ, 2015. 248 с.

15. Ильин А.И., Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Поспеев А.В., Горлов И.В. Пути прогноза горно-геологических условий бурения на Ковыктинском газоконденсатном месторождении // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 4 (57)

ЭФФЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ

от поиска до эксплуатации

2D|3D|4D

электроразведка



Поиск нефти и газа

Высокотехнологичные решения геологических задач на месторождениях нефти и газа



Малоглубинные исследования

Высокоточные зондирования верхней части разреза (10-500м): поиск воды, изучение ММП



4D мониторинг месторождений

Определение фактического фронта распространения заводнения



Прогноз условий бурения

- Рекомендации по точкам заложения поисковых и разведочных скважин
- Снижение рисков

Преимущества:



Оптимизация
стратегии ГРП



100%
экологичность



Точность
прогнозов

Компания СИГМА-ГЕО имеет большой опыт выполнения электроразведочных работ в комплексе с сейсморазведкой по заказу крупнейших недропользователей России.

Проведение комплекса исследований МОГТ и ЗСБ позволяет:

Значительно повысить точность и информативность геологических прогнозов при совместном анализе двух независимых характеристик разреза

Повысить качество обработки сейсморазведочных данных за счет уточнения модели ВЧР

Увеличить спектр решаемых задач, недоступных при использовании только одного метода (оценка типа насыщения, оценка коллекторских свойств, изучение ВЧР и др.)

Увеличить экономическую эффективность проводимых ГРП за счет повышения точности исследований и снижения геологических рисков



@sigmageo



sigma@sigma-geo.ru



sigma-geo.ru

УДК 550.83:553.3

Современные подходы к комплексным геофизическим исследованиям сложнопостроенных территорий

■ Самсонов М.Б., Богомолов Н.Ю., Скрыбин А.С., Артюгин А.И., Бухтеев Е.М., компания "ВЕГА", г. Санкт-Петербург.

Опыт компании ВЕГА



Современное комплексирование начинается не с совместной интерпретации раздельно полученных результатов, а с проектирования единого комплекса геофизических исследований под конкретную геологическую задачу и его согласованного выполнения в рамках единого полевого проекта.

Введение

Изучение сложнопостроенных территорий требует учёта структурно-тектонической неоднородности, изменчивости физических свойств пород, неоднозначности геофизических аномалий и влияния техногенных помех. В таких условиях отдельный геофизический метод далеко не всегда позволяет получить достаточно надёжную модель геологического строения. Повышение достоверности достигается за счёт комплексирования методов, основанных на различных физических свойствах среды, способных взаимно дополнять и контролировать получаемую информацию.

В отечественной геофизике методология комплексирования традиционно связана с формированием рационального комплекса применительно к конкретной геологической задаче и физико-геологической модели объекта. Информативность комплексного исследования определяется не количеством используемых методов, а их взаимодополняемостью, уменьшающему неоднозначность геологической интерпретации. К сожалению, на практике исследования различными геофизическими методами проектируются и выполняются самостоятельно и независимо. Даже при работе

в рамках единого геологоразведочного проекта. И собственно комплексирование происходит уже на этапе интерпретации полученных материалов.

Современные технические и методические возможности позволяют перенести начало комплексирования на этап проектирования. В этом случае проектируется не совокупность отдельных методов, результаты которых впоследствии предстоит объединить, а единая система исследований. Для каждого метода заранее определяются его место в комплексе, необходимая детальность, система наблюдений, последовательность и возможность согласованного или одновременного выполнения.

Геологическая задача → физико-геологическая модель → выбор комплекса методов → единое проектирование → согласованное выполнение → комплексная интерпретация → единая геолого-геофизическая модель.

От традиционного комплексирования к единому геофизическому проекту

Комплексирование геофизических методов является одним из основных способов повышения достоверности геологической интерпретации в условиях неоднозначности решения обратных за-

дач. Его преимущество состоит в использовании данных различной физической природы, характеризующих один и тот же объект через электрические, плотностные, магнитные и другие свойства пород. Один метод может уверенно картировать определённый элемент строения и одновременно быть малоинформативным для другого; дополнительный метод сокращает область допустимых решений.

Классическая методология комплексирования уже содержит принцип формирования комплекса исходя из геологической задачи и физико-геологической модели. Выделяются типовые, рациональные и оптимальные комплексы, причём рациональный комплекс формируется с учётом конкретных геологических, геоморфологических и геолого-экономических условий [1–4]. Следовательно, современный подход не отрицает сложившуюся методологию, а развивает её в направлении более тесной технологической интеграции методов.

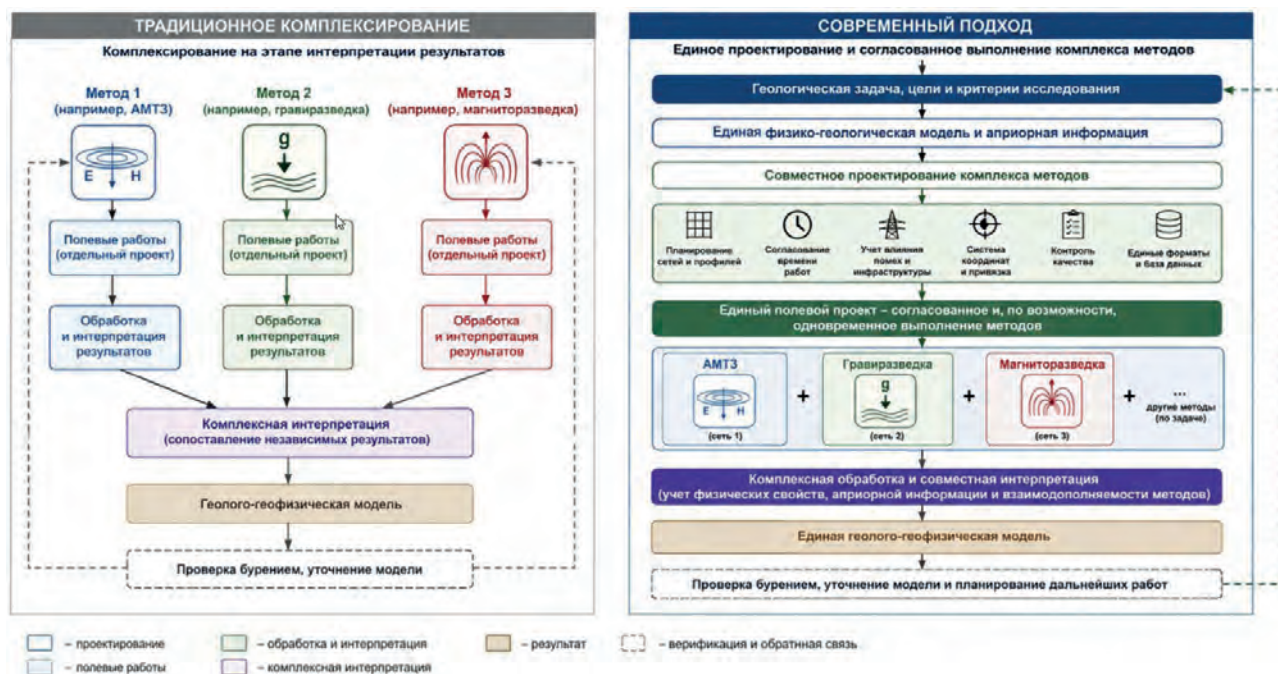
Традиционная производственная схема часто предполагает самостоятельное проектирование и выполнение отдельных видов работ, различную детальность

и несовпадающие системы наблюдений. Их результаты объединяются уже на стадии комплексной интерпретации. Такая схема сохраняет практическую ценность, однако ограничивает возможность оперативно использовать данные одного метода для корректировки другого и затрудняет организацию общего полевого цикла.

Единый геофизический проект предполагает согласование методов до начала полевых работ: общую геологическую и координатную основу, взаимосвязанные системы наблюдений, последовательность операций, требования к контролю качества и форматы данных. Там, где это методически и технологически допустимо, отдельные наблюдения могут выполняться параллельно или с минимальным временным разрывом. Одновременность при этом не является самоцелью: важнее согласованность работ и возможность рассматривать их как части одного технологического процесса.

Преимущество такого подхода состоит также в оперативном обмене информацией. Выявленная одним методом аномальная зона может стать основанием

▼ Рис. 1. От традиционного комплексирования результатов к единому проектированию и выполнению комплекса геофизических методов.



для сгущения сети или уточнения положения профиля другим методом. Сокращение временного разрыва между наблюдениями делает более сопоставимыми состояние территории, уровень техногенных помех и доступность участков. В результате комплексирование охватывает не только интерпретацию, но и проектирование, полевые наблюдения, контроль качества и последующую проверку модели.

Принципы единого проектирования и технологического обеспечения реализованного на проектах компании «Вега».

Состав комплекса должен определяться геологическими задачами, физико-геологической моделью объекта и ожидаемыми контрастами физических свойств. На стадии проектирования необходимо определить роль каждого метода, согласовать площади и системы наблюдений, положение опорных профилей и кон-

трольных точек, необходимую детальность, последовательность работ и возможность их параллельного выполнения.

Одновременно учитываются требования методов к взаимному влиянию и техногенным помехам, топографо-геодезическое обеспечение, петрофизические исследования, единые требования к пространственной привязке и форматам данных, процедуры контроля качества и порядок комплексной интерпретации. Тем самым ещё до начала полевого этапа задаётся общая логика получения и последующего сопоставления информации.

Плотность и конфигурация каждого метода должны соответствовать его разрешающей способности, глубинности и решаемой части общей задачи. Объединяющим элементом является не механическое совпадение точек измерений, а пространственная и информационная сопоставимость результатов.

▼ Рис. 2. Развитие индукционных датчиков ВЕГА и результаты сравнительных испытаний IMS-030 и IMS-050.

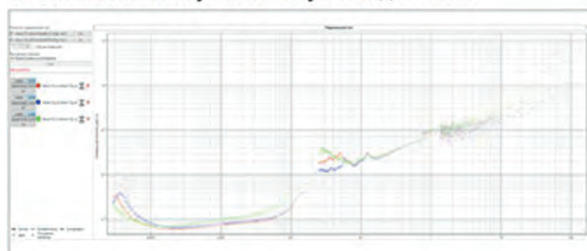
А. Индукционный магнитометр IMS-030



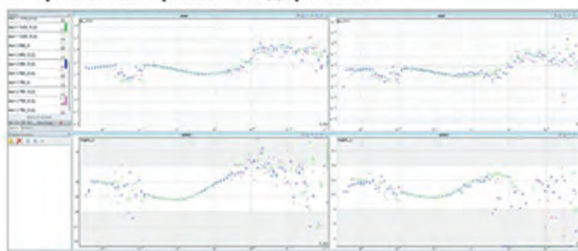
Б. Схема и полевые условия параллельного теста



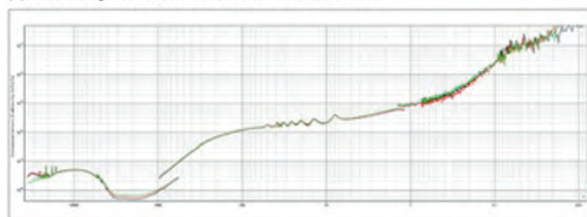
В. Собственные шумы испытуемых датчиков



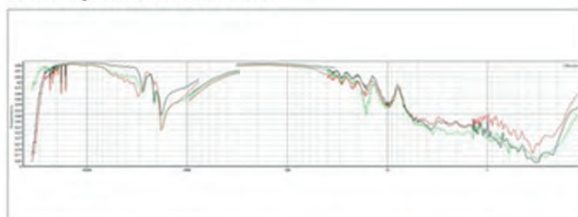
Г. Сравнение кривых зондирования



Д. Спектральная плотность сигнала



Е. Когерентность сигнала



Исходные изображения и графики — материалы ВЕГА. По результатам параллельного теста собственные шумы и когерентность выбранной пары IMS-030 сопоставимы с IMS-050; кривые АМТЗ практически идентичны.

Аппаратурное обеспечение комплексных исследований

Практическая реализация комплексного подхода зависит от аппаратурно-методической базы. Для АМТЗ существенны уровень собственных шумов, динамический и рабочий частотный диапазоны, масса и габариты оборудования, поскольку эти параметры одновременно определяют качество данных и производительность полевых работ.

Опыт эксплуатации индукционных датчиков IMS-050 сформировал требования к более лёгкому и компактному датчику при сохранении технических характеристик. В 2025 году были изготовлены три прототипа IMS-030, отличавшиеся параметрами обмоточных катушек на ферромагнитном сердечнике. Опытнометодические работы включали оценку собственных шумов, сравнение с IMS-050 и анализ когерентности сигналов.

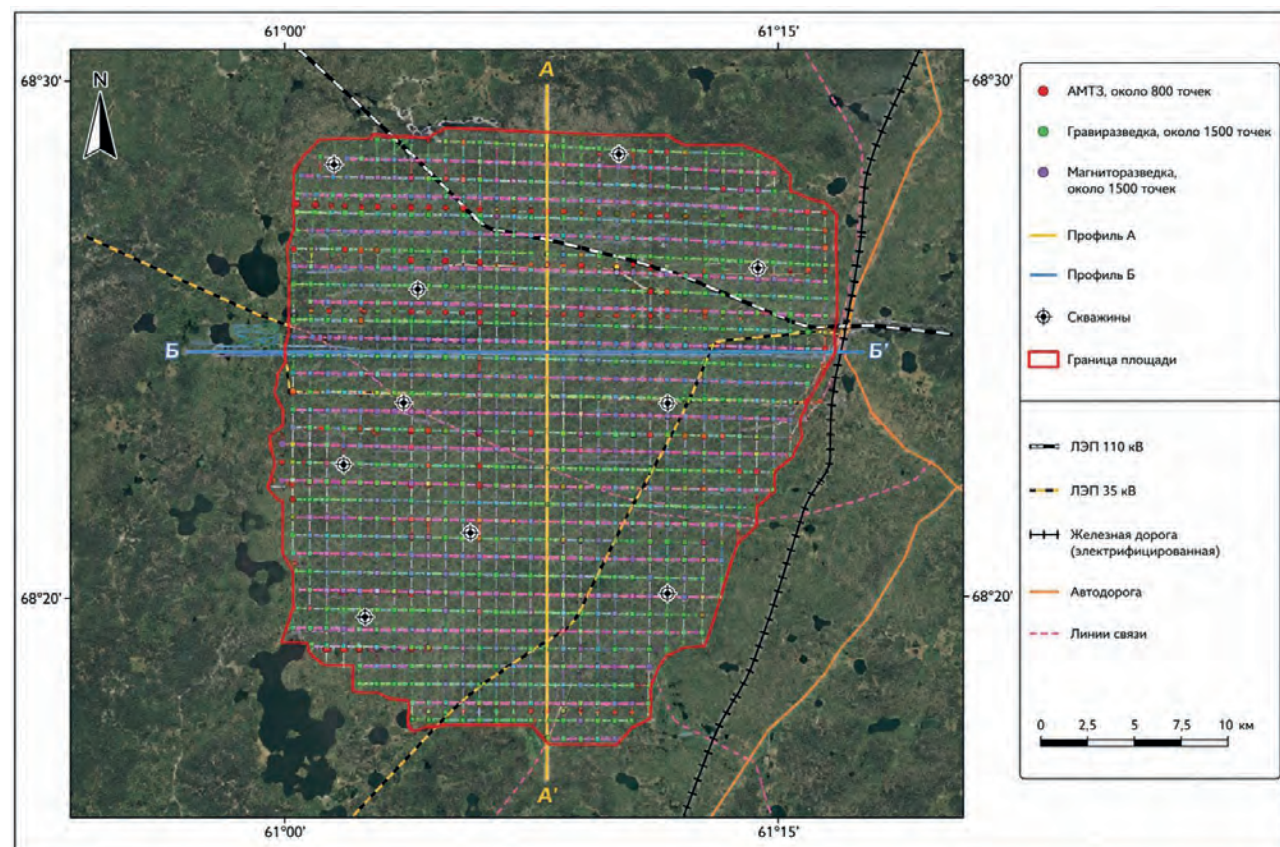
Испытания показали, что выбранная конструкция IMS-030 по собственным шумам и когерентности сопоставима с

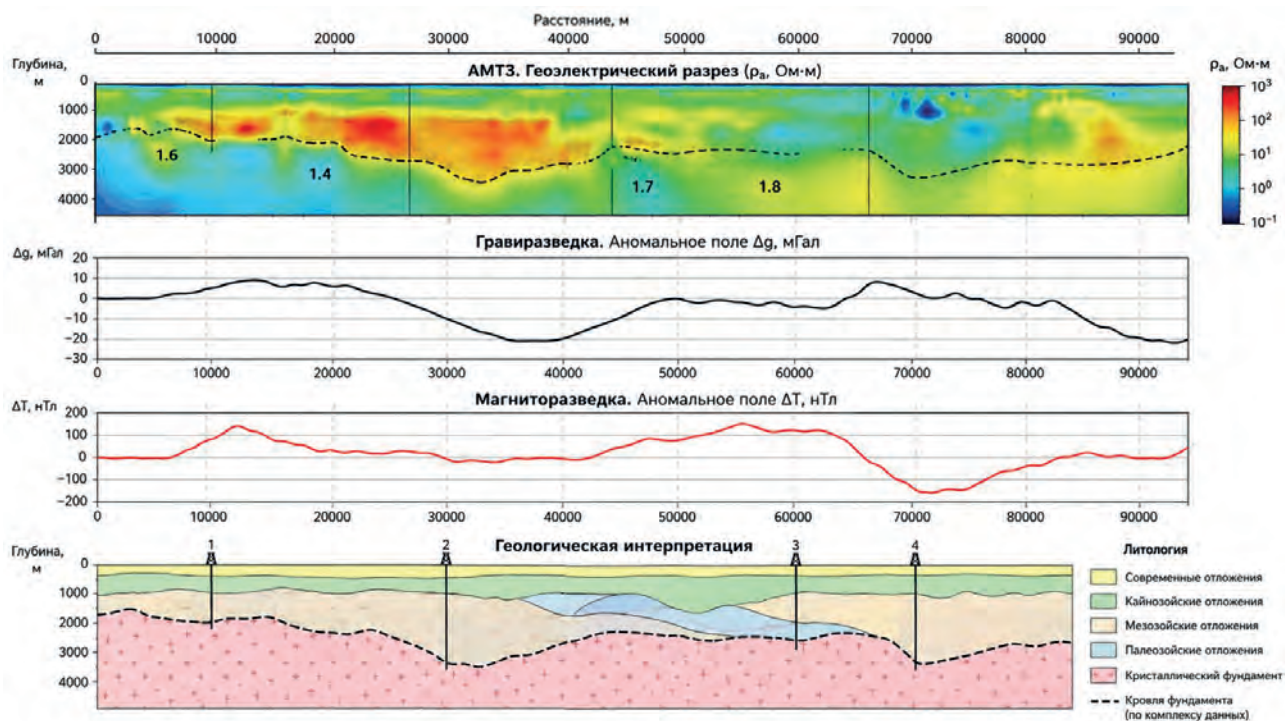
IMS-050. Полевые записи аппаратурой NORD с двумя типами датчиков дали практически идентичные кривые зондирования. В середине 2026 года первые рабочие экземпляры IMS-030 были испытаны непосредственно в полевых работах совместно с другими комплектами оборудования. Таким образом, развитие приборной базы является продолжением практики полевых исследований и направлено на повышение эффективности всего технологического цикла.

Практическая реализация комплексного подхода на Бадинской площади

В 2024 году компания ВЕГА выполнила комплексные геофизические исследования на Бадинской площади в Забайкальском крае. Бадинская впадина представляет крупную структуру Центрального Забайкалья протяжённостью около 100 км в северо-восточном направлении. Фундамент сложен палеозой-протерозойскими интрузивными и метаморфическими породами.

▼ Рис. 3. Схема комплексных геофизических исследований Бадинской площади.





Цифрами показаны пункты ГСЗ и скважин 2025 г.

▲ Рис. 4. Сопоставление результатов АМТЗ, гравиразведки и магниторазведки по профилю А.

Осадочное выполнение представлено юрско-меловыми терригенными отложениями сангинской и селенгинской свит, разделёнными покровом андезито-базальтов. В пределах впадины известны проявления урановой минерализации.

Основными задачами исследований являлись уточнение строения перспективных участков, прогноз глубины залегания кристаллического фундамента, прослеживание особенностей его строения и возможное выделение базальтовых пластов. Для их решения применён комплекс, включавший аудиоманнителлурическое зондирование, гравиразведку и магниторазведку. Выполнено около 800 точек АМТЗ и примерно по 1500 точек гравиметрических и магнитометрических наблюдений.

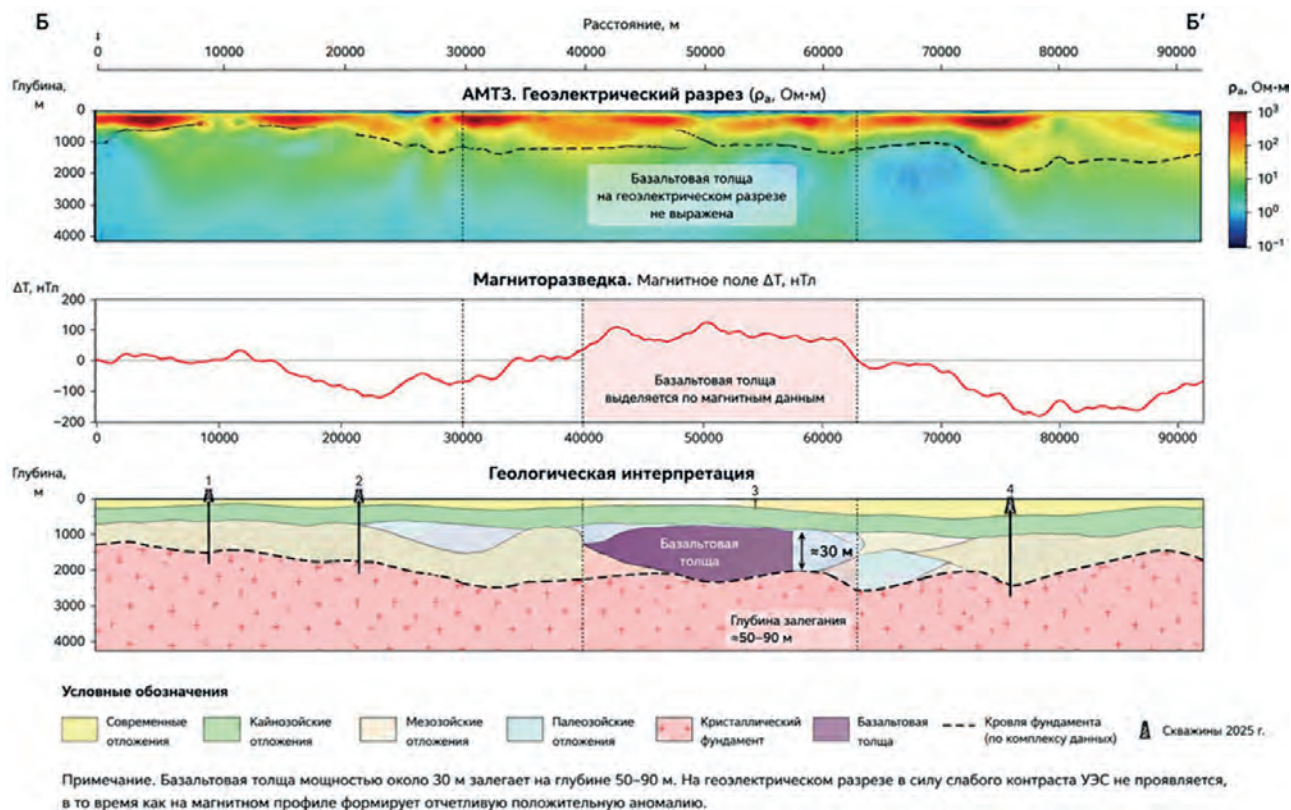
Объект сложен не только геологически, но и технологически. В пределах площади расположены высоковольтные линии электропередачи, электрифицированная железная дорога, автомобильная дорога и телекоммуникационные кабели. Эти объекты создают дополнительные помехи, особенно существен-

ные для электромагнитных наблюдений. Для АМТЗ в условиях интенсивных помех использовались разработанные ВЕГА датчики IMS-050 с увеличенным динамическим диапазоном.

Взаимодополняемость методов

Результаты Бадинской площади демонстрируют различную чувствительность методов к элементам геологического строения. По профилю А положение кровли кристаллического фундамента, определённое по геоэлектрическому разрезу по границе порядка 50 Ом·м, хорошо согласуется с гравиметрическими данными. В магнитном поле эта граница уверенно не прослеживается, что может быть связано с недостаточной контрастностью магнитных свойств пород на соответствующих глубинах.

По профилю Б установлено резкое погружение поверхности фундамента до глубин более 490 м, связываемое со сбросовым нарушением большой амплитуды. Базальтовая толща не получила уверенного отображения на геоэлектрическом разрезе, но была выделена по



▲ Рис. 5. Проявление базальтовой толщи в электрическом и магнитном полях по профилю Б.

магнитометрическим данным. Её мощность оценивается примерно в 30 м, глубина залегания — 50–90 м. Отсутствие выраженного электрического отклика объясняется слабой контрастностью пород по УЭС.

Этот пример принципиален для понимания комплексирования: его ценность определяется не обязательным совпадением признаков одного объекта во всех физических полях, а возможностью одного метода восполнять недостаточную информативность другого. Расхождения между результатами могут содержать дополнительную информацию о свойствах и строении среды.

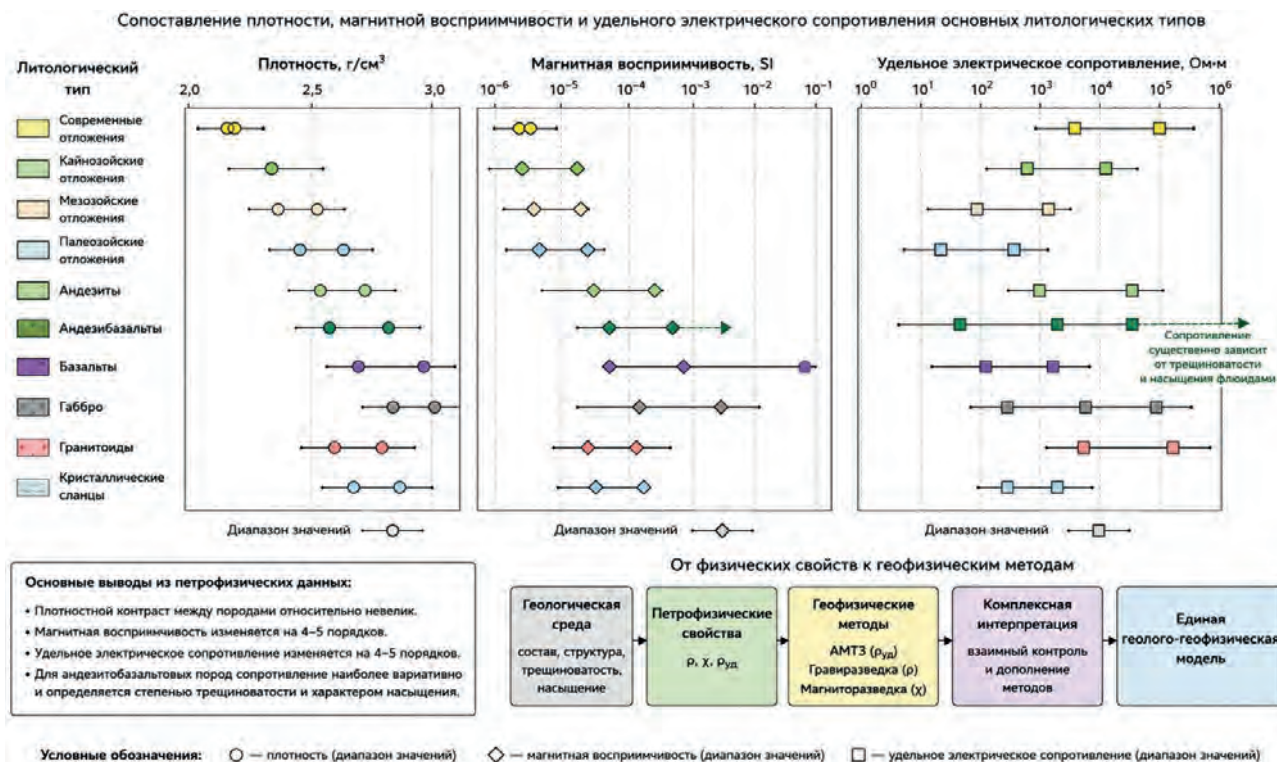
Петрофизическое обоснование и верификация

Связующим звеном между геологическим строением и наблюдаемыми полями являются физические свойства пород. Для Бадинской площади проанализированы плотность, магнитная восприимчивость и удельное электрическое сопротивление. Породы характеризуются

сравнительно слабой плотностной дифференциацией: средние значения для изученных литотипов находятся примерно в диапазоне 2,09–2,52 г/см³, а максимальные значения для массивных андезитобазальтов достигают 2,67 г/см³.

Магнитные и электрические свойства изменяются существенно шире. Магнитная восприимчивость изученных пород находится в диапазоне от $0,04 \times 10^{-3}$ до $16,23 \times 10^{-3}$ ед. СИ, а для отдельных образцов андезитобазальтов достигает $51,42 \times 10^{-3}$ ед. СИ. УЭС изменяется от первых десятков до первых тысяч Ом·м. Для андезитобазальтов среднее значение составляет около 200 Ом·м при диапазоне примерно 70–500 Ом·м и заметно зависит от трещиноватости.

Петрофизические данные объясняют, почему один и тот же объект по-разному проявляется в электрическом, гравитационном и магнитном полях. Поэтому комплексная интерпретация должна опираться не только на пространственное совпадение аномалий, но и на понимание причин их совпадения или расхождения.



▲ Рис. 6. Петрофизические предпосылки комплексной интерпретации на Бадинской площади.

Важной стадией является проверка геофизической модели независимыми геологическими данными. Бурение 2025 года подтвердило ряд построений по профилю А и позволило сопоставить прогнозируемое положение элементов разреза с фактическими данными; отмечено тектоническое нарушение на глубине 136,1 м. Одновременно выявлены ограничения отдельных методов. Базальтовый покров, вскрытый отдельными скважинами, местами не получил уверенного отображения по АМТЗ; возможными причинами являются влияние ЛЭП и слабая контрастность пород по УЭС.

Такие несовпадения не следует рассматривать только как недостаток метода. Их анализ позволяет разграничить влияние геологических факторов, петрофизической неоднозначности и условий регистрации и тем самым уточнить область применимости каждого вида наблюдений. В этом смысле верификация замыкает цикл комплексного исследования: прогноз → бурение → сопоставле-

ние → анализ расхождений → коррек-
ровка модели.

Практическая реализация комплексного подхода на площади развития интрузивных комплексов с сульфидным оруденением

Еще один пример комплексного подхода реализован компанией на перспективной (сульфидные Cu-Ni руды) площади в Красноярском крае, где выполнены комплексные геофизические исследования. В геологическом строении участка принимают участие различные комплексы пород, как по составу, так и по возрасту (от пермских до верхнечетвертичных отложений). Осадочные и вулканогенно-осадочные комплексы прорваны различными типами интрузивных образований.

Основной задачей работ было определение границ распространения интрузивов, их морфологии, размеров и локализация в подошве аномальных участков, отвечающих зонам развития сульфидной минерализации.

Для достижения поставленных задач

были запланированы площадные магниторазведочные работы, а также профильные работы методами гравиразведки и электротомографии ВП (ЭТ-ВП) с глубиной исследования до 300 метров.

Взаимодополняемость методов

Результаты, полученные в ходе полевых работ, подтверждают корректность выбора методов: интересующие геологов объекты отличаются от вмещающих пород как по электрическим, так и по магнитным и плотностным свойствам. Интрузии выделяются в виде зон повышенного сопротивления на геоэлектрических разрезах и участками с повышенной эффективной плотностью и контрастными магнитными свойствами на итоговых разрезах инверсии данных магнито- и гравиразведки.

В ходе обработки была проведена также совместная классификация плотностных и магнитных свойств пород на исследуемых разрезах, что позволило уточнить положение и форму интрузивов.

Стоит отметить, что комплексирование методов позволило не только выделить зоны интереса, но и выполнить разделение по стратиграфическим комплексам. Так, например, довольно ярко на представленных разрезах различаются между собой по физическим свойствам интрузии курейского и катангского комплексов: оба комплекса отражаются в виде зон повышенных сопротивлений на геоэлектрических разрезах, слабо отличаются по плотностным и существенно - по магнитным свойствам, что заметно как на разрезе магнитной восприимчивости, так и на разрезе совместной классификации свойств.

В рассматриваемом примере комплексирование методов позволило также снизить возможность неверной интерпретации полученных данных. На ПК 3100-3500 по данным инверсии ЭТ-ВП расположена зона с повышенными зна-

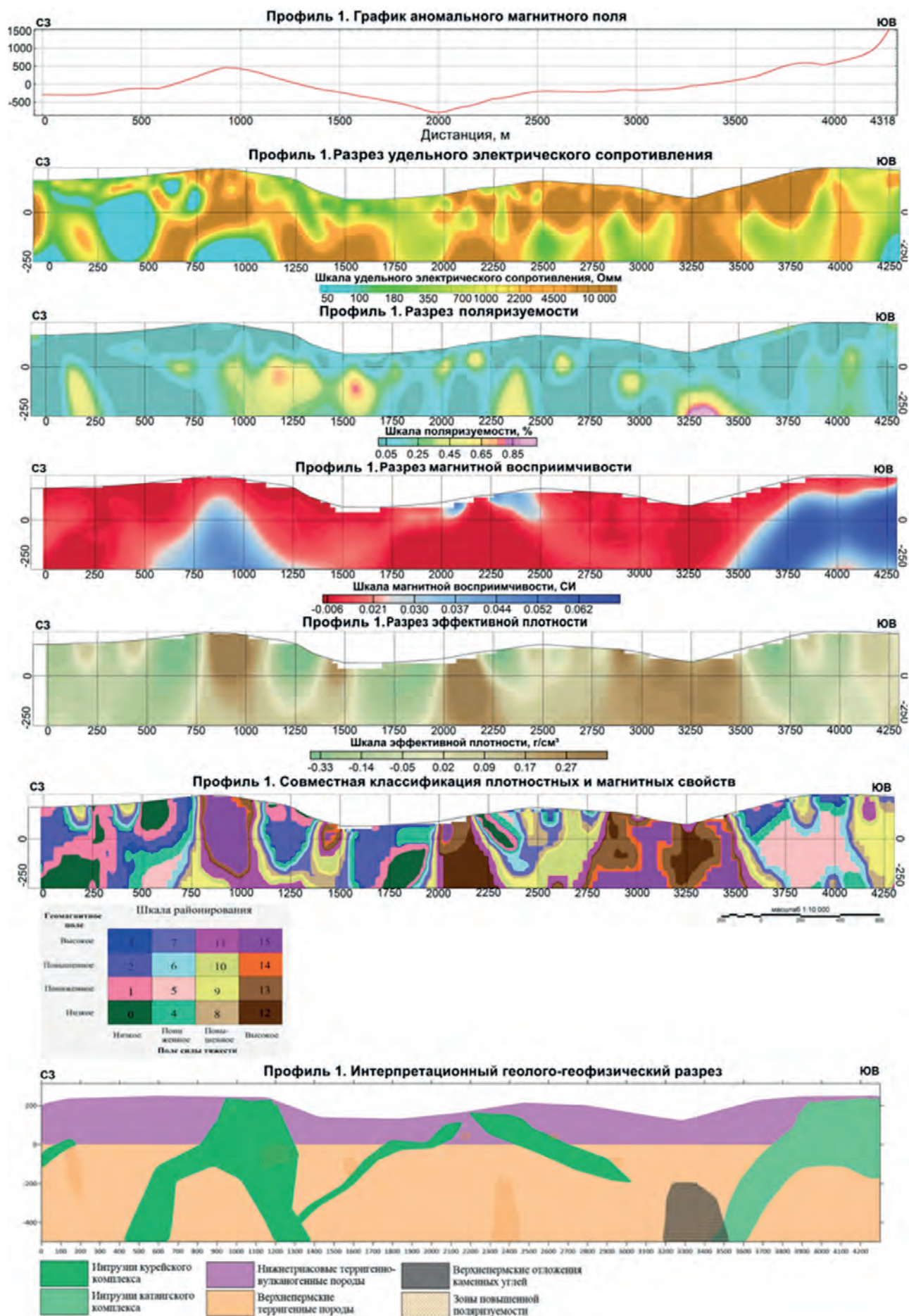
чениями сопротивлений и аномально высокими значениями поляризуемости, что аналогично выделенным интрузивам, однако по данным магниторазведки рассматриваемая область характеризуется низкими значениями магнитной восприимчивости, что позволяет отнести аномалообразующие объекты к верхнепермским отложениям каменных углей, не представляющих интереса в рамках решаемых геологических задач.

Перспективы развития комплексных исследований

Дальнейшее развитие комплексирования связано с переходом от совместного использования результатов отдельных методов к их более глубокой интеграции на всех этапах проекта. Единая геологическая задача и физико-геологическая модель должны определять состав комплекса, взаимное положение систем наблюдений, последовательность полевых операций, требования к качеству и технологии обработки данных.

Следующим шагом является организация согласованных и, где это технологически возможно, одновременных полевых наблюдений с общей системой контроля качества. Комплекс может расширяться за счёт различных методов электроразведки, сейсморазведки, гравитационной и магниторазведки, петрофизики и данных бурения в зависимости от решаемой задачи.

Перспективным направлением является совместная инверсия данных различной физической природы [9, 10]. В отличие от последовательного сопоставления независимо построенных моделей, она позволяет использовать взаимные ограничения непосредственно при решении обратной задачи и тем самым снижать неоднозначность интерпретации. Для Бадинской площади совместная инверсия рассматривается как направление дальнейшего развития: имеющиеся



▲ Рис. 7. Результаты комплексной интерпретации геофизических данных.

материалы подтверждают комплексную интерпретацию, но не дают оснований говорить о её практическом применении в данном проекте.

Опыт Дегалинской площади показывает, что еще на стадии проектирования возможно обосновать перспективность применения комплексирования нескольких геофизических методов для решения конкретных поисковых задач.

Заключение

Современное комплексирование целесообразно начинать при постановке геологической задачи и проектировании исследований. Методы должны объединяться общей физико-геологической моделью и выполняться согласованно, сохраняя оптимальные для каждого из них системы наблюдений.

Опыт Бадинской площади показывает, что информативность комплекса определяется не только совпадением геофизических признаков, но и возможностью одного метода компенсировать ограничения другого. Развитие аппаратуры, включая IMS-030, является частью этого процесса, поскольку требования к техническим средствам формируются практикой полевых работ.

Конечным результатом комплексирования должна быть единая геолого-геофизическая модель, уточняемая по петрофизическим данным и результатам бурения, а различия между методами должны использоваться как дополнительная информация о строении среды.

Опираясь на опыт Дегалинской площади, можно сделать выводы о перспективности использования нескольких геофизических методов в рамках одной задачи не только для рудной геологии, но и стратиграфического разделения уже известных комплексов пород и проверки качества интерпретации.

Литература

1. Никитин А. А., Хмелевской В. К. Комплексирование геофизических методов. 2-е изд. М.: ВНИИгеосистем, 2012. 346 с.
2. Долгаль А. С. Комплексирование геофизических методов: учебное пособие. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2012. 167 с.
3. Тархов А. Г., Бондаренко В. М., Никитин А. А. Комплексирование геофизических методов. М.: Недра, 1982.
4. Комплексирование геофизических методов при решении геологических задач / под ред. В. В. Бродового, В. Е. Никитского. М.: Недра, 1987.
5. Агафонов Ю. А., Семинский И. К., Селяев В. А., Агафонов Е. А., Буддо И. В. Современная нефтегазопроисковая электро-разведка в комплексе геологоразведочных работ // Приборы и системы разведочной геофизики. 2022. № 3 (74).
6. Агафонов Ю. А., Немцева Д. Б., Оцимик А. А., Мисюркеева Н. В., Селяев В. А. Комплексирование сейсморазведки и электроразведки — значимое повышение информативности и оптимизация затрат на полевые работы // Приборы и системы разведочной геофизики. 2025. Специальный выпуск.
7. Золотая Л. А., Сокулина К. Б., Хуснуллина Г. Ф., Сивожелезов Е. В. Комплексная интерпретация геофизических данных в сложных геолого-геофизических условиях зоны сочленения Волго-Уральской антеклизы и Прикаспийской синеклизы // Приборы и системы разведочной геофизики. 2024. № 3. С. 101–108.
8. Митюнина И. Ю. Методика комплексирования геофизических методов при создании скоростной модели верхней части геологического разреза // Геофизика. 2014. № 5. С. 41–45.
9. Gallardo L. A., Meju M. A. Characterization of heterogeneous near-surface materials by joint 2D inversion of DC resistivity and seismic data // Geophysical Research Letters. 2003. Vol. 30. No. 13.
10. Gallardo L. A., Pérez-Flores M. A., Gómez-Treviño E. A versatile algorithm for joint 3D inversion of gravity and magnetic data // Geophysics. 2003. Vol. 68. No. 3. P. 949–959.

УДК 550.83:553.78

Первые результаты комплексных геофизических исследований месторождения термальных вод Гоуджекит (участок «Солнечный», Северное Прибайкалье)

■ Шашкеева Л.П.¹, Буддо И.В.^{1,2}, Черных А.А.¹, Часовитин П.А.¹, Рукосуев Д.А.¹, Добрынина А.А.¹

¹ Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск.

² Сибирская школа геонаук ИрННТУ, г. Иркутск.

Аннотация. Представлены первые результаты комплексных геофизических исследований месторождения термальных вод «Гоуджекит» на участке «Солнечный» в Северном Прибайкалье, выполненных в 2025 г. Цель работ состояла в уточнении геологического строения разреза, выявлении разрывных нарушений, обводнённых зон и возможных путей разгрузки термальных вод. Комплекс методов включал электротомографию (ЭТ), пассивную сейсморазведку и аэротепловизионную съёмку. По данным пассивной сейсморазведки мощность осадочного разреза предварительно оценена в 380–470 м; кровля фундамента характеризуется неровным, предположительно блоковым строением. Методом электротомографии выявлены низкоомные области на глубинах около 40–100 м, интерпретируемые как водонасыщенные рыхлые отложения и трещиноватые обводнённые породы, а также субвертикальная зона резкого изменения сопротивления, вероятно, связанная с разрывным нарушением. Тепловизионная съёмка позволила выделить температурные аномалии и отделить техногенный прогрев от потенциальных участков естественной разгрузки тепла. Совместная интерпретация результатов подтверждает ведущую роль разломно-трещинных зон в формировании гидротермальной системы и обосновывает направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: термальные воды, Гоуджекит, Северное Прибайкалье, электротомография, пассивная сейсморазведка, аэротепловизионная съёмка, разрывные нарушения.

Введение

Термальные воды Байкальской рифтовой зоны приурочены преимущественно к крупным разрывным нарушениям и зонам повышенной трещиноватости кристаллических пород. Их формирование связывают с инфильтрацией атмосферных вод, глубокой циркуляцией по тектонически ослабленным зонам, нагревом в условиях повышенного геотермического градиента и последующим восходящим движением по разломам [5, 6]. Сложное блоковое строение фундамента, неоднородность четвертичных отложений и локальный характер разгрузки затрудняют картирование геотермальных структур только по данным бурения и наземных

гидрогеологических наблюдений.

Месторождение Гоуджекит, также известное по эксплуатируемому участку «Солнечный», ранее изучалось преимущественно гидрогеологическими и режимными методами [4]. Имеющиеся материалы указывают на разломно-трещинный тип коллектора, однако детальные комплексные геофизические исследования непосредственно в пределах участка ранее практически не проводились. Это обусловило постановку в 2025 г. опытно-методических работ с использованием методов электротомографии, пассивной сейсморазведки и аэротепловизионной съёмки.

Цель настоящей работы заключается в представлении первых результатов комплексного исследования строения месторождения и комплексирования геофизических методов для выявления разрывных нарушений, обводнённых зон и участков разгрузки термальных вод.

Геолого-гидрогеологическая характеристика

Месторождение термальных вод «Гоуджекит» расположено в Северо-Байкальском районе Республики Бурятия, северо-западнее г. Северобайкальска, на правом пологом борту долины р. Гоуджекит. Расстояние до Северобайкальска составляет около 30 км. База отдыха и эксплуатационная скважина № 20 находятся приблизительно в 0,5 км южнее разъезда Гоуджекит. Абсолютные отметки рельефа в пределах участка изменяются от 660 до 700 м [4].

Район входит в состав Байкальской рифтовой зоны и характеризуется сложным блоково-разломным строением. В региональном структурном плане существенную роль играют Тыйский и глубокий Левоминьский разломы, а также система сопряжённых нарушений. По имеющимся представлениям, пересече-

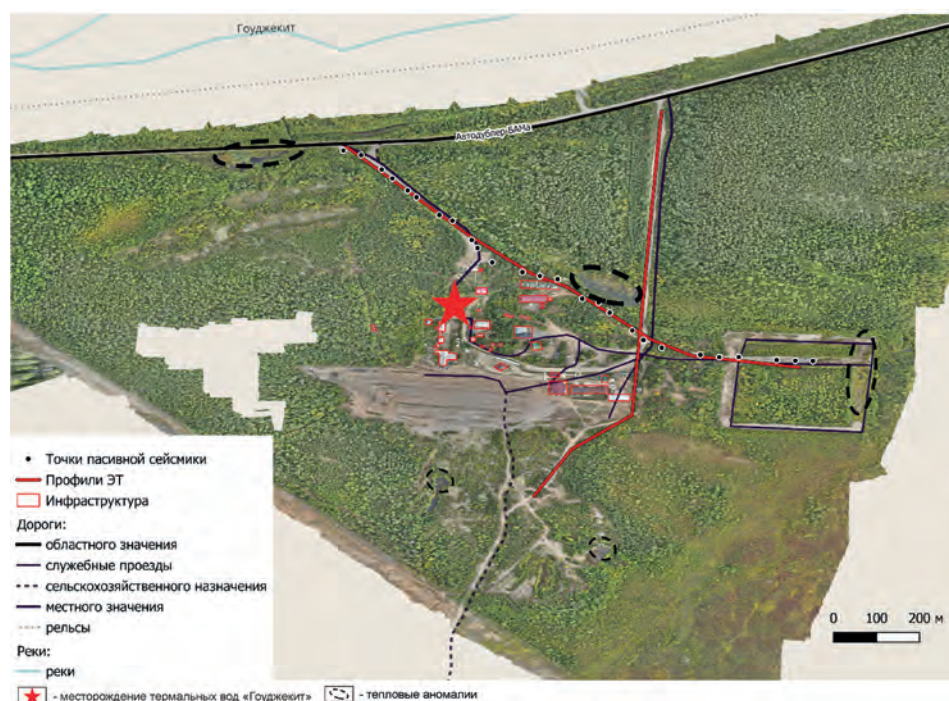
ния и оперяющие ветви разломов образуют проницаемые зоны, обеспечивающие глубокую циркуляцию и восходящую миграцию нагретых вод [4, 5].

Эксплуатационная скважина № 20 пробурена в 1989 г. до глубины 170 м. Напорные термальные воды вскрыты в интервале 75-90 м. При бурении дебит самоизлива составлял 6 л/с, пьезометрический уровень установился на отметке +14 м, первоначальная температура воды достигала 45,5 °С. В 2003-2017 гг. температура самоизлива сохранялась преимущественно в диапазоне 51-53 °С. Воды отнесены к трещинно-жильному типу и связаны с водоносной зоной Тыйского разлома [4].

Материалы и методы

Комплекс геофизических исследований 2025 г. включал ЭТ, пассивную сейсморазведку и аэротепловизионную съёмку. Положение профилей и пунктов наблюдений приведено на рис. 1. Выбор комплекса определялся необходимостью изучения объекта на разных глубинных уровнях: от температурного поля поверхности до строения рыхлого чехла и кровли кристаллического фундамента.

Исследования методом ЭТ выпол-



◀ Рис. 1. Схема расположения профилей электротомографии и пунктов пассивной сейсморазведки на участке «Солнечный» (материалы исследований 2025 г.).

нялись многоканальной аппаратурой «СКАЛА-48К12» с применением установки Шлюмберже. Длина одной расстановки составляла 480 м, расстояние между соседними электродами – 10 м. Для увеличения протяжённости профилей использовалась технология последовательного переноса измерительной косы. Общий объём полевых электро-разведочных работ составил 1,8 пог. км. Обработка и двумерная инверсия данных выполнены в программе ZondRes2D. Получены разрезы распределения удельного электрического сопротивления до глубины около 100 м.

Наблюдения методом пассивной сейсморазведки проводились аппаратурой «Байкал-8Н». Пункты располагались вдоль профиля 1 с шагом 25 м. Продолжительность регистрации фонового сейсмического сигнала на каждом пункте составляла около 30 мин. Выполнено 26 физических наблюдений. Обработка была направлена на оценку

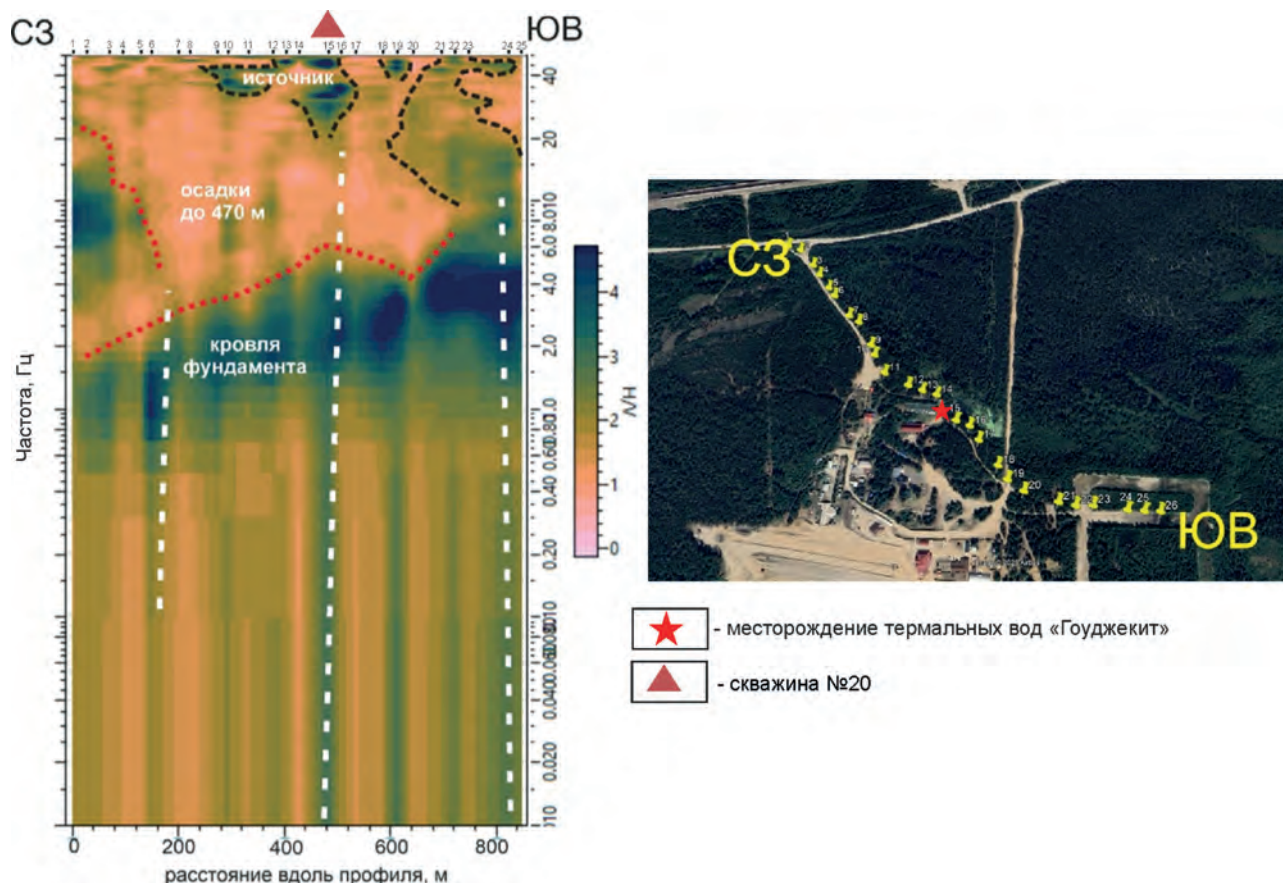
мощности осадочного разреза, определение конфигурации кровли фундамента и выделение зон нарушения сплошности геологической среды.

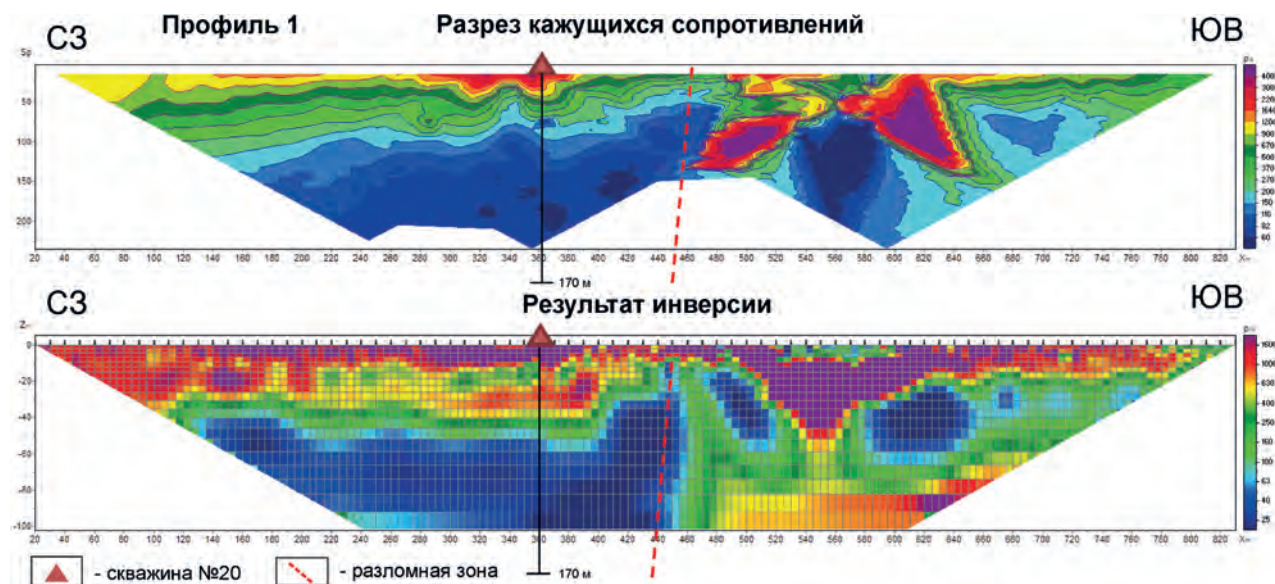
Аэротепловизионная съёмка выполнена с помощью квадрокоптера DJI Mavic 3T, оснащённого тепловизионной камерой с разрешением 640×512 пикселей и частотой регистрации 30 кадров/с. Высота полёта составляла 100 м, продольное и поперечное перекрытие кадров – 80 %. Площадь съёмки достигла $0,08 \text{ км}^2$. Обработка материалов и построение тепловизионного ортофотоплана выполнены в программе Earth-Thermal, разработанной в ИЗК СО РАН [7].

Результаты исследований

По результатам обработки пассивной сейсморазведки построен глубинный разрез вдоль профиля 1 (рис. 2). Предварительная интерпретация показывает, что мощность осадочного разреза долины составляет около 380–470

▼ Рис. 2. Результат пассивной сейсморазведки по профилю 1.





▲ Рис. 3. Результаты электротомографии: разрез кажущегося сопротивления (сверху) и результаты двумерной инверсии (снизу) по профилю 1 (СЗ–ЮВ).

м. Кровля кристаллического фундамента имеет неровное, предположительно блоковое строение. Изменения её положения по профилю сопровождаются зонами повышенной неоднородности, которые могут соответствовать разрывным нарушениям.

В северо-западной части профиля, непосредственно в районе источника Гоуджекит, выделяется локальная зона нарушения сплошности среды. Её положение согласуется с представлениями о тектоническом контроле разгрузки термальных вод. Также предполагаемые нарушения отмечаются в центральной и юго-восточной частях профиля по резким изменениям кровли фундамента.

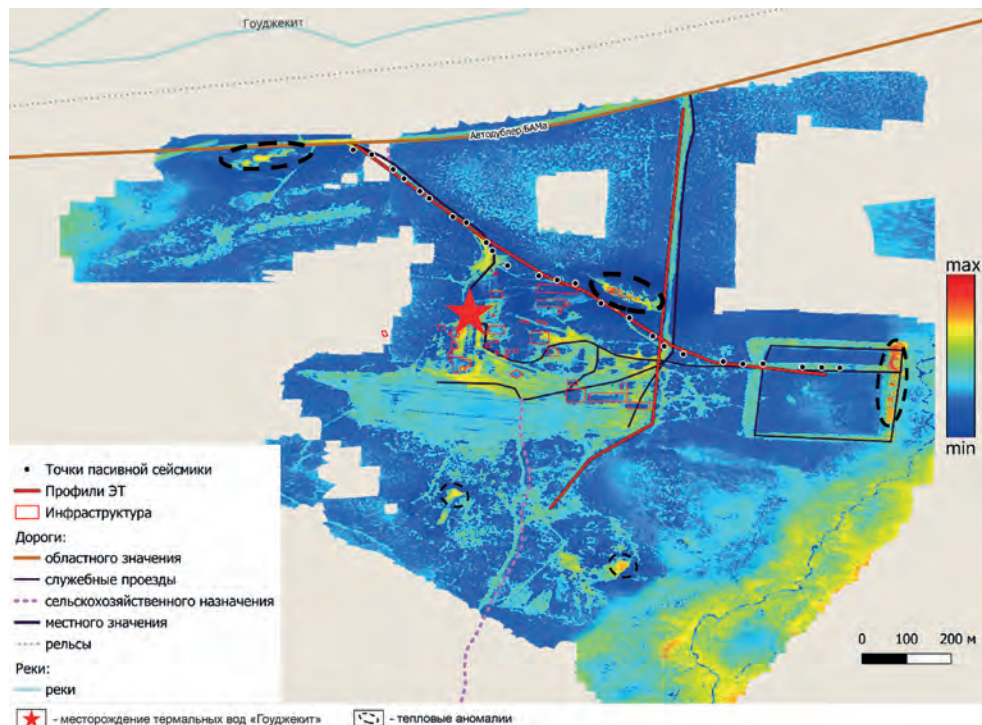
Исследования методом ЭТ выполнены по двум профилям. В верхней части профиля №1 преобладают относительно высокоомные образования с удельным электрическим сопротивлением от нескольких сотен до первых тысяч Ом·м (рис. 3). На глубинах приблизительно 40-100 м прослеживаются низкоомные области с сопротивлением преимущественно менее 100-160 Ом·м. С учётом информации о геологическом строении территории исследования, они могут соответствовать водонасыщенным рыхлым отложениям или трещиноватым обводнённым породам.

В интервале около 440-470 м профиля выделяется узкая субвертикальная зона контрастного изменения сопротивления. По морфологии и положению она предварительно интерпретируется как зона разрывного нарушения. К юго-востоку наблюдается чередование высокоомных и низкоомных блоков, отражающее неоднородное строение фундамента. Эксплуатационная скважина № 20 расположена приблизительно на отметке 360 м профиля. Смещение основной контрастной аномалии относительно скважины может указывать на связь водопритока с опережающими трещинами или с широкой зоной дробления, а не только с осевой частью нарушения.

На тепловизионном ортофотоплане выделяются участки повышенной температуры, пространственно связанные как с объектами инфраструктуры, так и с незастроенными частями территории (рис. 4). Аномалия в центральной части участка интерпретируется как техногенная, поскольку приурочена к зданиям, бассейнам и коммуникациям, используемым для транспортировки термальных вод.

Другие выделенные участки расположены за пределами основных источников техногенного прогрева. Вместе с

► **Рис. 4. Теплови-
зионный ортофо-
топлан участка
«Солнечный».**
Штрихпунктиром
показаны выделен-
ные температур-
ные аномалии; цен-
тральная аномалия
интерпретируется
как техногенная.



тем, на температуру поверхности влияют влажность грунта, растительность, экспозиция склонов, свойства покрытий и суточный ход температуры.

Совместная интерпретация данных ЭТ и пассивной сейсморазведки позволяет предположить наличие неоднородной осадочной толщи, залегающей на тектонически нарушенном фундаменте. По данным наблюдений пассивной сейсморазведкой мощность осадочного чехла составляет около 380-470 м. При такой глубине кровли фундамента низкоомные области, выявленные электротомографией на глубинах 40-100 м, располагаются внутри осадочной толщи и могут отражать водонасыщенные горизонты.

Резкое изменение сопротивления в интервале 440-470 м профиля 1 может говорить о наличии флюидонасыщенной разломной зоны. В сочетании с предполагаемыми нарушениями на сейсмическом разрезе это допускает существование разломно-трещинной системы, обеспечивающей восходящее движение термальных вод и их последующее распространение по проницаемым горизонтам осадочной толщи. Интервал водопритоков в скважине № 20, состав-

ляющий 75-90 м, согласуется по глубине с распространением низкоомных областей.

Обсуждение результатов

Наиболее важным результатом проведенных исследований является выявление в районе источника и скважины системы признаков разломно-блокового строения. Сейсмический разрез указывает на нарушение сплошности среды в северо-западной части профиля и значительные изменения глубины кровли фундамента. На разрезе электротомографии по профилю 1 выделяется субвертикальная контрастная зона, а в окружающем пространстве развиты низкоомные области. Совпадение этих признаков позволяет предполагать наличие водопроводящей разломно-трещинной зоны.

Предварительная модель предполагает инфильтрационное питание системы, глубокую циркуляцию вод по зонам тектонической трещиноватости, их нагрев и восходящую миграцию по пересекающимся нарушениям. В приповерхностной части термальные воды могут распространяться по проницаемым зонам в рыхлых отложениях, формируя ло-

кальные низкоомные и температурные аномалии. Скважина № 20, вероятно, вскрывает одну из ветвей этой системы в интервале 75-90 м.

Вместе с тем, остаётся невыясненной глубина заложения разлома, т.к. примененные методы позволяют изучать геологический разрез не более чем на 1 км. Для построения глубинной геолого-геофизической модели источника термальных вод целесообразна постановка других методов, к примеру, магнитотеллурического зондирования (МТЗ) либо зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). Таким образом, целесообразно проведение полномасштабных геологоразведочных работ, в т.ч. бурения для заверки выявленных геофизических аномалий.

Заключение

По данным пассивной сейсморазведки мощность осадочного разреза предварительно оценена в 380-470 м; в районе источника выделено разрывное нарушение. ЭТ выявила протяжённые низкоомные области по профилю 1 на глубинах приблизительно 40-100 м и субвертикальную зону резкого изменения сопротивления, которые могут быть связаны с наличием водонасыщенного коллектора, разломной зоны и участками трещиноватости фундамента. Аэротепловизионная съёмка позволила отделить центральную техногенную аномалию от участков, предположительно связанных с естественной разгрузкой тепла.

Комплексная интерпретация геолого-геофизических данных подтверждает ведущую роль разломно-трещинных зон в формировании месторождения термальных вод. Наиболее вероятная модель включает глубокую циркуляцию инфильтрационных вод, их нагрев и восходящее движение по системе разрывных нарушений с последующим рас-

пространением в проницаемых рыхлых отложениях. Полученные результаты могут использоваться при планировании дальнейших геофизических и гидрогеологических исследований, выборе участков заверочного бурения и организации мониторинга состояния термальных вод месторождения.

Литература

1. Гидрогеология СССР. Т. XXII. Бурятская АССР. М. : Недра, 1970. 432 с.
2. Добрынина А. А., Саньков А. В., Буддо И. В., Шелохов И. А., Саньков В. А. Возможности методов пассивной сейсморазведки при изучении геологического строения арктических районов Западной Сибири (полуостров Ямал) // Геология и геофизика. 2025. Предварительная электронная публикация. DOI: 10.15372/GiG2025192.
3. Добрынина А. А., Саньков В. А., Иванов А. В., Саньков А. В. Применение методов пассивной сейсмологии для определения параметров угольного разреза // Уголь. 2022. № S12. С. 88-93. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-S12-88-93.
4. Кислицына Л. Б. Оценка запасов подземных термальных вод месторождения «Солнечное» (Северобайкальский район, Республика Бурятия) по состоянию на 01.06.2018 г.: отчёт. ООО «Недра-Геомониторинг», 2018. Рукопись.
5. Ломоносов И. С. Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск : Наука, 1974.
6. Ломоносов И. С., Пиннекер Е. В., Писарский Б. И. Минеральные воды зоны влияния Байкало-Амурской магистрали // Современные исследования земной коры. Иркутск, 1975. С. 163-165.
7. Рукосуев Д.А., Буддо И.В., Шелохов И.А., Черных А.А. Earth-Thermal : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2025692115. Дата публикации: 05.11.2025.

УДК 550.838:528.8

Опыт применения аппаратурно-программного комплекса БПЛА-магниторазведки и аэротепловизионной съёмки в условиях высокогорной местности

■ Рукоусев Д.А.¹, Юрьев А.А.^{1,2}, Черных А.А.¹, Рыбченко А.А.^{1,4}, Буддо И.В.^{1,3}

¹ Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск.

² Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск.

³ Сибирская школа геонаук ИрННТУ, г. Иркутск.

⁴ Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН

Аннотация. Рассмотрен опыт планирования БПЛА-магниторазведки и аэротепловизионной съёмки на высокогорном участке с высотными отметками 1400-3000 м. Разработанное в ходе проведенных исследований программное обеспечение (ПО) позволяет рассчитывать маршруты по цифровой модели рельефа, изменять шаг маршрутных точек на подъёмах и спусках, предусматривает плавные переходы и рекомендует продолжительность вылета. Магнитная съёмка выполнена с БПЛА DJI Matrice 400 с магнитометром MaxiMag на 10-метровом подвесе, тепловизионная – с БПЛА DJI Mavic 3 Thermal. Для выборки из десяти контрольных профилей (742 интервала) средняя абсолютная ошибка составила 3,07 нТл, среднеквадратичная ошибка – 4,08 нТл. Площадь тепловизионного контура составила 24,2 км². Показан пример теплового дешифрирования склоновых деформаций. Предлагается сопоставлять площадные магнитные и детальные тепловые материалы с учётом различий в масштабе наблюдений. Применение в горных районах Арктики требует проведения локальных полевых испытаний для корректировки параметров полёта.

Ключевые слова: БПЛА, магниторазведка, аэротепловизионная съёмка, высокогорье, обтекание рельефа, планирование миссий, разломы, опасные геологические процессы, Арктика.

Финансирование: Работа выполнена в рамках темы № 1023110300018-4-1.5.4 Министерства науки и высшего образования РФ в молодежной лаборатории комплексных исследований Арктики ИЗК СО РАН.

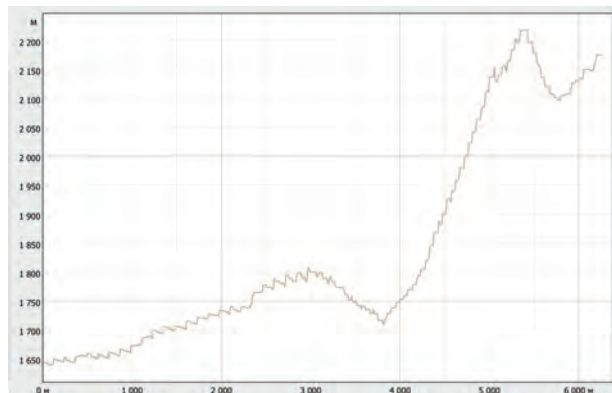
1. Введение

В условиях резко расчленённого рельефа сеть наблюдений геофизических методов нередко прерывается на скальных склонах, в осыпях и в зонах склоновых деформаций. БПЛА снимает часть этих ограничений, но создаёт другую задачу: траектория должна одновременно сохранять условия измерений, не выходить за ограничения носителя и оставлять энергетический резерв для возврата. Для подвесной магниторазведки добавляются раскиска датчика и магнитная помеха от носителя [4, 7-11]. Для аэротепловизионной съёмки критичны время суток, перекрытие кадров и изменение условий инсоляции [13, 14].

Цель работы – описать порядок планирования и полевого контроля двух БПЛА-методов для изучения разломного строения и признаков опасных склоновых процессов. Методическая особенность комплекса состоит в использовании общей цифровой основы при раздельном задании условий магнитных измерений и тепловизионной съёмки. Пригодность принятых технологических решений обоснована по результатам тестовых полевых работ, выполненных в 2026 г.

Материалы и методы

Работы выполнены на высокогорном



▲ Рис. 1. Профиль высот северной части площади по Copernicus DEM (около 30 м/пиксель). По горизонтали - расстояние вдоль профиля, м; по вертикали - абсолютная высота, м.

участке в пределах Алтае-Саянской горной страны с абсолютными высотными отметками 1400–3000 м. Маршруты пересекали водоразделы, долины и склоны разной экспозиции; пешеходный доступ к части профилей был ограничен. В период работ наблюдались порывы ветра до 20 м/с. Эта характеристика погоды не является принятым режимом съёмки с БПЛА: допустимые условия вылета определяются ограничениями носителя и подвесной системы [5].

Условия планирования иллюстрирует профиль северной части площади (рис. 1). На протяжении около 6,3 км отметки меняются приблизительно от 1640 до 2230 м; трасса последовательно пересекает подъёмы и понижения. Профиль построен по цифровой модели рельефа (ЦМР) Copernicus DEM с размером пикселя около 30 м [6]. Он показывает характер изменения высоты вдоль маршрута, не охватывая наиболее высокие и расчленённые части участка.

Геологическая задача заключалась в выявлении разломных зон и оценке признаков опасных склоновых процессов. Магнитные материалы рассматриваются на уровне площадных аномалий и их границ, тепловизионные - на уровне отдельных склонов и поверхностных нарушений.

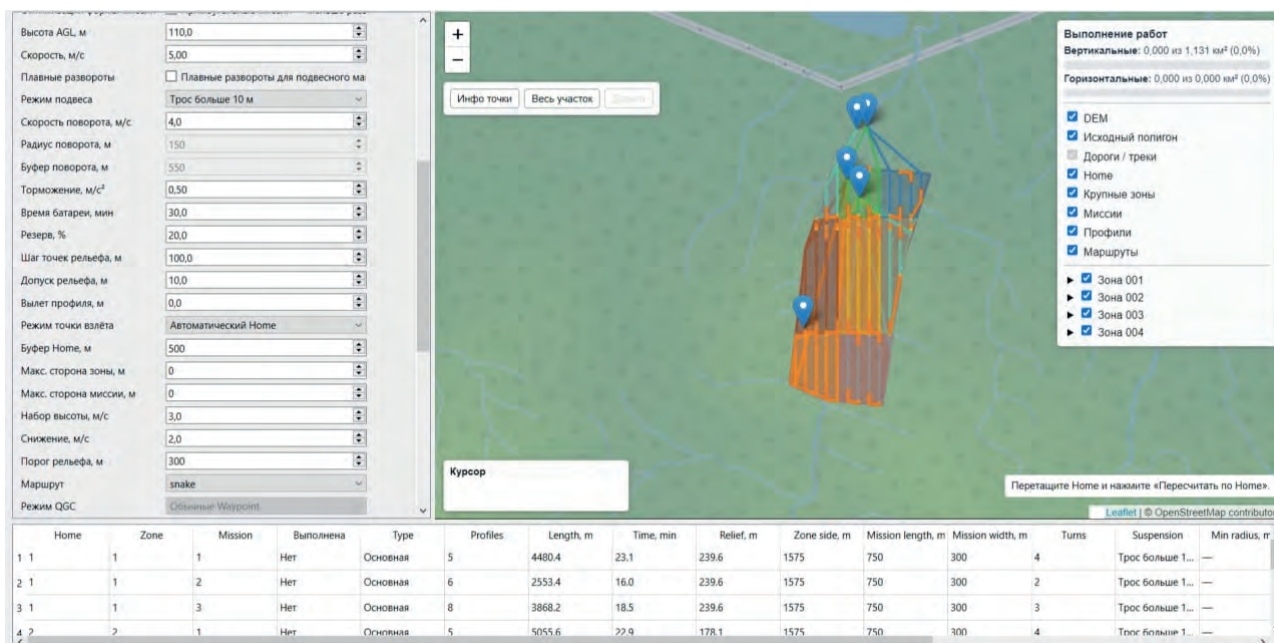
Их интерпретацию необходимо сопоставлять с рельефом и наземными наблюдениями: аномалия сама по себе не определяет активность разлома или механизм смещения [1–3].

Магнитную съёмку выполняли с БПЛА DJI Matrice 400 с магнитометром MaxiMag на тросовом подвесе длиной 10 м. Шаг рабочих линий составлял 75 м, секущих – 375 м. Носитель следовал в 110 м над рельефом, что давало номинальную высоту датчика около 100 м. Вариационная станция работала не далее 10 км от площади. Разнесение датчика и силовой установки снижало помеху, но повышало требования к разгону, торможению и радиусам разворота [7–11].

Тепловизионную съёмку выполняли с БПЛА DJI Mavic 3 Thermal с матрицей 640 × 512 пикселей и объективом 9,1 мм. Контур 24,2 км² разделили примерно на 61 блок по 0,4 км². На блок планировали четыре вылета около 30 мин каждый, скорость на рабочих галсах 7 м/с и перекрытия 80 × 80 %. При высоте 110 м и скорректированном в опытно-методических работах (ОМР) фокусном расстоянии 757,72 пикселя расчётный след кадра равен 92,9 × 74,3 м. Шаг маршрутов составляет 18,6 м, продвижение между кадрами – 14,9 м. Исходный размер проекции пикселя – около 14,5 см. Размер пикселя итоговой ортомозаики составлял 9 см. Объём с учётом перекрытий составил 25,1 км².

Разработка специализированного программного обеспечения

Для геофизических работ потребовалось дополнить штатное планирование DJI расчётом траектории с учётом подвеса и геометрии измерений. В разработанное ПО загружают полигон, ЦМР и точки Home. Расчёт объединяет геометрию сети, высоту над поверхностью, скорость и условия поворотов. Программа определяет продольный уклон и положение



▲ Рис. 2. Интерфейс специализированного ПО планирования полётов: параметры маршрута и ограничения движения (слева), схема миссий и точки Home (справа), таблица рассчитанных заданий (внизу). Показан пример проекта, численные настройки не являются универсальными режимами съёмки.

маршрутных точек; на подъёмах и спусках их шаг уменьшается с учётом допуска по высоте. Для тепловизионной съёмки по той же ЦМР задаются перекрытия и шаг кадров.

Параметры маршрута согласуют последовательно. Сначала выбирают высоту измерений и сеть, затем проверяют возможность набора и снижения высоты вдоль профиля. Для подвешенного магнитометра отдельно настраивают разгон, торможение и повороты, чтобы переход к рабочему режиму завершался до начала измерительной линии. Эти переходы были доработаны в ПО и испытаны в ОМР перед выходом на производственную площадь. Тепловизионная миссия использует общую основу планирования с настройками для кадровой съёмки.

В интерфейсе отдельно задаются параметры геометрии маршрута и ограничения движения (рис. 2). В показанном примере шаг точек рельефа равен 100 м, допуск – 10 м, скорости набора и снижения – 3 и 2 м/с, торможение – 0,5 м/с², резерв – 20 %. Показана конфигурация отдельного проекта. Допуск относится к

расчёту маршрута по ЦМР и не характеризует фактическую ошибку выдерживания высоты. Карту и таблицу миссий используют для проверки длины, времени и разбиения задания на блоки.

Рекомендуемая продолжительность вылета рассчитывается с учётом температуры, абсолютной высоты, ветра и полезной нагрузки. При переносе методики параметры расчёта проверяют в местных ОМР, сопоставляя план с фактической продолжительностью и остатком заряда. Задание экспортируется в ПО DJI Pilot 2. Решение о вылете принимает пилот БПЛА по фактической погоде и состоянию комплекса.

Опытно-методические работы и контроль

В ходе ОМР проверялось поведение подвешенного датчика при разгоне, торможении и поворотах; по результатам испытаний вносились корректировки и улучшения в ПО. Настройку движения выполняют с учётом длины подвеса и рельефа, добиваясь установившегося режима на входе в рабочую линию.



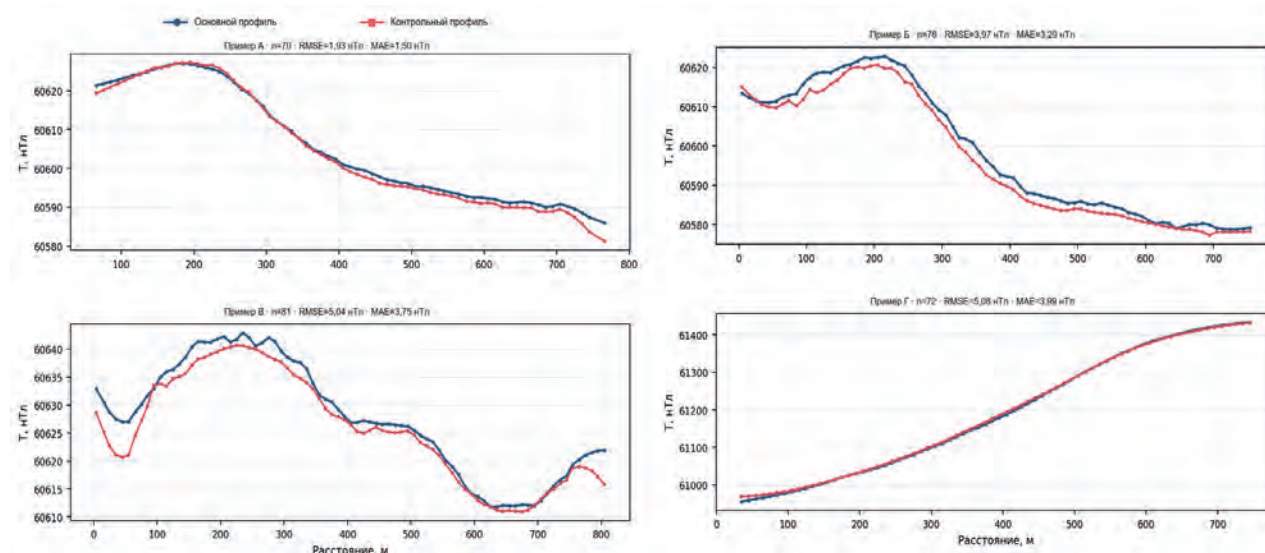
▲ Рис. 3. Принятая геометрия обтекания рельефа: высота носителя 110 м, длина подвеса 10 м, номинальная высота магнитометра около 100 м.

Номинальная геометрия измерений показана на рис. 3. Для нового участка параметры переходов и резерв возврата уточняют при выполнении локальных ОМР.

По результатам тепловизионных ОМР оптимальным временем съемки было выбрано раннее утро (03:00-06:00), скорость рабочих галсов 7 м/с. Скорость была выбрана с учётом рельефа, устойчивости БПЛА на разворотах и качества кадров. Съёмка выполнена с 10 июля по 3 августа 2026 г. При контроле проверялось покрытие и пригодность кадров для построения мозаики.

Повторяемость магнитных измерений оценивали повторным прохождением продольных профилей. Из 1357 полных продольных проходов 68 были контроль-

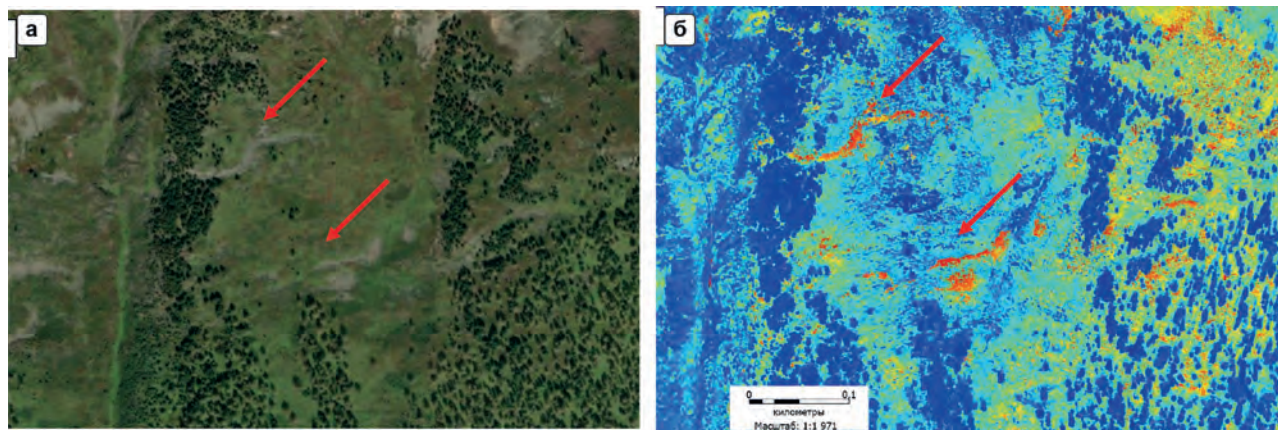
▼ Рис. 5. Четыре примера сопоставления основных и повторных магнитных профилей из контрольной выборки.



ными. Для выборки из десяти контрольных профилей сопоставлены 742 интервала общей длиной 7,33 км. Средняя абсолютная ошибка (MAE) составила 3,07 нТл, среднеквадратическая ошибка (RMSE) – 4,08 нТл; четыре пары профилей показаны на рис. 4. Показатели относятся к этой выборке и оценивают повторяемость измерений, а не эффект отдельных изменений ПО.

Сопоставление методов на разных пространственных масштабах

Общая ЦМР использовалась при планировании обеих съёмок, но их результаты имеют разную детальность. Сеть 75 × 375 м при высоте магнитометра около 100 м предназначена для анализа площадных аномалий и протяжённых границ. Тепловизионная съёмка раскрывает поверхностные особенности отдельных склонов. Для комплексирования предлагается сначала выделять структурные границы по магнитным материалам, затем сопоставлять их положение с признаками склоновых деформаций по тепловизионным и геоморфологическим данным. Наличие самостоятельной магнитной аномалии у каждой трещинной зоны не является условием такого анализа. На рис. 5 показан детальный теплови-



▲ Рис. 5. Признаки склоновых деформаций: а - космоснимок; б - термомозаика. Стрелками отмечены морфологические элементы, интерпретируемые как трещины отрыва и растяжения. Температурная шкала не приведена; показан качественный тепловой контраст.

зионный пример.

На космоснимке и термомозаике прослеживаются соответствующие друг другу линейные и дугообразные элементы (рис. 5). По результатам дешифрирования и маршрутных наблюдений эти элементы интерпретируются как трещины отрыва и растяжения, характерные для склоновых деформаций, в том числе сейсмогравитационных. Повышенный тепловой отклик объясняется открытым грубообломочным материалом и отличиями его нагрева и охлаждения от участков с растительностью. Тепловой контраст помогает проследить морфологические границы; сейсмическое происхождение и современная активность требуют самостоятельного обоснования.

Обсуждение результатов

Сильная сторона рассмотренного подхода – единая модель рельефа и повторяемый порядок контроля. При этом точность ЦМР в горах не равна точности истинной поверхности: в тенях рельефа, на скальных уступах и под древостоем ошибка может превысить заданный допуск.

Для критических участков нужны более детальная модель или бортовое измерение дальности до поверхности. Координата магнитометра на подвесе также не тождественна координате но-

сителя. Следующий шаг – снабдить датчик независимой GNSS/IMU-привязкой и включить оценку раскачки в отбраковку прохода.

Тепловой контраст зависит от излучательной способности поверхности, увлажнения, растительности и предшествующего нагрева. Для количественной температурной интерпретации нужны калибровка, повторные съёмки и наземная термометрия [13, 14]. Совместный анализ методов следует развивать на сопоставимых масштабах: оценивать положение склоновых деформаций относительно протяжённых магнитных границ и учитывать неоднозначность обеих интерпретаций. В представленном примере такая пространственная связь количественно не оценивалась.

Разработанная методика может быть масштабирована для выполнения работ в горных районах Арктики, включая Полярный Урал, где сочетаются трудная доступность, расчленённый рельеф и задачи дистанционного картирования [1, 2, 12-15]. Высокую важность имеет использование алгоритма обтекания, деление площади на миссии, учёт резерва и порядок контроля данных. При отрицательной температуре для таких БПЛА, как DJI Matrice 400 отдельно учитываются энергозатраты на поддержание температурного режима и работу подо-

грева аккумуляторов ТВ100 [5]. Подогрев расширяет рабочий диапазон, но не отменяет проверки фактической ёмкости, ветровой нагрузки и резерва возврата. Числовые параметры миссий для холода, обледенения и низкого солнца получают в местных ОМР.

Предложенный в статье подход применим к исследованиям температурных аномалий в Байкальской рифтовой зоне. Магнитные материалы могут дополнять структурную основу при выборе участков аэротепловизионной съёмки и наземной термометрии. Для активных разломов, геотермальных систем, криогенных и карстовых процессов диагностические признаки следует обосновывать отдельно; совпадение структурной границы и теплового контраста служит основанием для проверки, а не готовым заключением об их происхождении [3].

Выводы

В результате выполненных исследований разработанное программное обеспечение было апробировано для планирования магнитной и тепловизионной съёмок по единой цифровой модели рельефа в условиях высокогорной местности, при этом для каждого метода задавались собственные параметры и ограничения измерений.

Для выполнения БПЛА-магниторазведки с подвесным магнитометром в программном обеспечении были дополнительно реализованы плавные переходы между элементами траектории, а соответствующие параметры предварительно проверены в ходе опытно-методических работ перед производственной съёмкой.

С целью комплексной интерпретации полученных материалов целесообразно сопоставлять тепловые аномалии с площадными магнитными структурами с учётом различий в пространственной детальности применяемых методов.

Полученные результаты показывают возможность масштабирования разработанных алгоритмов планирования и контроля съёмки на горные районы Арктики, однако параметры вылетов должны уточняться по результатам местных опытно-методических работ с учётом низких температур, ветровой нагрузки, возможного обледенения и необходимого энергетического резерва БПЛА.

Литература

1. Базилевич С. О., Казанина М. А., Жилин Ф. Е., Кочетов М. В., Шепелев А. А. Комплексные инженерные изыскания при изучении потенциально опасных геологических процессов арктического шельфа // Приборы и системы разведочной геофизики. 2024. № 1 (80). С. 122-133.
2. Кауркин М. Д., Андреев Д. О., Романов В. В., Кауркин В. Д. Результаты комплексных инженерно-геофизических исследований на территории поста наблюдения за мерзлотными условиями автодороги Р-297 «Амур» // Приборы и системы разведочной геофизики. 2026. № 1 (88). С. 86-92.
3. Семинский К. Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 1. Теоретические основы и принципы // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, № 2. С. 445-467. DOI: 10.5800/GT-2014-5-2-0136.
4. Accomando F., Bonfante A., Buonanno M., Natale J., Vitale S., Florio G. The drone-borne magnetic survey as the optimal strategy for high-resolution investigations in presence of extremely rough terrains: The case study of the Taverna San Felice quarry dike // Journal of Applied Geophysics. 2023. Vol. 217. Art. 105186. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2023.105186.
5. DJI. DJI Matrice 400 User Manual. Version 2.0 [Электронный ресурс]. 2026. URL: https://terra-1-g.djicdn.com/6189933d30024fc1b331bffe4fe41837/matrice-400/UM/Matrice_400_User_Manual_v2_

en.pdf (дата обращения: 12.09.2026).

6. Copernicus Data Space Ecosystem. Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model [Электронный ресурс]. URL: <https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/copernicus-contributing-missions/collections-description/COP-DEM> (дата обращения: 14.09.2026).

7. Døssing A., Lima Simões da Silva E., Martelet G., Rasmussen T. M., Gloaguen E., Petersen J. T., Linde J. A high-speed, lightweight scalar magnetometer bird for km scale UAV magnetic surveying: On sensor choice, bird design, and quality of output data // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, no. 4. Art. 649. DOI: 10.3390/rs13040649.

8. Kaub L., Keller G., Bouligand C., Glen J. M. G. Magnetic surveys with unmanned aerial systems: Software for assessing and comparing the accuracy of different sensor systems, suspension designs and compensation methods // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2021. Vol. 22, no. 7. Art. e2021GC009745. DOI: 10.1029/2021GC009745.

9. Phelps G., Bracken R., Spritzer J., White D. Achieving sub-nanoTesla precision in multirotor UAV aeromagnetic surveys // *Journal of Applied Geophysics*. 2022. Vol. 206. Art. 104779. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2022.104779.

10. Walter C. A., Braun A., Fotopoulos G. Impact of three-dimensional attitude variations of an unmanned aerial vehicle magnetometry system on magnetic data quality // *Geophysical Prospecting*. 2019. Vol. 67. P. 465-479. DOI: 10.1111/1365-2478.12727.

11. Zheng Y., Li S., Xing K., Zhang X. Unmanned aerial vehicles for magnetic surveys: A review on platform selection and interference suppression // *Drones*. 2021. Vol. 5, no. 3. Art. 93. DOI: 10.3390/drones5030093.

12. Иванова Ю. Н., Иванов К. С., Бондарева М. К., Ермолаев В. А., Жуков

А. О. Опыт и возможности применения космических систем дистанционного зондирования Земли для прогнозирования золоторудного оруденения на труднодоступных территориях на примере Полярного Урала // *Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования*. 2019. Т. 20, № 2. С. 123-133. DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-2-123-133.

13. Van der Sluijs J., Kokelj S. V., Fraser R. H., Tunnicliffe J., Lacelle D. Permafrost terrain dynamics and infrastructure impacts revealed by UAV photogrammetry and thermal imaging // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, no. 11. Art. 1734. DOI: 10.3390/rs10111734.

14. Ponti S., Girola I., Guglielmin M. Thermal photogrammetry on a permafrost rock wall for the active layer monitoring // *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 917. Art. 170391. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170391.

15. Буддо И. В., Турутанов Е. Х., Мельникова В. И. [и др.]. Комплексные геофизические исследования в регионе Восточной Сибири и Арктики: история и современное состояние // *Актуальные направления и перспективные тенденции в науках о Земле (первая четверть XXI века): материалы Всерос. науч. конф.* Иркутск: ИЗК СО РАН, 2024. С. 31-32.

УДК 550.834.08

Пирамида потребностей «Геотом»

Как рождаются технологии, меняющие отрасль



Анкушев
Вадим Викторович



«Когда оборудование становится технологией»

В сентябре 2021 года на конференции «Геофест-ЭКСПО» произошло событие, которое тогда заметили далеко не все. На демонстрационной площадке впервые была представлена новая отечественная бескабельная телеметрическая система регистрации сейсмических данных — ПАК «Геотом». На тот момент было произведено всего 300 каналов промышленного прототипа.

На первый взгляд это была одна из очережных инженерных новинок. Российская отрасль уже имела опыт создания собственных регистраторов, систем телеметрии, программного обеспечения, отдельных элементов аппаратуры. После ухода с российского рынка ведущих мировых

производителей разговоры об импортозамещении звучали практически на каждой отраслевой конференции. Поэтому появление еще одной отечественной разработки воспринималось скорее, как закономерный ответ на вызовы времени, чем как начало новой технологической истории.

Никто тогда не мог предположить, насколько быстро эта история будет развиваться.

Всего через несколько лет ПАК «Геотом» из экспериментальной разработки превратился в полноценную промышленную систему, принятую и заказчиками, и сервисом. А весной 2026 года произошло событие, которое можно считать переломным не только для самого проекта, но и для всей российской сейсморазведки.

Компания «Газпром нефть» сообщила

▼ Рис.1. История развития системы ПАК «Геотом».



► *Рис.2. ПАК «Геотом» во время отраслевой демонстрации технологии в компании ТСКГ. Март 2026 г.*

**Фото предоставлено пресс-службой компании «Газпром нефть».*



о завершении масштабного трехмерного проекта, выполненного с использованием полностью отечественной бескабельной системы регистрации. В работе одновременно находились пятнадцать тысяч регистрирующих модулей. Российская технология впервые доказала способность самостоятельно решать задачи такого масштаба без опоры на зарубежные решения.

Однако опыт проекта показал и другое. Успех «Геотома» определялся не только количеством каналов, автономностью, точностью синхронизации или возможностями программного обеспечения. Систему одновременно оценивали люди, решавшие совершенно разные задачи. Рабочим были важны масса и удобство установки оборудования, геофизикам — качество данных и средства контроля, начальнику партии — мобильность и управляемость производства, руководству предприятия — экономика проекта, а заказчику — надежный геологический результат.

Именно после перехода к промышленным масштабам стало особенно ясно: зрелая технология должна быть востребована не одним пользователем, а всеми участниками производственного процесса. Из этого наблюдения и возникла

идея пирамиды потребностей «Геотом» — модели, позволяющей понять, почему одни инженерные разработки становятся частью отрасли, а другие, несмотря на достойные технические характеристики, так и остаются опытными образцами.

Почему одни технологии становятся отраслевыми, а другие исчезают

История техники знает немало блестящих инженерных решений, которые так и не получили широкого распространения. Одни превосходили конкурентов по точности измерений, другие предлагали уникальные функциональные возможности, третьи были заметно дешевле существующих аналогов. Однако рынок нередко делал выбор в пользу совсем других систем.

Этот парадокс хорошо знаком разработчикам приборов. Судьба технологии определяется не только уровнем ее технического совершенства.

Геофизики привыкли сравнивать принципы управления, наличие передаточных кабелей или бескабельность архитектуры систем, динамический диапазон, энергопотребление, автономность, точность синхронизации и другие параметры. Все они, безусловно, имеют принципиальное значение, но сами по

себе еще не гарантируют успеха. Даже выдающаяся по характеристикам система может остаться невостребованной, если она неудобна в эксплуатации, плохо вписывается в существующие производственные процессы, не сочетается с уже имеющимся оборудованием.

И наоборот, распространение получают решения, которые уступают конкурентам по отдельным показателям, но лучше приспособлены к реальной работе.

В конечном счете рынок оценивает не прибор как таковой, а его способность решать конкретные задачи людей — тех, кто переносит оборудование, организует полевые работы, отвечает за качество данных, принимает экономические решения и заказывает конечный результат.

Пожалуй, именно это стало одним из главных выводов, сделанных за несколько лет промышленной эксплуатации ПАК «Геотом»: зрелость технологии определяется не только ее характеристиками, но и тем, насколько органично она отве-

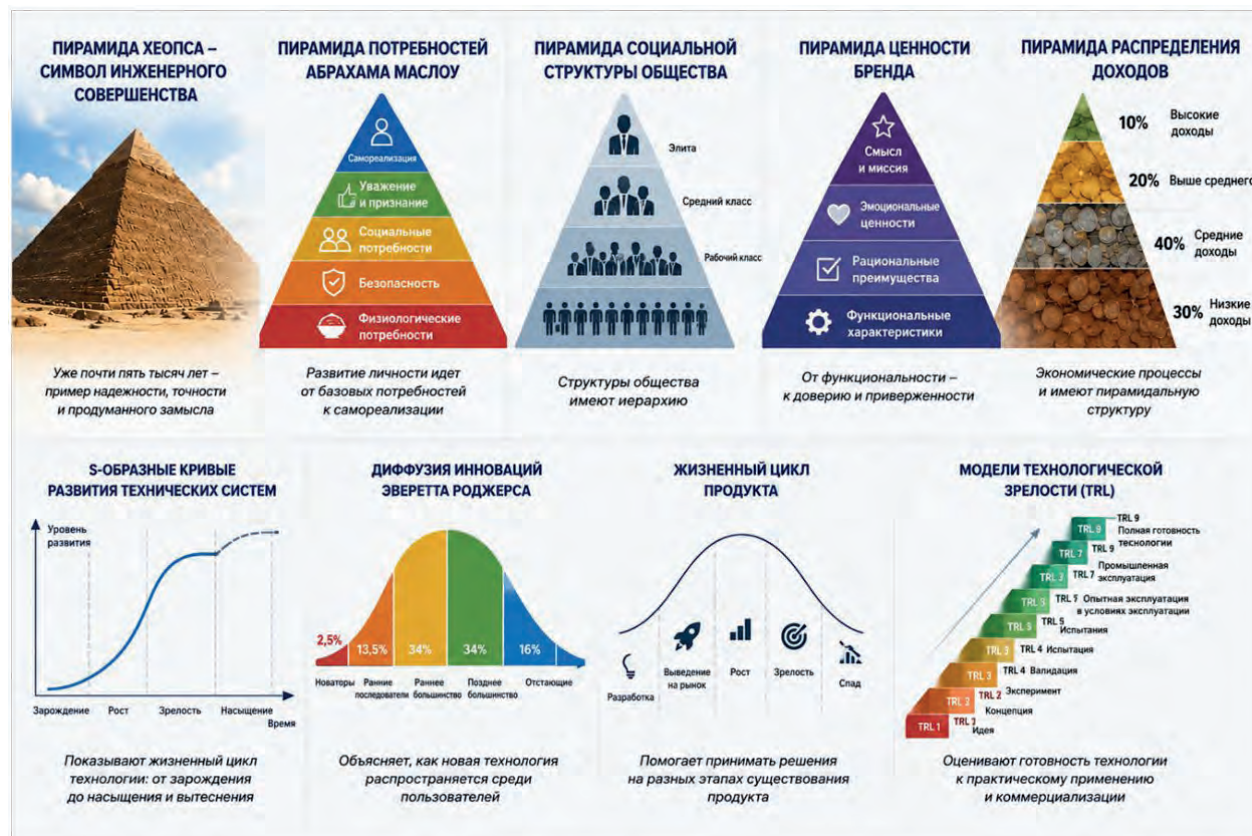
чает потребностям всех участников производственного процесса.

От Хеопса до современных технологий

Человечество вообще очень любит описывать сложные явления в виде пирамид. Эта геометрическая форма удивительным образом позволяет показать главное — иерархию, последовательность и взаимосвязь элементов. Возможно, именно поэтому пирамиды сопровождают развитие человеческой цивилизации уже несколько тысячелетий.

Самая древняя и, пожалуй, самая известная из них — пирамида Хеопса. Почти пять тысяч лет она остается символом инженерного совершенства своей эпохи. Построенная без современной техники и вычислительных средств, она до сих пор поражает точностью геометрии, масштабом замысла и совершенством организации строительства. Не случайно именно пирамиду многие счи-

▼ Рис. 3. Разные пирамиды — общая закономерность развития сложных систем.



тают первым великим инженерным проектом человечества.

В XX веке пирамида получила совершенно новое содержание. Американский психолог Абрахам Маслоу предложил знаменитую иерархию человеческих потребностей, показав, что развитие личности происходит последовательно — от удовлетворения базовых физиологических потребностей к самореализации. Его модель давно вышла за рамки психологии и стала одним из самых узнаваемых способов объяснения сложных процессов развития.

Сегодня пирамиды используются во многих областях знаний. Социологи с их помощью описывают структуру общества, маркетологи строят пирамиды ценности бренда, экономисты анализируют распределение доходов, специалисты по менеджменту — организационные структуры и уровни управления. В каждом случае речь идет об одном и том же принципе: сложная система становится понятнее, если показать взаимосвязь ее уровней.

Даже развитие технологий давно пытаются объяснить с помощью подобных моделей. Инженерам хорошо известны S-образные кривые развития технических систем, теория диффузии инноваций Эверетта Роджерса, концепции жизненного цикла продукта, модели технологической зрелости и многие другие подходы. Каждая из них позволяет понять отдельную сторону развития новой техники: как появляются инновации, каким образом они распространяются, достигают зрелости и постепенно уступают место следующим поколениям технологий.

Однако почти все существующие модели рассматривают технологию как самостоятельный объект исследования. При этом значительно реже задается другой вопрос: почему одна и та же технология оказывается по-разному важна

для совершенно разных участников производственного процесса? Возможно, ответ на этот вопрос также можно представить в виде пирамиды.

Есть устоявшееся мнение, что главным пользователем любого геофизического оборудования является инженер-геофизик. Именно его требования определяли технический облик новой системы, а основными критериями выбора были точность, надежность и функциональные возможности.

Семь уровней пирамиды потребностей «Геотом»

Любая новая технология начинает свою жизнь с инженерной идеи. Затем появляются опытные образцы, первые испытания, первые заказчики. Но по мере развития происходит любопытное изменение. Постепенно меняется не только сама технология — меняются люди, для которых она становится важной. Вместе с этим меняются и критерии ее оценки.

На первых этапах систему рассматривают исключительно как техническое устройство. Позже она становится элементом производственного процесса. А затем — частью экономики предприятия, стратегии недропользователя и, наконец, государственной технологической политики. Именно это наблюдение и легло в основу пирамиды потребностей «Геотом».

В основании пирамиды находятся студенты. На первый взгляд может показаться странным начинать разговор о современной сейсморегистрирующей системе именно с университетской аудитории. Однако любая технология появляется значительно раньше первого промышленного проекта — она рождается в образовании. Именно здесь формируется отношение будущего специалиста к профессии. Если после первой полевой практики студент хочет вновь выйти в



▲ Рис. 4. ПАК «Геотом» используется в студенческих геофизических практиках РГУ им. Губкина и МГУ им. Ломоносова.

экспедицию, если современная техника вызывает не страх, а интерес и желание экспериментировать, значит первый уровень пирамиды уже достигнут. Геотом становится не просто прибором, а частью профессиональной мечты.

Следующая ступень принадлежит **рабочим сейсмопартии**. Для них ценность технологии измеряется совсем другими критериями. Здесь не обсуждают динамический диапазон или архитектуру программного обеспечения. Гораздо важнее масса оборудования, скорость установки, простота подключения, надежность и отсутствие лишнего обслуживания. Хорошая технология должна прежде всего облегчать ежедневную работу человека. Именно поэтому второй уровень пирамиды можно назвать уровнем производственного комфорта.

Еще выше находится **инженер-геофизик**. Для него Геотом перестает быть просто удобным оборудованием и превращается в инструмент управления качеством. Контроль полевой расстановки, оперативная диагностика, анализ состояния каналов, возможность быстро принимать решения непосредственно во время производства работ — все это становится частью самой технологии наблюдений. Если для рабочего важен комфорт выполнения операций, то для инженера главным становится достоверный геологический результат.

На следующем уровне появляется

начальник партии. Его задача значительно шире, чем организация регистрации данных. Он управляет людьми, техникой, логистикой и сроками выполнения проекта. Поэтому здесь ценность системы определяется уже не отдельными приборами, а эффективностью всей производственной схемы. Простая мобилизация, унификация оборудования, взаимозаменяемость модулей, снижение потребности во вспомогательной технике постепенно меняют сам подход к организации современной сейсморазведочной партии.

Для **руководителя геофизической компании** технология становится уже элементом бизнеса. Важны совместимость с существующей инфраструктурой предприятия, универсальность применения, экономическая эффективность, сервисная поддержка и репутация самой системы на рынке. Руководитель приобретает не просто оборудование — он инвестирует в производственную платформу, которая должна приносить компании новые проекты и обеспечивать конкурентные преимущества на многие годы вперед.

Еще выше располагается уровень **недропользователя**. Здесь разговор уже идет не о приборах и даже не о производственном процессе. Заказчика интересует конечный результат — возможность получить качественную геологическую информацию быстрее, безопаснее и экономически эффективнее. Если технология позволяет выполнять исследования в техногенных условиях, болотах, лесах, горах или на удаленных территориях, сокращает сроки полевых работ и повышает достоверность геологических моделей, значит она начинает создавать дополнительную ценность уже для самого проекта освоения недр.

Вершину пирамиды занимают **государственные интересы**. Здесь технология становится частью промышленной

политики страны. Развитие собственного приборостроения, подготовка инженерных кадров, повышение эффективности геологоразведки, снижение зависимости от зарубежных поставщиков и укрепление технологического суверенитета — все это выходит далеко за рамки отдельного проекта или отдельной компании. Именно на этом уровне становится очевидно, что современная инженерная система способна влиять не только на эффективность полевых работ, но и на развитие целой отрасли.

Любопытно, что эти семь уровней не существуют независимо друг от друга. Они образуют единую систему, в которой каждый следующий уровень опирается на предыдущий. Невозможно создать технологию, одинаково ценную для государства, если она неудобна рабочему. Так же невозможно заинтересовать студента профессией, если сама технология не имеет перспектив промышленного развития. Именно поэтому пирамида потребностей «Геотом» — это не просто

описание одной российской системы регистрации. Скорее, это попытка показать универсальную закономерность развития любой зрелой инженерной технологии: чем шире круг людей, для которых она становится по-настоящему полезной, тем больше шансов у нее изменить не отдельный проект, а всю отрасль.

Заключение

История ПАК «Геотом» показывает, что зрелость современной технологии определяется не только ее техническими характеристиками. Настоящий успех приходит тогда, когда инженерное решение становится одинаково востребованным всеми участниками производственного процесса — от студента, впервые приехавшего на практику, до государства, решающего задачи технологического развития страны.

Именно такой взгляд и лег в основу предложенной модели — пирамиды потребностей «Геотом». Разумеется, она не претендует на универсальную научную



теорию. Скорее, это попытка показать, что эволюция технологии происходит одновременно на нескольких уровнях: инженерном, производственном, экономическом, образовательном и государственном. Чем гармоничнее развивается система на каждом из них, тем выше ее шансы стать частью отрасли.

Сегодня российское приборостроение постепенно переходит от этапа импортозамещения к этапу импортоопережения. Речь уже идет не только о создании отечественных аналогов, но и о разработке собственных технологических решений, способных определять дальнейшее развитие отрасли. История ПАК «Геотом» показывает, что такой путь возможен.

Возможно, именно поэтому главным результатом развития системы следует считать не количество каналов и не масштабы выполненных проектов. Значительно важнее то, что в российской

геофизике появилась собственная технологическая платформа, способная объединить интересы науки, образования, производства, бизнеса и государства. А значит, у нее есть все основания стать не только успешной инженерной разработкой сегодняшнего дня, но и одним из ориентиров развития отечественной геологоразведки на годы вперед.

Импортозамещение позволяет сохранить отрасль. Импортоопережение — формирует ее будущее. И именно в этом, вероятно, заключается главный итог эволюции ПАК «Геотом».



УДК 550.834:004.9

От экспертного опыта к математическому проектированию: новая парадигма подготовки проектов 3D-сейсморазведки

■ Федоров А.Б., г. Москва.

Аннотация. Современные проекты 3D-сейсморазведки характеризуются высокой стоимостью, большим числом взаимосвязанных технологических параметров и возрастающими требованиями к эффективности использования оборудования. Несмотря на цифровизацию большинства производственных процессов, проектирование полевых работ во многих случаях по-прежнему остается экспертной задачей, основанной на ручных расчетах, электронных таблицах и практическом опыте специалистов.

В статье рассматривается переход к новой концепции математического проектирования, в которой выбор параметров работ осуществляется на основе автоматизированного анализа множества возможных сценариев. На примере программной экосистемы *Seismic Pro Dashboard* показано, каким образом современные вычислительные технологии позволяют объединить проектирование, оценку производительности, анализ качества и подготовку технического обоснования в единую цифровую среду.

Конец эпохи ручного проектирования

Любая технология проходит несколько этапов развития. Сначала решения определяются преимущественно опытом специалистов. Затем появляются методические рекомендации и нормативы, формируются расчетные подходы, а вслед за ними — программные средства, автоматизирующие отдельные операции. Сегодня сейсморазведка подошла к следующему этапу, когда автоматизации отдельных расчетов уже недостаточно и требуется переход к комплексному математическому проектированию.

Еще двадцать лет назад проект сейсморазведочных работ представлял собой сравнительно ограниченный набор параметров, которые опытный геофизик мог оценить вручную, порой интуитивно, на основании собственных представлений о рациональности. Современные проекты значительно сложнее. При их подготовке необходимо одновременно учитывать размеры площади, плотность системы наблюдений, производительность источников, количество доступного оборудования, характеристики реги-

стрирующего комплекса, логистические ограничения, календарные сроки, требования к качеству данных и экономические условия.

Все эти параметры тесно взаимосвязаны. Изменение шага наблюдений может повлиять на необходимое количество оборудования, длительность регистрации, схему перемещения полевых подразделений, стоимость проекта и качество получаемых данных. Поэтому проектирование уже нельзя рассматривать как последовательность отдельных инженерных расчетов. Оно становится задачей поиска оптимального решения в многомерном пространстве взаимозависимых вариантов.

Именно на этом уровне возможности традиционного экспертного подхода начинают сталкиваться с объективными ограничениями. Опыт геофизика не теряет своего значения, но уже не может оставаться единственным инструментом проектирования. Даже высококвалифицированный специалист способен подробно сравнить лишь ограниченное число сценариев, тогда как вычислительная система может за короткое время проа-



▲ Рис. 1. Переход в проектировании от опыта и интуиции к математической обоснованности решений.

нализировать сотни и тысячи комбинаций параметров.

При этом преимущество современных программных средств заключается не только в скорости расчетов. Главное — в возможности исследовать значительно более широкое пространство допустимых решений, выявлять скрытые взаимосвязи и находить варианты, которые сложно получить путем последовательного ручного подбора.

В этих условиях меняется и роль инженера. Раньше специалист самостоятельно выполнял основную часть расчетов и на их основе формировал проектное решение. Теперь он задает исходные ограничения и критерии оптимизации, анализирует предложенные системой сценарии, оценивает их технологическую реализуемость и принимает окончательное решение.

Таким образом, программный комплекс становится не заменой специалиста, а его интеллектуальным помощ-

ником. Он берет на себя трудоемкий перебор вариантов и математическую оценку решений, оставляя за инженером постановку задачи, профессиональную интерпретацию результатов и ответственность за выбор итоговой конфигурации проекта.

Именно этот переход — от ручного расчета отдельных параметров к системному математическому поиску оптимального решения — определяет начало новой эпохи проектирования сейсморазведочных работ.

Функциональная архитектура Seismic Pro Dashboard

В основе Seismic Pro Dashboard лежит принцип непрерывного проектирования, при котором весь процесс подготовки сейсморазведочных работ рассматривается как единая цепочка взаимосвязанных инженерных решений. В отличие от традиционного подхода, когда различные расчеты выполняются независимо

друг от друга в отдельных программах или электронных таблицах, система объединяет все этапы подготовки проекта в рамках единой математической модели. Это позволяет не только исключить повторное выполнение расчетов, но и обеспечить автоматическое распространение изменений по всей структуре проекта. Любое изменение исходных параметров немедленно отражается на производительности, потребности в оборудовании, качестве данных и итоговой эффективности проекта.

Функционально система состоит из четырех взаимосвязанных подсистем, каждая из которых отвечает за решение определенного класса инженерных задач.

Проектирование

Первым этапом является математическое проектирование полевых работ. На этой стадии система автоматически формирует и анализирует большое количество возможных вариантов организации съемки. Исходными данными служат геометрия площади, параметры системы наблюдений, ограничения по оборудованию, производительности и срокам выполнения проекта.

В отличие от традиционного последовательного подбора параметров, система одновременно рассматривает все допустимые комбинации и определяет оптимальное соотношение между производительностью работ, необходимым количеством оборудования, продолжительностью регистрации и объемом переключений. Одновременно рассчитывается полный состав оборудования, необходимого для реализации каждого варианта проекта, что позволяет уже на стадии проектирования объективно оценить потребность в материальных ресурсах и выбрать наиболее рациональную конфигурацию полевых работ.

Производительность

После определения возможных вариантов организации работ выполняется моделирование производительности проекта.

Специализированные модули рассчитывают циклограммы регистрации для различных технологий возбуждения, определяют ожидаемую суточную производительность, коэффициенты использования виброисточников и оптимальные параметры высокопроизводительных методов регистрации.

В результате проектировщик получает не экспертную оценку темпов выполнения работ, а количественный прогноз производительности для каждого рассматриваемого варианта. Это позволяет заранее определить наиболее эффективную организацию полевого процесса и оценить возможность выполнения проекта в заданные календарные сроки.

Контроль качества

Высокая производительность не является самоцелью, если достигается за счет ухудшения качества данных. Поэтому следующим этапом проектирования становится математическая оценка качества будущей регистрации.

Средства гармонического анализа позволяют исследовать вероятность возникновения интерференционных помех, определить безопасные режимы работы высокопроизводительных технологий возбуждения и оценить влияние выбранных параметров на отношение сигнал/шум. Фактически система переносит значительную часть контроля качества из полевых условий на этап проектирования, позволяя заранее выявить потенциально опасные режимы работы и исключить их еще до начала регистрации.

Такой подход существенно снижает вероятность возникновения полевого брака и уменьшает риск дорогостоящих повторных работ.

Аналитическое сопровождение проектных решений

Заключительным этапом становится комплексная оценка всех рассчитанных вариантов.

Каждый сценарий автоматически анализируется по совокупности геофизических, производственных, технологических и экономических показателей. Система выполняет сравнительный анализ альтернативных методик, формирует количественные критерии эффективности и автоматически подготавливает материалы технического обоснования проекта.

В результате инженер получает не отдельные результаты расчетов, а объективную картину преимуществ и ограниче-

ний каждого варианта, что существенно повышает обоснованность принимаемых решений и упрощает защиту выбранной технологии перед заказчиком.

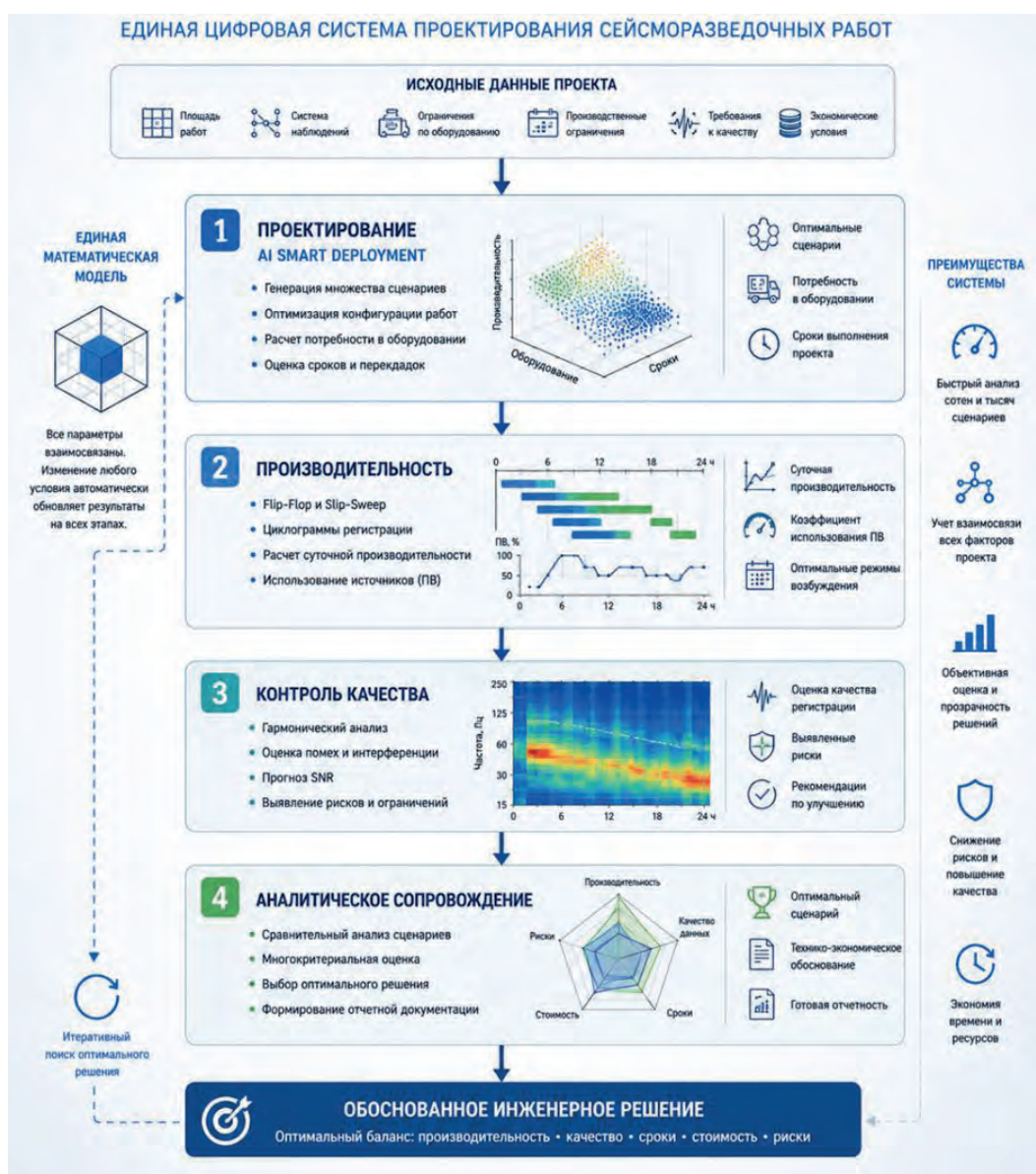
Единая цифровая модель проекта

Принципиальным отличием Seismic Pro Dashboard является тесная взаимосвязь всех перечисленных подсистем. Проектирование, моделирование производительности, прогноз качества и аналитическое сопровождение не являются самостоятельными расчетными модулями, а работают с общей цифровой моделью проекта.

Благодаря этому любое изменение исходных параметров автоматически при-

► Рuc. 2.

Блок-схема
SEISMIC PRO
DASHBOARD.



водит к пересчету всех зависимых характеристик. Изменение плотности системы наблюдений влияет не только на потребность в оборудовании, но одновременно изменяет производительность, условия возбуждения, показатели качества регистрации и итоговую эффективность проекта. Проектировщик сразу видит последствия каждого принятого решения для всей технологической схемы, а не только для ее отдельного элемента.

Именно такая организация вычислительного процесса позволяет перейти от автоматизации отдельных инженерных расчетов к интеллектуальной системе поддержки проектирования, в которой все этапы подготовки проекта объединены общей математической моделью и работают как единый механизм поиска оптимального решения.

Интеллектуальное управление проектными рисками

По мере развития цифровых технологий проектирование перестает ограничиваться поиском оптимальных технических параметров. Не менее важной задачей становится объективная оценка рисков, способных повлиять на сроки, стоимость и качество выполнения проекта. Если сегодня анализ рисков в значительной степени основан на экспертных оценках, то в перспективе он станет неотъемлемой частью математической модели проекта.

Практически любое проектное решение связано с определенной степенью неопределенности. Производительность источников может отличаться от расчетной вследствие особенностей рельефа и грунтовых условий, логистика — зависеть от транспортной доступности и погодных факторов, а эффективность работ — определяться надежностью оборудования, квалификацией персонала, сезонными ограничениями и другими пара-

метрами, которые невозможно учесть с абсолютной точностью.

Современные вычислительные технологии позволяют перейти от качественной оценки подобных рисков к их количественному анализу. Для каждого варианта проекта рассчитываются вероятности возникновения неблагоприятных событий, степень их влияния на производительность, стоимость и календарные сроки. В результате проект характеризуется не только ожидаемыми технико-экономическими показателями, но и уровнем устойчивости к возможным отклонениям от расчетных условий.

Следующим этапом становится сценарное моделирование. Вместо единственного проектного решения система автоматически формирует несколько сценариев реализации — оптимистичный, наиболее вероятный и консервативный — оценивая последствия возникновения различных рисков событий. Это позволяет заранее определить наиболее уязвимые элементы проекта и оценить его устойчивость при изменении исходных условий.

Важнейшим элементом такого подхода становится предиктивный аналитический аудит качества данных. Инструменты математического моделирования, реализованные в Seismic Pro Dashboard, позволяют выполнять гармонический анализ еще на этапе офисного проектирования, выявлять потенциальные зоны интерференции гармоник, определять безопасные режимы применения высокопроизводительных технологий возбуждения и объективно сравнивать альтернативные методики по комплексу геофизических показателей, включая энергетический индекс SSE. В результате проектировщик получает не только оптимальный вариант, но и количественное обоснование его выбора, су-

щественно сокращая время подготовки и защиты проектных решений.

Следующим шагом станет автоматизированное формирование мероприятий по снижению выявленных рисков. Если система прогнозирует вероятность нарушения календарного графика, недостаточную производительность оборудования или повышенные технологические риски, она сможет предложить несколько альтернативных вариантов реагирования: изменение схемы выполнения работ, перераспределение оборудования, создание резервов ресурсов или корректировку производственного графика. Аналогичным образом могут анализироваться последствия отказов оборудования, неблагоприятных погодных условий, логистических ограничений и других факторов.

Таким образом, система переходит от простой регистрации рисков к интеллектуальному управлению ими. Проектировщик получает не только информацию о потенциальных угрозах, но и заранее рассчитанные сценарии их минимизации с оценкой влияния на стоимость, сроки и эффективность проекта.

Перспективным направлением является интеграция подобных моделей с экономическими механизмами управления рисками, включая страхование. Количественная оценка вероятности возникновения неблагоприятных событий и размера возможных потерь позволит математически обоснованно выбирать наиболее эффективную стратегию: изменить техническое решение, реализовать дополнительные организационные мероприятия, сформировать необходимые резервы или передать часть риска через страховые инструменты. Это дает возможность оценивать не только техническую, но и экономическую эффективность каждого варианта управления рисками.

Особую роль в дальнейшем развитии подобных систем будет играть искусственный интеллект. Используя статисти-

ку тысяч реализованных проектов, интеллектуальные алгоритмы смогут выявлять закономерности возникновения рисков, прогнозировать вероятность отклонений в конкретных природно-климатических условиях и рекомендовать наиболее эффективные меры их предупреждения.

При этом искусственный интеллект не рассматривается как средство автоматического принятия решений. Его задача заключается в интеллектуальной поддержке инженера: выявлении потенциальных угроз, анализе устойчивости проектных решений, оценке вероятности их успешной реализации и формировании альтернативных сценариев. Окончательный выбор стратегии управления рисками, как и принятие проектного решения в целом, остается за специалистом.

В результате системы нового поколения смогут одновременно оптимизировать конфигурацию проекта, прогнозировать последствия реализации различных рисков, оценивать устойчивость выбранных решений и формировать рекомендации по их минимизации. Такой подход знаменует переход от проектирования **оптимального** проекта к проектированию **надежного и устойчивого проекта**, способного сохранять эффективность в условиях неизбежной производственной неопределенности.

Технологическая платформа Seismic Pro Dashboard

Эффективность интеллектуального математического проектирования определяется не только используемыми алгоритмами, но и технологической платформой, обеспечивающей выполнение ресурсоемких вычислений, многовариантный анализ и интерактивную визуализацию результатов.

Вычислительное ядро **Seismic Pro Dashboard** реализовано на языке **Python**, являющемся одним из мировых стандартов научных и инженерных вычис-



▲ Рис. 3. Новая парадигма управления сейсморазведочными проектами.

лений. Пользовательский интерфейс построен на базе реактивного фреймворка **Streamlit**, а визуализация результатов выполняется с использованием библиотек **Altair** и **Matplotlib**, обеспечивающих наглядное представление результатов моделирования и оптимизации.

Комплекс имеет модульную архитектуру, в которой все расчетные подсистемы используют единую математическую модель проекта. Такой подход обеспечивает расширяемость системы и позволяет интегрировать новые алгоритмы оптимизации, оценки рисков и анализа данных без изменения базовой архитектуры.

Программный комплекс соответствует требованиям информационной безопасности нефтегазовой отрасли, поддерживает защищенное облачное развертывание (**Yandex Cloud**) и полностью автономную эксплуатацию внутри корпоративного контура (**On-Premise**). Наличие статуса отечественного программного обеспечения обеспечивает возможность его применения в проек-

тах, реализуемых в рамках политики технологического суверенитета.

Заключение

История развития сейсморазведки показывает, что ключевые изменения в отрасли происходят не только благодаря совершенствованию аппаратуры, но и вследствие появления новых методов организации и проектирования работ. Сегодня отрасль находится на пороге очередного такого этапа.

Проектирование, десятилетиями основанное на экспертном опыте и последовательном выполнении инженерных расчетов, постепенно превращается в процесс математической оптимизации, позволяющий объективно оценивать тысячи возможных сценариев и выбирать наиболее эффективное решение. При этом цифровые системы не заменяют инженера-геофизика, а становятся интеллектуальным инструментом поддержки принятия решений, существенно расширяя его аналитические возможности.

Появление программных комплексов

нового поколения, объединяющих математическое проектирование, моделирование производительности, прогноз качества и оценку рисков, свидетельствует о формировании новой парадигмы подготовки сейсморазведочных работ. Можно ожидать, что влияние этих технологий на организацию полевых исследований окажется сопоставимым с тем эффектом, который в свое время оказал переход от профильной 2D-сейсморазведки к пространственной 3D-сейсморазведке. Если 3D изменила качество геологической информации, то интеллектуальное математическое проектирование способно столь же радикально изменить качество подготовки самих сейсморазведочных проектов.

P.S. Автор приглашает к профессиональному обсуждению представленной концепции математического проектирования сейсморазведочных работ. Организации, заинтересованные в апробации программного комплекса Seismic Pro Dashboard на реальных производственных проектах, сравнении результатов с существующими подходами и участии в дальнейшем развитии системы, могут обращаться непосредственно к автору публикации.

<https://seismic-pro.ru>

Подробнее об авторе



Федоров
Андрей Борисович

г. Москва

УДК 550.834.05

Повышение эффективности региональных сейсмических исследований в сложнопостроенных средах с использованием технологии продольно-непродольного профилирования (широкого профиля)

■ Шушкевич Н.Ю., Гоц И.А., Каплан С.А., Лебедев Е.Б., ФГБУ «ВНИГНИ», г. Москва.

■ Силаенков О.А., ООО «Сейсмотек», г. Москва.

Аннотация. Рассмотрены преимущества системы наблюдения широкого профиля (ШП) над классическим 2D на примере исследований, выполненных в 2025 году в условиях солянокупольной тектоники Прикаспийской впадины. Показано, что данная система наблюдения за счет возможности применения процедур 3D обработки данных, в частности – глубинной миграции до суммирования (PSDM-3D), позволяет повысить геологическую информативность результатов сейсморазведки на этапе региональных геологоразведочных работ (ГРП) в сложных сейсмогеологических условиях. Предложены возможные направления дальнейшего совершенствования методики – добавление линий воздействия и комбинирование ШП с классическим 2D-профилированием.

Ключевые слова: региональные ГРП, сейсморазведка, широкий профиль, ШП, глубинная миграция до суммирования, PSDM-3D, солянокупольная тектоника, подсолевой комплекс, Прикаспийская впадина, Астраханский свод, Заволжский прогиб.

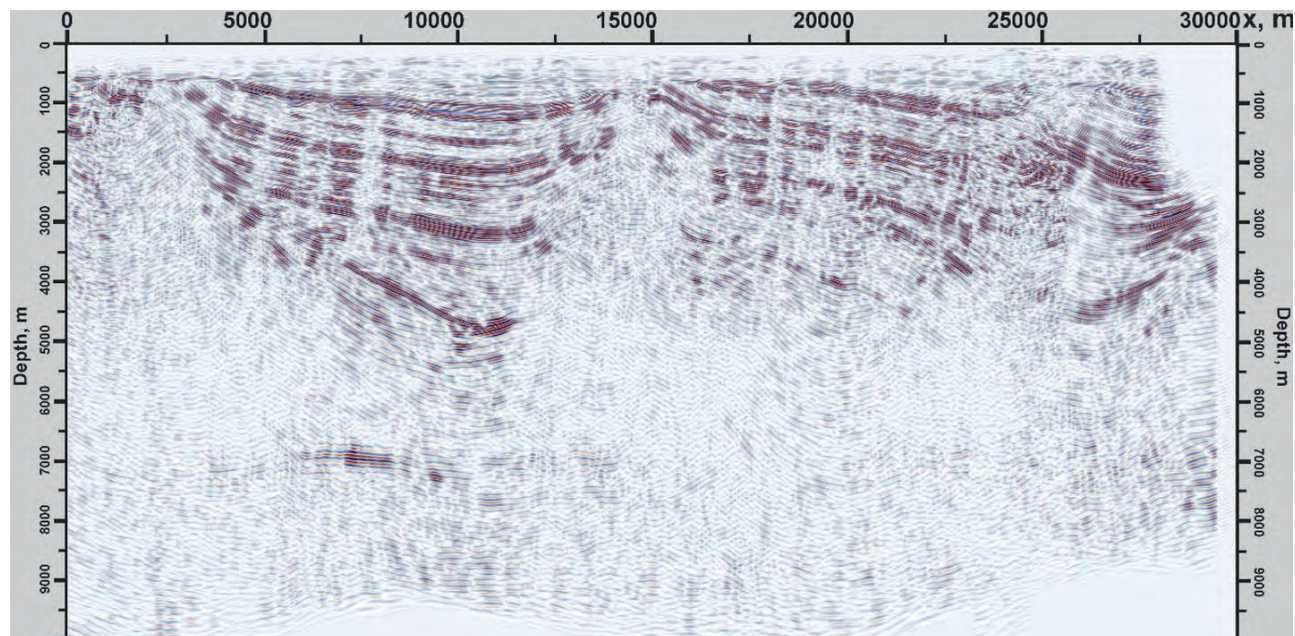
Введение

В условиях существенного сокращения объемов глубокого бурения на региональном этапе геологоразведочных работ (ГРП) возрастают требования к информативности ведущего метода исследований – сейсморазведки МОВ-ОСТ, в его наиболее распространенном профильном (2D) варианте. В последние годы удовлетворение этих требований достигается за счёт увеличения как кратности наблюдений, так и удалений источник - приёмник, обеспечивающих, наряду с высоким качеством получаемых результатов, повышение глубинности исследований. Подобное решение эффективно при изучении сред с относительно простым геологическим строением и пологим залеганием границ, в которых влияние пространственных локальных неоднородностей незначительно. В средах более сложного строения оно недостаточно. Оптимальным в этих условиях было бы использование наблюдений 3D, однако с учётом экономических и экологических факторов целесообразен компромиссный

вариант системы наблюдений – сейсморазведка 2D в модификации широкого профиля (ШП). Накопленный к настоящему времени опыт использования этой технологии свидетельствует о её эффективности, по крайней мере, как средства для подавления волн, приходящих не из плоскости профиля (боковых волн) и для улучшения прослеживания отражений, связанных с глубокими границами [6, 8].

Система наблюдений ШП в дополнение к обычному 2D-профилированию описывается шириной полосы и количеством линий приёмников и источников. Выбор параметров системы наблюдения, помимо представлений об особенностях строения среды, определяется поверхностными условиями, доступными техническими средствами, а также – ограничениями, связанными с экологией и хозяйственной деятельностью на исследуемой территории [2, 3].

Стандартная система наблюдений ШП состоит из одной линии воздействий (ЛВ) и ряда симметрично-расположенных от-



▲ Рис. 1. Пример разреза после глубинной миграции до суммирования по данным сейсморазведки 2D в условиях солянокупольной тектоники. При хорошем качестве изображения в надсолевом комплексе отражения в подсолевом комплексе практически не прослеживаются (обработка 2025 г.).

носителем неё параллельных линий приёма (ЛП). Обычно, линия воздействия совмещается с центральной линией приёма.

Существует и альтернативный подход к проектированию систем наблюдения широкого профиля. В [8], в условиях Предуральяского прогиба, использовалась обращённая система ШП: регистрация колебаний производилась на одной линии, а пункты воздействия (ПВ) располагались на перпендикулярных к ней семи линиях, с увеличенным шагом по профилю (200 м) и с расстояниями между ПВ по линии (100 м). Такая система наблюдения представляет собой некоторый аналог системы «крест» при сейсморазведке 3D.

В [9], в юго-восточной части Восточно-Европейской платформы, была использована система наблюдения, состоящая из четырех приемных линий, разнесенных между собой на 100 м, и двух линий источников, совпадающих с центральными приемными линиями. Шаг по ПП вдоль линий составлял 25 м, по ПВ – 50 м.

Исследования эффективности систем наблюдения широкого профиля в более сложных сейсмогеологических

условиях солянокупольной тектоники Прикаспийской впадины средствами полноволнового моделирования представлены в [4]. Смоделированная система наблюдения ШП включала в себя 21 линию приёма (ЛП) в полосе ± 1 км (с шагом 100 м) и 1 линию воздействия (ЛВ), совмещенную с центральной линией приёма. Расстояния между ПП и ПВ составляли 25 и 50 м соответственно, максимальное удаление ПП-ПВ ± 10000 м (на центральной линии). В работе показано, что применение ШП позволяет не только подавить боковые волны, улучшить прослеживаемость отраженных волн и их динамическую выразительность, но и обеспечить более корректное восстановление геометрии отражающих границ. Полученный эффект был достигнут за счёт выполнения обработки сейсмограмм ШП в 3D варианте. Попутно установлено, что, сохраняя ширину полосы широкого профиля, число линий приёма может быть уменьшено до 9 при незначительном снижении качества получаемых результатов.

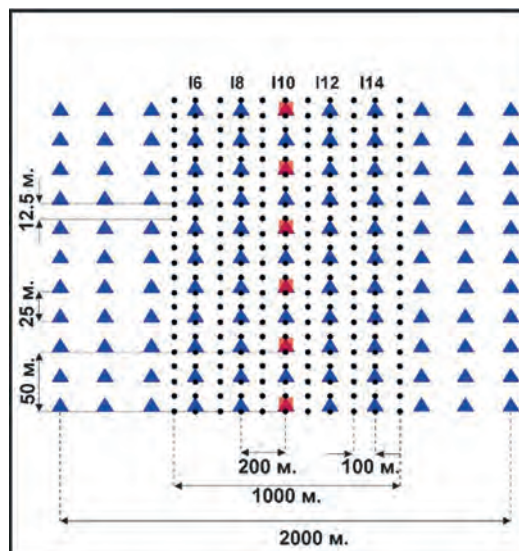
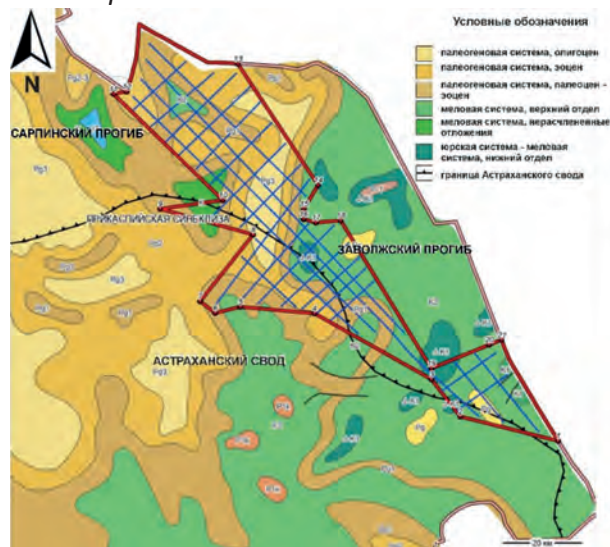
В настоящей статье с опорой на результаты моделирования из [4] представлен

опыт применения модификации ШП на региональном этапе ГРР, в условиях солянокупольной тектоники периферии Астраханского свода, в зоне его сочленения с Заволжским прогибом.

Характерной чертой территории является резкое погружение подсолевого комплекса отложений с 4-5 км в пределах свода до 7-9 км в прогибе и соответствующее этому погружению увеличение мощности соленосной толщи в куполах, а также – глубин мульд между ними [1]. Особенности рельефа соленосной толщи обуславливают значительные искажения годографов волн от подсолевых границ из-за резкого скоростного контраста на её кровле. В подобных условиях основная цель применения ШП заключается в обеспечении качества выделения и прослеживания отражающих границ в подсолевом комплексе, которые при классическом 2D профилировании часто остаются недоступны (рис. 1).

Регион проведения работ характеризуется благоприятными поверхностными условиями (степные, полупустынные участки без резкого изменения рельефа дневной поверхности), что не накладывает ограничений на используемую систему наблюдения (рис. 2). Система

▼ Рис. 2. Схема отработанных широких профилей на фоне фрагмента Геологической карты РФ.



▲ Рис. 3. Геометрия системы наблюдения широкого профиля. Синим – приемники, красным – источники, черным – точки ОСТ. 16...114 – номера линий широкого профиля.

наблюдений ШП – центрально-симметричная с переходом в начале и окончании профиля в ассиметричную, вплоть до фланговой, состоит из 11 линий приёма, разнесенных между собой на 200 м (ширина полосы ШП 2000 м) с шагом ПП – 25 м. Линия ПВ совмещена с центральной линией ПП, шаг по ПВ – 50 м. Максимальные удаления источник-приемник по центральной линии составили ± 8000 м (рис. 3).

Для воздействия использовались вибрационные источники NOMAD по 3-4 в группе. Генерировался линейный свип-сигнал длительностью 20 с в диапазоне частот от 8 до 80 Гц.

Для регистрации использовались сейсмоприёмники GS-20DX (по 6 шт. на базе 12.5 м), длительность коррелограммы – 16 с.

Обработка полученных материалов до миграции выполняется в программном комплексе Prime (ООО «Сейсмотек») по стандартному для региональных ГРР графу. Весь граф сигнальной обработки состоит из более чем 20 пунктов, однако, в рамках статьи, ограничимся перечислением только основных процедур: пре-

процессинг (отбраковка нулевых трасс, ввод поправки за учет геометрического расхождения, подавление амплитудных выбросов (спайков)); учет верхней части разреза по преломленным волнам; подавление конуса поверхностных волн и линейных помех; подавление нерегулярных помех; сигнатурная деконволюция; поверхностно-согласованная деконволюция; подавление кратных волн от дневной поверхности; коррекция поверхностно-согласованных амплитудных и статических поправок (5-6 итераций); скоростной анализ и построение временных разрезов ОСТ. В процессе сигнальной обработки учитывается особенность расстановки, поэтому основная часть процедур применяется в варианте 3D.

Построение глубинно-скоростной модели (ГСМ) и глубинная миграция до суммирования (PSDM) являются ключевым этапом обработки в условиях солянокупольной тектоники. Миграция выполняется по алгоритму Кирхгофа. Построение общей увязанной ГСМ исследуемой территории осуществляется методом послойной кинематической инверсии с использованием технологии кинематико-динамического преобразования, суть которой заключается в определении поля времен на основе анализа остаточной кинематики вдоль горизонтов по мигрированным сейсмограммам. Данный подход обеспечивает итеративное уточнение скоростных параметров и глубин залегания отражающих горизонтов на основе анализа формы годографов отраженных волн с учетом их негиперболической кинематики [5,7].

Особенности построения глубинно-скоростной модели

Исследуемая территория не изучена бурением. Ближайшая скважина, пригодная для определения скоростных характеристик среды, расположена на

удалении более 10 км от отработанных сейсмических профилей. В связи с этим, единственным источником информации о скоростных параметрах геологического разреза являются сами сейсмические данные.

Полный набор удалений присутствует только на центральной линии широкого профиля, где источники и приемники совмещены. На боковых линиях ближние удаления отсутствуют, что делает невозможным проведение по ним устойчивых кинематических оценок для верхней части разреза.

В связи с этим, построение ГСМ верхней части надсолевого комплекса первоначально производится в варианте 2D, по центральным линиям широких профилей. Далее, полученная 2D модель экстраполируется в пределах всей ширины полосы широкого профиля и выполняется первая итерация трехмерной миграции до суммирования. На этом этапе для каждой из 11 линий (где это возможно) производится коррекция глубин залегания отражающих горизонтов. Интервальные скорости при этом не корректируются в силу их незначительных (пренебрежимо малых) изменений в направлении ортогональном профилю.

Процесс построения модели – итеративный и, как правило, для каждого горизонта требуется проведение от 3 до 5 итераций миграции с последующей оценкой остаточной кинематики и решением с ее учетом обратной кинематической задачи. Критерием остановки процесса уточнения служит достаточное спрямление годографов отраженных волн на сейсмограммах общей точки изображения (ОТИ) и отсутствие негеологических кинематических аномалий.

В результате построенная ГСМ надсолевого комплекса в зависимости от профиля и сложности строения пересекаемых им мульд содержит до 11 слоёв, значения интервальных скоростей в ко-

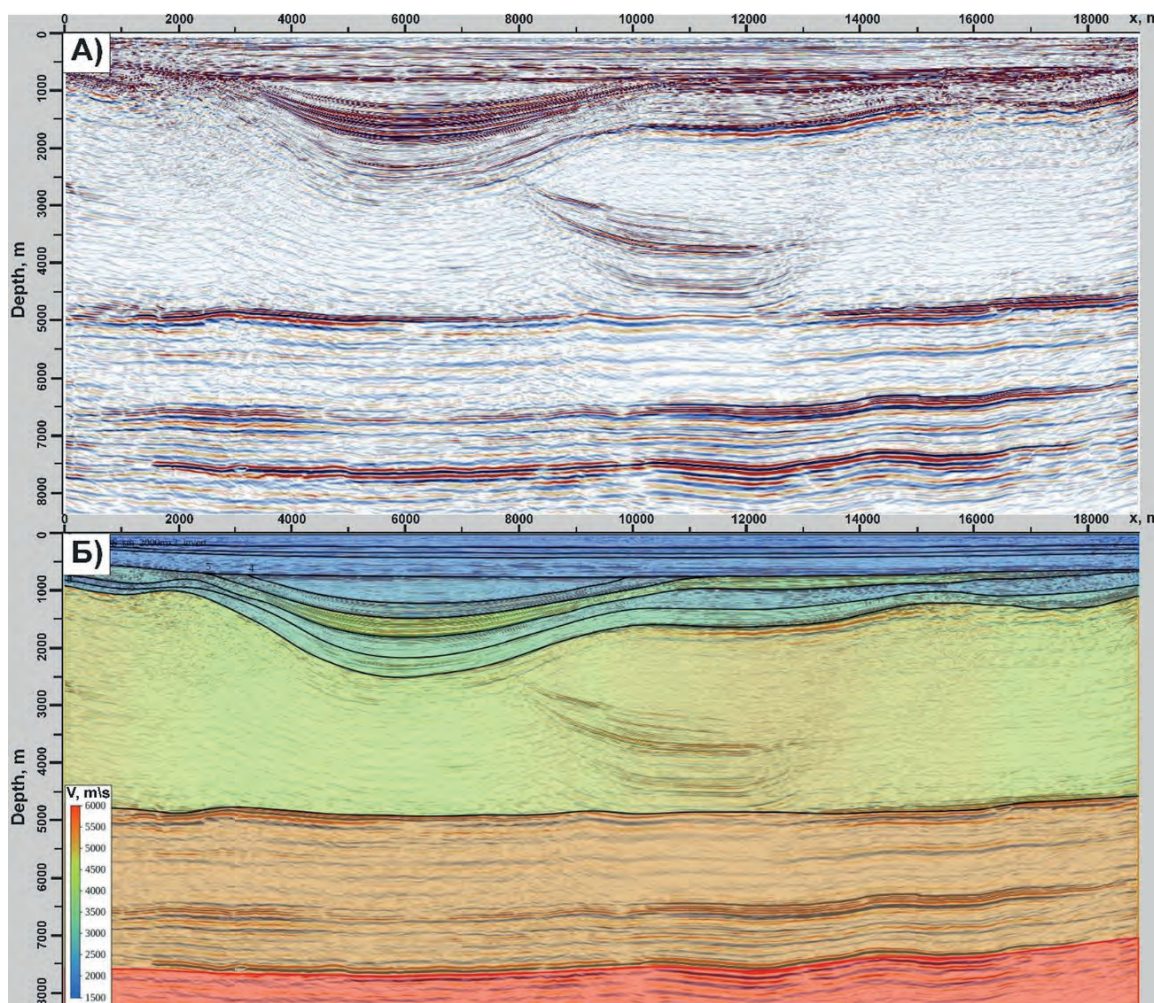
торых в целом увеличиваются с глубиной. Вместе с тем, на части площади выделен слой аномально-высоких интервальных скоростей (до 4000-4300 м/с), связанный с распространением карбонатов. Ниже этого слоя наблюдается значительная инверсия интервальных скоростей – скорости падают до 3200-3500 м/с.

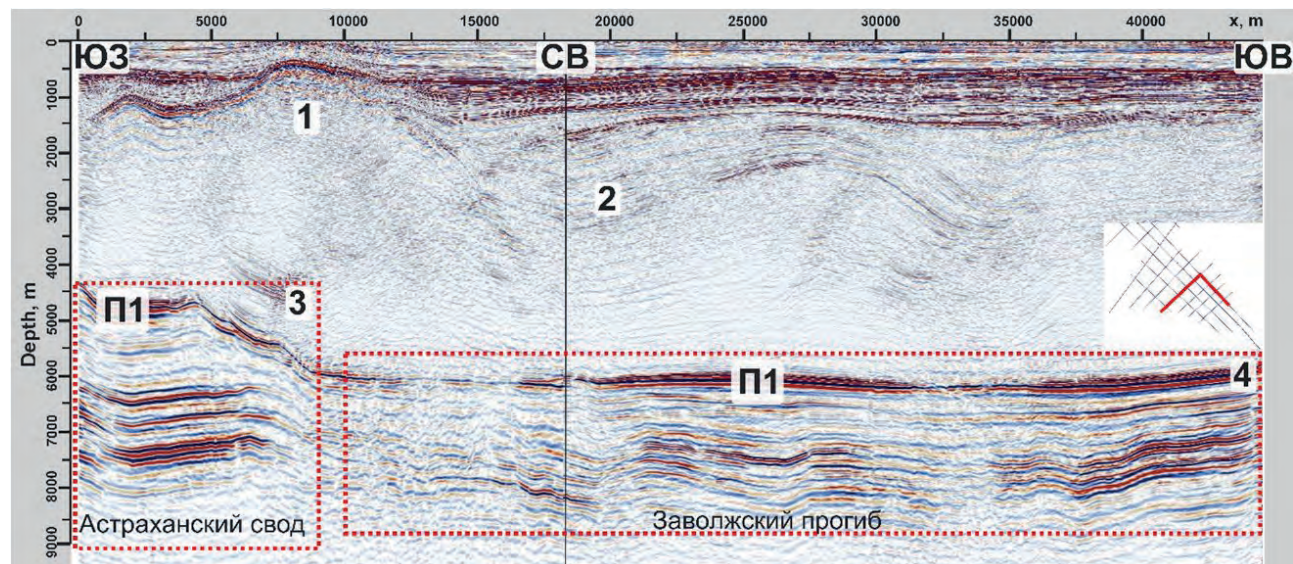
Скоростная характеристика ниже лежащей части разреза определяется в процессе 3D глубинной миграции до суммирования. На части площади наиболее глубокие мульды по своим кинематическим характеристикам слабо отличаются от вмещающих их солей ($V \approx 4400 - 4600$ м/с) и при этом слабо выражены в сейсмическом волновом поле. Опытным путем установлено, что их совместное описание с соленосной толщей в соста-

ве единого эффективного слоя ГСМ позволяет получить лучшее изображение подсолевой толщи по сравнению с раздельным описанием. Использование эффективного слоя позволяет придать рельефу кровли соли более пологий характер, что уменьшает искажающие эффекты преломления на контрастной границе.

Для отражающих горизонтов подсолевого интервала разреза решение обратной кинематической задачи происходит неустойчиво, а сами интервальные скорости определяются с большими погрешностями. В связи с этим для всего подсолевого интервала была задана скорость 5200 м/с. Данное значение интервальной скорости не противоречит наблюдаемым данным (обеспечивает

▼ Рис. 4. Финальный глубинный разрез (А) по одному из профилей после трехмерной глубинной миграции до суммирования (PSDM-3D) и его глубинно-скоростная модель, использованная при миграции (Б).





▲ Рис. 5. Композитный глубинный разрез после глубинной миграции до суммирования, охватывающий структуры Астраханского свода и Заволжского прогиба. Вертикальной линией обозначена точка пересечения. На разрезе: 1 – соляной купол с двумя вершинами; 2 – глубокая мульда, заполненная слабоконтрастными, высокоскоростными осадками; 3 – фрагмент Астраханского свода; 4 – подсолевой комплекс в пределах Заволжского прогиба.

спрямление годографов отраженных волн на сейсмограммах ОТИ) и согласуется с данными бурения за пределами исследуемой территории, в тех скважинах, где эти отложения были вскрыты.

Обработка после миграции производится в два этапа.

На первом этапе по полученным 3D-мигрированным сейсмограммам выполняется подавление остаточных когерентных (кратные, линейные) и некогерентных волн-помех. Далее, с целью расширения амплитудно-частотного спектра записи выполняется нуль-фазовая деконволюция, что обеспечивает повышение вертикальной разрешенности разреза. Затем производится подбор финального мьютинга, позволяющего отсечь участки сейсмограмм с низким соотношением сигнал/шум на больших удалениях и выполняется суммирование для каждой из 11 линий ШП.

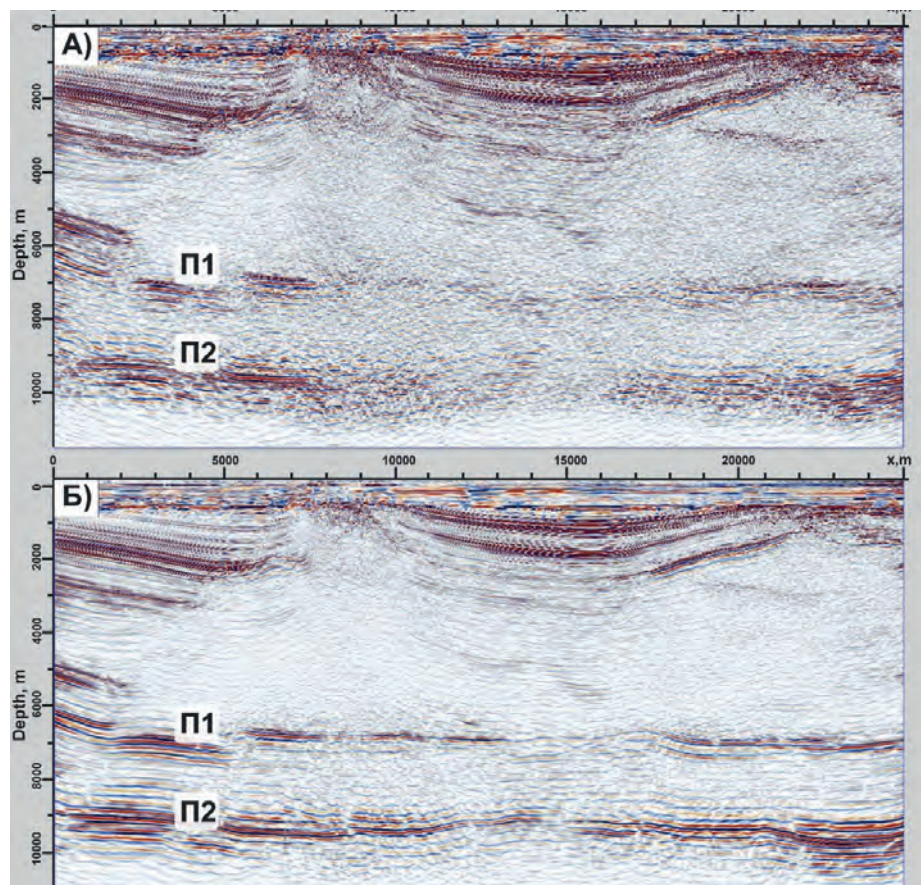
На втором этапе по суммарным разрезам выполняется подавление остаточных некогерентных помех, производится нуль-фазовая деконволюция, обеспечивающая дополнительное сжатие импульса и повышение разрешенности суммар-

ного разреза. Завершающей процедурой является модель-ориентированная когерентная фильтрация, направленная на усиление регулярных отраженных волн.

Финальный вариант разреза после 3D глубинной миграции до суммирования и постмиграционной обработки для центральной линии одного из профилей ШП, представленный в композиции с ГСМ на рис. 4, демонстрирует высокое качество прослеживания и динамическую выразительность отражающих горизонтов, в том числе и в подсолевом комплексе.

Пространственный эффект 3D глубинной миграции иллюстрируется сопоставлением разрезов по пересекающимся профилям ШП непосредственно в зоне сочленения Астраханского свода и Заволжского прогиба (рис. 5).

На композитном разрезе в надсолевом комплексе выделяются крупный соляной купол с двумя вершинами (1) и глубокая мульда, заполненная слабоконтрастными высокоскоростными осадками (2). В подсолевом комплексе прослеживаются фрагменты Астраханского свода в прибортовой зоне (3), где граница П1 залегает на глубине 4,5 км с



◀ Рис.6. Сравнение глубинных разрезов: А – после двумерной глубинной миграции до суммирования (PSDM-2D) и Б – после трехмерной глубинной миграции до суммирования (PSDM-3D).

последующим погружением в сторону Заволжского прогиба до 6,5 км (4).

Преимущество наблюдений ШП с последующим выполнением 3D глубинной миграции перед классическим двумерным профилированием с 2D миграцией показано сопоставлением глубинных разрезов, приведенных на рис. 6А (2D миграция) и рис. 6Б (3D миграция). Из рисунков видно, что надсолевой комплекс на обоих разрезах без существенных отличий, облик же подсолевого комплекса изменяется значительно. В варианте 2D отражения П1-П2 прослеживаются только на части профиля, в то время как в варианте 3D эти же отражения прослеживаются на всей его протяженности.

Важно отметить, что простое накопление в варианте 2D миграции не улучшает прослеживаемость подсолевых отражающих горизонтов. Демонстрируемое преимущество 3D миграции связано с суммированием пространственного годографа, а не только с увеличением кратности наблюдений.

Заключение

Модификация широкого профиля при региональных исследованиях является хорошей альтернативой обыкновенному 2D-профилированию при изучении сложнопостроенных сред – в частности, регионов с развитой солянокупольной тектоникой. В таких условиях 3D глубинная миграция до суммирования позволяет в полной мере использовать преимущества пространственного характера системы наблюдения при формировании изображения глубокозалегающих горизонтов подсолевого комплекса. Для изучения пространственных особенностей этих горизонтов может быть применен анализ разрезов по отдельным линиям ШП.

Дальнейшее совершенствование методики связано с оптимизацией системы наблюдения. При благоприятных поверхностных условиях в качестве меры повышения геологической информативности может быть рассмотрено увеличение числа линий воздействия до трех и бо-

лее (добавлением двух из дополнительных линий по краям расстановки ШП) с увеличением шага по ПВ вдоль линий воздействия с 50 до 100 м. Такая модификация системы наблюдения позволит повысить освещенность среды и увеличить апертуры суммирования в поперечном направлении без существенного удорожания работ.

С экономической точки зрения использование системы наблюдения ШП более чем оправдано. По оценкам авторов увеличение себестоимости полевых работ по рассмотренной технологии по сравнению с затратами на классическое 2D-профилирование затрагивает только топогеодезические работы и смоточно-размоточные операции и не превышает в целом 30-35%. Тогда как столь значительный прирост геолого-геофизической информативности при использовании стандартной методики 2D просто недостижим.

Альтернативным подходом к дальнейшему выполнению сейсморазведочных работ с применением ШП является комбинирование ШП и классического 2D-профилирования. В этом случае в пределах изучаемой площади должны быть выбраны несколько ключевых траекторий для создания по ним каркасной сети широких профилей, а остальные профили отрабатываются в варианте 2D. Опыт таких работ уже имеется [9], что подтверждает практическую реализуемость и перспективность данного подхода.

Таким образом, более широкое применение системы наблюдения ШП на региональном этапе ГРП является перспективным направлением в условиях постоянно увеличивающихся требований к качеству и геологической информативности результатов сейсмического метода. Предложенные направления дальнейшего развития технологии широкого профиля – модификация системы наблюдения и комбинирование профи-

лей ШП с классическим 2D профилированием удовлетворяют этим требованиям, сохраняя при этом экономическую эффективность работ.

Литература

1. Астраханский карбонатный массив: строение и нефтегазоносность / под ред. Ю.А. Воложа, В.С. Парасыны. – М. : Научный мир, 2008. – 300 с.
2. Будяк А. В. Современные задачи для системы наблюдения «широкий профиль» // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2023. – № 4. – С. 71–75.
3. Будяк А. В. Широкий профиль как рациональный компромисс между 2D и 3D на малых объектах // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2026. – №2. – С. 60 – 66.
4. Веденяпин О.А., Каплан С.А., Лебедев Е.Б., Левченко Т.В., Рок В.Е., Левченко В.Д., Перепелкина А.Ю. Моделирование систем наблюдения широкого профиля в условиях солянокупольной тектоники // Прикладная геофизика. – 2018. – № 5. – С. 45–53.
5. Глоговский В.М., Мешбей В.И., Цейтлин М.И., Лангман С.Л. Кинематико-динамическое преобразование сейсмической записи для определения скоростного и глубинного строения среды // Сборник докладов второго научного семинара стран – членов СЭВ по нефтяной геофизике. – Т. 1: Сейсморазведка. – М. : СЭВ, 1982. – С. 327–331.
6. Днистрянский В.И., Побережский С.М., Гореликов В.И. Методика и технология полевых сейсморазведочных работ при региональных исследованиях // Геофизика. – 2007. – № 4. – С. 22–28.
7. Лангман С.Л., Силаенков О.А. Кинематико-динамическое преобразование – инструмент параметризации волнового поля // Геомодель-2011 : сборник материалов 13-й Международной научно-практической конференции по проблемам комплексной интерпрета-

ции геолого-геофизических данных при геологическом моделировании месторождений углеводородов. – Геленджик, 2011. – С. 215–219.

8. Парамонов В.К., Калинин А.Ю., Черваков В.М., Гореликов В.И., Карнаухов В.И. Широкопрофильная сейсморазведка МОВ-ОСТ: методика и результаты // Технологии сейсморазведки. – 2006. – № 3. – С. 5–12.

9. Фортунатова Н.К., Канев А.С., Баранова А.В., Белоусов Г.А., Володина А.Г. Особенности геологического строения и перспективы нефтеносности отложений доманикового типа в пределах южной части Актаныш-Чишминского палеопрогиба (Благовещенская впадина и Южно-Татарский свод) // Геология нефти и газа. – 2023. – № 4. – С. 85–103.

Подробнее об авторах



Шушкевич Н.Ю.
вед. инженер сектора
комплексной обработки
сейсмических и сква-
жинных данных ФГБУ
ВНИГНИ



Гоц И.А.
зав. отделением геофи-
зических исследований
ФГБУ ВНИГНИ



Каплан С.А.
к.т.н., зав. отделом мето-
дического сопровожде-
ния обработки данных
сейсморазведки и каро-
тажа ФГБУ ВНИГНИ



Лебедев Е.Б.
зав. сектором комплекс-
ной обработки сейсмиче-
ских и скважинных дан-
ных ФГБУ ВНИГНИ



Силаенков О.А.
главный геофизик
ООО "Сейсмотек"

УДК 550.834:553.81

Оконтуривание кимберлитовой трубки на основании данных сейсморазведочных работ МОГТ 3D

■ Душкин А.Б.¹, Лаптев А.П.¹, Мамедов О.Г.¹, Мифтахутдинова Е.В.¹, Пенделяк Р.Н.², Пятунина Е.В.¹, Спешиллов В.И.¹, Устинов В.Н.², Шелковникова И.Ф.¹.

¹ ПАО «Пермнефтегеофизика», г.Пермь.

² АО «АГД Даймондс», г.Архангельск.

Аннотация. В статье представлены результаты опытно-методических сейсморазведочных работ МОГТ 3D, проведённых на одной из кимберлитовых трубок Зимнебережного алмазонасного района Восточно-Европейской провинции на территории лицензионного участка АО «АГД ДАЙМОНДС». Целью исследований являлось уточнение строения трубки высокоплотными сейсморазведочными работами МОГТ 3D и решение вопроса об эффективности их использовании в комплексе поисковых работ на алмазы. Работы проводились в условиях залесённой и заболоченной местности с использованием малогабаритных буровых установок и пиропорохового заряда в качестве источника возбуждения. Выполнялись небольшим количеством специалистов широкого профиля. На основе обработки и интерпретации данных полевых наблюдений удалось уверенно выделить тело кимберлитовой трубки, уточнить её положение в плане и в разрезе, выявить особенности строения и связанные с ней зоны нарушения корреляции отражений. Полученные данные подтверждают высокую эффективность сейсморазведочных работ МОГТ 3D для выявления коренных месторождений алмазов в сложных поисковых обстановках.

Ключевые слова: сейсморазведка МОГТ 3D, кимберлитовая трубка, пиропороховой заряд, сейсморужье, оконтуривание, статические поправки.

В последние годы в геофизической практике наблюдается устойчивый рост интереса к применению методов высокоразрешающей сейсморазведки при поисках и разведке твердых полезных ископаемых. Особенно активно развиваются технологии МОГТ 3D для картирования рудных тел сложного строения, локализации зон трещиноватости и уточнения морфологии магматических объектов. В отличие от традиционных задач нефтегазовой геофизики, объекты рудной геологии характеризуются существенно меньшими размерами, высокой латеральной изменчивостью и сложными скоростными условиями, что предъявляет повышенные требования к плотности систем наблюдений и устойчивости возбуждения упругих колебаний.

Кимберлитовые трубки являются основными коренными источниками алмазов диаметром от первых десятков до

сотен метров. Традиционные геофизические методы (магниторазведка, гравиразведка, электроразведка) часто дают неоднозначные результаты из-за сложного геологического строения и экранирующего влияния четвертичных отложений. Данные методы эффективно применяются на поисковой стадии, однако обладают ограниченной вертикальной разрешающей способностью и не позволяют достоверно восстанавливать внутреннюю морфологию объектов. Некоторые исследователи считают, что возможен пропуск до 20% кимберлитовых тел девон-раннекаменноугольного возраста, особенно на площади развития вендских отложений осадочного чехла [1, 3].

Например, магниторазведка традиционно используется при поисках кимберлитовых трубок благодаря повышенной магнитной восприимчивости кимберлитов, обусловленной присутствием магнетита

и пикроильменита. Амплитуда аномалий магнитного поля варьирует от первых нТл до тысяч нТл.

Основными преимуществами магниторазведки являются:

- высокая производительность;
- относительно низкая стоимость;
- возможность быстрого обследования больших территорий;
- эффективность на региональных стадиях поисков.

Вместе с тем метод обладает рядом ограничений:

- неоднозначность интерпретации;
- низкая вертикальная разрешающая способность;
- невозможность достоверного определения внутреннего строения объекта;
- слабая чувствительность к немагнитным кимберлитовым фациям;
- наличие искажающего эффекта, который вносят трансформации поля. Азимут простирания длинных осей трубок не совпадает с простиранием аномалий, их сопровождающих [1].

К другим проблемам, замедляющим открытие месторождений алмазов на северо-западе РФ также относят:

- на многих известных перспективных площадях не выполнен достаточный комплекс геолого-геофизических исследований;
- на ряде перспективных площадей не проведена заверка аномалий бурением;
- фонд относительно легко открываемых месторождений алмазов на большей части территорий к настоящему времени исчерпан [8].

Для поиска трубок взрыва на территории Зимнебережного района применялись и методы сейсморазведки МОГТ с 80-х годов прошлого столетия. Результаты данных работ показали, что кимберлитовые трубки отображаются в волновых полях, образуя волновые эффекты: образование зоны тени, увели-

чение интенсивности низкочастотных компонент, сужение полосы частот и нарушение когерентности спектров, образование локальных аномалий времен прихода отраженных и преломленных волн, локальное прекращение корреляции мелких горизонтов во вмещающих породах [3]. Аналогичные признаки подмечены при проведении сейсморазведочных работ на различных зарубежных объектах, например в Австралии [9].

При поисках алмазоносных трубок на территории Сибирской провинции применялся метод высокочастотной сейсморазведки ОГТ 2D. В отличие от строения кимберлитовмещающих пород Зимнебережного района осадочный чехол в районе якутских трубок взрыва сложен терригенными и терригенно-карбонатными толщами пород рифея и венда, кембрийской, ордовикской систем, мезозоя и кайнозоя. Высокочастотной сейсморазведкой 2D установлено, что в плане трубки имеют изометричную форму, в волновом поле проявляются в виде аномальной зоны отсутствия корреляции отражающих горизонтов. Однако, наибольший интерес при опосредованном и планировании разработки кимберлитовых трубок связан с геологическим строением верхней части разреза и обычная сейсморазведка не может в полной мере решить эту задачу, т.к. верхняя часть характеризуется низкой кратностью сейсмических данных. Необходимо применение пространственной системы наблюдений с широким набором азимутов и удалений и плотной сетью наблюдений. Так на нескольких малоразмерных перспективных объектах Сибирской платформы было принято решение об инициации внедрения технологии трехмерной сейсморазведки с предварительным моделированием систем наблюдений [6].

Результаты моделирования трехмерной съемки, выполненные сотрудниками ПАО «Пермнефтегеофизика», показали,

что сеть профилей с расстояниями более 50 м (например, между профилями возбуждения 100 м и профилями приема 50 м) не позволит непрерывно проследить верхний, перекрывающий трубки, горизонт и, следовательно, решить геологическую задачу в полной мере. Выбрана оптимальная методика наблюдения, обеспечивающая достижение кратности 20 в верхней части разреза: сеть профилей приема и возбуждения с расстояниями 50 м, шаг по пунктам приема 5 м, по пунктам возбуждения 10 м, расстановка 8 линий по 100 каналов, [6]. С помощью предложенной методики 3D возможно получение объемного изображения недр, уточнение морфологических параметров трубок, строения покрывающих пород и картирование зон нарушения сплошности разреза, связанных с трубками взрыва. Дополнительным преимуществом является возможность применения атрибутного анализа для выделения зон нарушения когерентности, деформации отражающих горизонтов и локальных изменений волнового поля.

При этом необходимо отметить основные недостатки высокоплотных съемок МОГТ 3D:

- высокая стоимость полевых работ;
- сложность логистики;
- значительный объем и длительность обработки;
- зависимость качества данных от условий возбуждения.

Для северных лесисто-болотистых территорий России дополнительными ограничениями являются экологические требования к подготовке профилей, высокая стоимость мобилизации тяжелой техники и организации складов взрывчатых веществ (ВВ).

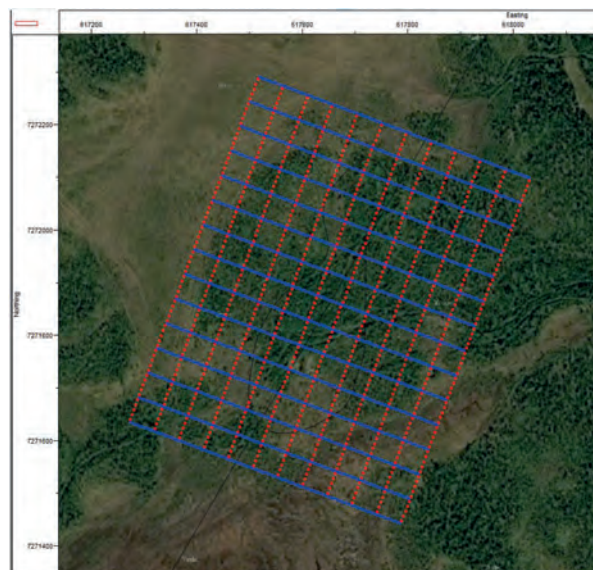
В связи с этим актуальной темой становится разработка компактных экологосберегающих технологий сейсморазведки, обеспечивающих необходимое

качество данных при минимальных затратах.

Основной задачей опытно-методических сейсморазведочных работ 3D 2026 года в Зимнебережном алмазоносном районе являлась апробация и оптимизация методики работ в условиях заболоченной и залесенной местности (Рис.1) с минимальным воздействием на окружающую среду с целью уточнения строения перспективной кимберлитовой трубки «В» на малых глубинах высокоплотными сейсморазведочными работами МОГТ 3D [4].

Объект исследований «В» открыт в 1988 году в результате поисково-оценочных работ и в плане представляет собой трубку с двумя подводщими каналами, образующую на погребенной поверхности правильный овал размером 340х205м, длинная ось которого ориентирована в север-северо-восточном направлении. Сложена образованиями жерловой и кратерной фаций. Жерловая фация представлена туфобрекчиями и ксенотуфобрекчиями, кратерная - туфопесчаниками, туфоалевролитами, брекчиями осадочных пород, туфами и туффитами. [5, 7]. Трубка прорывает толщу терригенных пород верхнего венда, залегающих на архейско-протерозойском кристаллическом фундаменте (или на

▼ Рис. 1. Обзорная схема района работ.





◀ Рис. 2. Условия выполнения опытно-методических работ 3D по профилям возбуждения (слева) и профилям приема (справа).

породах верхнего рифея). Отложения венда представлены переслаиванием песчаников, алевролитов и аргиллитов. В толще вендских пород (до 900-1100 м) выделяют три свиты (снизу вверх): усть-пинежская, на 60% состоящая из алевролитов и аргиллитов (40%), мезенская, представленная в основном алевролитами (до 75%) и падунская, в объеме которой песчаники составляют до 75% объема [2]. Породы вендского комплекса со стратиграфическим перерывом перекрываются маломощными среднекаменноугольными и четвертичными образованиями общей толщиной до 80 м.

Полевые сейсморазведочные работы МОГТ 3D выполнены силами ПАО «Пермнефтегеофизика» на участке площадью 0,382 кв.км, расположенном восточнее месторождения им. В. Гриба. Для минимизации расходов было принято решение проводить работы сокращенным составом сейсморазведочной партии. Общая численность сейсморазведочной партии составила 22 человека (5 инженерно-технических работников, 17 рабочих). Работы проводились с использованием небольшого количества колесной техники, снегоходов «Бурани» и малогабаритных буровых установок «УБШМ-1-13» производства ОАО «Курганавторемонт» (Рис.2).

В отличие от традиционных схем проведения сейсморазведки не потребовалось:

- рубка леса – подготовка профилей ограничивалась визирками расширение просек;
- применение тяжелой гусеничной техники;
- организация складов взрывчатых веществ;
- использование специализированного транспорта для перевозки ВВ.

В качестве источника возбуждения предложено применение сейсморужья с пиропороховыми патронами промышленного типа (Рис. 3).



▲ Рис. 3. Сейсморужье.

Глубина бурения выбиралась с учетом необходимости возбуждения упругих колебаний в плотных обводненных глинах. Литологический разрез верхней части в зоне исследований представлен (по данным керна поисковых скважин и шлама буровых скважин): до 0.2 м – почвенный

слой; от 0,2 м до 2-3 м – торф; от 2-3 м до 3-3,5 м – песчаник с глинистыми примесями; от 3-3,5 м до 6 м – плотная обводненная глина.

Перед началом основных работ были выполнены опытные наблюдения на двух типах рельефа: заболоченном участке и лесной территории. В ходе опытных работ исследовались следующие параметры:

- глубина скважин 3 и 6 м;
- количество патронов 1 и 2;
- количество накоплений 1 и 2;
- для сравнения использовались заряды ВВ массой 0,075 и 0,150 кг.

Анализ данных выполнялся в программном комплексе SeisPro (модуль QCONTR).

Задача работ состояла не в демонстрации превосходства ВВ, а в обосновании возможности использования порохового источника как полноценной альтернативы для высокоплотной сейсморазведки.

По результатам опытных работ определены оптимальные параметры возбуждения сигнала (глубина бурения 6 м, 1 патрон, 1 накопление). Качество оценивалось исходя из визуального анализа

сейсмограмм и комплексной оценки амплитудно-частотных характеристик сейсмической записи в интервале целевых отражений. После бурения скважины сейсморужье погружалось через полый шнек на глубину 6 м, далее происходил пуск заряда (Рис. 4). Использовалась энергия пороховых газов, выделяющихся при сгорании заряда пороха в замкнутом объеме, образуемого между патронником сейсморужья и дном скважины. Источник обеспечивал генерацию волнового поля широкого частотного диапазона с интенсивностью, достаточной для регистрации отраженных волн в изучаемом интервале глубин. Результаты опытных наблюдений показали, что качество записи с ВВ в данных условиях выше, однако стабильность импульса у сейсмического ружья выше благодаря закрытой камере сгорания, обеспечивающей одинаковую энергию от выстрела к выстрелу.

Следует отметить, что эффективность порохового источника ограничивается глубиной исследований и существенно зависит от литологических условий верхней части разреза. В условиях сухих рыхлых песчаных грунтов, а также при

▼ Рис. 4. Процесс погружения сейсморужья в полый шнек.



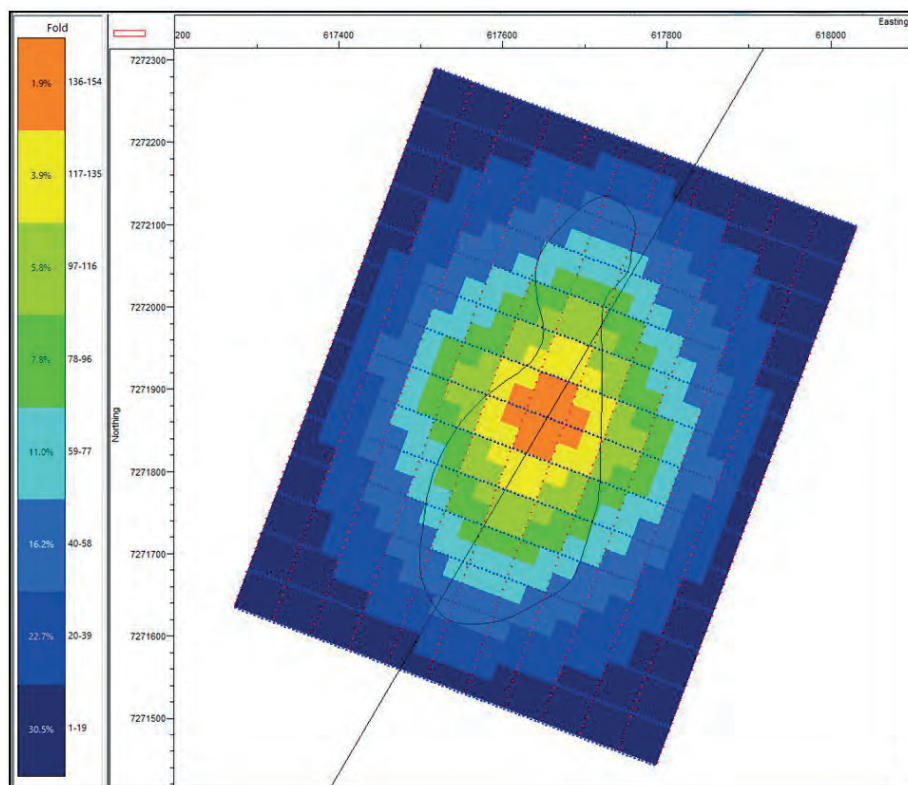


Рис. 5. Карта эффективной кратности.

глубинах более 600–800 м энергия источника может оказаться недостаточной для получения устойчивых отражений. В подобных условиях потребуются увеличение числа патронов либо использование малых зарядов ВВ.

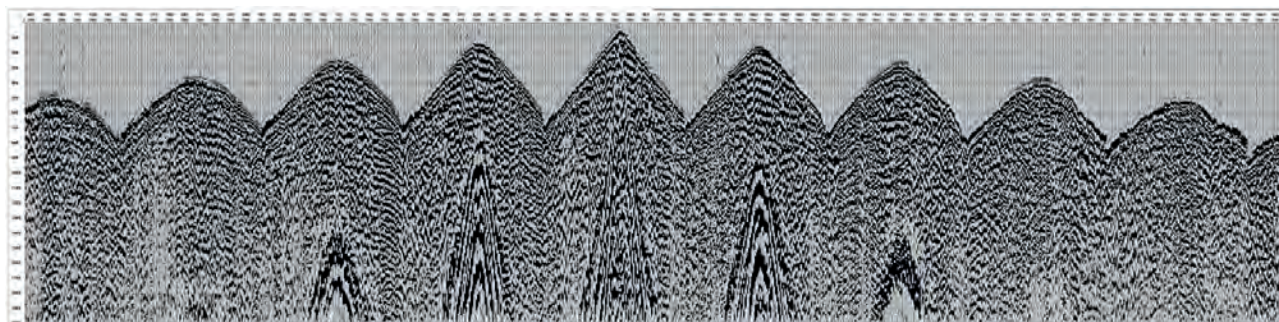
В процессе опытно-методических работ применена ортогональная асимметричная центральная система наблюдений: шаг ПП – 5 м; шаг ПВ – 10 м; расстояние между линиями ПП и ПВ – 50 м; активных каналов для каждого ПВ – 1650 (15 линий × 110 каналов); максимальная кратность в пределах контура трубки – 154 (бин 2.5 м × 5 м) (Рис. 5). Сейсмоприёмники – «GS-ONE»; сеймостанция – «G3i NXT» компании «INOVA»;

длина записи 2 с, шаг дискретизации 0.25 мс. Общий объем работ составил 0.382 км², 840 физических наблюдений. Асимметричная система наблюдений обеспечивала более равномерное азимутальное освещение крутонаклонных границ и способствовала улучшению качества изображения стенок трубки.

Кондиционное качество полевого материала (Рис. 6) обеспечило последующую качественную обработку и интерпретацию данных.

На этапе предобработки сейсмический куб и данные бурения загружены в базу данных интерпретационного комплекса KINGDOM. Предобработка дан-

Рис. 6. Фрагмент сейсмограммы. Глубина бурения 6 м.



Преобразование данных во внутренний формат системы «Geovation». Анализ качества исходных данных
Формирование и присвоение геометрии, контроль качества
Расчёт априорных статических поправок по методу взаимных точек с использованием первых вступлений преломленных волн
Автоматическая коррекция статических и кинематических поправок (первая итерация)
Компенсация амплитуд за затухание
Подавление высокоамплитудных шумов (процедура гармонизации амплитудно-частотного спектра)
Автоматическая коррекция статических и кинематических поправок (вторая итерация)
Динамическое выравнивание амплитуд в широком окне для группы, состоящей из всех трасс внутри сейсмограммы ОПВ
Потрассная деконволюция
Полосовая фильтрация
Автоматическая коррекция статических и кинематических поправок (третья итерация)
Подавление линейных волн-помех с помощью разложения Радона по сейсмограммам ОПВ и ОПП
Автоматическая коррекция статических поправок (четвертая итерация) и скоростей суммирования
Получение суммарного временного куба
Динамическое выравнивание амплитуд в широком окне
Фильтрация в F-K-области по кубу
Амплитудная деконволюция по кубу

▲ Табл. 1. Граф обработки.

ных выполнялась в системе «Geovation» по графу, представленному в таблице 1.

Волновое поле характеризуется:

- хорошим качеством первых вступлений, что обеспечило надёжное статическое решение;
- наличием интенсивных низкочастотных линейных помех (поверхностные волны до 20-25 Гц), успешно подавленных на этапе обработки;
- высоким уровнем когерентности отражений в верхней части разреза (до 0.25-0.3 с);
- постепенным снижением энергии и усложнением волновой картины с глубиной.

Анализ суммарного куба ОГТ после предварительной обработки в комплексе «Geovation» показал уверенную корреляцию отражающих горизонтов в интервале до 1 с, наиболее выдержанные

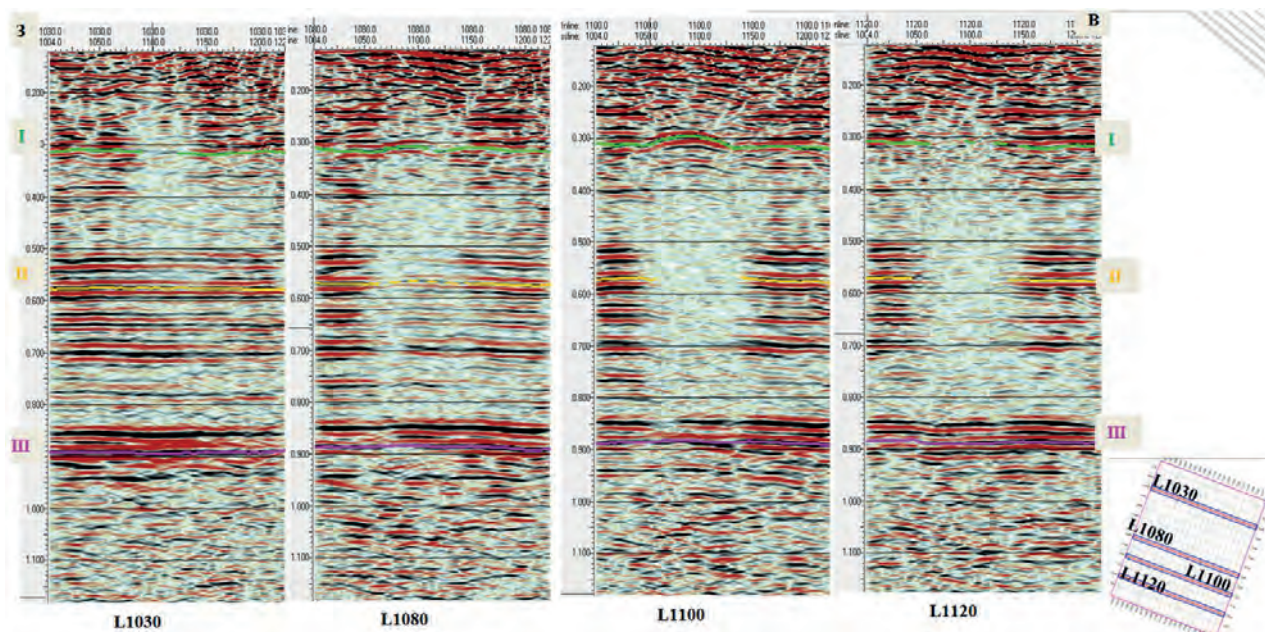
из них предварительно прослежены в разрезе, отмечены зоны потери корреляции, которые можно интерпретировать как внедрившиеся породы трубки (Рис.7).

Кимберлитовые трубки отобразились и на карте среднеквадратичных амплитуд по кубу пониженными амплитудами, околнурены две области (Рис. 8) на юге и севере площади.

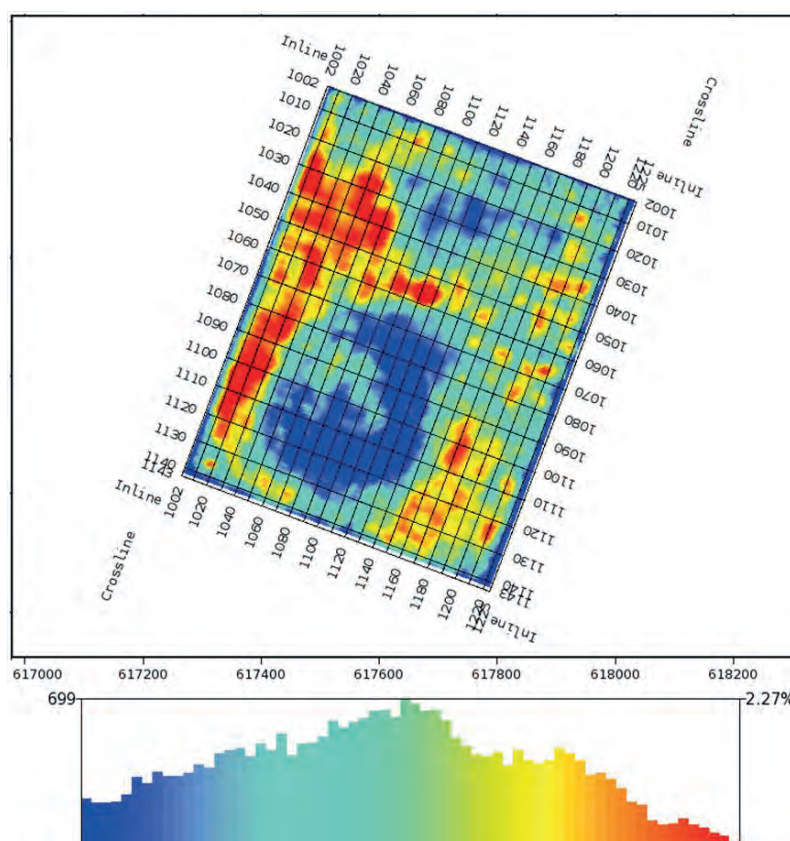
Главным результатом предварительной интерпретации стало прямое картирование кимберлитовой трубки по комплексу признаков:

1) Зона ослабления энергии отражений – в центральной части куба наблюдается значительное снижение амплитуд отражений и ухудшение когерентности записи.

2) Нарушение корреляции – на вертикальных срезах (Inline и Crossline) чётко



▲ Рис. 7. Корреляция на вертикальных срезах куба с постобработкой.



▲ Рис. 8. Карта среднев-
дратичных амплитуд по кубу.
Окно 300-600 мс.

видна вертикальная зона отсутствия или сильного искажения отражений, типичная для тел трубок взрыва.

3) Поведение атрибутов:

- пониженные значения RMS-амплитуд – демонстрируют приуроченность зон пониженной энергии к телу трубки;
- низкие значения параметра Confi-

dence (Рис. 9) (автоматического отслеживания горизонтов – параметра когерентности трасс) – ниже 0.6-0.7с – области белого и синего цвета (низкая уверенность) точно оконтуривают положение трубки;

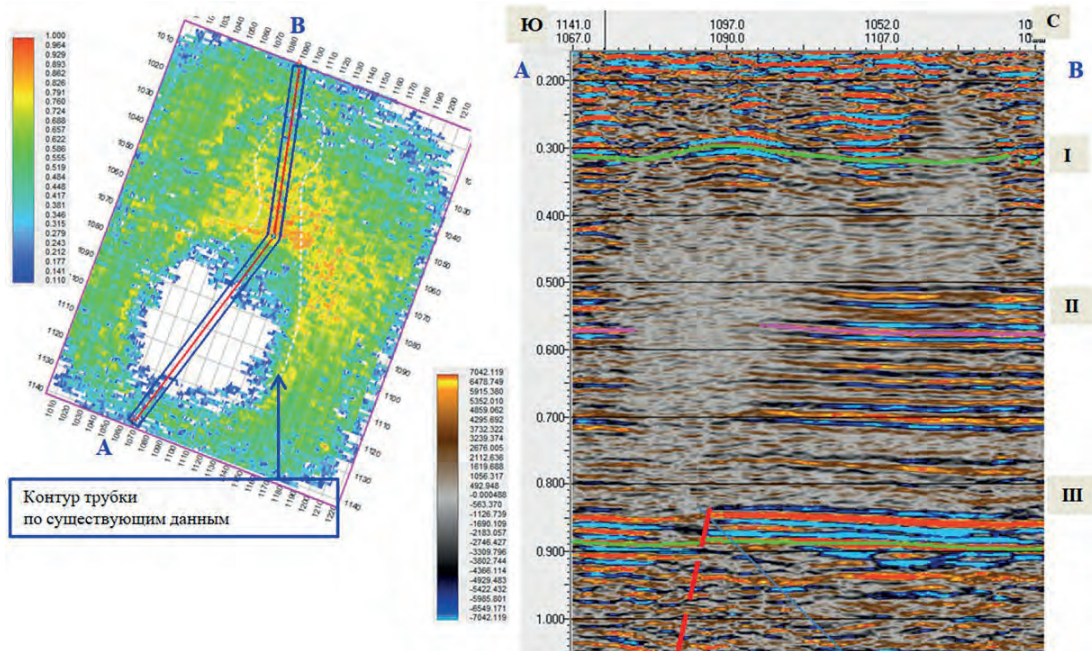
- значения параметра Dip (Рис. 10) (наклона отражений) вдоль горизон-

тов на временах 0,3, 0,57с – показывают аномальные зоны деформации разреза над телом трубки и вокруг нее;

- уровень частот и соотношение сигнал/помеха – подтвердили высокую надёжность данных.

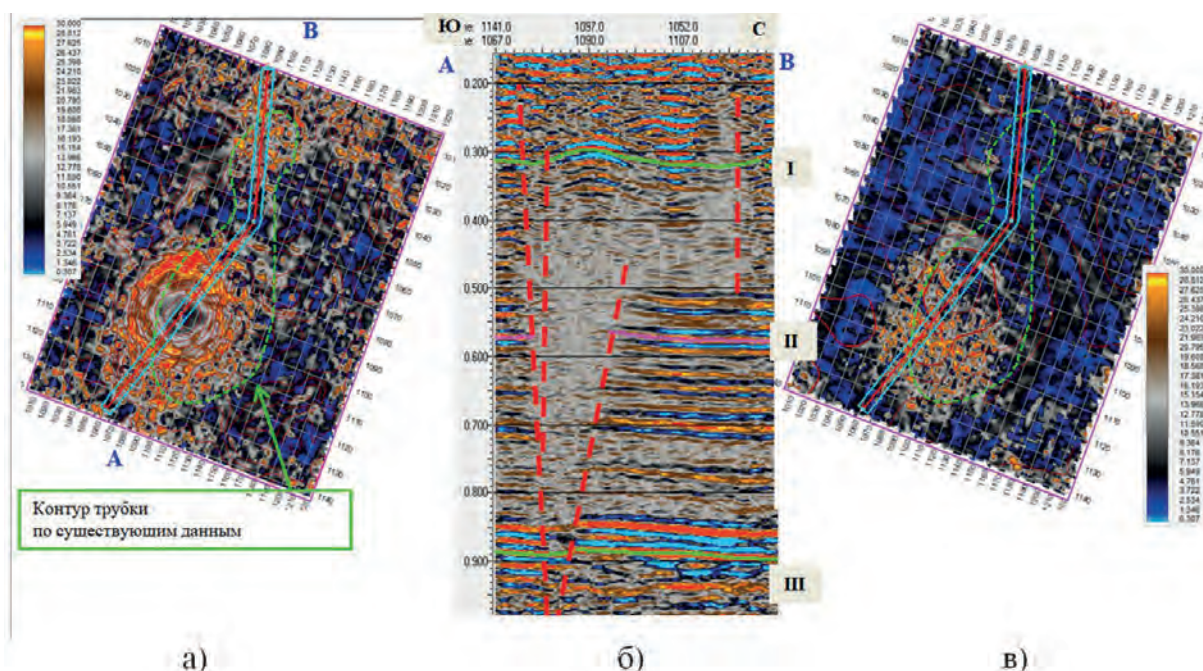
Основное тело трубки выделяется в южной части на временах $\sim 0.32 \div 0.85$ с. Наблюдается смещение тела на запад

относительно контура по архивным данным. На уровне времен 0,9 с фиксируются тектонические нарушения. Впервые установлено, что северная трубка не имеет отдельного корня, а является спутником (боковым кратером) южной трубки. Зона отсутствия корреляции начинается значительно выше по разрезу (0.2-0.5 с) и не перекрыта выдержанными отражениями в верхней части.



▲ Рис. 9. Карта параметра Confidence вдоль ОГ II и вертикальный срез куба амплитуд по линии A-B.

▼ Рис. 10. Карты параметра Dip вдоль горизонтов на временах 0,3 с (а), 0,57 с (в) и разрез по линии A-B (б).



На вертикальных срезах куба вдоль длинной оси трубки хорошо видна вертикальная «зона» нарушения когерентности, различие в проникновении тела трубки вверх и вниз по разрезу в глубине залегания кровли между южной и северной частями, возможные тектонические нарушения, сопровождающие внедрение кимберлита.

Преимущества сейсморазведки МОГТ 3D (по результатам проведенных работ):

- объёмное изображение локального участка недр, позволяющее даже на этапе предобработки оконтуривать тело трубки в пространстве и определять её морфологию (в данном случае – смещение южной части на запад и вероятный боковой кратер на севере);
- высокая разрешающая способность по глубине и латерали, благодаря высокой кратности и плотной системе наблюдений;
- прямая визуализация зон нарушения когерентности отражений, ослабления энергии записи и изменения параметров атрибутов (RMS-амплитуды, Confidence, Dip), что даёт структурно-вещественную информацию;
- надёжное определение глубины залегания кровли и подошвы трубки при проведении стратиграфической привязки и наличии скоростных законов для перевода из времени в глубину, а также связанных тектонических нарушений.

Для детального оконтуривания, уточнения пространственного положения и морфологии кимберлитовой трубки сейсморазведка МОГТ 3D значительно превосходит другие геофизические методы. При поисках погребённых кимберлитовых тел в условиях Зимнебережного алмазоносного района применение высокоплотной 3D-сейсморазведки позволит существенно повысить эффективность последующего бурения и снизить геологические риски. Оптимальной стратегией при выполнении геологоразведочных

работ является комплексное применение электро-, магниторазведки и сейсморазведки МОГТ 3D.

Опытно-методические работы, проведенные на объекте «В», показывают хорошую эффективность МОГТ 3D при решении задач оконтуривания кимберлитовых тел. Полученные предварительные результаты подтверждают высокую разрешающую способность методики работ при использовании экологически щадящих источников возбуждения. Результаты демонстрируют целесообразность применения малогабаритной техники и пиропорохового источника возбуждения при оконтуривании кимберлитовых трубок. Высокая кратность и плотная система наблюдений позволяет оконтурить даже относительно небольшие тела. Особенности волнового поля (высокий фон низкоскоростных помех, в том числе поверхностных волн-помех), типичные для торфяно-глинистого разреза, успешно подавлены в процессе обработки данных.

В 2026 году разработанная технология и основные результаты выполненных работ были представлены на IV ежегодном Форуме «Арктика – Регионы», который проходил 13–14 августа в Архангельске. Методика может быть рекомендована к включению в комплекс геологоразведочных работ при поисках погребённых коренных месторождений алмазов на площадях Зимнебережного района и других территорий древних платформ со сходными геолого-поисковыми обстановками.

Литература

1. Данилов К.В. Выявление геологических неоднородностей в верхней части земной коры на основе анализа низкочастотных микросейсм (на примере Архангельской области). Диссертация на соискание ученой степени кандидата фи-

- зико-математических наук. Архангельск, 2017. – 181 С.
2. Кротков В.В., Кудрявцева Г.П., Богатилов О.А. и др. Новые технологии разведки алмазных месторождений. – М.: ГЕОС, 2001. – 310 С.
3. Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Иерархический ряд проявлений щелочно-ультраосновного магматизма Архангельской алмазоносной провинции. Их отражение в геолого-геофизических материалах. – Архангельск: ИПП «Правда Севера», 2004. – 283 с.
4. Опытнo-методические сейсмoразведочные работы МОГТ 3D при поисках кимберлитовых тел в Зимнебережном алмазоносном районе. Отчет СП №15 ПАО «Пермнефтегеофизика», 2026.
5. Пенделяк Р.Н. Веричев Е.М., Головин Н.Н. Месторождение им. В.Гриба: геологическое строение и алмазоносность // Горный журнал, 2014, №3, стр.16-21.
6. Столбова Т.А., Максимкина Л.В. Опыт проектирования сейсмических работ 3D для разведки малоразмерных алмазоносных объектов в Республике Саха (Якутия) // Материалы конференции «Геомодель – 2012». Россия, г. Геленджик, 2012 г.
7. Устинов В.Н., Неручев С.С., Загайный А.К. и др. Алмазоносность севера Восточно-Европейской платформы.- СПб.: Наука, 2021.- 410 С.
8. Устинов В.Н., Антащук М.Г., Загайный А.К. и др. Перспективы выявления месторождений алмазов на севере Восточно-Европейской платформы // Руды и металлы, 2018, №1. С-11-26.
9. M. Urosevic. Surface and borehole seismic methods to delineate kimberlite pipes in Australia.-TLE, July 2000.

УДК 550.834.05

Техногенные помехи как источник сейсмических колебаний

■ Ягудин И.Р., Гафаров Р.М., Сираев И.А., АО «Башнефтегеофизика», г. Уфа.

Аннотация. Исследована возможность использования техногенных помех от движущегося транспортного средства в качестве пассивного источника сейсмических колебаний при работах методом МОГТ-2D. На основе непрерывной регистрации и кросскорреляционной обработки восстановлены волновые поля, содержащие поверхностные и отражённые волны. Сопоставление с данными импульсного источника КЭМ подтвердило возможность выделения отражающего горизонта и построения временного разреза. Показана перспективность применения пассивных источников на участках, где использование активных источников затруднено или невозможно.

Ключевые слова: техногенные помехи; пассивная сейсморазведка; сейсмическая интерферометрия; кросскорреляционная обработка; МОГТ-2D; отражённые волны; сейсмические колебания.

Введение

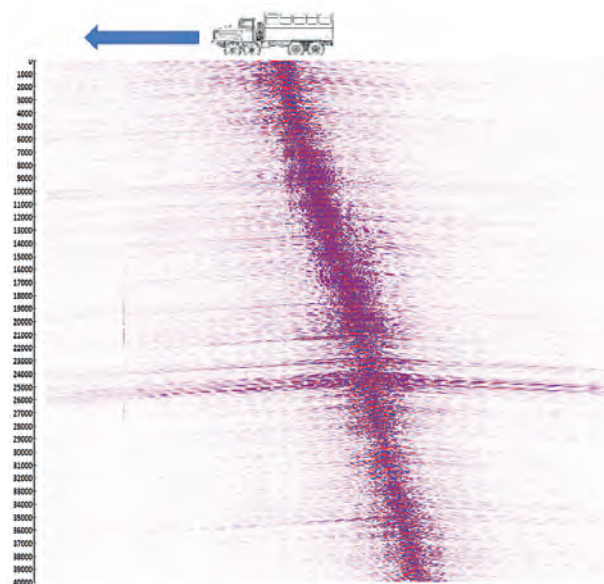
Развитие вычислительных мощностей современных компьютерных систем и совершенствование беспроводных регистрирующих приборов создают предпосылки для рассмотрения пассивных источников возбуждения упругих колебаний в качестве метода расширения объёма получаемой сейсмической информации, в том числе на участках, где ранее её регистрация была технически затруднена или невозможна.

На сегодняшний день применение пассивных методов возбуждения ограничивается преимущественно задачами микросейсмического мониторинга и пассивного метода поверхностных волн (MASW), тогда как их использование для стандартных работ методикой МОГТ остаётся малоизученным. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования применимости пассивного источника возбуждения для проведения сейсморазведочных работ методом МОГТ-2D. В качестве источника возбуждения упругих колебаний использовалось транспортное средство УРАЛ, генерирующее импульсное воздействие в процессе движения по профилю.

Опытные работы

Для опытных работ разматывали 2D профиль, протяженностью 1 км. Шаг между пунктами приема (ПП) составлял 2 м, регистрация происходила двухприборными каналами Solo(5Гц). Расположение пунктов возбуждения (ПВ) и пунктов приема (ПП) совпадало. Всего количество пассивных ПВ по профилю составило 500 шт. Непрерывная регистрация велась около 4 ч. Автомобиль двигался вдоль опытного профиля с постоянной скоростью (рис.1).

▼ Рис. 1. Волновое поле при движении автомобиля по профилю с постоянной скоростью.





◀ Рис. 2.
Схема опытного
профиля и уста-
новка бревна.

Для усиления импульсного воздействия по профилю дороги использовали 4 заглублённых бревна (рис. 2). Их расположение соответствовало типовым неровностям покрытия, а контакт колёс с ними генерировал ударную нагрузку.

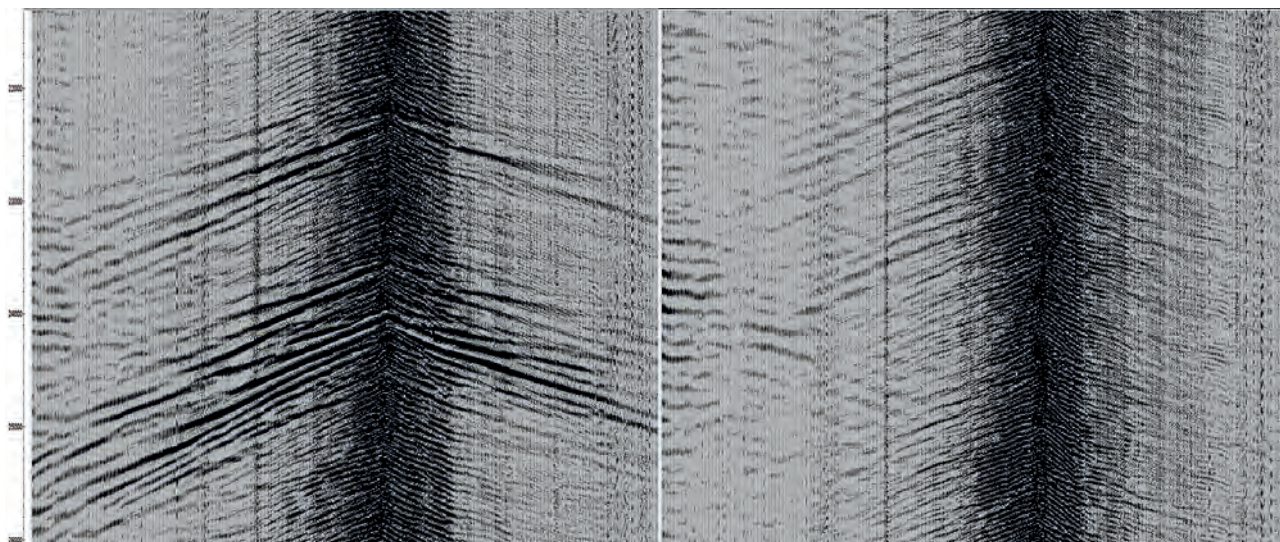
Формирование волновых полей

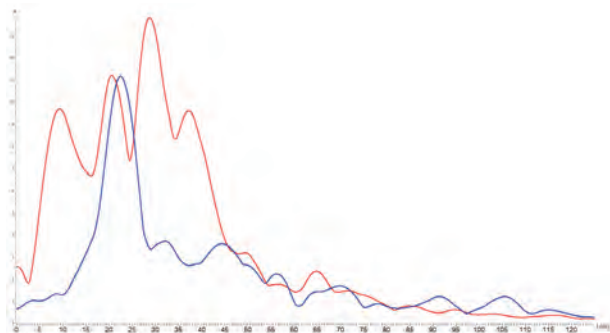
На рисунке 3 показаны характерные волновые поля, зарегистрированные при проезде автомобиля через бревно и движении его по участку без бревен. В момент удара передними и задними колесами формировался импульс, который визуально распространялся на всю приемную линию. Импульс, созданный движением автомобиля по дороге меж-

ду брёвнами, визуально проявляется слабее и зависит от степени неровности.

На рисунке 4 представлены характерные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) сигналов, зарегистрированных от пассивных источников возбуждения, соответствующих двум режимам движения транспортного средства: удару колёс о препятствие (бревно) и проезду участка профиля без препятствий. Анализ полученных спектров показывает, что при импульсном ударном воздействии ширина спектра существенно превышает соответствующий показатель для сигнала, зарегистрированного при движении по ровному участку. При этом нижняя граница спектра импуль-

▼ Рис. 3. Слева волновое поле при проезде автомобиля через бревно. Справа волновое поле при движении по участку без бревен.





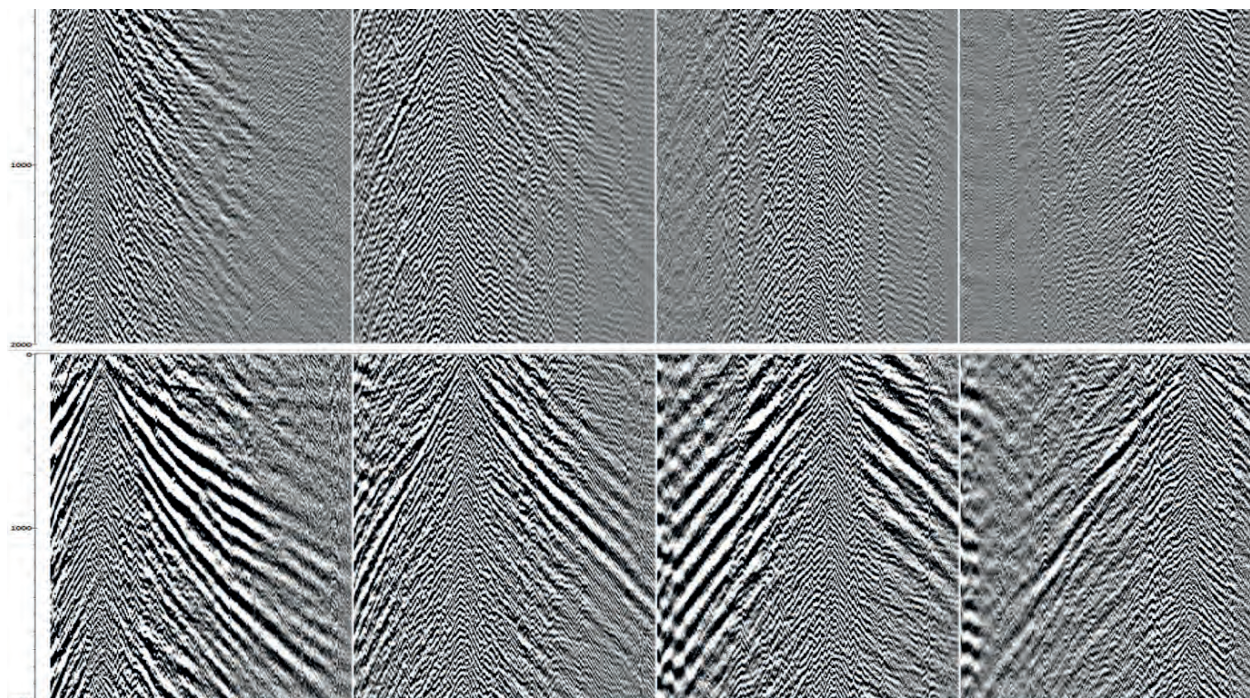
▲ Рис. 4. Красный график характеризует АЧХ сигнала при ударе о бревно. Синий график характеризует АЧХ сигнала при движении по ровному полю.

сного сигнала смещена в область более низких частот и составляет порядка 5 Гц, что свидетельствует о более широкополосном характере возбуждения при ударном взаимодействии по сравнению с колебаниями, генерируемыми при равномерном движении транспортного средства.

Для получения и последующего анализа волновых полей непрерывная запись разделили на временные интервалы продолжительностью 4 секунды. Из общего объема записи для дальнейшей обработки использовалось 30 минут

ввиду ограниченности доступных вычислительных ресурсов. На следующем этапе для каждого временного сегмента выполнена кросскорреляционная обработка волнового поля относительно сейсмической трассы, зарегистрированной приёмником, расположенным непосредственно на месте рассматриваемого пассивного ПВ. В результате для каждого пассивного ПВ получено 450 кросскорреляционных волновых полей. Таким образом, для каждого положения пассивного ПВ восстановлено волновое поле, характеризующее отклик среды на импульсный источник возбуждения. Полученный результат позволяет реконструировать функцию, описывающую распространение сейсмических волн между двумя приёмниками, без использования активных источников возбуждения, что соответствует методологии пассивной сейсмической интерферометрии. Характерные кросскорреляционные волновые поля, полученные в результате данной процедуры, представлены на рисунке 5.

▼ Рис. 5. Сверху показаны кросскорреляционные волновые поля при движении автомобиля через 4 ПВ без бревен. Снизу показаны кросскорреляционные волновые поля при движении автомобиля через 4 ПВ с бревном.



Анализ волнового поля

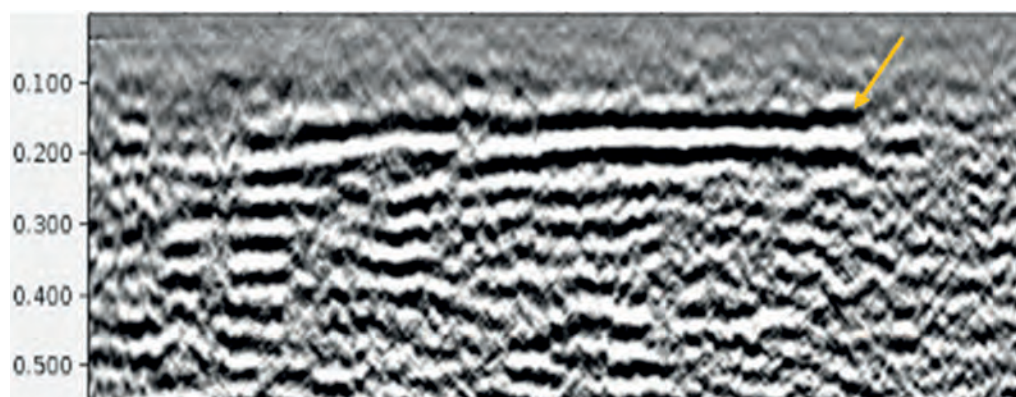
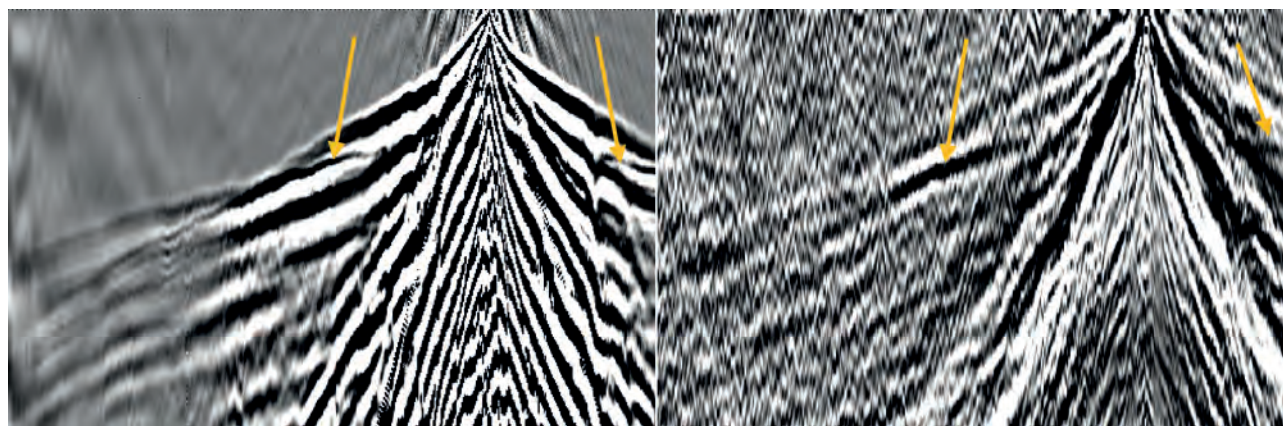
На одном из пунктов возбуждения (ПВ) выполнена регистрация с использованием колесного электромагнитного импульсного источника колебаний (КЭМ) при однократном накоплении сигнала. На том же ПВ получено кросскорреляционное волновое поле, сформированное при проезде автомобиля через бревно. Полученные волновые поля представлены на рисунке 6. Сопоставление указанных волновых полей позволило выделить годограф отражённой волны. Волновое поле, полученное от активного источника КЭМ, использовалось в качестве эталонного, поскольку на нём годограф отражённой волны прослеживался достаточно отчётливо. Для повышения чёткости выделения отражённой волны на волновом поле, полученном от пассивного источника, применены стандартные процедуры обработки сейсмических данных. В результате её выполнения

отражённая волна на кросскорреляционном волновом поле стала прослеживаться столь же отчётливо, как и на эталонном волновом поле от источника КЭМ. Полученный результат позволил предположить, что кросскорреляционные волновые поля содержат не только цуг поверхностных волн, но и информативные отражённые волны от неглубоко залегающих горизонтов. Данное предположение послужило основанием для построения временного разреза методом МОГТ-2D по совокупности полученных кросскорреляционных волновых полей.

По полученным волновым полям построен полевой временной разрез, представленный на рисунке 7. На временном разрезе, соответствующем данным от пассивного источника, отчётливо выделяется верхний отражающий горизонт.

Данный горизонт характеризуется преобладанием низкочастотной составляющей спектра, что обусловлено осо-

▼ Рис. 6. Стрелками показана отраженная волна. Слева волновое поле от импульсного источника КЭМ. Справа обработанное кросскорреляционное волновое поле от пассивного источника с бревном.



◀ Рис. 7. Временной разрез, полученный с использованием пассивного источника.

бенностями частотной характеристики излучаемого сигнала.

Выводы

Результаты, представленные в настоящей работе, расширяют существующие представления о пассивных источниках сейсмических колебаний и позволяют по-новому взглянуть на процесс получения полевого сейсмического материала.

Применение пассивных источников открывает возможности для проведения сейсморазведочных работ в зонах, где использование активных источников возбуждения — взрывных, вибрационных или импульсных источников достаточной энергии — затруднено или невозможно. При этом наличие в исследуемой зоне техногенных помех, обусловленных работой инженерных коммуникаций или движением автотранспорта, может рассматриваться не как ограничивающий фактор, а как дополнительный источник сейсмической информации. Следует также учитывать, что регистрация данных при использовании пассивных источников должна осуществляться в режиме непрерывного накопления. Это обуславливает необходимость применения беспроводных регистрирующих систем как наиболее целесообразного технического решения для организации полевых наблюдений. При этом снижение затрат, связанных с возбуждением упругих колебаний, сопровождается увеличением временных и вычислительных затрат на этапе обработки получаемых данных, что требует привлечения дополнительных ресурсов для их обработки.

Литература

1. Пассивная сейсмическая интерферометрия с применением DAS для картирования скоростных неоднородностей на аварийном участке Верхнекамского месторождения / А. В. Чугаев, М. В. Тарантин, С. К. Кирсанов // Инженерная и рудная геофизика 2026 / Инженерная и рудная геология 2026 : Сборник материалов научно-практической конференции и выставки, Санкт-Петербург, 20–23 апреля 2026 года. — Москва: ООО "Геомодель Развитие", 2026. — С. 343–346. — EDN QPLZWD.

2. Пассивный MASW / И. Р. Ягудин, Р. М. Гафаров, А. Р. Сахабутдинов // Санкт-Петербург 2026. Геонауки: от современных вызовов до решений, открывающих будущее: Сборник материалов 12-й международной геолого-геофизической конференции, Санкт-Петербург, 20–23 апреля 2026 года. — Москва: ООО "Геомодель Развитие", 2026. — С. 136–140. — EDN CCXYBU.

УДК 550.834.05

Разработка и обоснование камеральной методики подавления вторичных гармоник в технологии высокопроизводительной вибрационной сейсморазведки Slip-Sweep

■ Кибальчич А.С., Крайнова А.К., Коробкин В.С., ООО "СЖЖ Восток", г. Москва.

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема ухудшения качества сейсмических материалов при использовании технологии вибрационной сейсморазведки Slip-Sweep. Предложен новый камеральный способ подавления гармонических искажений, основанный на расчете мгновенных частот помех, контролируемой декорреляции и совместной многопараметрической адаптивной фильтрации в частотно-временной области на уровне виброграмм.

Ключевые слова: вибрационная сейсморазведка, Slip-Sweep, вторичные гармоники, нелинейные искажения, адаптивное вычитание.

Введение

Современный этап геологоразведочных работ (ГРП) в сложных климатических условиях арктических и северных регионов России характеризуется жесткими требованиями к сокращению циклов полевых работ и оптимизации их стоимости. Внедрение технологии Slip-Sweep позволило за ограниченные временные сроки полевых сезонов отработать обширные площади с использованием высокоплотных систем наблюдения. Это привело к оперативному получению геолого-геофизической информации для проектирования ключевых инфраструктурных объектов.

Однако широкое применение Slip-Sweep сопряжено со специфическими ограничениями волнового поля. Одним из них является регистрация интенсивных вторичных гармоник, причем основная проблема заключается не в самом их наличии, а в том, что вторичные гармоники, генерируемые последующим источником, накладываются непосредственно на полезный сигнал текущего источника и искажают его. Возникающие гармонические искажения существенно усложняют динамическую интерпретацию сейсмических данных и снижают потенциал метода при решении прикладных геологических задач.

Целью настоящей работы является разработка, теоретическое обоснование и апробация алгоритма, обеспечивающего

эффективное подавление энергии вторичных гармоник без искажения полезного сигнала.

Физическая природа и характер проявления гармонических искажений в данных Slip-Sweep

Методика Slip-Sweep – это высокопроизводительный метод полевой сейсморазведки, основанный на использовании перекрывающихся вибрационных свип-сигналов. Вибровозбуждения на разных ПВ выполняются с определенной задержкой по времени (slip-time), поэтому одновременно работающие вибраторы излучают упругие колебания на разных частотных диапазонах. Теоретически, за счет того, что в каждый дискретный момент времени частоты работающих источников различаются, их сигналы не интерферируют между собой. Это должно обеспечивать их полную независимость и корректное разделение при последующей корреляции виброграмм с соответствующими пилотными свип-сигналами.

Однако на практике в системе «вибратор-грунт» всегда возникают сильные нелинейные искажения. Они связаны с неоднородностью грунта и техническими особенностями самой вибрационной установки. Данные искажения наиболее интенсивны на низких частотах и приводят к генерации вторичных гармоник, частоты

которых кратны основной частоте опорного сигнала. Так, при генерации свипа в диапазоне 2-40 Гц частотный диапазон второй гармоники составит уже 4-80 Гц, третьей – 6-120 Гц, а четвертой – 8-160 Гц.

При работе одиночного источника его собственные высшие гармоники не создают проблем: после корреляции они смещаются в область отрицательных времен и не учитываются при дальнейшей обработке. Однако в условиях Slip-Sweep ситуация меняется: методы, направленные на подавление собственных гармоник одиночного источника, здесь бессильны, так как природа помех становится принципиально иной. Главная проблема Slip-Sweep – это взаимное наложение волновых полей: вторичные гармоники от последующего ПВ накладываются на фундаментальный сигнал текущего ПВ прямо во время полевой регистрации. В результате на конкретных временах и частотах траектории этих помех пересекаются с полезными отражениями, искажая запись.

На сейсмических данных эта проблема проявляется в двух формах:

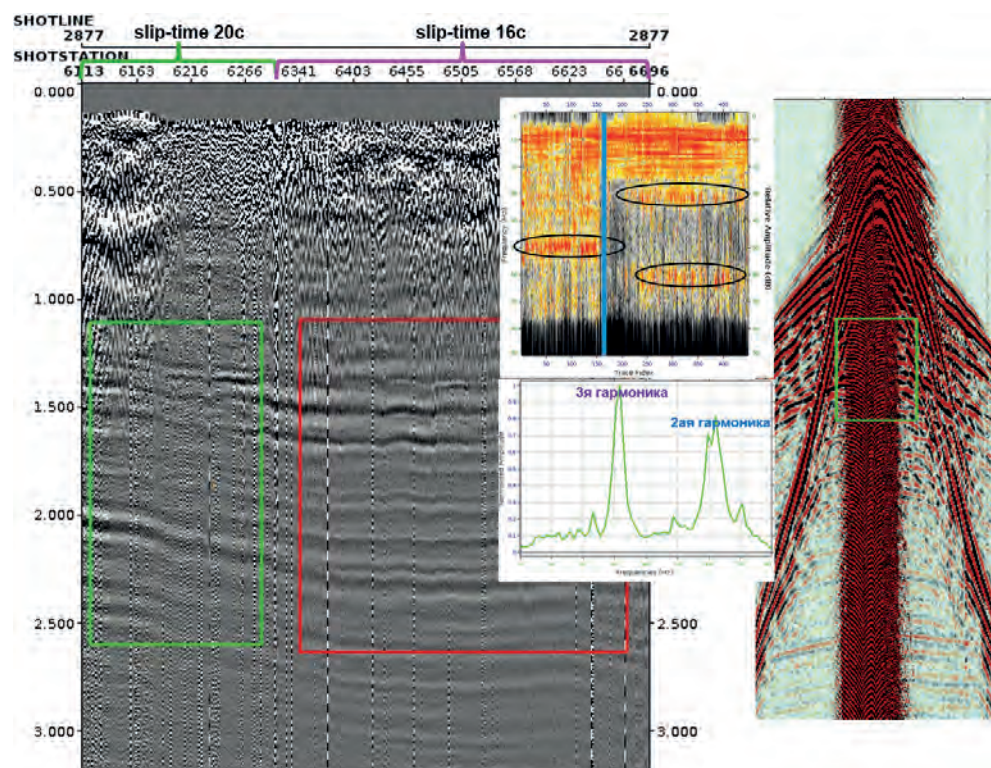
На уровне сырых данных: наблюдаются локальные всплески амплитуд на опре-

деленных частотах целевого интервала (в нашем случае, наиболее часто в районах 30, 40 и 50 Гц). Они локализуются преимущественно на ближних удалениях и вносят вклад в формирование так называемого амплитудного «столба». Важно отметить, что природа этого «столба» на ближних удалениях носит комплексный характер. Это не просто следствие работы метода Slip-Sweep, а результат интерференции самых разных типов волн. В этой зоне перекрываются мощные поверхностные волны (Рэлея, Лява, ground-roll), техногенные шумы самой вибрационной установки, а также продольные и поперечные компоненты, вызванные эффектом направленности источника. Вторичные гармоники от последующих свипов накладываются на этот фон, становясь ключевым деструктивным фактором для полезной записи (рис. 1).

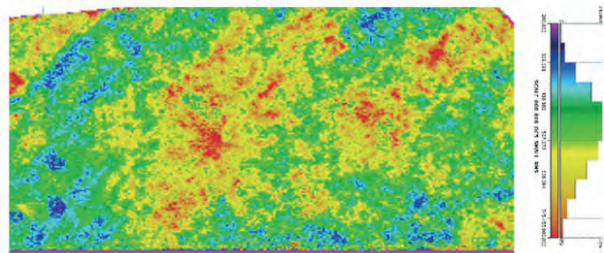
На этапе обработки: после различных этапов обработки остаточная энергия интерферирующих гармоник транслируется в яркую линейную «полосчатость» амплитудного поля в целевых окнах (особенно выраженную в полосах 16–32 и 32–64 Гц). Эта аномальная «полосча

► Рис. 1.

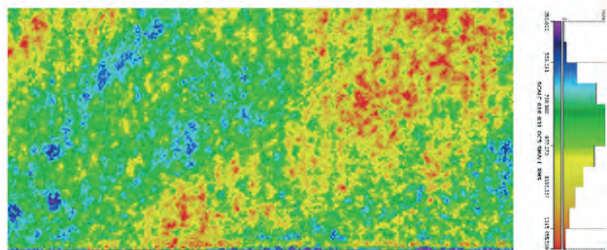
Проявление гармонических искажений на сырых данных.



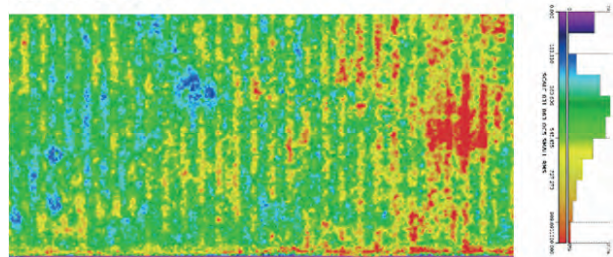
Частоты 8-16 Гц



Частоты 16-32 Гц

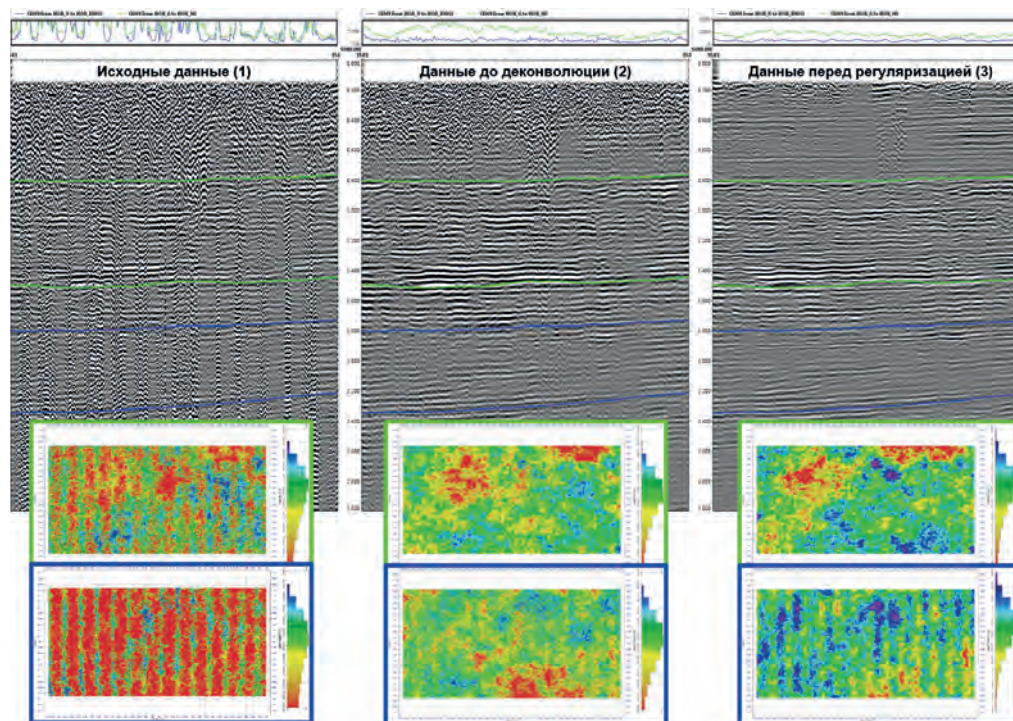


Частоты 32-64 Гц



▲ Рис. 2. Проявление гармонических искажений после различных этапов обработки на картах RMS-амплитуд.

тость» коррелирует латерально с пространственной схемой проходки вибрационных групп по площади (рис. 2).



◀ Рис. 3. Недостаточная эффективность стандартного графа обработки для подавления вторичных гармоник

Ограниченность стандартных подходов к шумоподавлению

Применение стандартных процедур шумоподавления для борьбы с вторичными гармониками демонстрирует низкую эффективность. На ранних этапах обработки энергия регулярного фона помех визуально нивелируется, и карты RMS-амплитуд кажутся однородными. Однако по мере прохождения графа обработки становится очевидным, что влияние вторичных гармоник не было компенсировано, и негативные эффекты проявляются повторно. При этом характер проявления гармоник инвертируется, преобразуясь из областей повышенных амплитуд в выраженные зоны пониженных амплитуд. Это искажает динамическую особенность волнового поля, снижая достоверность последующих результатов интерпретации (рис. 3).

Теоретико-математические основы предлагаемого камерального метода

Для преодоления ограничений существующих процедур авторами разработан способ целенаправленного моделирования и адаптивного вычитания помех, не требующий привлечения сиг-

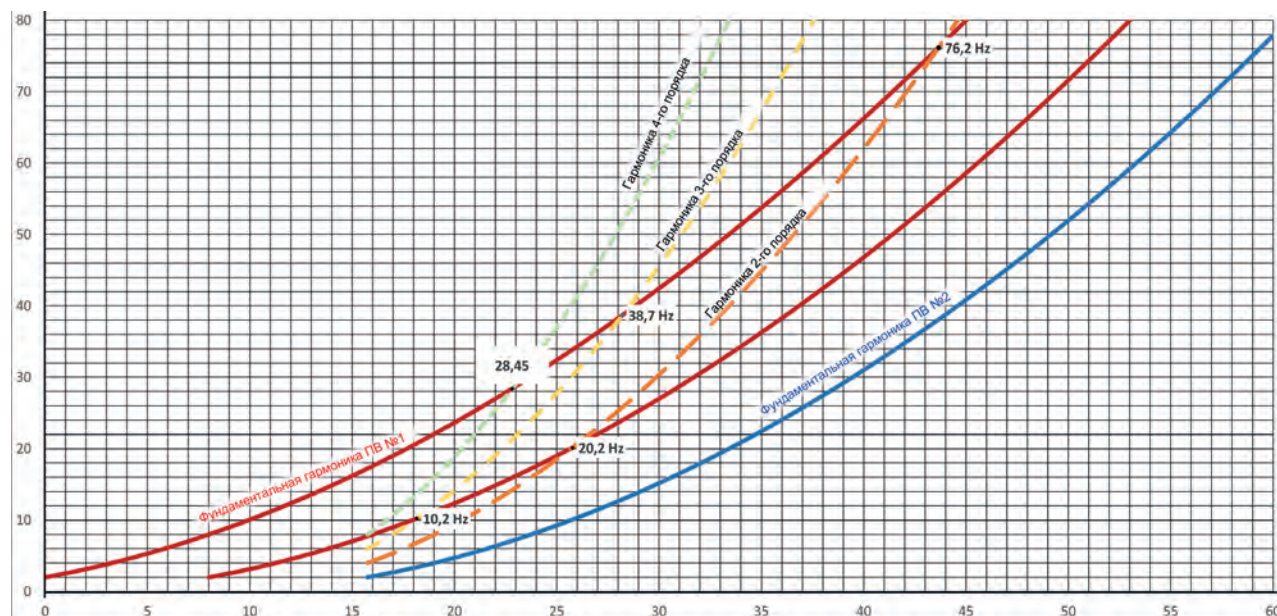
налов Ground Force и реализуемый полностью на вычислительных мощностях обрабатывающего комплекса g2. Метод включает три последовательных этапа.

Этап 1. Аналитическое параметрическое моделирование траекторий гармоник: в исходных данных известны тип свип-сигнала, диапазон рабочих частот, длительность развертки, а также геометрия расстановки и точные временные задержки между соседними ПВ (slip-time). Этого набора параметров достаточно, чтобы однозначно восстановить, как ведёт себя во времени частота не только основного свипа, но и кратных гармоник любого порядка от следующего ПВ в любой точке наблюдения. Для каждого ПВ строятся частотно-временные развертки фундаментальной компоненты и вторичных гармоник с учётом известных задержек между возбуждениями. Это позволяет задать детерминированные траектории пересечения гармоник последующих источников с фундаментальным сигналом текущего источника на уровне виброграмм (рис. 4). Формально положение гармонических помех в целевом временном интервале может быть задано двумя эквивалентными способами.

В аналитическом варианте задают-

ся законы частотной развертки обоих свип-сигналов и решается система уравнений, описывающая моменты их взаимного пересечения в начале и в конце окна анализа. Полученные граничные точки (время и частота совпадения гармоник) далее используются для построения корреляционных траекторий на коррелограмме и расчёта мгновенной частоты модели шума. В операционном варианте те же траектории восстанавливаются непосредственно из корреляционных соотношений: выполняется корреляция пилотного свип-сигнала и синтетического сигнала гармоники N-го порядка, что даёт частотно-временную развертку модели помехи. Таким образом, параметры свипа и схема возбуждений позволяют как аналитически, так и через корреляционные операторы однозначно задать положение гармонических помех сначала на виброграмме, а затем корректно перенести эту информацию в область коррелограмм. Далее эти траектории последовательно переносятся в область коррелограмм с помощью корреляции. В результате формируется многомерная кинематическая матрица, где для гармоники каждого порядка заданы точные границы и положение

▼ Рис. 4. Графическое представление вторичных гармоник для Slip-time 16с в области виброграмм.



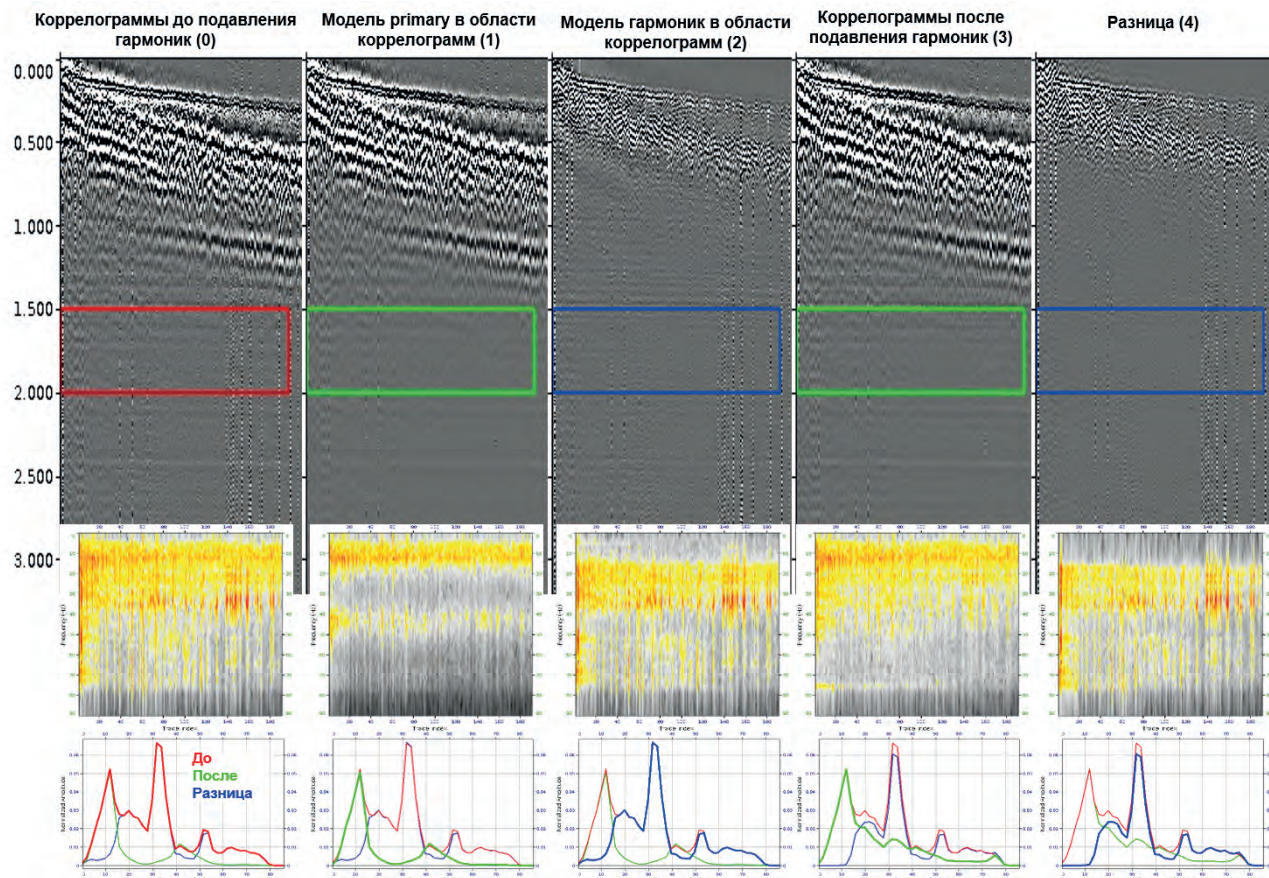
гармонических помех в плоскости «время-номер трассы» коррелограмм. Такие матрицы используются как бинарные маски при переходе в частотную область: в спектральном представлении данных обнуляются именно те зоны, где, согласно расчёту, должна проявляться энергия соответствующей вторичной гармоник.

Этап 2. Перевод данных из области коррелограмм в область виброграмм: прямое спектральное вычитание рассчитанной модели помехи непосредственно из коррелограммы возможно, но имеет явный недостаток: в зонах частотного наложения полезного сигнала и шума прямое вычитание неизбежно приводит к «утечке» сигнала. Для сохранения полезной компоненты целесообразно использовать комбинированный подход, включающий адаптивные и частотно-временные методы обработки. Для минимизации утечек и восстановления полезного сигнала предлагается выполнять адаптивное вычитание модели гармоник на уровне виброграмм. Применение виброграмм обосновано тем, что они представляют собой естественную частотно-временную развертку сигнала, позволяющую локализовать энергетические выбросы гармонических составляющих как по трассе, так и по времени, а также редактировать модели с учётом условий полевой регистрации, включая ограничения по длительности свип-сигнала и slip-time. Перевод данных из области коррелограмм (КГ) обратно в область виброграмм (ВГ) реализуется посредством процедуры декорреляции (деконволюция по пилотному свипу с отрицательной фазой). Безопасность и математическая обратимость данной процедуры подтверждена сквозным тестом (КГ-ВГ-КГ), продемонстрировавшим околонулевую разницу амплитудных спектров и полную сохранность волнового поля. Отдельно рассмотрен случай восстановления виброграммы из ус-

ченной коррелограммы. Несмотря на наличие ограничений по длине, анализ спектральных характеристик, полученных в различных временных окнах, показывает, что гармонические компоненты, попадающие в зону корреляции, сохраняются и могут быть эффективно разделены в области виброграмм.

Этап 3. Совместная адаптация моделей вторичных гармоник и модели сигнала: на данном этапе используются результаты предыдущих шагов. В области коррелограмм формируются исходные модели гармоник различных порядков с применением фильтрации по матрицам (компонента «модель гармоник»). Эти модели согласованы с положением помех, определённым на этапе параметрического моделирования. Параллельно формируется модель полезного сигнала, свободная от гармонических искажений и определяемая как арифметическая разность исходных данных и модели гармоник. Далее, в соответствии с процедурой этапа 2, модель гармоник, модель сигнала и исходные данные переводятся в область виброграмм посредством декорреляции. При этом сохраняется согласование с частотно-временными траекториями, что обеспечивает корректную локализацию помех. В области виброграмм выполняется совместная адаптация трёх компонент: исходных данных, модели гармоник и модели сигнала. Такой подход позволяет стабилизировать оценку амплитуд гармоник, минимизировать утечку полезного сигнала в модель гармоник и учесть условия полевой регистрации (длительность свип-сигнала, slip-time).

В результате формируется адаптированная модель гармонических искажений, согласованная с аналитически рассчитанными траекториями и не содержащая полезного сигнала. Полученная модель гармоник может быть вычтена как на уровне виброграмм, так и после



▲ Рис. 5. Результаты применения методики на уровне коррелограмм на реальных данных.

обратного перехода в область коррелограмм, что обеспечивает гибкость применения методики и согласованность результатов обработки.

Результаты применения методики на реальных данных

Разработанная методика прошла апробацию на шести лицензионных участках. Контроль качества выполнялся на различных стадиях обработки и включал анализ коррелограмм, сейсмограмм ОПВ, разрезов ближних удалений, карт среднеквадратических амплитуд и итоговых AVO-атрибутов.

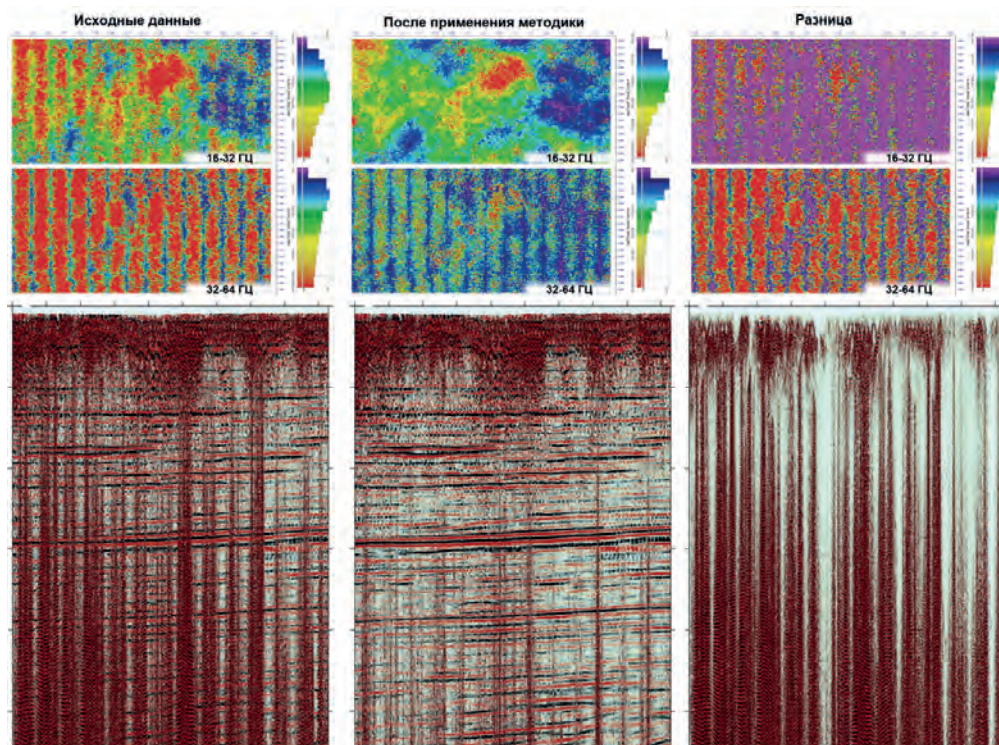
В области коррелограмм после применения методики фиксируется устранение проявлений гармонических искажений, что подтверждается сопоставлением частотных характеристик. На сейсмограммах ОПВ в разностном поле преимущественно выделяются гармоники высших порядков, что свидетельствует о корректном подавлении помех при сохране-

нии полезного сигнала (рис. 5).

Сопоставление разрезов ближних удалений и карт среднеквадратических амплитуд, рассчитанных в целевом интервале, показывает снижение уровня артефактов после подавления (рис. 6). На финальных AVO-атрибутах без применения методики на картах интерсепта, градиента и флюид-фактора наблюдается «полосчатость», тогда как после применения методики этот эффект компенсируется, что приводит к повышению качества итоговых материалов и увеличивает их информативность для последующей интерпретации (рис. 7).

Заключение

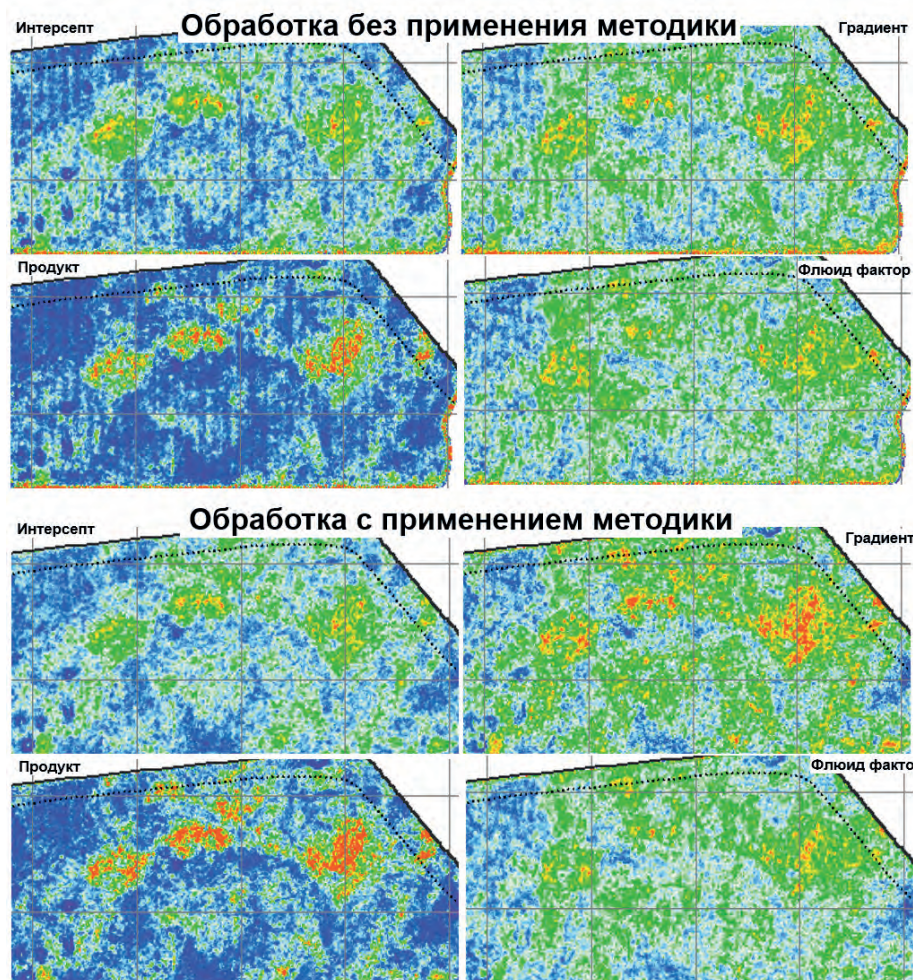
Системный анализ ограничений высокопроизводительной вибрационной сейсморазведки Slip-Sweep показал, что ключевой причиной деградации динамических параметров записи является интерференция полезного сигнала со вторичными гармониками высших по-



◀ Рис. 6. Результаты применения методики на разрезах ближних удалений и картах RMS-амплитуд.

рядков с соседних пунктов возбуждения. Стандартные процедуры шумоподавления обладают эффектом маскировки,

скрывая регулярную помеху на ранних этапах графа обработки и транслируя искажения в амплитудные атрибуты («по-



◀ Рис. 7. Сравнение карт AVO-атрибутов, полученных по данным без подавления вторичных гармоник и после применения предложенной методики.

лосчатость» карт RMS-амплитуд и AVO-атрибутов), что снижает достоверность динамической интерпретации.

В работе предложен камеральный метод целенаправленного подавления энергии вторичных гармоник, не требующий использования сигналов Ground Force и полностью реализуемый в области обработки. Разработанная методика параметрического моделирования траекторий гармоник, декорреляции и многомасштабной адаптации в области виброграмм обеспечивает удаление вторичных гармоник при сохранении полезного сигнала.

Показано, что алгоритм позволяет формировать адаптированную модель гармонических искажений, согласованную с теоретически рассчитанными траекториями и не содержащую полезной компоненты.

Результаты производственного внедрения с разными параметрами свип-сигналов подтвердили инвариантность алгоритма и существенное повышение достоверности финальных материалов.

Предлагаемая методика не имеет ограничений по параметрам свип-сигналов, качеству полевых данных, универсальна и может свободно применяться для любого материала, полученного по технологии Slip-Sweep. Это позволяет расширить область практического применения Slip-Sweep и повысить общую экономическую эффективность геолого-разведочных проектов в сложных условиях высокоплотных систем наблюдения.

Литература

1. Денисов М. С., Зыков А. А. Повышение разрешающей способности вибросейсмического сигнала за счет использования гармоник // Геология и геолого-разведочные работы. – 2019. – № 1. – С. 72–83.

2. Денисов М. С., Зыков А. А. Разделение сигнала и гармоник в невзрывной сейсморазведке с амплитудно- и нелинейно-частотно-модулированными сигналами // Геофизические технологии. – 2023. – № 3. – С. 69–83. – DOI: <https://doi.org/10.18303/2619-1563-2023-3-69>.

3. Долгих Ю. Н. Оценка нелинейных искажений при вибрационной сейсморазведке // Технологии сейсморазведки. – 2012. – № 2. – С. 45–54.

4. Долгих Ю. Н., Гуляев Д. В., Соколовский В. В., Кузнецов В. И. Обработка виброграмм как способ повышения качества результатов высокопроизводительной вибросейсморазведки // Георесурсы. – 2024. – Т. 26. – № 3. – С. 27–32. – DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2024.3.4>.

5. Чернышов Г. С., Литвиченко Д. А., Стеклёнов В. В., Дучков А. А. Анализ эффективности методов подавления помех вибрационных данных // Геофизические технологии. – 2024. – № 3. – С. 17–25. – DOI: <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-3-17-25>.

УДК 550.83.05:004.85

Автоматизация контроля данных электротомографии и магниторазведки с применением искусственного интеллекта

■ Кричинский А.К.¹, Буддо И. В.^{1,2}, Поспеев А. В.¹, Черных А.А.¹

¹ Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск.

² Сибирская школа геонаук ИрННТУ, г. Иркутск.

Аннотация. При совместной интерпретации электротомографии и магниторазведки ошибки измерений и неустойчивость обратной задачи могут привести к выделению ложных геологических объектов. Цель исследования - оценить возможности искусственного интеллекта для автоматизации контроля результатов инверсии с учётом того, как выявленные ошибки влияют на восстановленный разрез. В расчётном теоретическом кейсе для модели с зоной повышенной электропроводности и магнитной восприимчивости и немагнитной проводящей линзой получены синтетические электрические и магнитные отклики. Обнаружение ошибок инверсии методом случайного леса (Random forest) объединено со взаимным контролем измерений, повторной инверсией и оценкой устойчивости трансформаций магнитного поля. На модельных разрезах полнота обнаружения ошибок составила 91,3% против 77,4% у нормированного взаимного контроля. В демонстрационном кейсе исключение выявленных ошибок уменьшило погрешность предсказания незашумлённого электрического отклика с 6,50 до 1,40%, при этом немагнитная проводящая линза сохранилась в разрезе. Обучаемый контроль в таком варианте может использоваться для предварительного отбора результатов инверсии и объектов, требующих дополнительной проверки. В дальнейшем целесообразно верифицировать эффективность предложенной методики на полевых материалах.

Ключевые слова: искусственный интеллект, автоматизация, электротомография, магниторазведка, случайный лес, контроль качества, устойчивость инверсии, опасные геодинамические процессы.

Финансирование: Работа выполнена в рамках темы «Комплексная интерпретация геолого-геофизических данных при наземных и аэро-беспилотных исследованиях как основа для прогнозирования опасных геодинамических процессов при освоении недр и строительстве в природно-климатических условиях Российской Арктики и сопредельных территорий» Министерства науки и высшего образования РФ в молодежной лаборатории прогнозирования георисков ИЗК СО РАН.

Введение

Методы электротомографии и магниторазведки широко применяются в цикле геологоразведочных работ на рудные полезные ископаемые, а также при прогнозировании опасных геодинамических процессов: деградации многолетнемерзлых пород, разрушения бугров пучения, наблюдаемых на полуостровах Ямал и Гыдан, а также образования катастрофических провалов грунта. Выявление разломных зон и

непосредственно оруденений в геофизических полях является актуальной задачей. При картировании разломных зон необходимо выделить неоднородности разреза и установить, насколько надёжно они картируются при решении обратной задачи геофизических методов. Электротомография и магниторазведка дают сведения о разных свойствах среды: распределении удельного электрического сопротивления

и намагниченности. Их сочетание применяют при изучении тектонических нарушений и структурного контроля оруденения [1, 2, 5]. Однако простое совпадение аномалий ещё не подтверждает их природу, а геологически значимый объект может выделяться только одним методом.

Вместе с тем, геофизические данные всегда содержат погрешности ввиду влияния естественного и антропогенного шума, методических ошибок при проведении полевых работ. При многоэлектродных измерениях одни и те же электроды входят в разные установки, поэтому нарушение условий измерения способно затронуть целую группу отсчётов. А.А. Бобачев с соавторами [1] рассматривали ошибки, связанные с поляризацией электродов при их последовательном использовании в качестве питающих и приёмных. Но и удаление вероятно некондиционных значений требует обоснования: вместе с ошибкой можно потерять и полезный сигнал. При автоматической обработке выбранное правило распространяется на весь материал без просмотра каждого отсчёта записи.

Даже после контроля геофизических данных неоднозначность интерпретации сохраняется. D.W. Oldenburg и Y. Li [13] на синтетических примерах и материалах месторождения Century показали необходимость ограничивать интерпретацию глубиной исследования: часть структур модели, полученной по результатам инверсии, слабо проявляется в наблюдаемых геофизических полях. Хорошее совпадение рассчитанного поля с наблюдаемым само по себе не гарантирует достоверности выявления таких структур.

При обработке магнитных данных производные и фильтры также могут создавать основания для ошибочной интерпретации. Производные усиливают высокочастотный шум, а положение выделяемых границ зависит от выбранной трансформанты и свойств источника. Эти вопросы рассмотрены G.R.J. Cooper и D.R. Cowan при исследовании

фазовых фильтров и обобщённых производных потенциальных полей [8, 9].

Цель настоящего исследования – оценить возможности искусственного интеллекта для автоматизации контроля результатов инверсии с учётом того, как выявленные ошибки влияют на восстановленный разрез. В работе оцениваются полнота обнаружения ошибок по совокупности признаков и устойчивость восстановленных объектов при изменении условий инверсии. Использование синтетики даёт возможность отдельно выполнить контроль качества измерений и инверсии, поскольку истинное положение объектов и неискажённый (теоретический) отклик заданы априорно.

Материалы и методы

В электротомографии (ЭТ; ERT на рисунках) измеряют разность потенциалов на приёмной паре электродов при пропускании тока через питающую пару. Произведение отношения измеренной разности потенциалов к току на геометрический коэффициент определяет кажущееся удельное электрическое сопротивление. Инверсия этих данных позволяет восстановить распределение удельного электрического сопротивления (УЭС), зависящего от состава пород, флюида и порового пространства [1, 3, 11]. Магниторазведка регистрирует изменения магнитного поля, обусловленные неоднородностью магнитных свойств пород [6].

Схема автоматизации приведена на рис. 1. Измерение, признанное вероятно некондиционным одновременно методом случайного леса (Random forest) и обычным взаимным контролем с порогом 0,15, исключается из набора для проверочной инверсии. Если оценки расходятся, измерение отбирается для просмотра специалистом. Исходные отсчёты сохраняются вместе с основаниями исключения и версией классификатора.



▲ Рис. 1. Последовательность обучения классификатора, контроля измерений и проверочной инверсии.

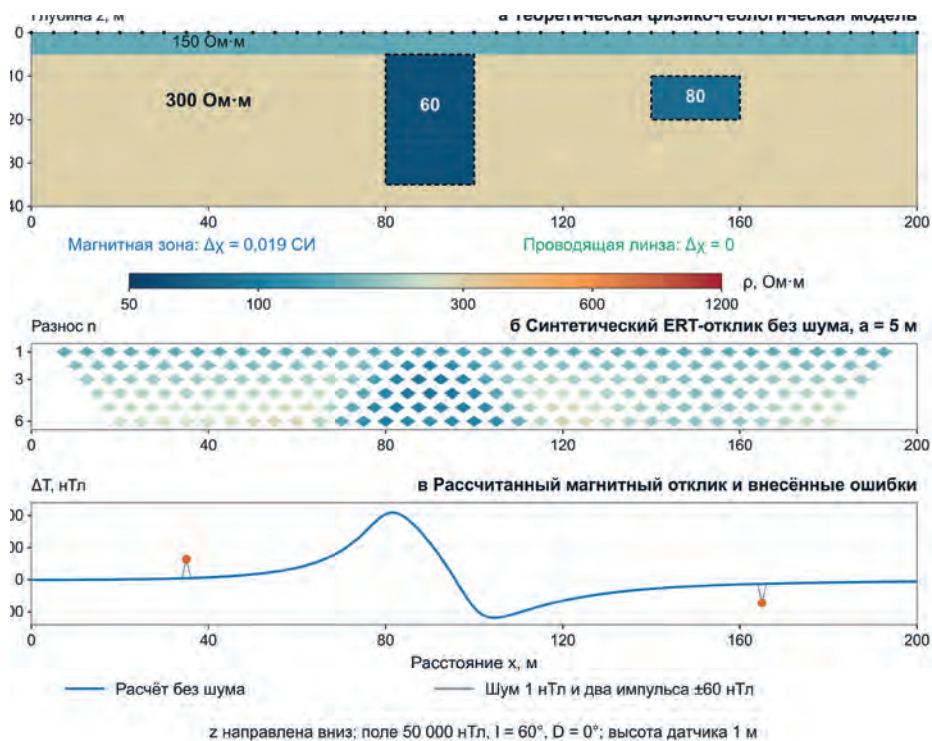
Автоматическое исключение применяется только при совпадении двух критериев; при этом ошибочная отбраковка полностью не исключается. Поэтому результат контроля оценивается не по числу удалённых отсчётов, а по изменению восстановленного разреза.

Для тестирования предложенного подхода использован полностью синтетический набор данных, включающий серию

модельных разрезов для обучения и проверки классификатора и отдельный расчётный кейс для анализа влияния ошибок измерений на результаты инверсии.

В демонстрационной модели задано проводящее тектоническое нарушение с выраженными магнитными свойствами и проводящая линза без магнитного контраста (рис. 2). Такое сочетание позволяет проверить как выявление объекта по

► Рис. 2. Расчётный теоретический кейс: модель среды, кажущиеся УЭС и магнитный отклик. Проводящая линза справа не имеет контраста магнитных свойств.



двум геофизическим методам, так и сохранение электрической неоднородности при отсутствии соответствующей магнитной аномалии. Параметры и геометрия модели приведены на рис. 2.

Синтетические данные ЭТ рассчитывали методом конечных объёмов в постановке 2,5D [10], магнитный отклик – для модели индуцированной намагниченности [6]. Использовали 41 электрод с шагом 5 м, диполи 5 и 10 м и разносы $n = 1-6$; всего 393 значения кажущегося УЭС на один разрез. Расчёты выполнялись программно с использованием кода. Корректность прямых расчётов контролировалась сравнением с независимыми решениями и расчётами при различной дискретизации.

Оранжевыми маркерами на магнитном отклике показаны положения двух искусственно внесённых импульсных ошибок ± 60 нТл.

Для автоматического выявления некондиционных измерений использован метод случайного леса (Random forest) [7]. Классификатор анализировал совокупность признаков, характеризующих расхождение прямых и взаимных измерений, локальные отклонения сигнала и уровень шума. Координаты измерений и истинные параметры синтетической модели при обучении не использовались.

Под дефектом далее понимается искусственно внесённое искажение измерения, используемое как эталонная ошибка при обучении и тестировании; случайный шум моделировался отдельно.

Обучающая серия включала 20 синтетических разрезов с различными положением, геометрией и сопротивлением объектов. Для каждого разреза формировались шумовые реализации с искусственно внесёнными ошибками. Разрезы разделяли на обучающую, валидационную и тестовую выборки без смещения реализаций одной модели между выборками.

Результаты классификатора сравнива-

ли с традиционным взаимным контролем и его нормированным вариантом. Пороговые значения определяли по валидационной выборке при ограничении доли ложных срабатываний.

В демонстрационном кейсе в синтетические данные ЭТ были внесены случайный шум и группа систематически искажённых измерений. После их автоматического выявления выполнялась повторная инверсия с теми же настройками, что и для исходного набора данных. Дополнительно проверялась устойчивость результата к изменению параметров регуляризации и начальной модели [3, 11]. В магнитные данные также вводились шум и импульсные ошибки с последующим контролем повторных измерений.

Для интерпретации магнитного поля рассчитывали модуль горизонтальной производной (THG), вертикальную производную, Tilt и амплитуду аналитического сигнала [6, 8, 12]. Для снижения влияния высокочастотного шума перед дифференцированием применялось продолжение поля вверх.

Трансформанты сравнивали по контрастности выделяемых границ, устойчивости их положения при изменении уровня шума и параметров обработки и пространственному соответствию границам, установленным по данным ЭТ. По этим характеристикам рассчитывался условный рейтинг I, предназначенный только для сравнительной оценки трансформант.

Для объектов электрического разреза дополнительно рассчитывался индекс приоритета проверки A. Он учитывал устойчивость неоднородности при изменении параметров инверсии, влияние исключённых измерений на соответствующую область модели и наличие магнитной поддержки. Высокое значение A означало необходимость первоочередного просмотра объекта специалистом.

Индекс A использовался только для

ранжирования и не интерпретировался как вероятность артефакта; отсутствие магнитной аномалии само по себе не повышало приоритет проверки.

Результаты

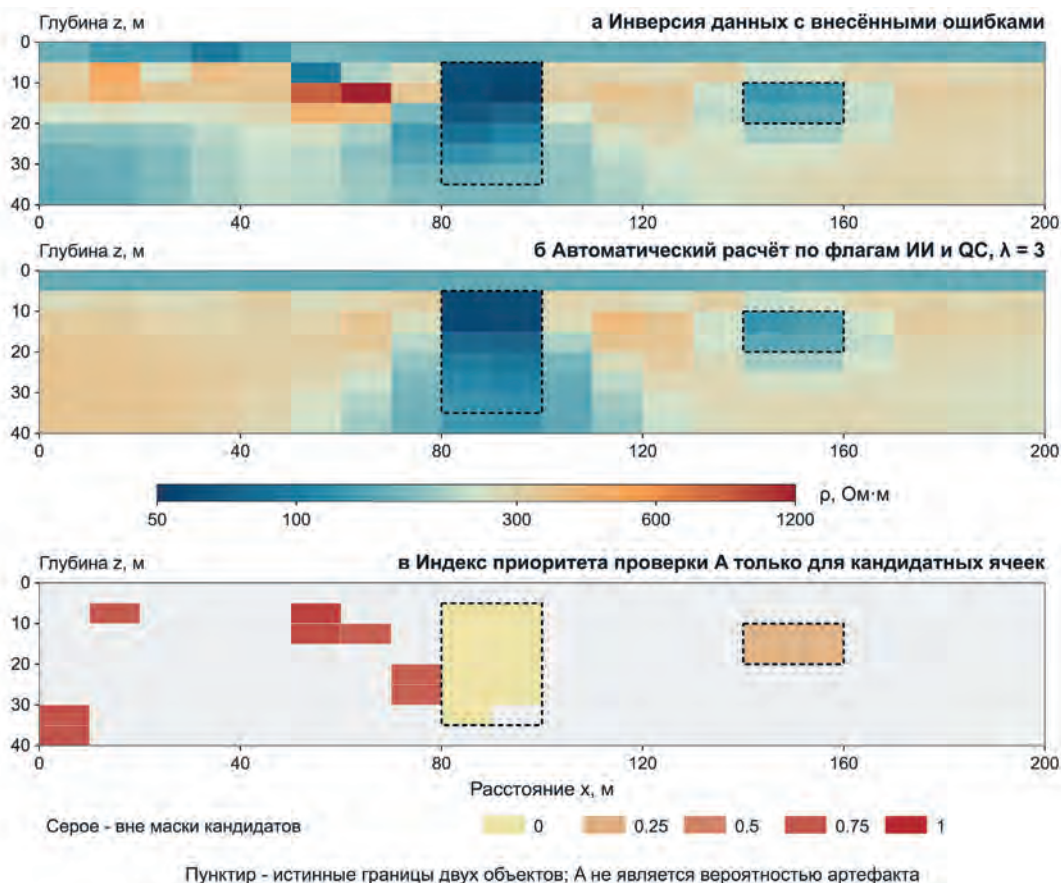
На четырёх тестовых разрезах методом случайного леса (Random forest) обнаружено 91,3% внесённых ошибок. Полнота нормированного взаимного контроля составила 77,4%, обычного контроля с порогом 0,15 – 71,7%. Доли ложных срабатываний среди исправных измерений равны соответственно 0,37, 0,75 и 0,15%. В случае применения метода случайного леса (Random forest) 93,0% помеченных измерений действительно содержали ошибки; полнота на отдельных разрезах находилась в пределах 90,0-92,3%.

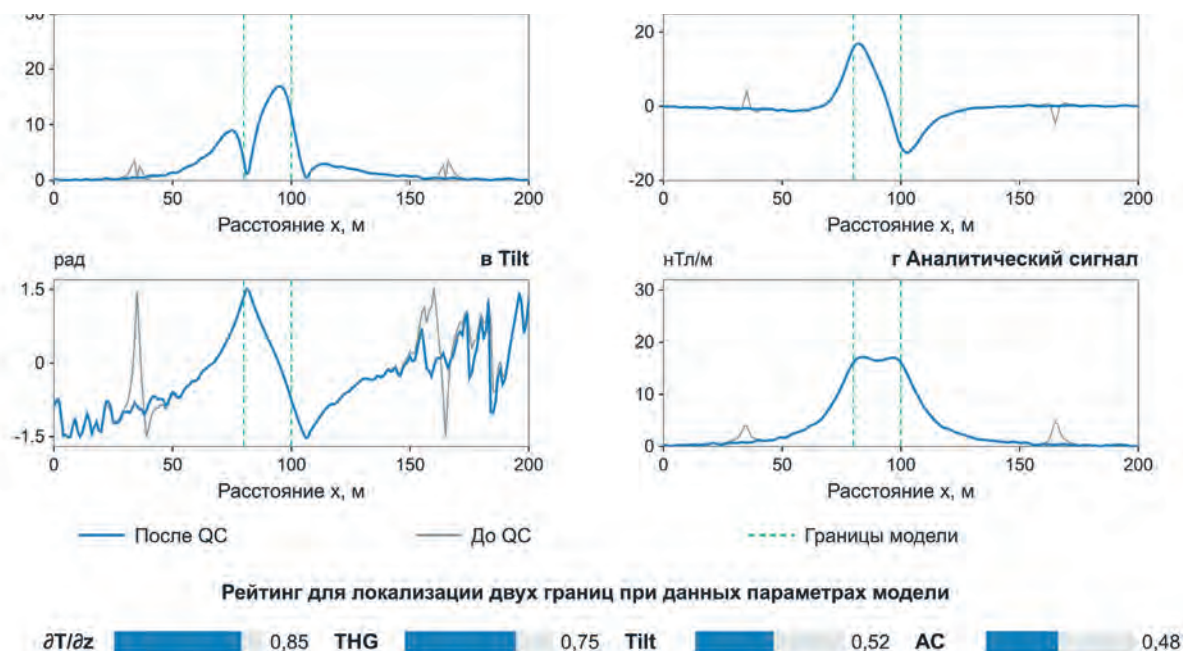
Эти значения относятся к классификатору до согласования с взаимным контролем. После согласования из 31 440 тестовых измерений для проверочного расчёта

исключены 1176, в том числе 30 кондиционных. Ещё 410 измерений отобраны для просмотра, из них 316 содержат внесённую ошибку. Среди измерений, не помеченных ни одним способом, осталось 138 дефектов. Это различие необходимо учитывать при оценке полноты автоматического контроля.

В демонстрационном кейсе все одиннадцать сильных искажений обнаружены и методом случайного леса (Random forest), и обычным взаимным контролем; ложных срабатываний не было. После исключения этих измерений среднеквадратическая относительная ошибка предсказания незашумлённого отклика кажущегося УЭС уменьшилась с 6,50 до 1,40%, а среднеквадратическая ошибка $\ln(p)$ относительно заданной модели - с 0,366 до 0,259. Сопоставление разрезов приведено на рис. 3. В области ложного высокоомного объекта медианное УЭС снизилось с 837 до 297 Ом·м, приблизившись к фоновым 300

▼ Рис. 3. Электрические разрезы до и после исключения согласованно выявленных дефектов и индекс приоритета проверки объектов.





▲ Рис. 4. Трансформанты синтетического магнитного поля до и после контроля импульсных ошибок; рейтинг индикаторов для выделения границ заданной зоны.

Ом·м; индекс проверки А составил 0,80.

Немагнитная проводящая линза в результатах инверсии сохранилась и получила $A = 0,23$. Однако медианное восстановленное УЭС в её области составило 139 Ом·м вместо заданных 80 Ом·м.

Оба внесенных в магнитный профиль импульсных выброса были выявлены при сравнении исходных и повторных измерений. Замена ошибочных отсчетов повторными значениями уменьшила среднеквадратическую ошибку профиля относительно заданного поля с 6,00 до 0,99 нТл. Наибольший рейтинг получила вертикальная производная, $I = 0,85$; далее следуют THG - 0,75, Tilt - 0,52 и амплитуда аналитического сигнала - 0,48 (рис. 4). Средняя ошибка положения границ относительно заданной зоны составила 2,5 м для вертикальной производной и 5,0 м для THG. Этот порядок получен при принятой геометрии источника, высоте наблюдений и правилах выделения границ.

Дискуссия

Серия модельных разрезов использовалась для оценки качества классификации, а расчетный кейс - для проверки

влияния отбракованных измерений на результат инверсии. Методом случайного леса (Random forest) выявлено больше ошибок, чем обоими пороговыми способами, при этом доля ложных срабатываний оказалась ниже, чем у нормированного взаимного контроля. При сильном систематическом искажении группы измерений, связанных с одним электродом, применение ИИ не изменило состав исключённых данных. Возврат УЭС ложной высокоомной области к фоновому уровню показывает, насколько существенно эти отсчёты влияли на результат инверсии; тот же результат здесь обеспечил обычный взаимный контроль. Преимущество классификатора проявляется в случаях, когда дефект описывается сочетанием признаков и не выделяется одним порогом.

Дополнительно выявленные ошибки в значительной мере попадают в группу для просмотра: оценки двух способов контроля расходятся. Локальное отклонение может отражать и помеху, и реальную неоднородность. Поскольку признаки взаимности входят в набор признаков метода случайного леса (Random forest),

совпадение его решения с пороговым контролем нельзя считать независимым подтверждением ошибки. Поэтому окончательное решение об исключении данных должно учитывать результат повторной инверсии.

Более показателен результат для немагнитной проводящей линзы. В результатах инверсии она сохранилась, однако восстановленное УЭС в её области оказалось завышенным: наличие проводящей неоднородности воспроизводится увереннее, чем количественное значение её УЭС. Расхождение согласуется с ограниченной разрешающей способностью и сглаживанием модели; вклад этих причин отдельно не исследовался. Использование 139 Ом·м как точной петрофизической характеристики могло бы привести к неверному толкованию объекта даже после контроля данных. Поэтому наличие неоднородности, её геометрию и количественное значение УЭС следует оценивать отдельно. В том же расчётном сценарии уменьшилась ошибка предсказания известного незашумлённого отклика. На полевом материале такого эталона нет: малая невязка по оставшимся данным может сочетаться с неустойчивой моделью. Изменение регуляризации и начального приближения помогает выявить эту неустойчивость, но не заменяет оценку глубины исследования [13] и проверку размерности модели.

Магнитные данные позволяют уточнить положение границ зоны, отличающейся от окружающей среды по магнитной восприимчивости. Для немагнитной проводящей линзы такое уточнение невозможно, поскольку её магнитная восприимчивость принята равной фоновой. Отбраковка по отсутствию магнитной аномалии в этом случае означала бы потерю заданного геологического объекта. При этом рейтинг трансформант частично опирается на границы, выделенные по данным ЭТ. Поэтому совпадение границ, выделенных по магнитным данным и данным ЭТ, в этом рас-

чёте не является независимым подтверждением строения зоны. Рейтинг 0,85 для вертикальной производной относится только к принятой геометрии, намагничённости и уровню шума; при других условиях ранжирование необходимо повторить [8, 9].

Кроме того, тест охватывает ограниченное семейство моделей. Разделение по разрезам исключает смешение их шумовых реализаций, но не воспроизводит переход к новой геологической обстановке. Известный фон вне области инверсии повышает её точность. Трёхмерные объекты, ошибки координат и пространственно связанные полевые помехи требуют отдельного исследования. При этом тестирование проводилось на модели без учёта рельефа [4].

Для полноценной апробации подхода требуется архив исходных и взаимных измерений, геометрия установок и разметка причин отбраковки. Тестовые участки должны быть отделены от обучающих. Наряду с пропусками и ложными исключениями необходимо измерять время просмотра и частоту изменения результатов интерпретации после проверки. В данном теоретическом кейсе трудозатраты не оценивались, поэтому вывод о снижении затрат на обработку был бы преждевременным.

Выводы

На рассмотренном семействе синтетических разрезов метод случайного леса (Random forest) повысил полноту обнаружения дефектов ЭТ по сравнению с нормированным взаимным контролем с 77,4 до 91,3%. Преимущество классификатора проявилось прежде всего для дефектов, которые не выявлялись одним нормированным порогом взаимности. При сильном искажении группы измерений обычного взаимного контроля оказалось достаточно; в таком случае классификатор не дал дополнительного эффекта.

Связь контроля с повторной инверсией

позволяет оценивать последствия исключения данных для конкретных объектов разреза. В демонстрационном кейсе ложный высокоомный объект получил высокий приоритет проверки, а немагнитная проводящая линза сохранилась. Вместе с тем, неточное восстановление её УЭС показывает, что устранение дефектов наблюдений не устраняет неопределённость обратной задачи геофизики.

При внедрении такой обработки геофизик сможет сосредоточить проверку на измерениях, от которых зависит выделение конкретной неоднородности. Для этого результаты классификации должны рассматриваться вместе с повторной инверсией и магнитными признаками. Предстоит установить на независимых полевых участках, сокращает ли такой автоматизированный контроль ручной просмотр при сохранении геологически значимых данных.

Литература

1. Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 2. С. 14-17.
2. Деев Е.В., Оленченко В.В., Дучков А.А., Заплавнова А.А., Сафронов О.В. Геоэлектрические образы активных разломов в районах развития многолетней мерзлоты (на примере высокогорных и арктических районов России) // Геология и геофизика. 2025. Т. 66, № 5. С. 654-668. DOI: 10.15372/GIG2024174.
3. Жданов М.С. Теория обратных задач и регуляризации в геофизике. М.: Научный мир, 2007. 712 с.
4. Казначеев П.А., Попов И.Ю., Модин И.Н., Жостков Р.А. Применение независимого конечноэлементного моделирования для оценки влияния простейших форм рельефа на результаты инверсии данных электротомографии (на примере рва треугольного сечения) // Наука и технологические разработки. 2019. Т. 98, № 1. С. 21-34. DOI: 10.21455/

std2019.1-2.

5. Мовчан И.Б., Шайгаллямова З.И., Яковлева А.А. Выявление факторов структурного контроля коренных золоторудных проявлений методом беспилотной аэромагниторазведки на примере Нерюнгринского района Якутии // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 217-233. DOI: 10.31897/PMI.2022.23.

6. Blakely R.J. Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 441 p. DOI: 10.1017/CBO9780511549816.

7. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. 2001. Vol. 45. P. 5-32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.

8. Cooper G.R.J., Cowan D.R. Enhancing potential field data using filters based on the local phase // Computers & Geosciences. 2006. Vol. 32, no. 10. P. 1585-1591. DOI: 10.1016/j.cageo.2006.02.016.

9. Cooper G.R.J., Cowan D.R. A generalized derivative operator for potential field data // Geophysical Prospecting. 2011. Vol. 59, no. 1. P. 188-194. DOI: 10.1111/j.1365-2478.2010.00901.x.

10. Dey A., Morrison H.F. Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures // Geophysical Prospecting. 1979. Vol. 27, no. 1. P. 106-136. DOI: 10.1111/j.1365-2478.1979.tb00961.x.

11. Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method // Geophysical Prospecting. 1996. Vol. 44, no. 1. P. 131-152. DOI: 10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x.

12. Miller H.G., Singh V. Potential field tilt-a new concept for location of potential field sources // Journal of Applied Geophysics. 1994. Vol. 32, no. 2-3. P. 213-217. DOI: 10.1016/0926-9851(94)90022-1.

13. Oldenburg D.W., Li Y. Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys // Geophysics. 1999. Vol. 64, no. 2. P. 403-416. DOI: 10.1190/1.1444545.

УДК 550.834:004.8

Гибридный алгоритм детектирования и локализации микросейсмических событий по данным DAS на основе MLE и 3D/2D-CNN: апробация на нагнетательной скважине и перспективы мониторинга

■ Емельянов Б.В.¹, Рыжов В.А.¹, Шарапов И.Р.¹, Хабаров А.В.², Рыков А.П.², Моисеенков А.В.².

¹ ООО «ИАС». Россия, г. Москва.

² ООО «Сахалинская Энергия». 693008, Россия, г. Южно-Сахалинск.

Аннотация. Работа посвящена разработке автоматизированного метода детектирования и пространственной локализации микросейсмических событий по скважинным данным распределенного акустического зондирования. Цель исследования состоит в повышении устойчивости обнаружения слабых событий в условиях интенсивных нестационарных и пространственно-коррелируемых помех. Методическая основа включает формирование базы синтетических микросейсмических сигналов с варьируемыми параметрами источника и уровнем сигнал-шум с их последующей интеграцией в реальные шумовые записи для имитации полевых условий. Первичная оценка пространственно-временных параметров источника выполняется методом максимального правдоподобия с построением трехмерных массивов, описывающих распределение значений решающей функции в координатах глубина–радиус–время. На основе этих массивов разработаны и обучены две нейросетевые модели, предназначенные для уточнения координат события и подавления влияния сложной структуры шума. Полученные результаты демонстрируют увеличение количества найденных событий при $SNR < 1$. Показано, что предложенный гибридный подход обеспечивает повышение вероятности обнаружения слабых микросейсмических событий при одновременном сокращении числа ложных срабатываний в условиях реальных скважинных шумов.

В настоящее время идея использования гибридных ИИ/ML алгоритмов с включением в логику их работы физических принципов находит все большее практическое применение и подтверждается эмпирическими наблюдениями. Предлагаемый подход открывает дополнительные перспективы в пассивных наблюдениях DAS: регистрация данных с полезным сигналом может проводиться не только после остановки работы нагнетательной скважины, но и эпизодически в периоды закачки и при смене режимов нагнетания; появляются возможности по мониторингу целостности флюидоупоров в интервалах целевой закачки [1, 2].

Ключевые слова: DAS, микросейсмический мониторинг, MLE, U-Net, CNN.

Введение

Технология распределенного акустического зондирования (Distributed Acoustic Sensing, DAS) за последнее десятилетие трансформировала подходы к мониторингу скважинных процессов. Использование стандартного одномодового оптоволоконного кабеля в качестве распределенного сенсора позволяет регистрировать волновые поля с высокой пространственной

плотностью — до одного датчика на погонный метр. Это важно для таких задач, как мониторинг микросейсмической активности в окрестности скважин и контроль целостности флюидоупоров при разных режимах заводнения в нагнетательных скважинах [3, 4].

Мониторинг в нагнетательных скважинах с большим отклонением от вертикали методом DAS в процессе закачки является

одной из наиболее востребованных, но методически сложных задач промысловой геофизики. В процессе закачки жидкости в пологонаправленный ствол происходит поглощение пластом-коллектором закачиваемого флюида с повышением порового давления в пласте. При превышении давления гидроразрыва трещина авто-ГРП развивается вертикально вдоль наибольшего горизонтального напряжения и отдаляется от ствола скважины, также происходит реактивация естественной трещиноватости. В таких условиях стандартные методы промысловой геофизики (ПГИ) становятся неинформативными для ее полной геометризации, а микросейсмические исследования как раз позволяют отслеживать события на удалении и контролировать динамическое поведение трещин.

Контроль процесса закачки флюида в нагнетательных скважинах с большим отклонением от вертикали является критически важной задачей для оценки эффективности поддержания пластового давления, контроля профиля приемистости и обеспечения геомеханической безопасности (предотвращения прорывов флюида в нецелевые интервалы). Распределенное акустическое зондирование (DAS) предоставляет уникальные возможности для непрерывного пространственно-временного мониторинга [5]. В частности, комплексирование данных DAS с распределенной термометрией (DTS) позволяет напрямую сопоставлять зоны сейсмической активности с фактическими интервалами приемистости, что подтверждено на примере экспериментальных данных морских нагнетательных скважин [2].

Однако ключевой проблемой при анализе данных DAS в процессе закачки является крайне низкое отношение сигнал/шум [6]. Технологические шумы от движения флюида, работы насосного оборудования и температурных деформаций маскируют полезные сигналы от микросейсмических

событий [7]. Применение базовых алгоритмов детектирования в таких условиях приводит к пропуску значительной части слабо энергетических событий [6]. В результате формируется разреженное и фрагментированное облако микросейсм, которое зачастую образует неестественные геометрические паттерны при кластеризации, не отражающие реальную физику процесса. Это делает невозможным достоверное восстановление сейсмических событий, что критически снижает ценность получаемых геофизических данных.

Для геофизика-интерпретатора практическая ценность качественного детектора определяется не только полнотой и точностью обнаружения событий как таковых, но и тем, насколько результат детектирования допускает содержательную геологическую и технологическую интерпретацию: привязку каждого события к конкретному интервалу поглощения вдоль горизонтального ствола, оценку динамики развития трещины автоГРП во времени, разделение событий, связанных с ростом индуцированной трещины, от событий, вызванных перетоком по уже существующим проводящим путям или нарушением герметичности заколонного пространства. В этой связи актуальной задачей является не только повышение точности детектирования слабых микросейсмических событий на фоне интенсивных техногенных помех, характерных для процесса закачки (вибрации насосного оборудования, турбулентность потока, колебания колонны), но и формирование результата — пространственно-временного распределения событий, оценки их значимости SNR — в виде, пригодном для прямой геологической и технологической интерпретации специалистом-геофизиком без необходимости погружения в детали устройства нейросетевой модели.

Однако высокая плотность данных сопровождается проблемой низкого от-

ношения сигнал-шум (SNR). В отличие от наземной сейсморазведки, скважинные измерения DAS подвержены специфическим техногенным помехам: вибрациям насосных агрегатов, турбулентным потокам флюида, а также низкочастотным колебаниям обсадной колонны. Эти помехи часто обладают той же частотной характеристикой и скоростными характеристиками, что и целевые микросейсмические события. Классические методы детектирования, такие как STA/LTA или алгоритмы на основе когерентности (Semblance), часто оказываются неэффективными, генерируя либо чрезмерное количество ложных срабатываний, либо пропуская слабые события ($SNR < 1$). История развития методов мониторинга и переход к современным высокоплотным системам регистрации подробно рассмотрены в работе [1].

В данной работе предлагается гибридный алгоритм детектирования. Он сочетает в себе строгость физической модели метода максимального правдоподобия (Maximum Likelihood Estimation, MLE) и возможности глубокого обучения. Метод MLE оптимален для оценки параметров сигнала в гауссовом шуме. При этом точность самой MLE-локации существенно зависит от точности задаваемой скоростной модели среды. Пределы чувствительности и неопределенность локации в этих условиях подробно исследованы в работе [8]. Для фильтрации сложных, нестационарных помех в предлагаемом алгоритме применяются модели U-Net и 3D/2D-CNN. Применение нейронных сетей для распознавания сейсмических фаз уже показало свою эффективность в смежных задачах сейсмологии [10].

Применение алгоритма локации MLE и базовый алгоритм детектирования событий

Задача локации микросейсмических событий в данной работе рассматривается как поиск параметров источника, миними-

зирующих расхождение между наблюдаемым полем и теоретическим откликом среды. Микросейсмический источник имел форму импульса с широкополосной временной функцией, обеспечивающей возбуждение частотного диапазона 10-300 Гц.

Особенностью DAS является регистрация только одной компоненты деформации вдоль оси кабеля. Это накладывает ограничения на определение азимута источника. В связи с этим задача решается в осесимметричной постановке (координаты: глубина Z и радиальное удаление R). Для расчета откликов использовалась вертикально-неоднородная изотропная горизонтально-слоистая модель, построенная на основе данных ВСП и акустического каротажа. Скорости V_p и V_s при этом адаптируются под каждую конкретную зону наблюдения.

Математически модель сигнала на k -м канале представляется как линейная комбинация откликов от компонентов тензора сейсмического момента:

$$z_k(t) = n_k(t) + \sum_i^N M^i s_k^i(t) \quad (1)$$

где $n_k(t)$ — аддитивный коррелированный шум, M^i — компоненты сейсмического момента, $s_k^i(t)$ — функция Грина (модельный отклик) для i -й компоненты момента. Метод максимального правдоподобия позволяет не только локализовать событие, но и рассчитать статистическую меру уверенности — значение $SNRLoc(M)$ [9]:

$$SNRLoc(M) = M^T Cov(M)^{-1} M \quad (2)$$

Этот параметр служит основным индикатором наличия когерентного сигнала, соответствующего физической модели распространения волн в данной среде. Данный параметр показывает меру того, насколько система локацией уверена в событии.

Базовый алгоритм детектирования

микросейсмических событий основан на анализе трехмерного массива локализаций SNRLoc с координатами (глубина, радиус, время). Этот массив SNRLoc, вычисляемый методом MLE, служит основным признаком (входным параметром) для последующих нейросетевых моделей, а не финальным пороговым решением для детектирования.

Для базового алгоритма детектирования исходный массив пространственных временных значений преобразовывался в одномерную временную зависимость $\max\text{SNRLoc}(t)$, выступающую в качестве решающей функции детектирования. Для этого пространственные координаты (глубина, радиус) сворачивались с использованием функции $\max()$, после чего для функции $\max\text{SNRLoc}(t)$ вычислялись локальные максимумы во времени, соответствующие потенциальным микросейсмическим событиям.

Применения моделей машинного обучения U-Net и 3D/2D-CNN для детектирования событий

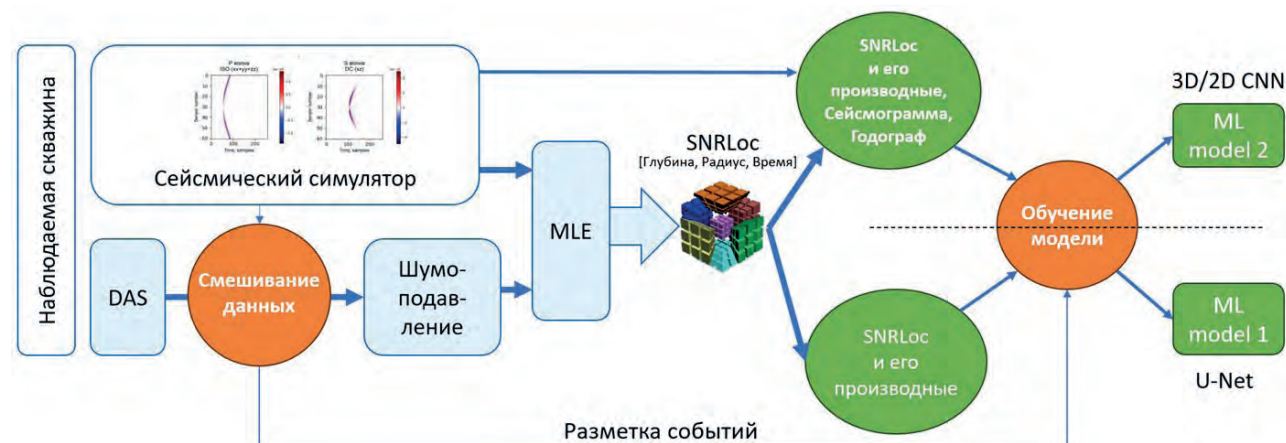
Для сравнения базового детектора (основанного исключительно на решающей функции MLE) и двух предложенных детекторов на основе машинного обучения (U-Net и 3D/2D-CNN) были использованы синтетические данные, в которых точно задавались микросейсмические события, выступающие в роли эталонной раз-

метки. Наличие такой разметки является обязательным условием для контролируемого обучения нейросетевых архитектур и позволяет объективно сопоставить их прогнозы с результатами работы базового метода. Схема обучения моделей машинного обучения показана на рисунке 1. Два варианта моделей: U-Net и 3D/2D-CNN.

Формирование датасета для обучения осуществлялось путем использования модельных откликов, которые были интегрированы в реальные шумовые записи на соответствующих глубинах и моментах времени. Также задавались значения SNR при смешивании модельных откликов с реальными данными. Отношение сигнал/шум задавалось в диапазоне от 0.2 до 4. Уровень $\text{SNR} < 1$ имитирует слабые события, практически полностью скрытые в шуме, а значения $\text{SNR} > 1$ характеризуют отклики, которые легко идентифицируются на волновой картине. Сформированные данные передавались в алгоритм локализации MLE. В ходе сканирования выбранной области изучения на выходе формируется трехмерный массив признаков SNRLoc (глубина, радиус, время).

В качестве первой модели обучения была использована архитектура U-Net. На вход модели U-Net были поданы 5 признаков SNRLoc, преобразование Гилберта, временная производная, локальная дисперсия и логарифм спектральной энергии. Многоканальное

▼ Рис. 1. Схема обучения моделей машинного обучения. Два варианта моделей: U-Net и 3D/2D-CNN.



представление данных позволяет модели анализировать волновое поле одновременно во временной и спектральных областях, повышая точность детектирования событий в зашумленных данных. Результатом прогнозирования является бинарная классификация, где 1 – событие и 0 – шум.

В качестве второй модели обучения была использована архитектура 3D/2D – CNN. Так как данные SNRLoc и сейсмограмм имеют разную физическую природу для их обучения была использована архитектура из двух сверточных нейронных сетей с поздним слиянием через механизм внимания. На первую ветвь подается три канала: SNRLoc, локальная дисперсия и производная. На выходе получается вектор из 128 признаков. На вторую ветвь подается два канала: сейсмограмма и годографы P и S волн — также итог 128-мерный вектор. Далее сеть адаптивно объединяет оба представления через механизм внимания, автоматически определяя вклад каждой модальности в зависимости от качества сигнала: при слабых событиях модель больше опирается на пространственный куб SNRLoc, при выраженных приходах волн — на сейсмограмму. Объединенное представление далее используется одновременно для двух задач: определения наличия события и оценки уровня SNR, что повышает устойчивость детектирования и улучшает разделение сигнала и шума.

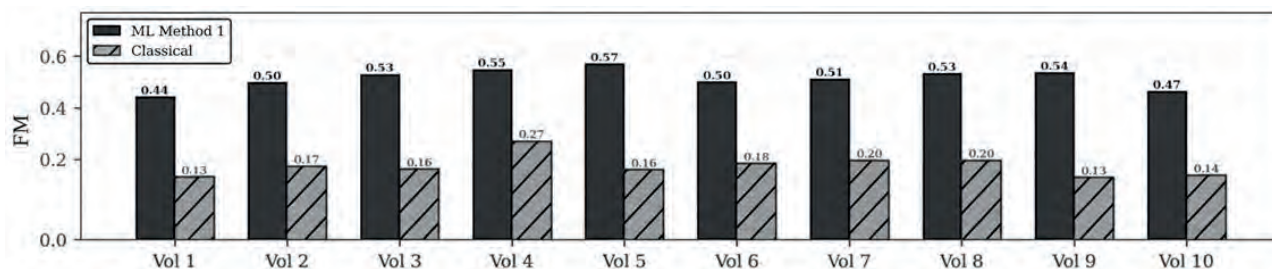
Результаты детектирования на синтетических и реальных данных

Всего было сгенерировано 1000 синтетических кадров, каждый из которых содержал 45 микросейсмических событий. Такой объем обеспечивает достаточно полное покрытие параметрического пространства и формирует способность модели к обобщению в условиях неопределенности локализации источника, ме-

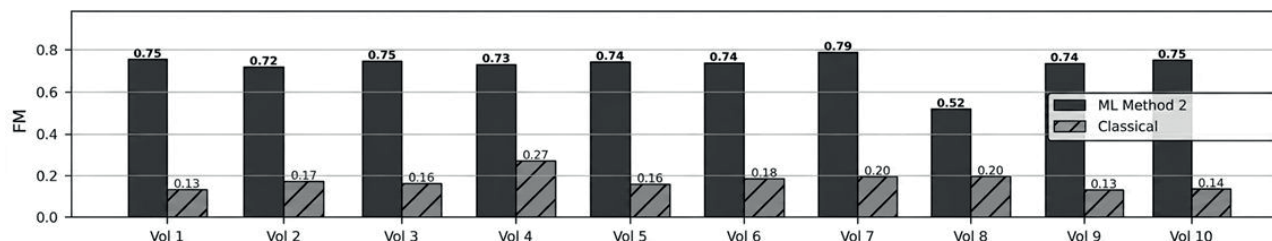
ханизма излучения и уровня шума. Для обучения моделей была сформирована синтетическая база данных, включающая в себя реальные данные и модельные отклики микросейсмических событий. Генерация данных выполнялась методом стохастического параметрического моделирования с варьированием пространственных, временных и динамических характеристик источника. Положение источника задавалось случайным образом в пределах глубины 2400-4000 метров и радиального удаления от скважины 10-210 метров. Время возникновения события также выбиралось случайно в интервале 0-2 секунд, что позволило сформировать сигналы с различным положением гиперболических фронтов на сейсмограммах и обеспечить устойчивость модели к изменению временной позиции события. Вариативность механизма очага задавалась случайным выбором компонент симметричного тензора момента m_{xx} , m_{zx} , m_{zz} в диапазоне от -2 до 2, что позволило моделировать различные типы механизмов излучения. Для количественной оценки качества обнаружения микросейсмических событий использовался модифицированный показатель Фоулкса–Маллоуза (Fowlkes–Mallows, FM).

На рисунке 2 показан показатель FM для базового детектора и детектора на основе U-Net для каждого из десяти объемов. **Детектор на основе U-Net** демонстрирует стабильное превосходство во всех без исключения случаях: значения FM варьируются в диапазоне 0,44–0,57, тогда как для базового детектора этот диапазон составляет 0,13–0,27. Средний показатель FM по всем объемам составляет 0,514 для детектора на основе U-Net против 0,174 для базового детектора, что соответствует трехкратному превосходству предложенного подхода.

На рисунке 3 представлено сравнение предложенной второй модели (де-



▲ Рис. 2. Сравнение методов обнаружения сейсмических событий базового подхода и первой модели U-Net по десяти тестовым объемам.



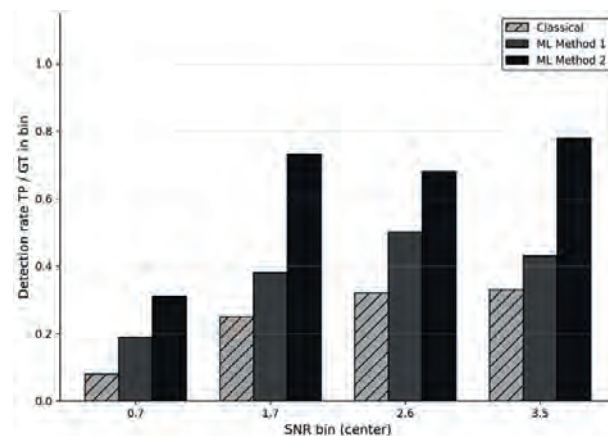
▲ Рис. 3. Сравнение методов обнаружения сейсмических событий базового подхода и второй модели 3D/2D-CNN по десяти тестовым объемам.

тектора на основе 3D/2D-CNN) и базового детектора по десяти независимым тестовым пакетам данных. **Детектор на основе 3D/2D-CNN** демонстрирует стабильно высокую FM-меру для всех пакетов данных: значения варьируются от 0,72 до 0,79, составляя в среднем 0,722, и лишь в наборе данных 8 наблюдается заметное снижение до 0,52, что может быть связано с повышенным уровнем когерентных помех в данном интервале наблюдений. Базовый алгоритм детектирования микросейсмических событий показывает значительно более низкие результаты: FM-мера не превышает 0,27 ни на одном из пакетов данных и в среднем составляет 0,174, что в четыре раза ниже по сравнению со второй моделью.

На рисунке 4 представлено сравнение трех методов детектирования микросейсмических событий по метрике полноты обнаружения Recall в разбивке по диапазонам SNR: базового порогового алгоритма, построенного на решающей функции SNRloc, первого нейросетевого подхода на основе архитектуры U-Net, и предложенного гибридного 3D/2D-CNN подхода с attention-слиянием ветвей SNRloc и сейсмограммы. Оба нейросе-

тевых метода превосходят базовый пороговый алгоритм во всех рассмотренных диапазонах SNR, что подтверждает эффективность применения машинного обучения для адаптации к нестационарному характеру скважинных помех. Наиболее выраженное различие между методами наблюдается в области слабых событий SNR < 1, где отношение полезного сигнала к уровню шума меньше единицы и решающая функция базового детектора наименее устойчива: в этом

▼ Рис. 4. Сравнение полноты обнаружения Recall базового алгоритма, первого подхода на основе U-Net и предложенного гибридного 3D/2D-CNN подхода по диапазонам отношения SNR на синтетической тестовой выборке.

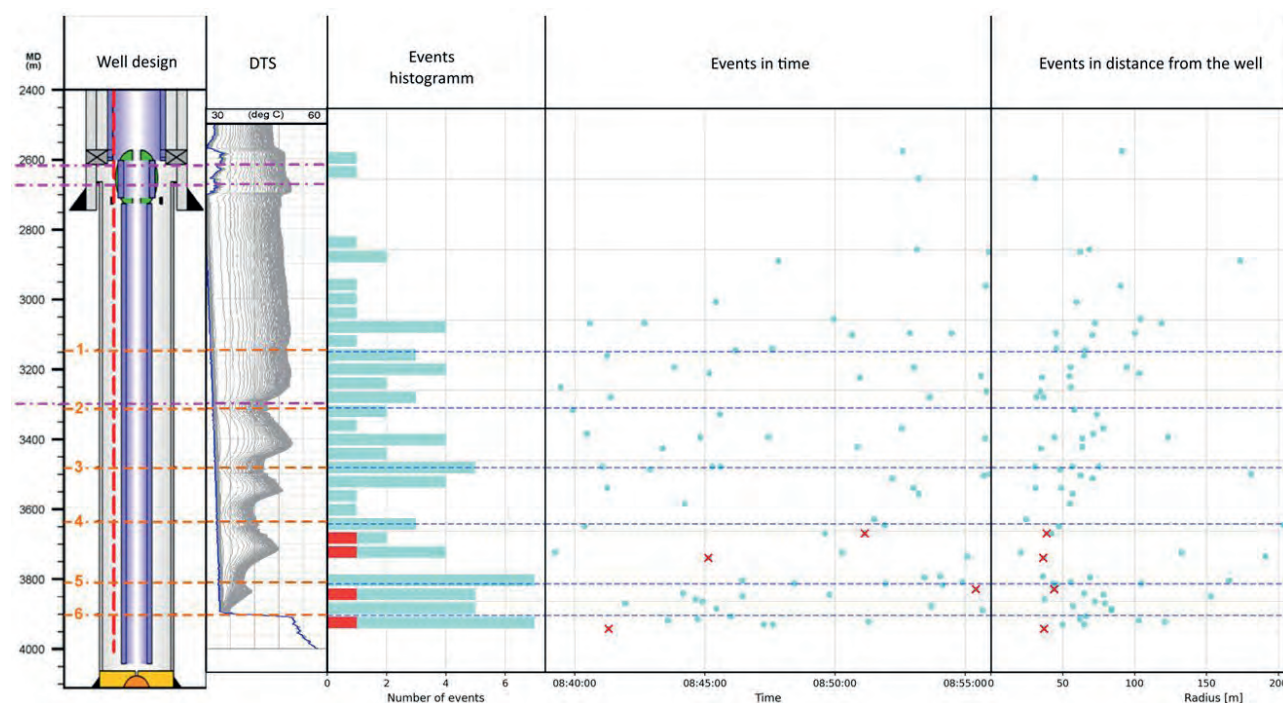


диапазоне предложенный гибридный 3D/2D-CNN подход демонстрирует наибольший прирост Recall по сравнению как с базовым алгоритмом, так и с подходом на основе U-Net. Такое преимущество объясняется совместным использованием двух источников информации разной физической природы. Если волновое вступление на сейсмограмме выражено слабо или вовсе неразличимо, модель за счет attention-механизма опирается преимущественно на ветвь SNRLoc. Эта ветвь сохраняет устойчивый локальный максимум даже при низком отношении сигнал/шум благодаря когерентному накоплению сигнала по всем каналам DAS-массива. В свою очередь, U-Net работает с ограниченным входным представлением и не обладает этим дополнительным физически обоснованным источником устойчивости. С ростом SNR, области выраженных, легко различимых событий,

разница между методами закономерно сокращается, поскольку все три подхода в этой области демонстрируют близкие к предельным значения Recall.

Итоговые результаты были получены на синтетических данных с контролируемыми параметрами источника и известной истинной разметкой событий, что позволило провести количественное сравнение методов в широком диапазоне SNR, включая область слабых событий, недоступную для надежной оценки на реальных данных из-за отсутствия достоверной ground-truth разметки. Подтвержденное на синтетических данных преимущество предложенного гибридного подхода, в особенности в области $SNR < 1$, дает основание перейти к практическому применению метода: локализации событий методом MLE и последующему детектированию с использованием гибридной 3D/2D-CNN модели

▼ Рис. 5. Результаты локации микросейсмических событий на реальных данных DAS для горизонтальной нагнетательной скважины в процессе закачки, полученные предложенным гибридным 3D/2D-CNN подходом. Слева направо: конструкция скважины с указанием портов приемистости (1–6); распределенная термометрия (DTS) вдоль ствола; гистограмма числа обнаруженных событий по глубине; распределение событий во времени; распределение событий по расстоянию (радиусу) от скважины. Красным цветом выделены события с наибольшей достоверностью локализации по SNRLoc.



непосредственно на реальных данных DAS.

Результаты локализации микросейсмических событий на реальных данных DAS с использованием предложенного гибридного 3D/2D-CNN детектора показаны на рисунке 5. Для горизонтальной нагнетательной скважины была выполнена локализация микросейсмических событий на реальных данных DAS с использованием разработанного гибридного 3D/2D-CNN алгоритма. По данным распределенной термометрии DTS наибольшая приемистость в процессе закачки зафиксирована на портах 4, 5 и 6 — в этих интервалах наблюдается наиболее выраженные температурные аномалии, связанные с охлаждением пласта за счет поглощения большего объема закачиваемой жидкости по сравнению с остальными портами. Окрестности данных портов наиболее подвержены возможности раскрытия трещин. Следовательно, при корректной работе алгоритма детектирования наибольшая плотность микросейсмической активности должна пространственно совпадать с этими интервалами приемистости.

Гистограмма числа обнаруженных событий по глубине подтверждает это ожидание: максимумы гистограммы располагаются напротив максимально поглощающих портов 4–6, что свидетельствует о физически согласованном результате локализации — обнаруженные события пространственно привязаны к интервалам реального поступления жидкости в пласт, а не распределены равномерно или случайным образом вдоль всего ствола. При этом наиболее достоверные события — с максимальными значениями SNRLoc (выделены красным на гистограмме) — сосредоточены именно на глубинах портов 4–6, как показано на рисунке 5.

То есть алгоритм не только обнаруживает события в правильном интервале,

но и присваивает наибольшую степень уверенности событиям, физически наиболее ожидаемым исходя из данных DTS. Распределение уверенных событий во времени показывает, что они регистрируются на всем протяжении рассматриваемого интервала закачки, а не сосредоточены в отдельный короткий момент. Распределение по расстоянию от скважины показывает, что наиболее достоверные события находятся в пределах 40–50 м от ствола — то есть в пределах ожидаемого радиуса развития индуцированной трещиноватости при закачке, а не на удалении, характерном для случайных шумовых срабатываний.

Важно отметить, что базовый пороговый алгоритм детектирования на этом же интервале закачки не выделил ни одного уверенного события. Это демонстрирует практическое преимущество предложенного гибридного подхода: там, где базовый детектор, основанный на пороговом сравнении решающей функции SNRLoc, оказывается нечувствительным к слабым событиям на фоне интенсивных техногенных помех закачки, адаптивная нейросетевая обработка позволяет выделить и с высокой степенью достоверности локализовать события, физически согласующиеся с независимыми геофизическими данными DTS о работающих интервалах поглощения.

Полученные результаты показывают, что предложенный гибридный подход позволяет регистрировать полезные события не только в периоды остановки работы нагнетательной скважины, но и непосредственно в процессе нагнетания, включая моменты изменения режимов нагнетания. Это создает предпосылки для организации регулярного микросейсмического мониторинга нагнетательных скважин с расширенным временным охватом, что особенно актуально в свете планируемого оснащения скважин DAS-интеррогаторами и внедрения систем

непрерывного контроля целостности покрывающих пород и образования законных перетоков.

Заключение

В данной работе представлен и проверен метод автоматического обнаружения микросейсмичности в данных DAS, использующий синергию физико-математического моделирования и технологий нейронных сетей. Гибридный подход позволил решить основную проблему внутрискважинного мониторинга — отделение слабых целевых сигналов от сильно коррелированного антропогенного шума.

Основные результаты работы

1. Разработана архитектура модели нейронной сети, адаптированная к специфике данных DAS и многоканальному вводу физических характеристик;

2. Реализована схема фильтрации шума с помощью массива SNRLoc, которая сохранила физическую интерпретируемость результатов в рамках анализа нейронной сети;

3. Для предложенного детектора на основе 3D/2D-CNN достигнуто десятикратное снижение количества ложных срабатываний при одновременном увеличении полноты обнаружения (recall) истинных событий на синтетических данных;

4. Предложенный гибридный детектор (**MLE + 3D/2D-CNN модель**) был протестирован на реальных записях DAS: полученные события подверглись дополнительной фильтрации по SNRLoc как основному признаку надежности сигнала, что позволило сохранить только события с высокой надежностью пространственного положения источника. Пространственно-временное распределение выбранных событий сравнивалось с независимыми геофизическими дан-

ными (температурным профилем DTS) и конструкцией скважины. Было установлено, что зарегистрированные события преимущественно концентрируются в интервале глубин между пакером и портами. Полученное распределение согласуется по времени с температурными аномалиями DTS, что подтверждает физическую обоснованность метода и его устойчивость к высокому уровню помех в приповерхностной части скважины; отсутствие событий выше интервала, охватываемого локализацией (см. рис. 5), обусловлено ограничением зоны обработки данных, а не фактическим отсутствием сейсмической активности на этих глубинах.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенный подход позволяет использовать DAS-записи, полученные непосредственно в процессе закачки, для решения широкого круга задач: мониторинга целостности пластов-флюидопоров между пластами целевой закачки, оценки трещинообразования (автоГРП) при нагнетании флюида и др. Подтвержденная на синтетических и реальных данных эффективность алгоритма создает основу для его внедрения в системы регулярного микросейсмического мониторинга нагнетательных скважин.

Данную методику можно рекомендовать для внедрения в системы мониторинга целостности пластов-флюидопоров при закачке жидкости в скважину с целью выявления зон нестабильного состояния критически важных пластов на месторождениях.

Литература

1. Karrenbach M., Cole S., Ridge A., Boone K., Kahn D., Rich J., Silver K., Langton D. Fiber-optic distributed acoustic sensing of microseismicity, strain and temperature during hydraulic fracturing // Geophysics. –

2018 [опубл. 2019]. – Vol. 84, No. 1. – P. D11–D23. – DOI: 10.1190/geo2017-0396.1.

2. Шарапов И.Р., Рыков А.П., Хабаров А.В., Милин А.Ю., Феофилов С.А., Талипов Р.Д. Перспективы комплексирования DAS и DTS на примере экспериментальных данных в нагнетательных скважинах на шельфе о. Сахалин // Геофизика. — 2024. — № 6.

3. Hartog A. H. An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors. – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 470 p.

4. Parker T., Shatalin S., Farhadiroudsari M. Distributed Acoustic Sensing – a new tool for seismic applications // First Break. – 2014. – Vol. 32, No. 2. – P. 61–69.

5. Distributed Acoustic Sensing for Downhole Production and Injection Profiling," J. Pet. Technol. (SPE), Mar. 2016. [Online]. Available: <https://jpt.spe.org/distributed-acoustic-sensing-downhole-production-and-injection-profiling>

6. W. Huang, R. Wang, H. Li, and Y. Chen, "Unveiling the signals from extremely noisy microseismic data for high-resolution hydraulic fracturing monitoring," Sci. Rep., vol. 7, Art. no. 11996, Sep. 2017, doi: 10.1038/s41598-017-09711-2.

7. P. Yu, T. Zhu, C. Marone, D. Elsworth, and M. Yu, "DASEventNet: AI-Based Microseismic Detection on Distributed Acoustic Sensing Data From the Utah FORGE Well 16A(78)-32 Hydraulic Stimulation," J. Geophys. Res.: Solid Earth, 2024, doi: 10.1029/2024JB029102.

8. Рыжов В.А., Рыков А.П., Хабаров А.В., Скворцов И.В., Емельянов Б.В. Оценка пределов чувствительности и неопределенности локации микросейсмических событий при регистрации оптоволоконными измерительными системами в условиях неопределенностей скоростной модели среды // Геофизика. — 2024. — № 6. — DOI: 10.34926/geo.2024.29.55.009.

9. Birialtsev E. V., Demidov D. E., Mokshin E. V. Determination of moment tensor and location of microseismic events under conditions of highly correlated noise based on the maximum likelihood method // Geophysical Prospecting. – 2017. – Vol. 65, No. 6. – P. 1510–1526. – DOI: 10.1111/1365-2478.12485.

10. Zhu W., Beroza G. C. PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method // Geophysical Journal International. – 2018. – Vol. 216, No. 1. – P. 261–273.

УДК 550.834.08:621.315.2

Сейсмический амбиликал пневмоисточников: разработка и производство в России

■ Чураев С.А., Воронцов В.В. ООО «Геоспейс Технолоджис Евразия», г. Уфа.

■ Казанин А.Г., АО «МАГЭ», г. Мурманск.

Аннотация. Рассмотрены устройство амбиликала пневмоисточников и его разработка компанией «Геоспейс» при поддержке АНО «ЦПИИ», совместимость с судовым оборудованием, ремонт и техническое сопровождение. Отечественное производство позволяет наладить прямое взаимодействие с изготовителем и сократить логистическое плечо при обслуживании изделия.

Амбиликал пневмоисточника – буксируемый пневмоэлектрический кабель, по которому передается воздух под высоким давлением на систему пневмоисточников, питание исполнительных механизмов и информационные линии для контроля работы системы вовремя сейсморазведочных работ на море.

Ключевые слова: морская сейсморазведка, амбиликал пневмоисточников, концевые соединения, отечественное производство, ремонт, техническое сопровождение.

Амбиликал в составе судового комплекса

При морской сейсморазведке судно-источник буксирует группу пневмоисточников, подаёт к ним сжатый воздух и управляет их работой (Рис.1). Связь между судном и пневмоисточниками обеспечивает сейсмический амбиликал, или буксирный пневмоэлектрический кабель (БПК). В нём в двойной оболочке объединены ру-

кав высокого давления для подачи воздуха, электрические проводники и два слоя силовой брони, воспринимающие тяговое усилие. Если это предусмотрено устройством комплекса, в состав амбиликала могут входить оптические линии [3, 6]. Кабели сейсмических кос относятся уже к приёмной части оборудования и имеют другое назначение [2].

▼ Рис. 1. Схема Амбиликал.



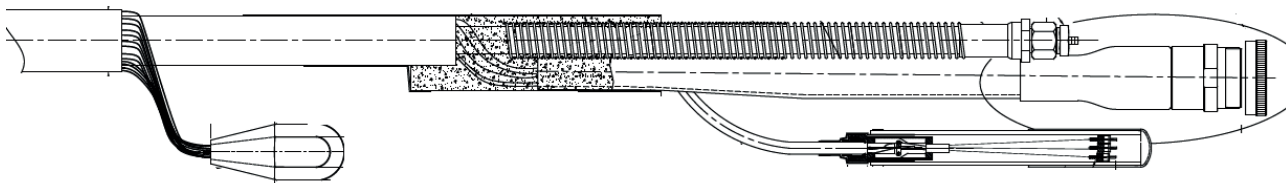


▲ Рис. 2. Мокрый конец амбликала. Общий вид.

Во время работы амбликал многократно изгибается: при спуске за борт, буксировке, подъёме и намотке на барабан. При этом рукав должен сохранять герметичность при циклических пульсациях давления во время работы пневмоисточников, а электрические цепи — передавать питание, команды управления и сигналы контроля. Работа амбликала при буксировке, многократном срабатывании пневмоисточников осуществляется в разных температурных режимах, волнении на море и знакопеременных. Разработчику приходится учитывать совместную работу всех этих элементов, так чтобы во время работы под давлением и пульсации давления в рукаве не происходило недопустимых деформаций электрических жил и их изоляции. Размеры и гибкость БПК зависят от устройства лебёдки и радиусов изгиба кабеля на направляющих.

У БПК есть две стороны — “wet end” (мокрый конец - МК) Рис. 2, 3 и “dry end”

▼ Рис. 4. Сухой конец амбликала. Конструкция.



▲ Рис. 3. Мокрый конец амбликала. Вид со стороны разъёмов.

(сухой конец — СК) Рис. 4. СК БПК подключается к судовому оборудованию, МК - к буксируемому. В них закрепляется броня, присоединяется воздушная линия и выполняется разводка электрических цепей.

На МК герметичное исполнение «колокола» защищает внутренние элементы от воды, а защита от перегиба ограничивает изгиб кабеля у жёсткого корпуса «колокола» [3]. Поэтому при разработке комплектного амбликала кабельную часть и концевые соединения рассматривают вместе. От качества их сопряжения зависят способность изделия переносить эксплуатационные нагрузки и его долговечность.

Зарубежное оборудование

Ключевые зарубежные разработчики и изготовители пневмоисточников — Sercel и Teledyne Bolt [4, 5]. Sercel предлагает также оборудование для подключения и управления источника-

ми, в том числе амбиликалы с концевыми соединениями [4].

Изготовлением самих амбиликалов занимаются специализированные кабельные предприятия. Fibron выпускает airgun umbilicals [2], DeRegt Cables разрабатывает кабельные сборки и концевые соединения для сейсмических источников [3], Umbilicals International производит gun umbilicals под марками Geocable Systems и Seiscon [6].

Таким образом, поставщик комплекса пневмоисточников и изготовитель его амбиликала могут быть разными предприятиями.

Отечественная разработка

Российский сейсморазведочный флот использует оборудование зарубежного производства; вопросы его оснащения и последующей замены рассмотрены в обзоре С. В. Горбачева [1].

При замене амбиликала необходимо учитывать уже установленное на судне оборудование. Новое изделие должно подходить к существующим креплениям и лебёдке, обеспечивать подачу воздуха и работать с существующей электрической схемой и системой управления, иметь полностью совместимые ответные части с установленным оборудованием. Такой подход позволяет сохранить исправные части комплекса при замене, выработавшего ресурс или повреждённого амбиликала.

Компания «Геоспейс Технолджис Евразия» ведёт проект сейсмического амбиликала пневмоисточников при грантовой поддержке АНО «Центр поддержки инжиниринга и инноваций» (ЦПИИ) по приоритетной отрасли промышленности «Нефтегазовая отрасль», приоритетной подотрасли нефтегазовой отрасли «Оборудование и технологии для геологоразведки» в рамках дорожной карты по направлению

«Оборудование для геологоразведки» на период до 2030 г. На сентябрь 2026 года предприятие находится на этапе изготовления комплектного амбиликала и подготовки к морским испытаниям, намеченным на весну 2027 года.

Работа над собственным изделием даёт возможность увязать конструкцию буксируемого пневмоэлектрического кабеля, концевых соединений и присоединительной арматуры с условиями конкретного судна и требованиями эксплуатирующих организаций. Обсуждение с инженерами эксплуатирующей организации помогает заранее учесть ограничения судового оборудования, удобство монтажа и реальный опыт морских работ с существующим оборудованием. Эксплуатирующая организация также может предложить доработки конструкции и напрямую согласовать их с изготовителем.

Собственная конструкторская и технологическая документация позволяет разбирать причины эксплуатационных повреждений, выбирать замену недоступным материалам и комплектующим, вносить изменения с учётом влияния на весь амбиликал.

Перед выходом в море на испытания согласно утверждённой программе и методике приёмочных испытаний «Сейсмический амбиликал пневмоисточников ЕДМС.422419.002 ПМ» предстоит проверить прочность и герметичность собранного изделия, электрические характеристики и работу при изгибах и намотке. Морские испытания позволят оценить амбиликал вместе с судовым оборудованием: при монтаже, спуске и подъёме, буксировке и работе пневмоисточников. Полученные данные будут использованы для уточнения конструкции и рекомендаций по эксплуатации, а также для подготовки к серийному выпуску амбиликала.

Взаимодействие с изготовителем и обслуживанием

Для судовладельца выбор отечественного амбиликала связан не только с поставкой нового изделия взамен вышедшего из строя. В эксплуатации возникают вопросы, которые удобнее решать непосредственно с его разработчиком: допустима ли замена комплектующих, как установить причину неисправности, какие работы можно выполнить на месте и когда изделие необходимо отправить на предприятие для ремонта. Прямой контакт инженеров заказчика и изготовителя позволяет оперативно решать технические вопросы, передавать результаты осмотра и согласовывать дальнейшие действия.

Отечественное производство даёт и практические возможности для организации ремонта. Отправка изделия и запасных частей внутри страны может иметь более короткое логистическое плечо, чем обращение к зарубежному изготовителю, и не требует международной перевозки с потенциальными санкционными рисками во время перевозки. Это позволит сократить время на организацию обслуживания и поставку комплектующих, доступность ремонтной документации и специализированной оснастки.

Заключение

Создание отечественного амбиликала — шаг к тому, чтобы российские предприятия могли самостоятельно обеспечивать сейсморазведочный флот необходимым оборудованием и поддерживать его в эксплуатации. Собственная конструкция и производство позволяют учитывать особенности судов, напрямую решать технические вопросы с заказчиком и организовать ремонт без длительной отправки изделия зарубежному изготовителю.

Сейчас «Геоспейс» при поддержке ЦПИИ изготавливает комплектный ам-

биликал и готовит его к морским испытаниям весной 2027 года. Испытания позволят проверить принятые технические решения в реальных условиях и определить дальнейшие шаги по освоению производства. Практическим результатом этой работы должно стать отечественное изделие, разработанное и изготовленное на территории Российской Федерации из отечественного сырья и материалов.

Литература

1. Горбачев С. В. Современное состояние рынка морских сейсморазведочных работ 2D/3D/4D с буксируемым оборудованием в России и мире // Приборы и системы разведочной геофизики. — 2025. — № 3(86). — С. 8–20. — URL: <https://psrgeo.geospace-ufa.ru/article/psrgeo-2025-03-p008-522ae8527176>.
2. Fibron. Seismic. Airgun Umbilicals [Электронный ресурс]. — Б. д. — URL: <https://fibron.com/markets/seismic>.
3. Hoogendijk M. Five Types of Terminations // DeRegt Cables [Электронный ресурс]. — Б. д. — URL: <https://deregtcables.com/insights/five-types-of-terminations>.
4. Sercel. Marine Sources: High-performance impulsive sources [Электронный ресурс]: техническая брошюра. — 06/2024. — URL: https://www.sercel.com/sites/default/files/2024-08/marinesources_brochure_newcharte_sercel.pdf.
5. Teledyne Marine. Teledyne Bolt for Oil and Gas Marine Equipment [Электронный ресурс]. — Б. д. — URL: <https://teledynemarine.com/brands/bolt>.
6. Umbilicals International. Seismic [Электронный ресурс]. — Б. д. — URL: <https://umbilicals.com/seismic/>.



СПЕЦИАЛЬНОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО
СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

АО «СКБ СП»

ГИБРИДНАЯ СИСТЕМА
НАЗЕМНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

СКАУТ-НТ

Одна расстановка.
Разные условия.

Кабельные, бескабельные
и автономные модули
в одной системе.

В РЕЕСТРЕ

Минпромторга России

№ 10817148

Запись от 24.06.2026



МТ

Кабельная телеметрия



БАР

Бескабельная передача



БАРС

Автономная запись

ВОЗМОЖНОСТИ СИСТЕМЫ

Данные и контроль качества в поле

Данные с МТ и БАР в реальном времени. Встроенный QC: амплитуда, сигнал/шум, доминантная частота и спектры.

Сохранение данных при обрыве

При обрыве кабельного соединения данные МТ сохраняются в концентраторе перед местом обрыва. После восстановления кабеля — автоматическая загрузка на станцию.

Современные режимы съёмки

Slip-Sweep, Flip-Flip, непрерывная запись. Вибрационные, импульсные и взрывные источники.

Проверьте СКАУТ-НТ
на вашем участке.

Готовы привезти систему
и провести полевые испытания.

АО «СКБ СП»

+7 (8452) 570-500

sales@skbsp.ru

УДК 550.834.05

Программная регулировка усиления в обработке данных метода преломлённых волн

■ Романов В.В., Рыжков В.И., РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва.

■ Аврамёнок А.В., Кирсанова В.С., РГГРУ им. Серго Орджоникидзе, г. Москва.

Аннотация. В статье приводится анализ опыта использования программной регулировки усиления при обработке данных метода преломлённых волн, делается выбор в пользу одновременной коррекции амплитуд по времени и удалению.

Ключевые слова: обработка данных метода преломлённых волн, регулировка усиления, динамический диапазон, программная регулировка усиления.

Введение

Инженерная сейсморазведка применяется для изучения сложных гетерогенных сред [Романов, Рахматуллин, 2014], для которых характерны значительные градиенты истинной скорости и коэффициенты поглощения [Романов, Гапонов, 2014]. Преломлённые волны, кроме того, характеризуются самым высоким показателем геометрического расхождения ($n=2$) [Романов, 2012], что приводит к затруднениям в их корреляции из-за значительного затухания. Исходный динамический диапазон сейсмограмм МПВ находится на уровне 80–100 дБ, визуальный анализ таких данных практически невозможен из-за обрезания импульсов (Trace Clipping) трасс с небольшим удалением. Для уменьшения динамического диапазона применяется регулировка усиления (РУ) до приемлемого для визуального анализа значения в 20–30 дБ [Дмитриев и др., 2024]. Динамический диапазон сужается путём умножения трасс исходной сейсмограммы на выравнивающую кривую, значения которой задаются так, чтобы ослабить интенсивные колебания и усилить слабые. Применение регулировки усиления необходимо для просмотра полевых сейсмограмм и реализации большинства последующих процедур графа обработки [Азаров и др., 2022].

Алгоритмы регулировки усиления (РУ) делятся на автоматические (АРУ) и программные (ПРУ, коррекция). Процедуры АРУ (Automatic Gain Control или Time-Varied

Gain). вычисляют выравнивающие кривые путём обработки отсчётов трасс, например, как обратную функцию от СКО трассы в скользящем окне. Автоматическая регулировка усиления — широко востребованная процедура, входящая в стандартный граф начальной обработки данных сейсморазведки [Киреева, Фиников, 2025]. Единственный настраиваемый параметр АРУ — это **размер окна регулировки**, выраженный в миллисекундах или количестве отсчётов. Считается, что в инженерной сейсморазведке оптимальный размер окна регулировки меньше, чем в “большой” сейсмике, однако этот тезис предполагает, что волны, приходящие с малых глубин, имеют более высокие частоты и меньшую длину импульса, что не всегда соответствует действительности. Главными недостатками АРУ при обработке данных метода преломлённых волн являются возрастание шума до первых вступлений, искажение формы импульса и полная утрата соотношений между амплитудами волн, что делает невозможным дальнейшую динамическую интерпретацию [Киреева, Фиников, 2025].

В алгоритмах ПРУ выравнивающие кривые вычисляются на основе выбранной функциональной зависимости (степенной, экспоненциальной и т.д.) с постоянными коэффициентами. Аргументами выравнивающих кривых ПРУ являются удаление или время, то есть величины, которые не зависят от отсчётов трасс. При

правильно и обосновано подобранных коэффициентах ПРУ (коррекции амплитуд), уровень шума возрастает незначительно, а влияние факторов, определяющие чрезмерную ширину динамического диапазона, компенсируются.

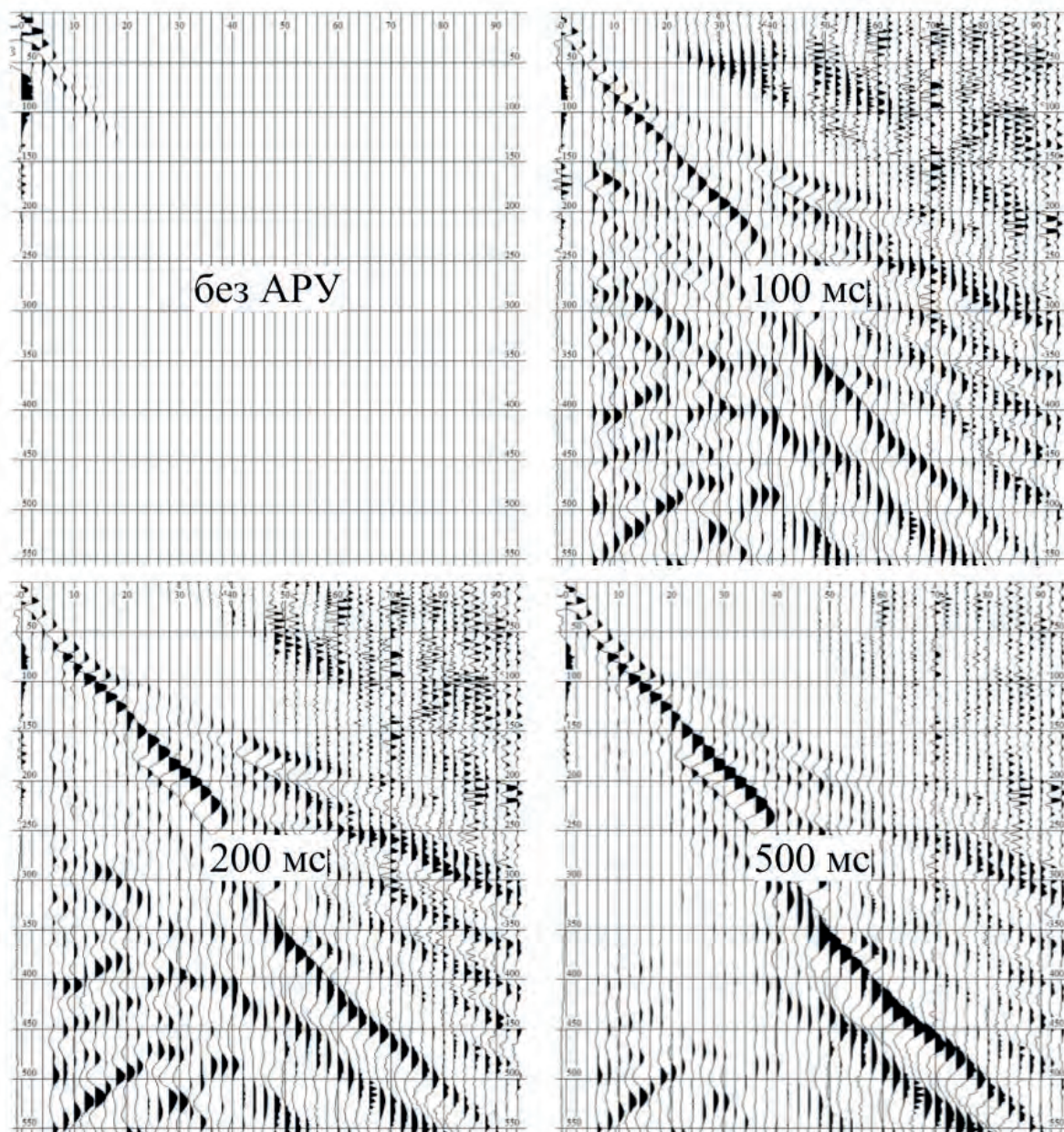
В работе рассматриваются преимущества использования ПРУ при обработке данных метода преломлённых волн.

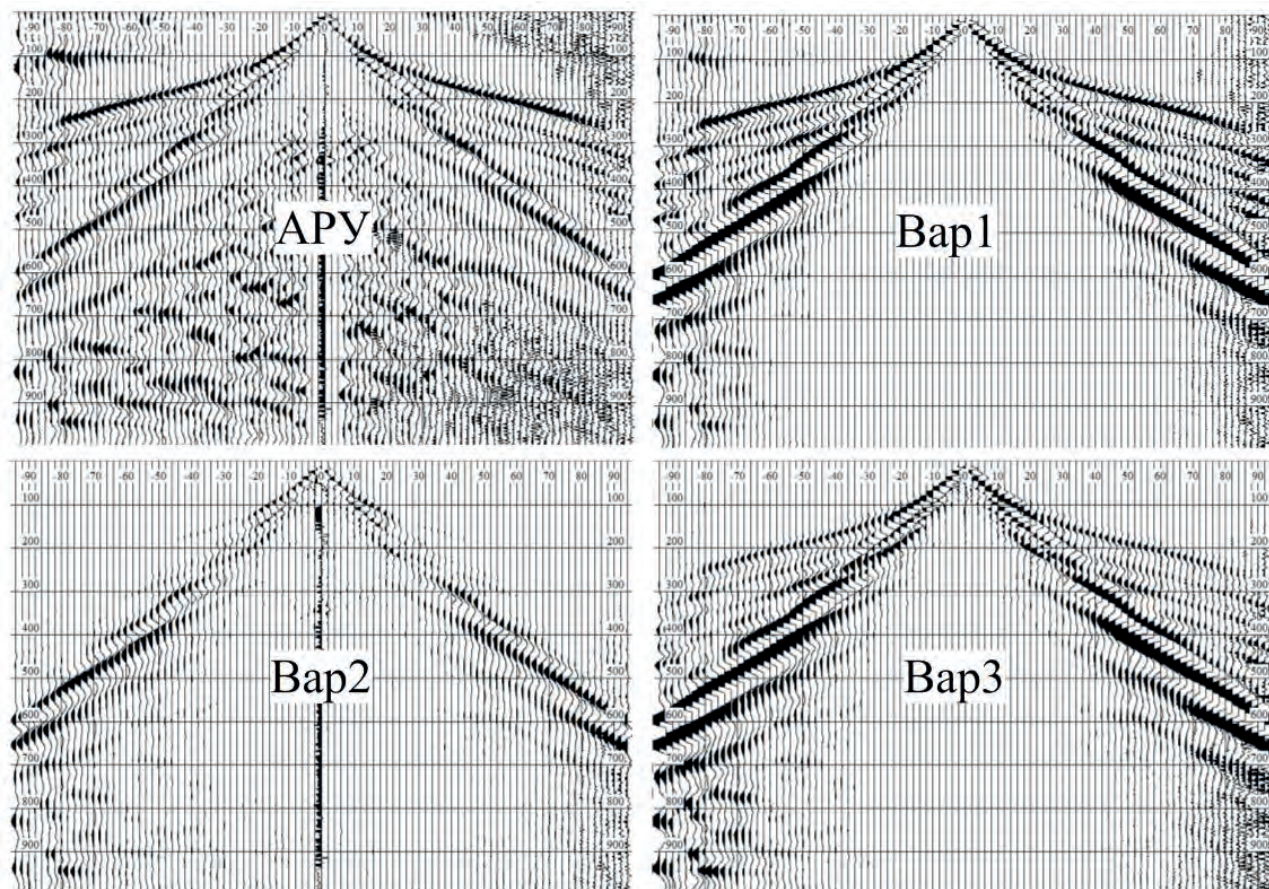
Методика и результаты

На рис. 1 показано применение АРУ с разной длиной окна регуляции к сейсмограмме инженерной сейсморазвед-

ке. Без регуляции на записи проявляется не более 10 импульсов в области первых вступлений, выбор длины окна 100 и 200 мс приводит к чрезмерному уровню шума до первых вступлений. Окно 500 мс, напротив, не позволяет уверенно выделять фазы первых волн, то есть сужение динамического диапазона здесь недостаточно. То есть, оптимальная длина окна регуляции для целей МПВ составила 250-300 мс, что в 2-4 раза меньше аналогичного показателя в графе обработки нефтегазовой сейсморазведки.

▼ Рис. 1. Результат применения АРУ к полевой сейсмограмме.





▲ Рис. 2. Результат сравнения работы алгоритмов ПРУ и АРУ.

В процедурах ПРУ выравнивающая кривая вычисляется как функция одной или двух координат — удаления l и времени t . ПРУ по времени активно применяется при обработке данных МОВ (компенсация сферического расхождения), где затухание амплитуд происходит преимущественно в вертикальном направлении. У преломлённых волн затухание зависит от пути, пройденного скользящей волной, которая распространяется параллельно преломляющей границе, поэтому здесь уменьшение амплитуды зависит от удаления, что следует учитывать при коррекции. Для обработки данных МПВ рекомендуется использовать оба подхода.

На рис. 2 показаны результаты применения к сейсмограмме трёх вариантов ПРУ: 1— умножение трасс на функцию l^2 , 2 — на функцию t^2 , 3 — на произведение функций $l \cdot t$ и АРУ. Использование АРУ привело к усилению шума как в пер-

вых, так в последующих вступлениях. Первый вариант ПРУ (коррекция амплитуд только за удаление) дал результат с высоким уровнем шума на краях сейсмограммы. Использование второго варианта (коррекция только за время) привело к выделению поверхностных волн в последующих вступлениях, область первых вступлений оказалась ослабленной. Оптимальный результат дал третий вариант — сочетание двух подходов ПРУ — одновременная коррекция за удаление и времени с меньшими показателями степенной выравнивающей кривой.

Выводы

В результате тестирования алгоритмов регулировки(коррекции) амплитуд было установлено, что при корреляции преломлённых волн в первых вступлениях оптимальным выбором является использование выравнивающей показательной кривой, зависящей от удаления

и времени. В этом случае уменьшение динамического диапазона не сопровождается возрастанием уровня шума как до первых вступлений, так и в последующих вступлениях.

Литература

1. Азаров А.В., Сердюков А. С., Яблоков А. В. Подавление поверхностных волн в данных сейсморазведки на основе поиска главных компонент волнового поля в частотно-временной области / А // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – Т. 2, № 2. – С. 305-311. – DOI 10.33764/2618-981X-2022-2-2-305-311. – EDN MDNZCK.

2. Дмитриев А.Г., Дмитриева М.А., Ковалев А.С. Проблемы динамического диапазона и информативности изображения при визуализации сейсмических данных. Науки о Земле и недропользование. 2024;47(1):6-16. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-6-16>. EDN: DQCZBW

3. Киреева А. П., Фиников Д. Б. АРУ (AGC) и деконволюция. Об искажениях формы сигнала в ходе нелинейных преобразований // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2025. – №. 1. – С. 87-103.

4. Романов В.В. Применение амплитудных графиков при обработке и интерпретации данных метода преломлённых волн для решения задач инженерной геологии // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2012. № 4. С. 56-60.

5. Романов В.В., Гапонов Д.А. Применение инженерной сейсморазведки при изучении грунтовых вод в глинистых грунтах // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2014. № 6 (184). С. 52-59.

6. Романов В.В., Рахматуллин И.И. Инженерная геофизика при изучении гляциальных отложений Дмитровского района Подмосковья // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2014. № 3. С. 86-88.

УДК 550.834.05

Методика определения физических свойств дисперсных грунтов в естественном залегании по результатам инженерной сейсморазведки

- Романов В.В., РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва.
- Кауркин М.Д., Андреев Д.О., Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва.
- Иванов А.А., РГГРУ им. Серго Орджоникидзе, г. Москва.

Аннотация. Рассмотрена методика определения физических свойств дисперсных грунтов по данным инженерной сейсморазведки в естественном залегании на примере четвертичных суглинков России.

Ключевые слова: инженерная сейсморазведка, физические свойства грунтов, интерпретация данных сейсморазведки, четвертичные суглинки.

Введение

Сейсмические методы исследования, наравне с электрическими, относятся к основным методам инженерно-геофизических исследований. Они применяются для уточнения геологического строения верхней части разреза, поиска скрытых проявлений геодинамических процессов и иных локальных неоднородностей, в сейсмическом микрорайонировании, при определении физических свойств грунтов. В инженерной сейсморазведке задействованы практически все известные типы волн (преломлённые, рефрагированные, отражённые, прямые, поверхностные) и микросейсм, востребовано внутриметодное комплексирование, когда на одном профиле (в скважине или паре скважин) реализуются несколько схем наблюдений и получаются сейсмограммы с записями продольных, поперечных и обменных волн. В сейсморазведке используются: метод преломлённых волн (МПВ) и сейсмическая томография (СТ), вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП), межскважинное сейсмическое просвечивание (МСП), метод отражённых волн в модификации общей глубинной точки (МОВ–ОГТ).

Сейсмическая томография, МПВ и МСП позволяют получить детальное распределение истинной скорости продольных и поперечных волн в плоскости xz , то есть по горизонтальной координате про-

филя (базы просвечивания) и глубине. Скважинные методы (ВСП, МСП) отличаются возможностью выделения инверсных (низкоскоростных) слоёв и большей разрешающей способностью.

Традиционно скорости сейсмических волн используются для перехода от времени вступления к глубинам границ, кроме того, их значения применяются для интерпретации результатов сейсморазведки. В томографических методах алгоритмы инверсии восстанавливают непрерывное распределение истинной скорости, а границы выделяются на уже полученном скоростном разрезе.

Сильные корреляционные зависимости между самими сейсмическими свойствами (скоростями продольных и поперечных волн V_p , V_s ; импедансами ρ_p , ρ_s и декрементами поглощения $\mathcal{Q}_p$, $\mathcal{Q}_s$), а также между сейсмическими и другими физическими параметрами грунтов верхней части разреза [Миндель и др., 2016], позволяют находить значения последних в естественном залегании, без бурения скважин, отбора образцов и выполнения полевых испытаний [Романов и др., 2014]. Теоретическая связь существует только между отношением (1) и динамическим коэффициентом Пуассона (2).

$$\gamma = \frac{V_p}{V_s} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{\gamma^2 - 2}{2(\gamma^2 - 1)} \quad (2)$$

Динамические упругие модули (Юнга E , всестороннего сжатия K , сдвига G) определяются через скорости волн и плотность, которая находится по данным лабораторных испытаний грунтов или через эмпирические отношения (3–5).

$$G = \rho V_S^2 \quad (3)$$

$$K = G \left(\gamma^2 - \frac{4}{3} \right) \quad (4)$$

$$E = G \left(\frac{3\gamma^2 - 4}{\gamma^2 - 1} \right) \quad (5)$$

Значения упругих констант, найденные по данным сейсморазведки, завышены относительно аналогичных модулей, определяющих сопротивление статической нагрузке, поэтому динамические упругие модули уменьшаются за счёт введения понижающих поправок. В частности, в геотехническом программном обеспечении PLAXIS, базирующемся на реализации метода конечных элементов и предназначенном для моделирования поведения грунтов и определения устойчивости строительных конструкций, начальный модуль сдвига $G_{\max}(G_{0ref})$ находится именно по геофизическим данным [Власов и др., 2023].

Помимо плотности, по данным инженерной сейсморазведки определяются такие механические прочностные параметры, как удельное сцепление C и угол внутреннего трения φ , определяющие предельную нагрузку, способную выдержать грунт до разрушения. Оценка предельного напряжённого состояния грунта важна при прогнозировании развития геодинамических процессов [Лобанов, Романов, 2015]. Упругие константы, плотность, прочностные свойства, найденные в узлах регулярной двухмерной сети, позволяют выполнять расчёт показателей устойчивости грунтовой толщи мето-

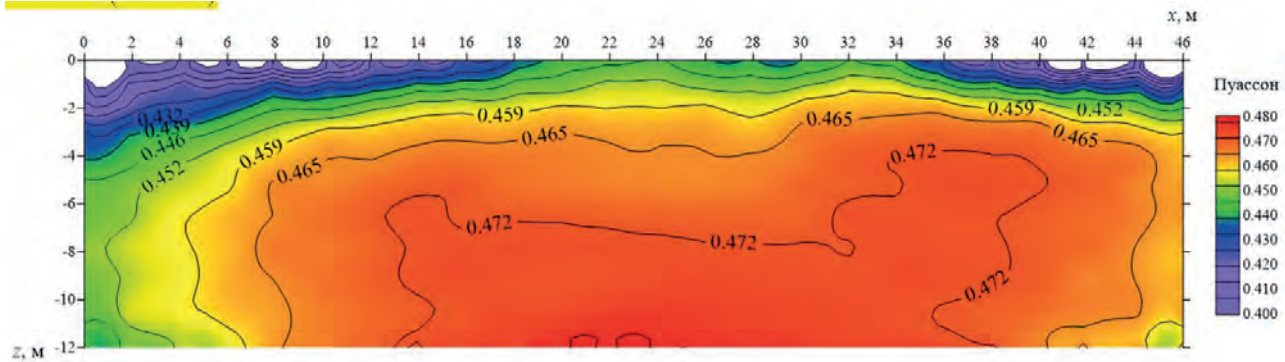
дом конечных элементов на основании критерия Мора — Кулона [Анциферов, Кудрявцев, 2025]. Вместе с тем, полевые испытания и лабораторные исследования редко обеспечивают сохранение условий залегания грунтов [Виноградов, Зубова, 2023] поэтому возможности сейсморазведки в этой области представляются весьма широкими.

В работе рассмотрена методика определения значений физических свойств грунтов в естественном залегании по результатам сейсморазведки.

Метод решения и результаты

Основой для определения распределения физических параметров грунтов служат полученные на регулярной сети значения скоростей продольных и поперечных волн. Такой результат обеспечивает многоволновая сейсморазведка томографическими методами (СТ и МСП). Вместе с тем, из-за сложности подготовки скважин и необходимости в отдельном источнике и приёмной косе, в МСП работа на поперечных волнах обычно не выполняется [Вязниковцев А. А. и др., 2025]. Результаты многоволновой наземной или межскважинной сейсморазведки представляются в виде регулярной прямоугольной сети [Романов и др., 2015], где каждая ячейка характеризуется пространственными координатами центра (x, z) и парой значений скорости V_P, V_S . По соотношениями (1)–(2) в каждой ячейке вычисляются значения коэффициента Пуассона (Рис. 1)

В формулы (3)–(5) входит природная (объёмная) плотность, определяемая по одному из эмпирических уравнений, которые различаются по типу и состоянию грунта [Романов и др. (Метрология, стандартизация и сертификация), 2015], региону и тесноте корреляции. Для суглинков средней полосы Европейской части РФ расчёт в плотности выполняется в два этапа. На первом определяются



▲ Рис. 1. Карта распределения значений коэффициента Пуассона.

приближённые оценки плотности сухого грунта ρ_d и природной весовой влажности w , единицы измерения скорости — км/с; плотности — г/см³, влажности — %. Уравнение (6) используется для входа в систему уравнений многомерной корреляции (7)–(8). Расчёт выполняется итеративно, то есть весовая влажность, полученная по уравнению (7), подставляется в (8), а уточнённая плотность сухого грунта — снова в уравнение (7). Количество итераций 5–6.

$$E = G \left(\frac{3\gamma^2 - 4}{\gamma^2 - 1} \right) \quad (5)$$

$$\rho_d = 1.38 + 0.33 \cdot V_p \quad (6)$$

$$w = 79,061 - 3,82 \cdot V_p - \frac{30,01}{\gamma} - 28,91 \cdot \rho_d \quad (7)$$

Влажность и плотность сухого грунта, найденные по выражениям (7) и (8), используются для входа в систему (9)–(11),

в которую также входит уравнение для расчёта влажности на границе текучести.

$$\rho_d = 2,34 - \frac{0,736}{\gamma} - 0,0245 \cdot w \quad (8)$$

$$w_L = 26,93 + 0,840 \cdot w - 13,143 \cdot \rho_d(1 + 0,01 \cdot w) + 42,9 \cdot V_s \quad (9)$$

$$\rho_d = 2,30 + 0,53 \cdot V_s - \frac{0,656}{\gamma} - 0,0125 \cdot w - 0,0121 \cdot w_L \quad (10)$$

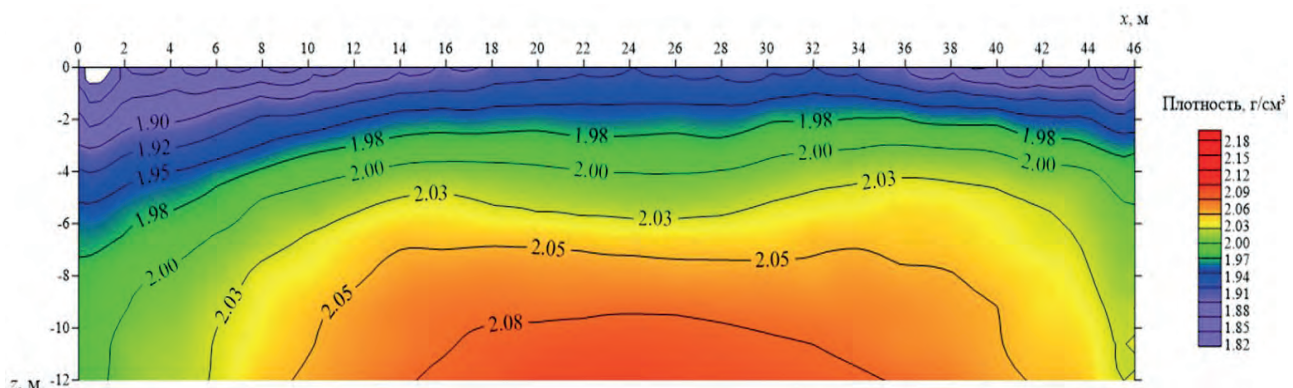
$$w = 79,061 - 3,82 \cdot V_p - \frac{30,01}{\gamma} - 28,91 \cdot \rho_d \quad (11)$$

Плотность грунта находится по стандартной формуле (12).

$$\rho = \rho_d(1 + 0,01 \cdot w) \quad (12)$$

Для определения модуля полной деформации $E_{\text{деф}}$, удельного сцепления и угла внутреннего трения (ускоренный сдвиг) применяются формулы (13)–(15).

▼ Рис. 2. Карта распределения плотности.



Упругие модули в (13)–(15) выражаются в МПа, удельное сцепление — в кПа, угол внутреннего трения — в градусах.

$$E_{\text{ДЕФ}} = 0,0362E + 2,6 \quad (13)$$

$$C = 8\sqrt{G} - 21 \quad (14)$$

$$\varphi = 16,1 - 0,076 \cdot G \quad (15)$$

Выводы

Таким образом, успешно опробованная на суглинках средней полосы Европейской части РФ, методика определения физических свойств грунтов в естественном залегании показала адекватные результаты при интерпретации результатов многоволновой сейсмической томографии.

Литература

1. Анциферов С. В., Кудрявцев М. А. Оценка устойчивости склонов при сооружении в них транспортных тоннелей // Транспортное строительство. – 2025. – № 3. – С. 2-5. – EDN UMCGNC.
2. Виноградов А.Ю., Зубова О.В. Прочностные характеристики грунта при проектировании объектов лесной инфраструктуры. Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2023, 5 (1), 75-86. doi: 10.34753/HS.2023.5.1.75
3. Власов М. А., Простов С. М., Соколов М. В. Выбор рациональных параметров геомеханической модели грунтового основания сооружения в ПК Plaxis 3D // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2023. – № 5 (159). – С. 4-14.
4. Вязниковцев А. А. и др. Метод межскважинного сейсмоакустического просвечивания как инструмент контроля качества закрепления карстующихся грунтов // Вестник АГГИ. – 2025. – Т. 1. – №. 1. – С. 17-25.
5. Лобанов А.М., Романов В.В. Перспективы гравиметрии при изучении

динамически нестабильных геологических объектов // Разведка и охрана недр. 2015. № 7. С. 42-46.

6. Методические рекомендации Методические рекомендации по определению состава, состояния и свойств грунтов сейсмоакустическими методами / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т трансп. стр-ва (ЦНИИС); [разраб.: О. П. Аникин и др.]. – Москва : ЦНИИС, 1985. – 100 с.

7. Миндель И.Г., Севостьянов В.В., Трифонов Б.А., и др., Особенности изучения деформационно-прочностных свойств дисперсных грунтов сейсмоакустическими методами. Геоэкология, 2016, № 5, с. 461–476.

8. Романов В.В., Мальский К.С., Боровой Е.А. Определение устойчивости бортов карьеров при инженерно-геологических изысканиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 7. С. 77-82

9. Романов В.В., Посеренин А.И., Мальский К.С. Метрология, стандартизация и сертификация // Учебное пособие / Москва, 2015.

10. Романов В.В., Рахматуллин И.И. Инженерная геофизика при изучении гляциальных отложений дмитровского района Подмосковья // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2014. № 3. С. 86-88.

11. Tjie-Liong G. Common mistakes on the application of Plaxis 2D in analyzing excavation problems // International Journal of Applied Engineering Research. – 2014. – Т. 9. – №. 21. – С. 8291-8311.

УДК 550.834.05

Оценка объёмной плотности грунтов Московской агломерации при карстологическом прогнозе

■ Романов В.В., РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва.

■ Новиков П.В., Матюшенко А.А., Посеренин А.И. РГГРУ им. Серго Орджоникидзе, г. Москва.

Аннотация. В работе выполняются анализ и обобщение распределений значений плотности и скоростей упругих волн Московской агломерации и нахождение эмпирического соотношения между ними.

Ключевые слова: инженерная сейсморазведка, определение плотности по данным сейсморазведки, Московская агломерация

Введение

Московская агломерация в настоящее время занимает первое место в России и Европе, как крупнейшая городская территория. Её радиус (с учётом маятниковой миграции) достигает 80 км, её население достигает 22 миллионов человек. Регион отличается высокой плотностью застройки, активно застраиваются новые территории и ранее освоенные территории. В связи с этим, повышенный интерес вызывает геологическое строение и физические свойства верхней части разреза, породы (грунты) которой активно взаимодействуют с продуктом хозяйственной деятельности человека — зданиями и сооружениями. Негативное влияние на инфраструктуру агломерации оказываются опасные геодинамические явления — карст, суффозия, оползни и т.д.

В карбонатных скальных грунтах Московской агломерации распространены проявления древнего карста (растворения пород подземными водами с последующими выносом продуктов растворения), что является существенной проблемой для градостроительной деятельности.

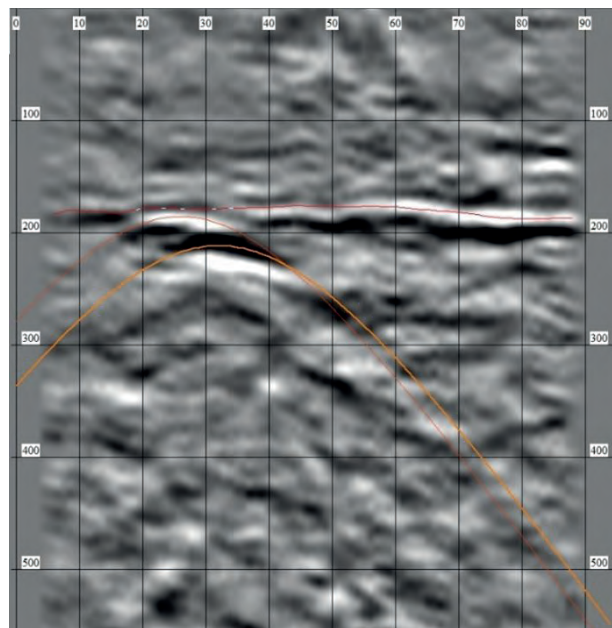
В Московской агломерации наблюдается — русский (по Г.А. Максимовичу), восточно-европейский (по М.А. Зубашенко), среднерусский (по И.В. Попову), закрытый (покрытый) тип карстового процесса. Не менее распространена суффозия — механический вынос части нерастворимых пород потоком подземных вод,

зачастую обусловленная карстовым процессом [Кочев, Чертков, 2018].

Вопросы проектирования фундаментов зданий и сооружений в зонах карстово-суффозионной опасности приобретают особую важность в связи со значительным увеличением количества опасных явлений, связанных с оседаниями и провалами дневной поверхности земли [Романов и др., 2026]. Критический анализ геологических условий площадки строительства и предупреждение подобных проявлений является важнейшей задачей геомеханики.

Инженерные геофизические методы позволяют за короткий срок исследовать площадку изысканий по регулярной плотной сети без прямого контакта с объектом исследования, их глубина и разрешающая способность достаточна для выделения границ в верхней части разреза [Давыдов, 2023]. Геофизические методы выполняются в наземном, скважинном и межскважинном вариантах [Романов, 2023], они применяются для решения следующих задач, связанных с карстовыми процессами:

- Определение рельефа кровли слоя карстующихся пород (поиск проявлений карстового процесса - переуглублений в скальном основании)
- Оценка физических свойств грунтов в естественном залегании (объёмной плотности и т.д.)
- Определение мощности покрыва-



▲ Рис. 1. Выделение кровли каменноугольных известняков в верхней части разреза на разрезе МОВ-ОГТ. Также выделены оси синфазности дифрагированных волн, образованных в верхней кромке карстовых полостей.

ющей толщи и её отдельных слоёв, в частности — водоупорных юрских глин;

- Поиск локальных неоднородностей — полостей, зон трещиноватости, погребённых останцов.
- Оценка состояния кровли карбонатного цоколя

В качестве основных методов для изучения карстовых процессов в СП 446.1325800.2019 устанавливаются методы электроразведки (вертикальное электрическое зондирование, электро-томография, дипольное электрическое зондирование, частотное зондирование, зондирование становлением поля, георадиолокационное зондирование) и сейсморазведки (метод преломлённых волн, метод отражённых волн (Рис. 1), метод поверхностных волн (MASW), вертикальное сейсмическое профилирование, межскважинное сейсмическое просвечивание [Романов, 2022]).

В пределах Московской агломерации

применение электрических методов затруднительно из-за затруднений с заземлением электродов, высокого уровня электромагнитных помех, большого количества низкоомных техногенных образований, малой глубинности и низкой разрешающей способности.

Применение же наземных и скважинных сейсмических методов позволяет успешно и оперативно решать все задачи, связанные с изучением и прогнозированием развития карстовых процессов. Одним из ключевым преимуществ сейсмических методов является определение упругих, плотностных и прочностных свойств грунтов ВЧР в естественном залегании, однако эта возможность базируется на применении эмпирических соотношений.

Для оценки напряжённо-деформированного состояния слоёв грунтовой толщи, с которой взаимодействует сооружение должны быть известны такие свойства, как объёмная плотность, удельное сцепление, угол внутреннего трения, коэффициент пористости, модуль полной деформации и коэффициент Пуассона [Шебуняев, Юдина, 2018].

В частности, для нахождения упругих модулей по сейсмическим свойствам необходимо значение объёмной плотности, которая сейсморазведкой напрямую не определяется.

Поэтому, для успешного раскрытия всех возможностей сейсморазведки при изучении карстовой опасности и карстологическом прогнозе в Московской агломерации необходимо наличие статистически обоснованной региональной эмпирической зависимости между сейсмическими свойствами (скоростями упругих волн) и плотностью.

Методика и результаты

Верхняя часть разреза территории
Московская агломерация включает 4 сей-
смо-стратиграфических комплекса (ССК):

- 1) Четвертичный
- 2) Меловой

3) Юрский

4) Каменноугольный

Каждый комплекс включает элементы
(подразделения), выделяемые по возра-
сту, литологическому составу и генези-
су [Романов, 2015] (Таблица 1). Сводная

▼ Табл. 1. Средние плотности грунтов Московского региона.

№	Обозначение	Состав или возраст	Плотность, г/см ³
1	tQ _{IV}	техногенные грунты	1,61
2	a-dQ _{IV}	аллювиальные, пролювиальные, озёрные и болотные грунты, дефлационные	1,95
3	prQ _{III}	покровные грунты	1,98
4	aQ _{III}	аллювиальные грунты	1,89
5	afQ _{III}	аллювиально-флювиогляциальные грунты	2,06
6	fQ _{III}	флювиогляциальные грунты	1,97
7	lbQ _{III}	озёрно-болотные грунты	1,71
8	gQ _{II}	гляциальные грунты	2,16
9	lgQ _{II}	лимно-гляциальные грунты	1,96
10	fQ _{II}	флювиогляциальные грунты	2,02
11	gQ _I	гляциальные грунты	2,18
12	lg-fQ _I	лимно-гляциальные и флювиогляциальные грунты	2,03
13	K ₂ cn-km	сантон-компанский ярусы	1,82
14	K ₂ t-k	турон-коньяский ярусы	2,02
15	K ₂ s	сеноманский ярус	1,80
16	K ₁ al	альбский ярус	1,90
17	K ₁ a	аптский ярус	1,98
18	K ₁ h-br	готерив-барремский ярусы	1,94
19	J ₃ v	волжский ярус	1,98
20	J ₃ ox-km	оксфорд-киммериджский ярусы	1,76
21	J ₂ cl	келловейский ярус	2,00
22	C ₃ sc	щёлковская свита	2,09
23	C ₃ rs	русавкинская свита	2,32
24	C ₃ tr	трошковская свита	1,99
25	C ₃ ms	мясницкая (измайловская) свита	2,19
26	C ₃ sd	садовая (мещеринская) свита	2,10
27	C ₃ prs	пресненская (перхуровская) свита	2,22
28	C ₃ msc	мещеринская (неверовская) свита	2,20
29	C ₃ prh	перхуровская(ратмировская) свита	2,27
30	C ₃ nv	неверовская (воскресенская) свита	2,08
31	C ₃ vs	воскресенская (верхняя пачка суворовской свиты) свита	2,35
32	C ₃ sv	суворовская (нижняя пачка суворовской свиты) свита	2,24
33	C ₂ pd-mc	подольская и мячковская свита	2,30

таблица типовых (нормативных) значений сейсмических, упругих, плотностных и прочностных свойств слоёв грунтов Московской агломерации в настоящее время отсутствует, данные о сейсмических свойствах разрознены и относятся они большей частью к каменноугольным и юрским отложениям. Значения плотности, приведённые в статье, были собраны и обобщены на основании данных, содержащихся в отчётах по инженерно-геологическим изысканиям и в научных публикациях (Таблица 1). В таблице приведены средние арифметические значения, в случае существенных расхождений между модальными и средними значениями, приводятся средние между ними.

Сейсмические свойства (скорости продольных и поперечных волн) в литературных источниках приведены для песков и суглинков четвертичной системы, юрских глин (преимущественно оксфордских), каменноугольных глин, мергелей и известняков касимовского и московского ярусов. Данные о сейсмических свойствах были получены вертикальным сейсмическим профилированием, ультразвуковой керноскопией, межскважинным просвечиванием.

Основные публикации на эту тему представлены специалистами ИГЭ РАН и кафедры сейсмометрии и геоакустики МГУ. Во всех случаях сейсмические свойства определялись скважинными и лабораторными методами, данных, полученных наземными методами практически нет, по некоторым стратиграфическим подразделениям сейсмические свойства не определялись или они приведены по небольшому числу неуказанных объектов [Романов и др., 2018].

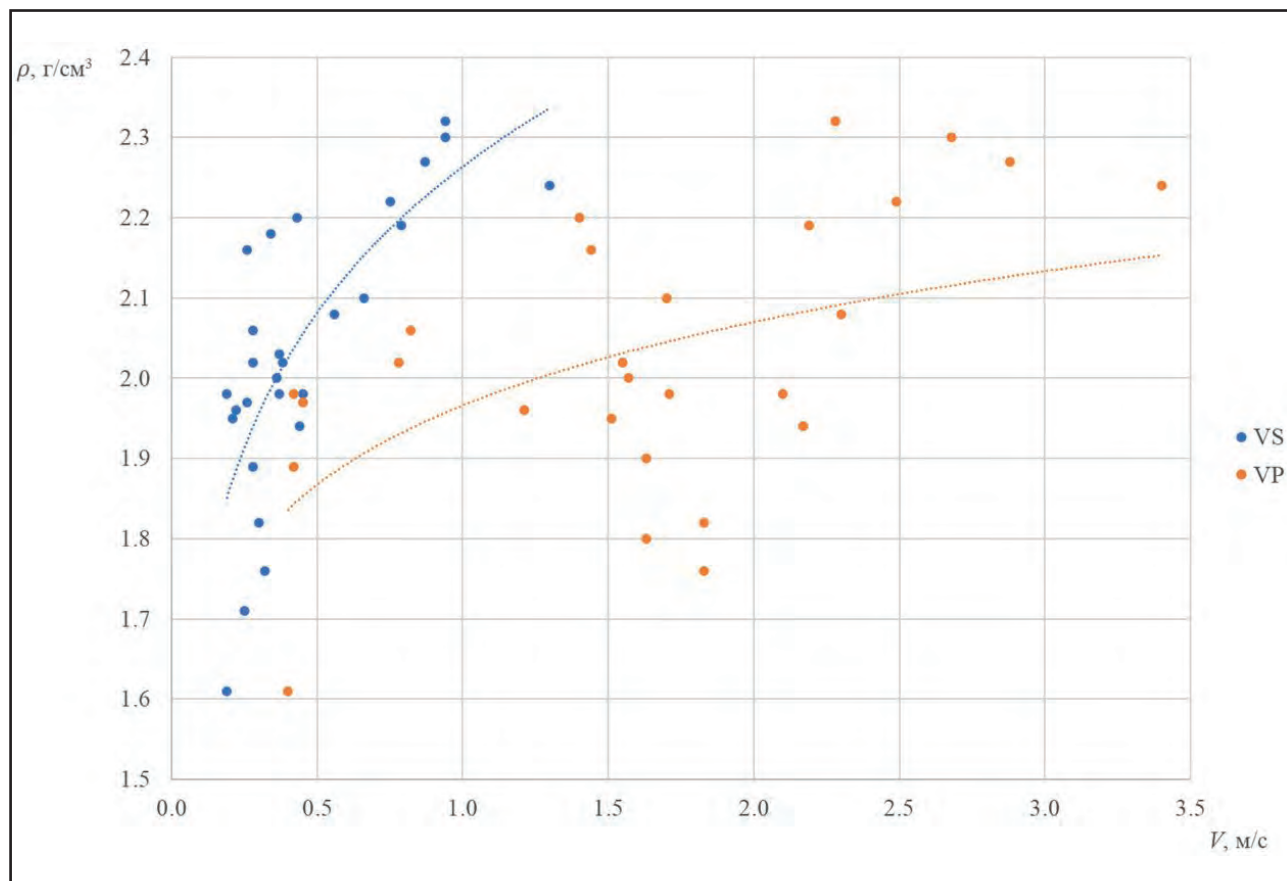
Данные, приведённые в таблице 2, получены преимущественно наземными методами (сейсмической томографией, МПВ, МОВ-ОГТ и MASW) [Романов, Шнеерсон, 2018] и привязаны к стратиграфическим

№	Обозначение	V_s , м/с	V_p , м/с
1	tQ_{IV}	190	400
2	$a-dQ_{IV}$	210	1510
3	prQ_{III}	190	420
4	aQ_{III}	280	420
5	afQ_{III}	280	820
6	fQ_{III}	260	450
7	lbQ_{III}	250	
8	gQ_{II}	260	1440
9	lgQ_{II}	220	1210
10	fQ_{II}	280	780
11	gQ_I	340	
12	$lg-fQ_I$	370	
13	$K_2 \text{ cn-km}$	300	1830
14	$K_2 \text{ t-k}$	380	1550
15	$K_2 \text{ s}$		1630
16	$K_1 \text{ al}$		1630
17	$K_1 \text{ a}$	450	2100
18	$K_1 \text{ h-br}$	440	2170
19	$J_3 \text{ v}$	370	1710
20	$J_3 \text{ ox-km}$	320	1830
21	$J_2 \text{ cl}$	360	1570
22	$C_3 \text{ sc}$		
23	$C_3 \text{ rs}$	940	2280
24	$C_3 \text{ tr}$		
25	$C_3 \text{ ms}$	790	2190
26	$C_3 \text{ sd}$	660	1700
27	$C_3 \text{ prs}$	750	2490
28	$C_3 \text{ msc}$	430	1400
29	$C_3 \text{ prh}$	870	2880
30	$C_3 \text{ nv}$	560	2300
31	$C_3 \text{ vs}$		
32	$C_3 \text{ sv}$	1300	3400
33	$C_2 \text{ pd-mc}$	940	2680

▲ Табл. 2. Средние значения сейсмических свойств Московского региона.

подразделениям, указанным в таблице 1.

На основании таблиц 1, 2 получены обобщающие показательные уравнения, позволяющие находить плотность по скоростям сейсмических волн (1) – (2). На рис.2 показаны кросс-плоты, иллю-



▲ Рис. 2. Кросс-плоты скоростей сейсмических волн и плотности.

стрирующие тесноту связи плотности и скоростей.

$$\rho = 1,97 \cdot V_p^{0,07} \quad (1)$$

$$\rho = 2,26 \cdot V_s^{0,12} \quad (2)$$

Для дочетвертичных отложений коэффициенты уравнения изменяются, особенно для продольных волн (3)–(4).

$$\rho = 1,78 \cdot V_p^{0,20} \quad (3)$$

$$\rho = 2,28 \cdot V_s^{0,16} \quad (4)$$

Выводы

Из приведённых выражений наибольшей теснотой корреляции (0,78) обладает формула (4), что позволяет рекомендовать её для оценки плотности грунтов Московской агломерации по скорости поперечных сейсмических волн.

Литература

1. Давыдов В.А. Выявление карста геофизическими методами с применением микросейсмических зондирований // Известия Уральского государственного горного университета. 2023. № 1 (69). С. 108-113.
2. Кочев А.Д., Чертков Л.Г. Использование методов сейсмоакустики на закарстованных территориях крупных городов (на примере Москвы и нижнего Новгорода) // Инженерные изыскания. 2018. Т. 12. № 9-10. С. 50-62.
3. Романов В.В. Применение инженерной сейсморазведки при оценке карсто-суффозионной опасности на примере Московского региона // В сборнике: Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Москва, 2022. С. 208-210.

4. Романов В.В., Кауркин М.Д., Андреев Д.О., Судоплатова А.А. Уточнение категории карстовой опасности участков строительства Московской агломерации методами инженерной сейсморазведки // Приборы и системы разведочной геофизики. 2026. № 1 (88). С. 100-104.

5. Романов В.В. Опыт прослеживания отражающих границ на территории Московского региона // Приборы и системы разведочной геофизики. 2023. № 4 (79). С. 62-69.

6. Романов В.В., Иванов А.А., Шматкова А.А. Опыт применения инженерной сейсморазведки МОВОГТ для оценки карстовосуффозионной опасности на территории Москвы и Московской области // В сборнике: Инженерная сейсморазведка-2018. Сборник тезисов научно-практической конференции. Под редакцией М.Р. Садуртдинова, М.С. Судаковой. 2018. С. 20-24.

7. Романов В.В., Шнеерсон М.Б. Инженерная сейсморазведка методом отраженных волн в Москве // Геофизика. 2018. № 6. С. 75-81.

8. Романов В.В. Из опыта комплексного применения сейсморазведки и георадиолокации при инженерно-геологических изысканиях на территории Москвы // Инженерные изыскания. 2015. № 5-6. С. 44-49.

9. Шебуняев А. Н., Юдина И. М. Расчет напряженно-деформированного состояния основания в области карстового провала //Инженерный вестник Дона. – 2019. – №. 1 (52). – С. 77.

УДК 550.8:902/904

Геофизика открывает историю. Тайны усыпальницы Николая Львова

Георадиолокационные исследования в усадьбе Никольское-Черенчицы

■ Сергеев К.С.¹, Севостьянов М.В.¹, Бурский И.С.¹,■ Словицкий С.Л.²,■ Слонов Д.Н.³

¹ Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва.

² Архитектурное бюро «Тектоника», г. Санкт-Петербург.

³ Научно-практический журнал «Приборы и системы разведочной геофизики», г. Саратов.

Аннотация. Геофизические методы давно вышли за пределы традиционных задач поиска полезных ископаемых и инженерных изысканий. Сегодня они помогают исследовать архитектурные памятники, обнаруживать скрытые подземные сооружения и открывать неизвестные страницы истории, не нарушая целостности объектов культурного наследия. В июне 2026 года методом георадиолокации был обследован нижний храм-мавзолей церкви Воскресения Христова в усадьбе Никольское-Черенчицы — родовой усыпальницы семьи Львовых и одного из наиболее значительных произведений выдающегося русского архитектора, инженера и просветителя Николая Александровича Львова. В результате исследований внутри мавзолея и по его внешнему периметру выявлены локальные геофизические аномалии, часть которых может быть связана со скрытыми строительными конструкциями, погребальными сооружениями или подземными полостями. Полученные результаты не дают окончательного ответа о природе обнаруженных объектов, но определяют наиболее перспективные участки для последующих археологических исследований и реставрационных работ.

Ключевые слова: археологическая геофизика, георадиолокация, георадар, культурное наследие, Николай Львов, Никольское-Черенчицы, церковь-усыпальница, подземные сооружения.

История не кончается

Мы привыкли считать, что геофизика ищет нефть, газ, рудные тела или подземные воды. В привычном представлении геофизический прибор работает среди лесов, болот и бескрайних северных пространств, помогая увидеть глубинное строение Земли там, куда невозможно проникнуть непосредственно. Но иногда геофизика решает совсем другие задачи.

Она работает под сводами старинных храмов, проходит по полу заброшенных дворцов и усадеб, исследует древние крепости и монастыри. Там, где нельзя разрушить кладку, вскрыть фундамент или начать раскопки без предварительно-

го научного обоснования, геофизические методы позволяют заглянуть в скрытое пространство памятника.

Геофизика не заменяет историю и археологию. Она помогает им задавать правильные вопросы. Именно такая задача возникла при обследовании нижнего храма-мавзолея церкви Воскресения Христова в усадьбе Никольское-Черенчицы Тверской области. Это место связано с именем одного из самых удивительных людей русского Просвещения — Николая Александровича Львова.

В июне 2026 года здесь были проведены георадиолокационные исследования. Их целью стало изучение грунтового осно-

вания и поиск скрытых подземных неоднородностей — возможных строительных полостей, утраченных конструкций и погребальных сооружений. Обследование охватило всю доступную площадь нижнего храма, а также внешний периметр здания.

Результаты исследования не поставили точку в загадках Никольского-Черенциц. Напротив, они показали, что серьезные исследования только начинаются.

Человек, который опередил своё время

Николай Александрович Львов [15] мая 1753, — 22 декабря 1803 [3 января 1804], — русский архитектор, последователь палладианства, один из самых ярких и разносторонних представителей Русского Просвещения. Он был архитектором, инженером, учёным, изобретателем, художником, поэтом, музыкантом, переводчиком, археологом, геологом и государственным деятелем. Его интересовали строительство дорог, вентиляция и отопление зданий, гидротехника, полезные ископаемые, древнерусская архитектура и русская народная музыка.

Львов проектировал дворцы, усадьбы и храмы, изучал природные материалы, разрабатывал инженерные решения и участвовал в становлении отечественной технической мысли. Некоторые его идеи значительно опередили своё время. По масштабу интересов и разнообразию дарований его нередко сравнивают с универсальными мастерами эпохи Возрождения.

Но Львов был не только выдающимся создателем своего времени. Он обладал редким умением соединять искусство и инженерное знание. Для него архитектура не сводилась к внешней красоте здания. Она включала понимание природной среды, свойств строительных материалов, движения воздуха и воды, освещения, отопления и внутренней



▲ Рис.1. Портрет Львова Н.А. кисти Дмитрия Левицкого, 1789 г.

организации пространства. В его сооружениях художественный замысел невозможно отделить от инженерного расчёта.

Такой же целостной была и созданная им усадьба Никольское-Черенчицы — родовое имение Львовых, построенное по замыслу и проекту самого Николая Александровича.

До наших дней дошла лишь часть его архитектурного наследия. Поэтому каждое сохранившееся сооружение Львова — это не просто памятник русского классицизма. Это своеобразный исторический документ, в котором запечатлены инженерные и художественные представления выдающегося человека XVIII века. Однако некоторые страницы этого документа до сих пор остаются непрочитанными.

Храм и усыпальница

Центральным сооружением Никольского-Черенциц стала церковь Воскресения Христова. Одновременно она выполняла функцию родовой усыпальницы семьи Львовых. Архитектурная композиция здания необычна. Над землёй возвышается монументальный храм-ротонда, а под ним расположен нижний храм-мавзолей — система сводчатых

► Рис.2. План усадьбы Никольское-Черенчицы.



А

▲ Рис.3 Церковь-ротонда, усыпальница Львовых. А – фото, Б – продольный разрез сооружения.

помещений, предназначавшихся для семейных захоронений.

В центре нижнего уровня находится круглое помещение. От него расходятся радиальные пространства, проходы и ниши. Вместе они образуют сложную и гармоничную композицию, в которой геометрическая ясность классицизма сочетается с особой атмосферой подземного мемориального пространства. За прошедшие два столетия храм пережил периоды запустения и разрушения. Долгое

Б

отсутствие систематического ухода и полноценных реставрационных работ привело к повреждениям кладки и отделочных покрытий, утрате штукатурного слоя, воздействию влаги и ухудшению состояния подземной части сооружения.

Но разрушение затронуло не только видимые конструкции. Историческая планировка нижнего храма известна не полностью. За два с лишним столетия отдельные помещения могли быть перестроены, засыпаны или утрачены. Не ис-

ключено существование погребальных камер, строительных полостей, дренажных элементов и других подземных конструкций, отсутствующих в современной документации.

Особое беспокойство вызывает и состояние грунтового основания. Увлажнение, разуплотнение или образование скрытых пустот могут представлять опасность как для сохранности исторических захоронений, так и для пространственной устойчивости памятника. Поэтому до начала реставрационных вмешательств было необходимо получить сведения о том, что находится под полом нижнего храма и в непосредственной близости от его наружных стен. Но как исследовать подземную часть усыпальницы, не нарушая её конструкции?

После революции церковь-усыпальница подверглась разорению. По воспоминаниям современников и позднейшим публикациям, захоронения семьи Львовых были вскрыты, а останки Николая Александровича и его близких выброшены из склепа. Эта трагическая история давно воспринимается как установленный факт. Однако возникает закономерный вопрос: действительно ли были уничтожены все погребения? Архивные свидетельства тех событий

немногочисленны и далеко не всегда позволяют с уверенностью восстановить происходившее. Нижний храм представляет собой сложное подземное сооружение, история формирования которого изучена не полностью. Не исключено, что часть погребальных камер могла оказаться скрытой под позднейшими наслоениями, строительными конструкциями или полом мавзолея и потому осталась неизвестной разрушителям. Сегодня невозможно ни подтвердить, ни опровергнуть такую возможность. Но именно здесь современные геофизические методы способны сыграть важную роль. Если под полом усыпальницы действительно сохранились неизвестные помещения или погребальные сооружения, обнаружить их можно без разрушения исторического памятника. И тогда геофизика сможет не только помочь сохранению архитектурного наследия Николая Львова, но и приблизить исследователей к восстановлению одной из самых драматичных страниц истории его семьи.

Георадар под сводами усыпальницы

Метод георадиолокации иногда сравнивают с медицинским обследованием. Врач не начинает лечение, пока не получит представление о состоянии внутренних органов. Так и реставратор или

▼ Рис. 4. Нижний храм-усыпальница церкви Воскресения Христова. А – фото, Б - схема



А



Б

археолог не должен начинать вскрытие исторического основания вслепую. Сначала необходимо понять, где могут находиться скрытые конструкции, пустоты или нарушенные участки грунта.

Георадар излучает электромагнитные импульсы и регистрирует сигналы, отражённые от границ сред с различными физическими свойствами. На записи — радарограмме — геофизик видит не сами стены, захоронения или полости, а изменения характера волнового поля. Нарушается непрерывность отражающих границ. Меняются амплитуда и частота сигнала. Возникают многократные переотражения. Регулярная волновая картина сменяется хаотичным рисунком записи.

Полевые исследования проводились в июне 2026 года в нижнем храме-мавзолее церкви Воскресения Христова в усадьбе Никольское-Черенчицы. Перед специалистами стояла задача изучить состояние грунтового основания сооружения, выявить возможные зоны разуплотнения, скрытые строительные полости и другие подземные неоднородности. Принципиально важно было получить эту информацию без вскрытия пола, нарушения исторических конструкций и

какого-либо вмешательства в структуру памятника.

Для обследования использовался георадар «ОКО-2» с антенным блоком АБ-400М, работающим на центральной частоте 400 МГц. Такая аппаратура позволяет исследовать верхнюю часть грунтового массива с достаточно высокой детальностью и фиксировать изменения электрофизических свойств среды, связанные с неоднородностями основания, погребёнными конструкциями и возможными полостями.

Архитектура нижнего храма определила необычную схему наблюдений. Центральное круглое помещение окружено системой радиальных камер и проходов, поэтому профили прокладывались как по радиальным направлениям, так и по дугам, повторяющим внутреннюю геометрию сооружения. Измерения выполнялись во всех доступных помещениях нижнего храма, а также снаружи — вдоль южного фасада, где сохранялась возможность пройти с георадаром непосредственно у стен памятника.

Всего было выполнено 13 георадиолокационных профилей общей протяжённостью около 260 м. Одиннадцать профилей длиной около 125 м прошли

► Рис. 5.
Георадарные
исследования в
нижнем храме



внутри нижнего храма, ещё два протяжённых профиля общей длиной около 135 м были проложены по внешнему периметру здания. Общая площадь обследования составила около 400 м².

Полученные радарограммы прошли обработку и интерпретацию. При анализе учитывался не один отдельный признак, а целый комплекс особенностей волновой картины: нарушение непрерывности отражающих границ, потеря корреляции сигнала, изменение амплитуды и частотного состава записи, появление хаотичных отражений и многократных переотражений. Особенно важным считалось совпадение аномалий на соседних профилях. Если похожий объект проявляется на нескольких независимых линиях наблюдений и занимает согласованное положение в плане, вероятность случайной или помеховой природы такого сигнала существенно уменьшается.

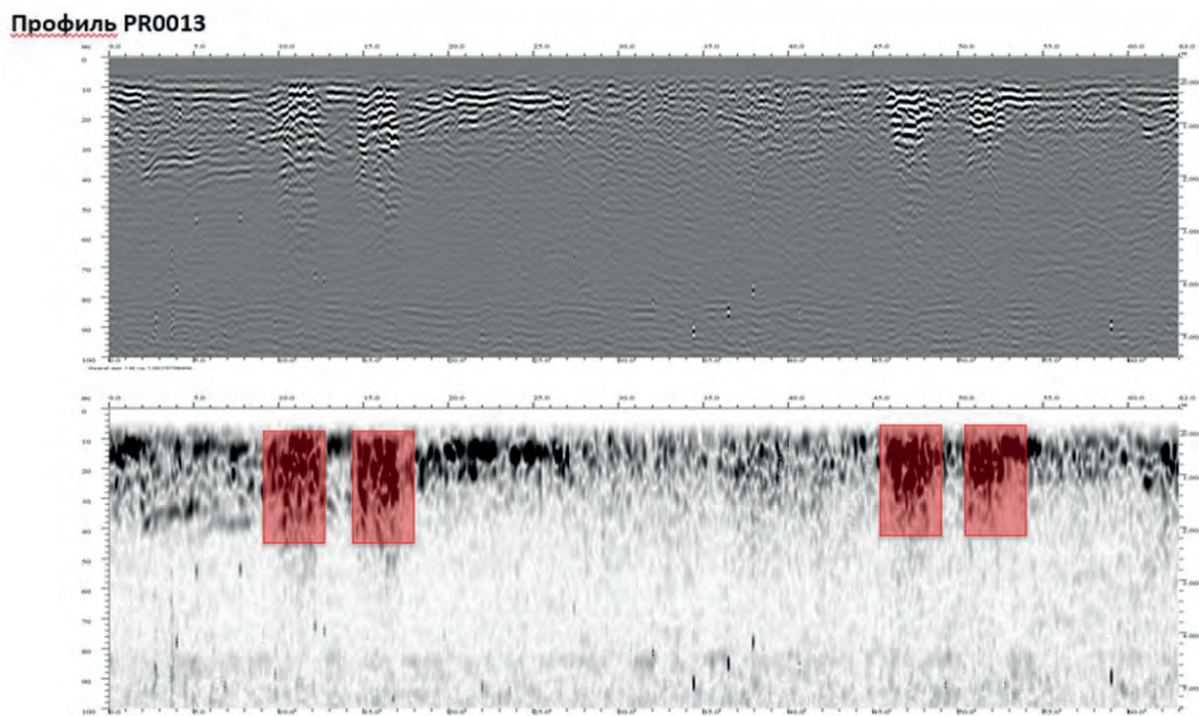
Что показали радарограммы

На интерпретационной схеме георадиолокационных исследований (Рис. 7.) показано положение всех пройденных

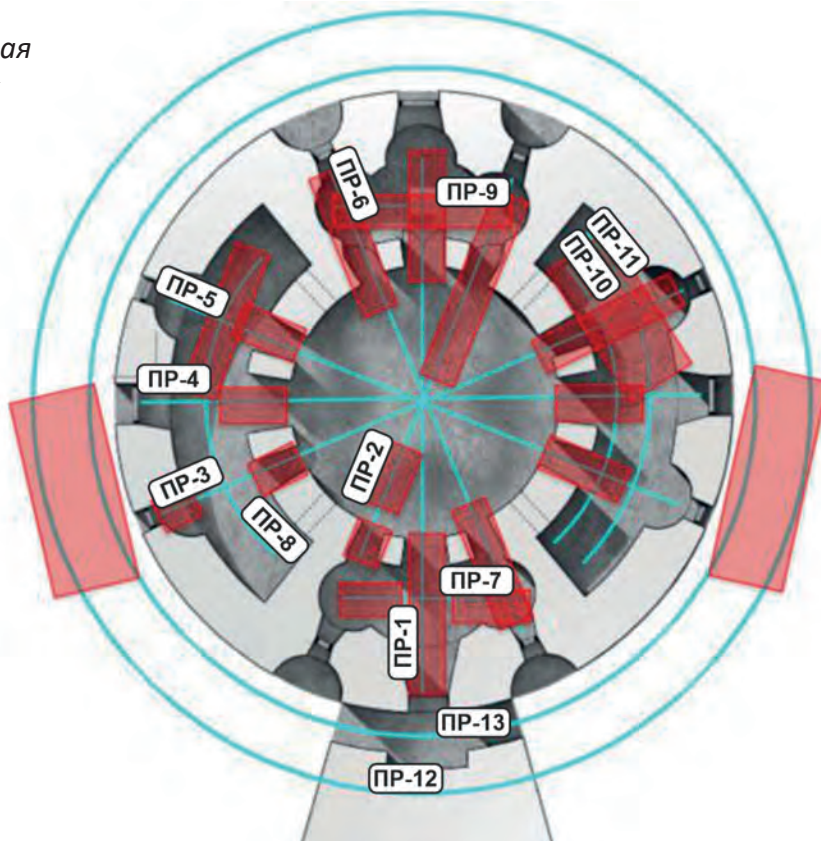
профилей и участков, где на радарограммах выявлены аномальные изменения волновой картины. Красным цветом обозначены зоны нарушения регулярной структуры отражений, повышения амплитуды сигнала и появления многократных переотражений. Эти участки не следует рассматривать как непосредственно обнаруженные пустоты: схема отражает результат геофизической интерпретации и показывает зоны, требующие дальнейшей проверки.

Внутри нижнего храма аномальные зоны распределены неравномерно. Значительная их часть приурочена к радиальным помещениям, местам их сопряжения с центральной частью мавзолея и участкам вдоль капитальных стен. Наиболее выраженные аномалии отмечены на профилях ПР-3, ПР-4, ПР-5, ПР-8, ПР-10 и ПР-11. Часть из них прослеживается на соседних профилях и образует пространственно согласованные группы, что повышает достоверность интерпретации и позволяет предполагать наличие реальных неоднородностей основания

▼ Рис.6. Радарограмма по профилю 13 с выделенными аномальными зонами.



► Рис. 7. Интерпретационная схема георадиолокационных исследований нижнего храма-мавзолея с положением профилей и выделенными аномальными зонами (красный цвет).



или скрытых элементов первоначальной конструкции мавзолея.

Особого внимания заслуживают аномалии, выявленные по внешнему периметру постройки с южной и северной сторон храма. На профилях ПР-12 и ПР-13 выделена система близко расположенных аномальных участков, которые на интерпретационной схеме формируют несколько протяжённых зон. Их пространственная согласованность указывает на то, что обнаруженные изменения волновой картины, вероятно, связаны с особенностями подземного строения вокруг мавзолея, а не являются случайными локальными помехами. Эти участки следует рассматривать как наиболее перспективные для детального комплексного геофизического обследования и последующей археологической проверки.

Природа отмеченных на схеме зон пока не установлена однозначно. Они могут быть связаны с локальным разуплотнением грунта, нарушением структуры основания, строительными поло-

стями, погребёнными конструкциями или историческими погребальными сооружениями. Поэтому рисунок следует рассматривать не как план уже обнаруженных подземных объектов, а как карту наиболее перспективных участков для дальнейших исследований.

Именно здесь особенно ярко проявляется роль геофизики. Она не подменяет археологию и не даёт готового ответа на вопрос, что находится под землёй. Геофизика делает другое: она выделяет участки, где поиск следует продолжить, помогает точнее планировать дальнейшие исследования и позволяет минимизировать вмешательство в исторический памятник.

Проведённое обследование впервые дало возможность получить целостное представление о неоднородностях основания нижнего храма и прилегающей территории. Внутри мавзолея выявлены закономерно расположенные аномальные зоны, а снаружи — возможное продолжение скрытой подземной структуры. Эти результаты не закрыва-

ют историческую загадку Никольского-Черенциц, но впервые позволяют очертить её границы.

Перспективы дальнейших геофизических исследований

Проведённое георадиолокационное обследование нижнего храма-мавзолея стало лишь первым этапом комплексного изучения архитектурного ансамбля усадьбы Никольское-Черенчицы. Полученные результаты показали высокую эффективность применения неразрушающих геофизических методов и позволяют сформировать программу дальнейших исследований, направленную как на решение инженерных задач сохранения памятников, так и на изучение исторической планировки усадьбы.

Современная практика исследований объектов культурного наследия показывает, что наибольшая информативность достигается при комплексном использовании нескольких геофизических методов, каждый из которых позволяет получить сведения о различных физических свойствах грунтов и конструкций.

Георадиолокация обеспечивает высокодетальное изучение верхней части разреза и локальных архитектурных элементов, электрические методы позволяют исследовать распределение электрофизических свойств основания, а малоглубинная сейсморазведка дает возможность оценить строение грунтового массива, глубину залегания плотных горизонтов и выявить крупные подземные неоднородности.

Совместная интерпретация результатов существенно повышает достоверность выводов.

Нижний храм-мавзолей

В первую очередь представляется целесообразным продолжить исследования в самом мавзолее. Наиболее перспективными являются участки, где на нескольких профилях зарегистрированы

совпадающие георадиолокационные аномалии.

Следующим этапом рекомендуется выполнить высокодетальную трёхмерную георадиолокационную съёмку с уменьшенным шагом профилей (0,2–0,25 м), что позволит значительно уточнить пространственную конфигурацию обнаруженных объектов и построить объемную модель подповерхностного пространства мавзолея.

Для проверки природы выявленных аномалий целесообразно использовать методы электротомографии и электрического сопротивления. Эти исследования позволят установить распределение удельного электрического сопротивления грунтов, определить зоны повышенного увлажнения, разуплотнения, выявить возможные пустоты и скрытые каменные конструкции.

Дополнительную информацию о строении основания способна дать малоглубинная сейсморазведка методом многоканального анализа поверхностных волн (MASW) и сейсмотомография первых вступлений. Эти методы позволяют определить скорости распространения упругих волн, оценить степень нарушения грунтов, выявить ослабленные зоны и проследить границы между естественным основанием и техногенными сооружениями.

Совместное применение трёх методов позволит значительно повысить достоверность интерпретации и определить участки, требующие археологической проверки.

Пирамида-погреб

Особый интерес представляет Пирамида — одно из наиболее необычных сооружений усадьбы Львова. Несмотря на сравнительно хорошую сохранность надземной части, вопросы внутреннего устройства основания, характера фундаментов, возможного существования скрытых помещений и

инженерных коммуникаций остаются открытыми.

Комплекс георадиолокационных исследований позволит изучить внутреннюю структуру сооружения и прилегающей территории, а электротомография — определить возможные скрытые камеры и зоны повышенной влажности.

Особенно перспективным представляется применение малоглубинной сейсморазведки. Сейсмические исследования позволят оценить состояние грунтового основания, выявить нарушения массива, определить глубину заложения фундаментов и возможное существование подземных сооружений, не проявляющихся на георадиолокационных данных.

Флигель

Сохранившийся усадебный флигель также представляет значительный интерес для комплексных геофизических исследований.

Георадар позволит локализовать фун-

▼ *Рис. 8. Пирамида Львова – потенциальный объект изучения комплексом геофизических методов.*



даменты, следы утраченных пристроек и инженерных коммуникаций.

Электротомография позволит оценить состояние основания здания и выявить зоны повышенного увлажнения, представляющие опасность для сохранности фундаментов.

Малоглубинная сейсморазведка позволит определить физико-механическое состояние грунтового основания и выявить возможные зоны ослабления, представляющие интерес для реставраторов.

Кузница и хозяйственная зона

Особое направление исследований связано с территорией бывшей кузницы и хозяйственного двора. Подобные участки отличаются высокой насыщенностью археологическими остатками: фундаментами построек, остатками производственных сооружений, очагами, технологическими площадками, хозяйственными ямами и инженерными коммуникациями.

Здесь наиболее эффективно комплексное применение магнитометрии, георадиолокации и электроразведки. Магнитометрия позволит локализовать остатки металлургического производства и печных сооружений, георадар — определить положение фундаментов и строительных элементов, а электротомография поможет проследить скрытые конструкции и инженерные объекты.

При необходимости малоглубинная сейсморазведка позволит определить особенности строения культурного слоя и инженерно-геологические условия площадки.

Территория усадебного парка

Большой научный интерес представляет исследование всей территории исторического парка. В XVIII веке усадебные ансамбли проектировались как единые инженерно-художественные комплек-



◀ Рис. 9. Валунная кузница Николая Львова

сы, включавшие аллеи, дорожки, водотводные системы, мостики, подпорные стенки, декоративные павильоны и другие элементы благоустройства. Комплекс геофизических методов позволит восстановить первоначальную планировочную структуру усадьбы, определить расположение утраченных малых архитектурных форм, выявить трассы старых дорог, инженерных коммуникаций и дренажных систем.

На открытых участках особую эффективность может иметь малоглубинная сейсморазведка, позволяющая картировать мощность культурного слоя, древние овраги, засыпанные русла и особенности строения грунтового основания всей территории усадьбы.

Комплексная геофизическая модель усадьбы

Наиболее перспективным направлением представляется создание единой трёхмерной геофизической модели всего архитектурно-паркового ансамбля Никольское-Черенчицы.

Её основу могут составить результаты георадиолокации, электротомографии, малоглубинной сейсморазведки, магнитометрии, высокоточного лазерного сканирования и геодезических измерений.

Интеграция этих данных с архивными документами, историческими планами,

результатами археологических исследований и реставрационных работ позволит реконструировать первоначальную пространственную организацию усадьбы, определить степень сохранности отдельных сооружений и создать научную основу для долговременного мониторинга объектов культурного наследия.

Подобный комплексный подход способен превратить Никольское-Черенчицы в один из наиболее полно исследованных геофизическими методами памятников русской усадебной архитектуры XVIII века и стать образцом применения современных геофизических технологий при изучении, сохранении и реставрации объектов историко-культурного наследия России

Заключение

Проведённые георадиолокационные исследования показали высокую эффективность современных неразрушающих геофизических методов при изучении объектов культурного наследия. Несмотря на то что природа выявленных аномалий требует дальнейшей проверки, выполненные работы позволили определить наиболее перспективные участки для последующих археологических и инженерных исследований, существенно сократив область возможных поисков и минимизировав необхо-

димось вмешательство в исторические конструкции.

Полученные результаты подтверждают, что геофизика не заменяет археологию, а становится её важнейшим инструментом, позволяющим научно обоснованно планировать исследования и сохранять историческое наследие. Современные геофизические методы способны не только решать инженерные задачи, но и открывать новые возможности для изучения памятников архитектуры, помогая восстановить утраченные страницы истории.

Особенно символично, что подобные исследования проводятся на объекте, созданном Николаем Александровичем Львовым — человеком, сумевшим соединить архитектуру, инженерное искусство и науку. Сегодня, спустя более двух столетий, именно достижения современной геофизики помогают вновь обратиться к его наследию. Георадар не даёт окончательных ответов, но позволяет задать истории правильные вопросы. И именно с этих вопросов начинаются новые открытия.

Литература

1. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию: учебное пособие. — М.: Издательство МГУ, 2004. — 153 с.
2. Судакова М.С., Владов М.Л. Георадиолокация: от физических основ до перспективных направлений. — М.: ГЕОС, 2017. — 222 с.
3. Conyers L.B. Ground-Penetrating Radar for Geoarchaeology. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2016.
4. Goodman D., Piro S. GPR Remote Sensing in Archaeology. Berlin: Springer, 2013.
5. Daniels D.J. Ground Penetrating Radar. 2nd ed. London: The Institution of Engineering and Technology, 2004.
6. Ключко А.А., Шишков Д.Л. Георадар-

ные исследования в изучении объектов исторического и культурного наследия (на примере военно-исторических объектов Бородинского поля) // Экологические проблемы сохранения исторического и культурного наследия: Материалы IX Всероссийской научной конференции. — М., 2005. — С. 307–317.

7. Бугаев А.С., Ивашов С.И., Разевиг В.В. Использование голографических подповерхностных радиолокаторов для обследования объектов культурного наследия // Успехи современной радиоэлектроники. 2021. Т. 75. № 10. С. 24–38.

8. Будылина М.В., Брайцева О.И., Харламова А.М. Архитектор Н.А. Львов. — М.: Госстройиздат, 1961. — 184 с.

9. Путятин И.Е. (отв. ред.). Новоторжская столица «Русского Палладио»: по следам Льва. Наследие Н.А. Львова: исторический путеводитель. — М.: Печатный двор, 2021. — 368 с.

10. Шорбан Е.А. Архитектура усадьбы Никольское-Черенчицы // История русского искусства. В 22 т. Т. 13.2. Искусство провинции второй половины XVIII века. — М.: Государственный институт искусствознания, 2023. — С. 660–909.

УДК 550.83.05:553.98

Методический подход к моделированию дискретных сетей трещин карбонатных коллекторов на основе комплексирования геофизических методов

■ Брюшинкина Е.Г.¹, Буддо И.В.^{1,2}¹ Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск.² Сибирская школа геонаук ИрННТУ, г. Иркутск.

Аннотация. Представлен методический подход к моделированию дискретной сети трещин (DFN) в межселевых карбонатных коллекторах на основе комплексирования скважинных, сейсмических и электромагнитных данных. Ориентация трещин обоснована по данным FMI/UBI и керна, структурный каркас и матричная пористость – по материалам сейсморазведки, а результаты зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) использованы как независимый пространственный критерий сопоставления и ограничения интерпретации. Показана возможность расчёта трещинной составляющей и формирования оценочной модели двойной пористости. Рассмотрены ограничения подхода, связанные с неполнотой скважинных данных и необходимостью дальнейшей калибровки.

Ключевые слова: дискретная сеть трещин, DFN, карбонатный коллектор, трещиноватость, двойная пористость, сейсморазведка, зондирование становлением поля в ближней зоне, ЗСБ, FMI, UBI, ТРИЗ.

Финансирование: Работа выполнена в рамках темы № 1023110300018-4-1.5.4 Министерства науки и высшего образования РФ в молодежной лаборатории комплексных исследований Арктики ИЭК СО РАН.

Введение

Карбонатные коллекторы, зачастую относящиеся к нетрадиционным коллекторам и трудноизвлекаемым углеводородам (ТРИЗ), характеризуются сложной структурой пустотного пространства, в которой наряду с межзерновой и вторичной пористостью существенную роль могут играть природные трещины. Даже при малом объёмном вкладе трещин в общую пористость их связность, ориентировка и раскрытие способны определять направления фильтрации и формировать высокопроводящие каналы. Поэтому использование только традиционной матричной модели не всегда позволяет адекватно описать пространственную неоднородность фильтрационно-ёмкостных свойств (ФЕС) трещинно-поровых карбонатных коллекторов [1].

Одним из наиболее распространённых способов явного представления природ-

ной трещиноватости является моделирование дискретных сетей трещин – DFN (Discrete Fracture Network). В такой модели отдельная трещина описывается как пространственный объект с заданными положением, ориентировкой, размерами и раскрытием. Статистические характеристики реальных трещин могут быть получены по керну, скважинным микроимиджерам, данным обнажений и другим источникам, а крупномасштабные структурные ограничения по данным сейсморазведки [4,6].

Основная проблема практического применения DFN связана с разницей масштабов между скважинными наблюдениями и межскважинным пространством. Скважинные методы обеспечивают детальную, но локальную характеристику трещин, тогда как сейсмические и электромагнитные исследования обладают меньшей разрешающей способностью, но охва-

тывают весь объём модели. В связи с этим перспективным является не замещение одного типа данных другим, а их совместное использование в единой интерпретационной схеме.

Цель настоящего исследования – оценить возможность комплексирования скважинных данных, сейсморазведки и электроразведки при построении DFN-модели и оценке трещинной составляющей ФЕС карбонатных коллекторов. Принципиальной особенностью подхода является использование метода зондирования становлением поля (ЗСБ) не как прямого генератора дискретных трещин, а как независимого пространственного критерия для сопоставления полученной модели с распределением электропроводящих неоднородностей.

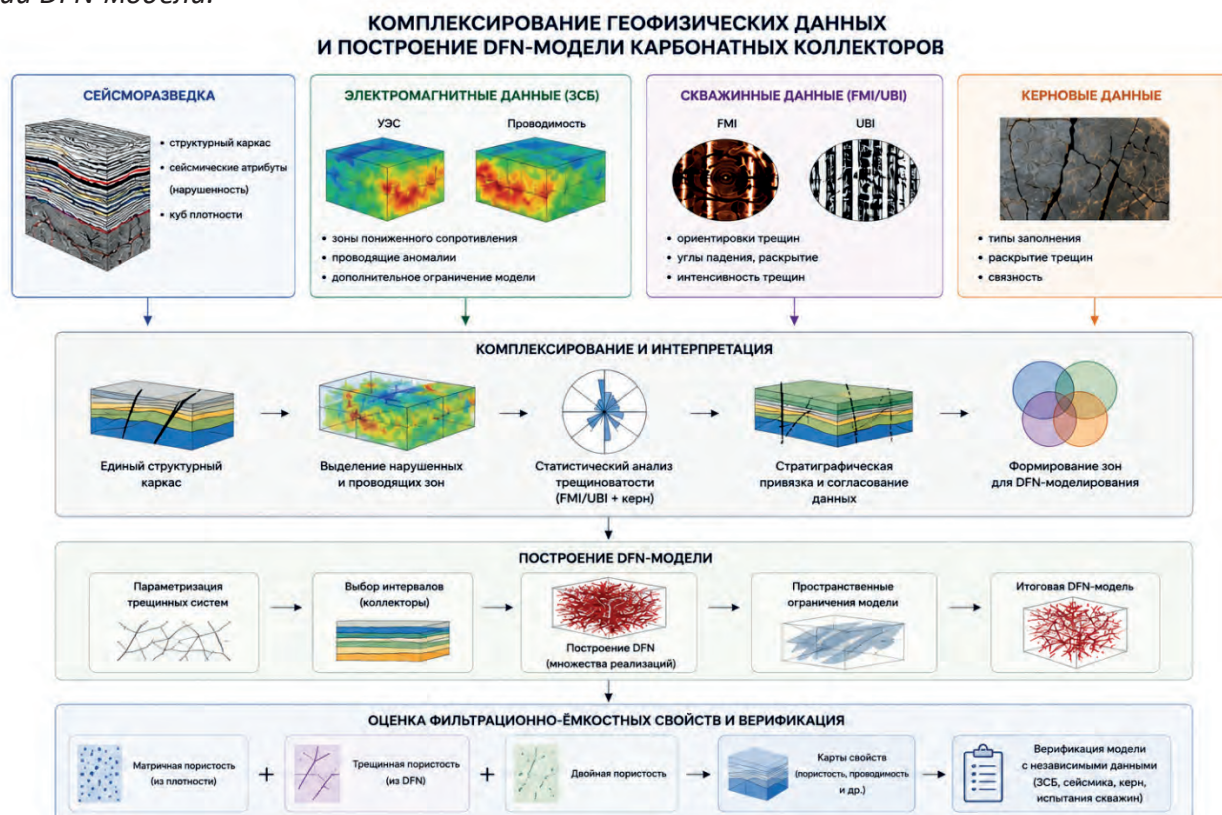
Материалы и методы

Исследование выполнено для нескольких межсоловых карбонатных коллекторов без привязки результатов к конкрет-

ному географическому объекту. В модель включены шесть основных продуктивных горизонтов, разделённых менее проницаемыми интервалами-неколлекторами. Для каждого продуктивного горизонта анализировались структурные, петрофизические, скважинные и электромагнитные характеристики.

В качестве структурной основы использована трёхмерная геологическая модель, сформированная по поверхностям отражающих горизонтов, интерпретированных по данным сейсморазведки. Сейсмические материалы также включали куб плотности и атрибуты, чувствительные к структурно-тектонической неоднородности. Матричная пористость рассчитывалась по кубу плотности. В связи со смешанным карбонатным составом межсоловых коллекторов использована усреднённая плотность минеральной матрицы $2,80 \text{ г/см}^3$; известняковый и доломитовый сценарии рассматривались как границы литологической неопределённости.

▼ Рис. 1. Принципиальная схема комплексирования геофизических методов при построении DFN-модели.



Для определения ориентировки природной трещиноватости использованы материалы одной скважины FMI и трёх скважин UBI. В данных FMI значительная часть выявленных нарушений соответствовала техногенным (буровым) трещинам, возникающим вследствие перераспределения напряжений вокруг ствола скважины. Поэтому основная статистика природной трещиноватости формировалась по UBI, а FMI использовалась как дополнительная информация о современном напряжённом состоянии и преимущественных направлениях нарушенности.

Керновый материал применялся для качественной проверки характера трещиноватости, морфологии трещин и выбора реалистичного порядка раскрытия. Данные ЗСБ представлены объёмными распределениями удельного электрического сопротивления и проводимости в интервалах исследуемых горизонтов. Геоэлектрическая модель использовалась для анализа пространственного соответствия DFN, разломно-трещинных зон и проводящих аномалий.

Общая последовательность работ включала следующие шаги (Рис. 1): (1) построение структурного каркаса; (2)

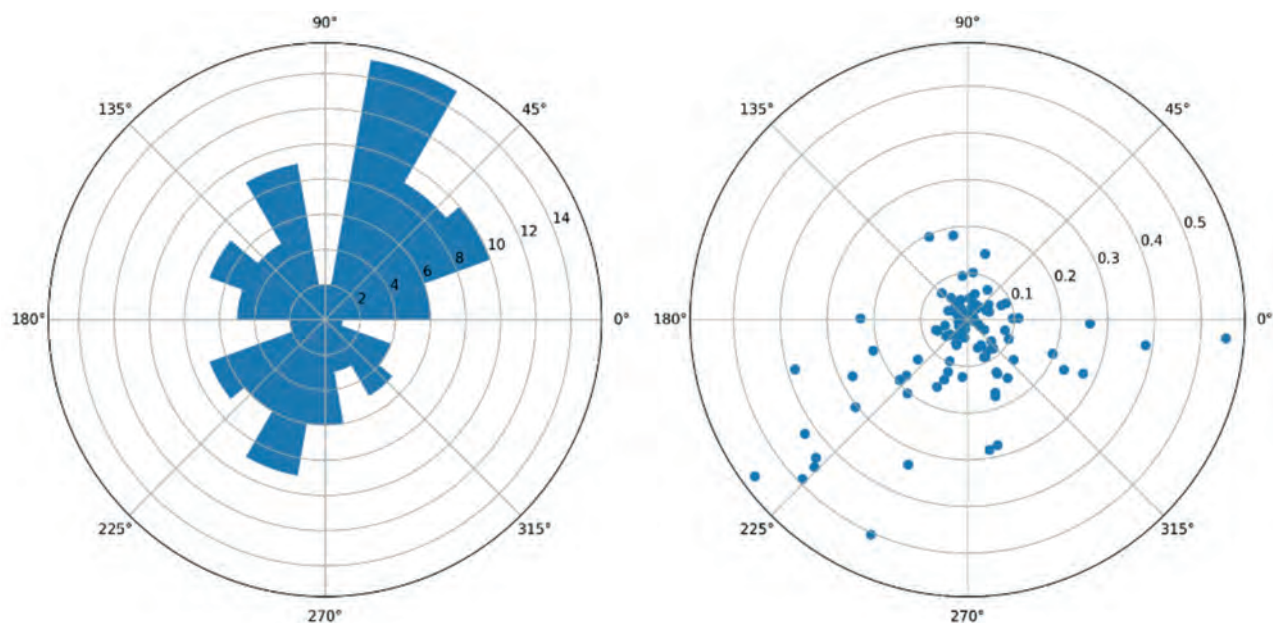
анализ FMI/UBI и керна; (3) статистическое выделение семейств трещин; (4) стохастическое DFN-моделирование по продуктивным горизонтам; (5) оценку матричной и трещинной составляющих пористости; (6) формирование модели двойной пористости; (7) сопоставление результатов с сейсмическими признаками трещиноватости, разломами и распределением проводимости по данным ЗСБ.

Анализ трещиноватости и параметризация DFN

Ориентационные параметры природных трещин были объединены в общую статистическую выборку. Для анализа построены роза азимутов и стереографическая проекция, по которым выделены два устойчивых семейства. Первое семейство характеризуется углом падения около 80° и азимутом падения 256° , второе – углом падения около 66° и азимутом падения 78° . Таким образом, в модели учитывались две пересекающиеся системы преимущественно крутых трещин (Рис. 2).

Разброс ориентировок задавался распределением Фишера. В расчётной реализации использовано значение пара-

▼ Рис. 2. Статистическая характеристика ориентировки трещин: роза азимутов (слева) стереографическая проекция (справа).



метра концентрации $K = 10$ для обоих семейств, что позволяет воспроизводить выраженную преимущественную ориентировку без сведения всех трещин к одной плоскости. Аналогичный статистический подход к заданию ориентировок, размеров и интенсивности широко применяется при стохастическом DFN-моделировании [3,4].

Для каждого продуктивного горизонта сформированы два соответствующих семейства, то есть всего двенадцать наборов трещин. Такое послойное построение обусловлено необходимостью ограничить генерацию DFN непосредственно объёмом коллекторов и исключить искусственное распространение трещинной ёмкости через интервалы-неколлекторы. При этом вследствие ограниченного количества скважинных наблюдений ориентационные и основные статистические параметры семейств принимались едиными для исследуемого комплекса.

Интенсивность трещинной сети задавалась параметром Frac area/volume ($P32$), равным $0,05 \text{ м}^{-1}$. Для раскрытия использовано среднее значение $0,0001 \text{ м}$ ($0,1 \text{ мм}$). Геометрические параметры были выбраны таким образом, чтобы обеспечить устойчивую генерацию сети в масштабе геологической модели и избежать искусственного доминирования единичных протяжённых трещин. Максимальная неявная длина трещин ограничивалась 30 м . Эти параметры рассматриваются как оценочные и требуют последующей калибровки при расширении фактической базы.

Построенная DFN является стохастической реализацией статистически заданной трещинной системы, а не детерминированной реконструкцией каждой реальной трещины. Такой подход принципиально соответствует природе исходной информации: скважинные изображения дают локальную выборку, которая распространяется в межскважинное про-

странство с учётом структурных ограничений. Влияние статистики длины, раскрытия и связности на фильтрационные свойства трещиноватых карбонатов показано в ряде исследований [5,7].

Оценка матричной, трещинной и двойной пористости

Матричная составляющая пористости определялась независимо от DFN по результатам сейсмической инверсии. Расчёт выполнен на основе куба плотности. Для смешанного карбонатного состава использована усреднённая плотность матрицы $2,80 \text{ г/см}^3$. Дополнительно известняковый и доломитовый варианты рассматривались как предельные сценарии, позволяющие оценить чувствительность коэффициента пористости к литологическому составу.

Трещинная пористость оценивалась по геометрическим параметрам DFN. Для системы плоских трещин её объёмная доля в первом приближении может быть представлена произведением площади поверхности трещин на единицу объёма $P32$ и среднего раскрытия a :

$$\varphi_{\text{тр}} = P32 \times a,$$

где $P32 = 0,05 \text{ м}^{-1}$ и $a = 0,0001 \text{ м}$ расчётное значение составляет $5 \cdot 10^{-6}$ доли единицы, или $0,0005 \%$.

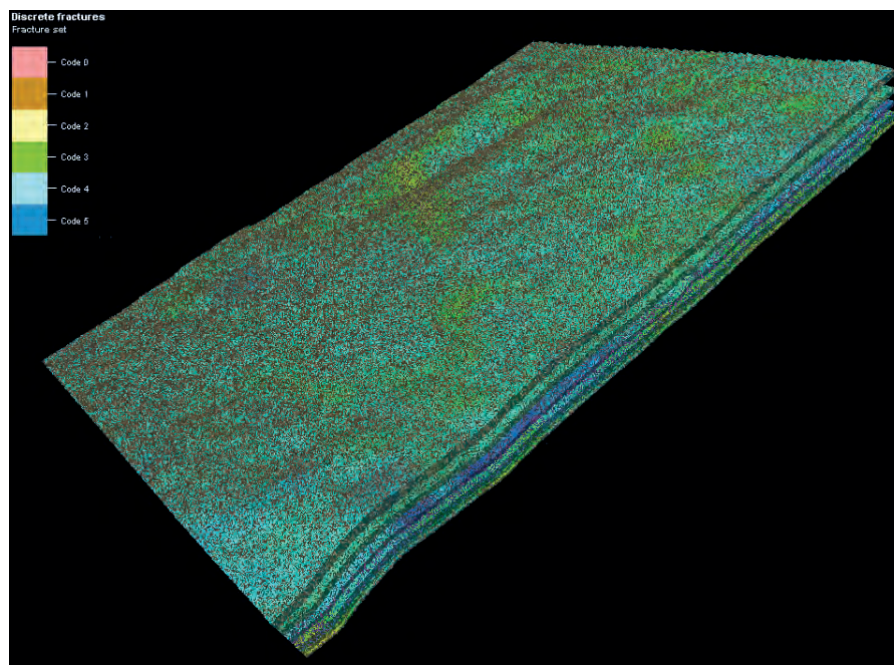
Малое абсолютное значение не означает отсутствия фильтрационной роли трещин: объёмная ёмкость трещин может быть невелика, тогда как их связность способна существенно влиять на движение флюида [2,5].

Для оценки суммарного ёмкостного эффекта сформирована модель двойной пористости как сумма матричной и трещинной составляющих:

$$\varphi_{\text{дв}} = \varphi_{\text{матр}} + \varphi_{\text{тр}}$$

Значения представлены в долях единицы. Полученная характеристика рассматривается как интегральная оценка

► Рис. 3. Пример построенной дискретной сети трещин одного из горизонтов модели.



пустотного пространства, а не как прямое определение эффективной пористости в гидродинамическом смысле.

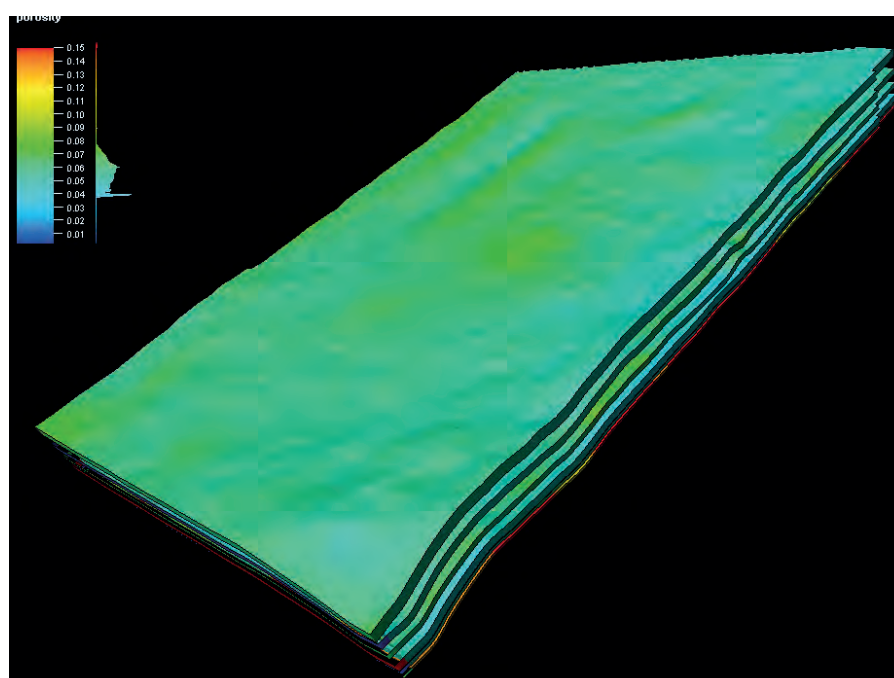
Карта двойной пористости горизонта-коллектора (Рис. 4) демонстрирует выраженную латеральную неоднородность, обусловленную, прежде всего, распределением матричной составляющей. Локальные зоны повышенных значений формируют неоднородную, местами мозаичную структуру. Поскольку в принятой реализации параметры P_{32} и раскрытия заданы единообразно, трещинная

добавка является малой по сравнению с изменчивостью матричной пористости; поэтому интерпретационный смысл DFN в данном случае заключается не только в изменении абсолютной величины пористости, но и в явном представлении геометрии и возможной связности трещинной системы.

Обсуждение результатов и заключение

Комплексирование геолого-геофизических данных выполнялось как после-

► Рис. 4. Пример результатов моделирования двойной пористости.



довательное использование каждого метода для характеристики тех параметров геологической среды, к которым он наиболее чувствителен. Скважинные изображения и керн задавали локальные параметры естественной трещиноватости, сейсморазведка формировала структурно-стратиграфический каркас и использовалась для оценки матричной пористости, а ЗСБ обеспечивало объёмное распределение удельного электрического сопротивления и проводимости. DFN связывала эти данные, обеспечивая перенос локальной статистики трещин в трёхмерное межскважинное пространство.

Принципиальным условием являлось разграничение функций методов: сейсмические, электромагнитные и скважинные данные не рассматривались как взаимозаменяемые. Наличие признака только по одному методу недостаточно для уверенного выделения трещинно-нарушенной зоны, тогда как пространственное согласование независимых признаков снижает неоднозначность интерпретации.

Геометрия трещинной системы определялась по данным FMI и UBI. По природным трещинам были выделены два доминирующих семейства и определены характерные азимуты и углы падения, которые использовались при параметризации DFN. Техногенные буровые трещины учитывались отдельно и не включались безусловно в статистику естественной трещиноватости.

Керн служил независимым источником информации о морфологии, заполнении и раскрытии трещин и использовался для геологической проверки параметров, полученных по скважинным изображениям. Таким образом, скважинно-керновые данные задавали параметры, которые невозможно надёжно восстановить непосредственно из сейсмического или электромагнитного поля.

Интерпретированные сейсмические

горизонты формировали трёхмерный структурный каркас и границы шести карбонатных интервалов-коллекторов. Разломы и признаки структурной неоднородности учитывались при пространственном размещении трещинных зон, поэтому DFN строилась внутри конкретных стратиграфических тел.

По результатам сейсмической инверсии оценивалась матричная составляющая пористости. Для смешанного карбонатного состава использовалась средняя плотность минеральной матрицы $2,80 \text{ г/см}^3$, а известняковый и доломитовый варианты рассматривались как границы литологической неопределённости. Тем самым матричная пористость определялась из сейсмо-петрофизической модели, а трещинная – из DFN, параметризованной по скважинным данным.

Сейсмические атрибуты, чувствительные к нарушениям непрерывности отражений и структурной неоднородности, применялись как дополнительные признаки возможного развития трещинно-нарушенной среды, но не отождествлялись непосредственно с открытыми трещинами.

По данным ЗСБ анализировались распределения УЭС и проводимости. Поскольку эти параметры зависят от литологии, минерализации флюида, пористости, насыщения и связности проводящих каналов, пониженное УЭС не интерпретировалось однозначно как признак трещиноватости.

Электромагнитные параметры анализировались в пределах тех же карбонатных интервалов, для которых строилась DFN. Совпадение зон повышенной проводимости с разломами, сейсмическими признаками нарушенности и развитой DFN рассматривалось как комплексный признак, требующий приоритетного геологического анализа.

Отсутствие такого совпадения также имеет интерпретационное значение.

Проводящая аномалия без структурных и скважинных признаков может быть обусловлена литологией или насыщением, тогда как трещинная зона без выраженного электромагнитного отклика может характеризоваться слабым раскрытием, «залеченностью» или отсутствием гидравлической связи.

После построения DFN трещинная составляющая пористости оценивалась через интенсивность P32 и среднее раскрытие трещин и объединялась с матричной пористостью в модель двойной пористости. Таким образом, сейсмика задавала пространственно изменчивую матричную составляющую, скважинно-керновые данные – параметры трещин, а DFN – их трёхмерное распределение.

Полученная модель сопоставлялась с сейсмическими признаками трещиноватости, положением разломов, УЭС и проводимостью ЗСБ. Основным интерес представляли участки, где повышенная структурная нарушенность, развитие DFN и электрофизическая аномалия пространственно совпадали в пределах одного стратиграфического интервала.

Предлагаемая схема включает несколько уровней ограничений: стратиграфический – DFN формируется внутри продуктивных горизонтов; структурный – учитываются геометрия горизонтов и разломы по 3D-сейсмике; статистический – параметры семейств задаются по FMI/UBI и проверяются по керну; электрофизический – результаты сопоставляются с УЭС и проводимостью ЗСБ; интегральный – оценивается согласованность модели двойной пористости с независимыми геолого-геофизическими признаками.

В результате DFN рассматривается не как самостоятельная стохастическая экстраполяция ограниченной скважинной статистики, а как часть комплексной геолого-геофизической модели, в которой независимые методы последователь-

но ограничивают область допустимых решений. Основным результатом комплексирования является формирование системы взаимодополняющих признаков, позволяющей выделять наиболее обоснованные участки развития трещинно-поровой среды в межскважинном пространстве.

Вместе с тем, полученные результаты демонстрируют принципиальную работоспособность подхода, однако не являются окончательной детерминированной моделью реальной трещинной системы. Основное ограничение связано с небольшим объёмом скважинных исследований (имеджеров): использованы одна скважина FMI и три скважины UBI. Этого достаточно для выделения доминирующих ориентировок, но недостаточно для надёжной оценки интенсивности, размеров и раскрытия трещин отдельно по каждому горизонту.

Кроме того, данные FMI осложнены присутствием техногенных буровых трещин, которые характеризуют современное напряжённое состояние, но не могут непосредственно заменять статистику естественных открытых трещин. Повышение достоверности модели требует расширения объёма FMI/UBI и более равномерного распределения таких наблюдений по площади и разрезу.

Керновые данные также обладают ограниченной пространственной представительностью. Необходимы количественная оценка раскрытия и заполнения трещин, анализ микротрещиноватости, кавернозности и лабораторных петрофизических характеристик. Особенно важна оценка эффективного раскрытия в пластовых условиях, определяющего трещинную пористость и проницаемость.

Сейсмические и электромагнитные признаки также не являются однозначными индикаторами трещиноватости: нарушения отражений могут быть обу-

словлены литологией или особенностями обработки, а проводящие аномалии – изменениями насыщения, минерализации и литологического состава пород. Поэтому наиболее обоснованной является интерпретация, основанная на совпадении нескольких независимых признаков.

Дальнейшее развитие подхода целесообразно связать с тектонофизическим и геомеханическим анализом, поскольку гидравлическая активность трещин зависит от их ориентировки относительно современного поля напряжений. Для калибровки модели наиболее информативны гидродинамические и интервальные испытания, данные о поглощениях и другие промысловые проявления.

Литература

1. Денисов В. В., Вагизов А. М., Пожитков Н. Д. Подходы к моделированию карбонатных коллекторов на примере единичной залежи // Нефтяное хозяйство. 2018. № 12. С. 117-119. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-12-117-119.
2. Кашников Ю. А., Шустов Д. В., Якимов С. Ю. Учет геомеханического состояния трещинно-порового коллектора при гидродинамическом моделировании // Записки Горного института. 2025. Т. 271. С. 42-52.
3. Abdallah I. B., Panza E., Dastoli S., Manniello C., Prosser G., Agosta F. Multiscale discrete fracture network modelling of shallow-water carbonates: East Agri Valley Basin, Southern Italy // Marine and Petroleum Geology. 2024. Vol. 169. Art. 107048. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2024.107048.
4. Fang J., Zhou F., Tang Z. Discrete Fracture Network Modelling in a Naturally Fractured Carbonate Reservoir in the Jingbei Oilfield, China // Energies. 2017. Vol. 10, No. 2. Art. 183. P. 1-19. DOI: 10.3390/en10020183.
5. Hardebol N. J., Maier C., Nick H., Geiger S., Bertotti G., Boro H. Multiscale fracture network characterization and impact on flow: A case study on the Latemar carbonate platform // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2015. Vol. 120, No. 12. P. 8197-8222. DOI: 10.1002/2015JB011879.
6. Hosseini E., Sarmadivaleh M., Chen Z. Developing a new algorithm for numerical modeling of discrete fracture network (DFN) for anisotropic rock and percolation properties // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2021. Vol. 11. P. 839-856. DOI: 10.1007/s13202-020-01079-w.
7. Massaro L., Corradetti A., Vinci F., Tavani S., Iannace A., Parente M., Mazzoli S. Multiscale Fracture Analysis in a Reservoir-Scale Carbonate Platform Exposure (Sorrento Peninsula, Italy): Implications for Fluid Flow // Geofluids. 2018. Vol. 2018. Art. 7526425. 10 p. DOI: 10.1155/2018/7526425.

УДК 550.834.05

Способ повышения достоверности стратификации отражающих границ кайнозойских отложений Ферганской межгорной впадины по данным геофизических исследований

■ Урмонов А.Х., АО «Узбекгеофизика», г. Ташкент.

■ Кострыгин Ю.П., ООО «Новоросморгео», г. Новороссийск.

Аннотация. Статья посвящена анализу сейсмических отражений от границ в нижне-неогеновых и палеогеновых отложениях Центральной части Ферганской впадины по материалам сейсморазведки 3D. Составлены одномерные сейсмические модели, проведена стратиграфическая привязка отражающих границ и изучены их петрографические параметры.

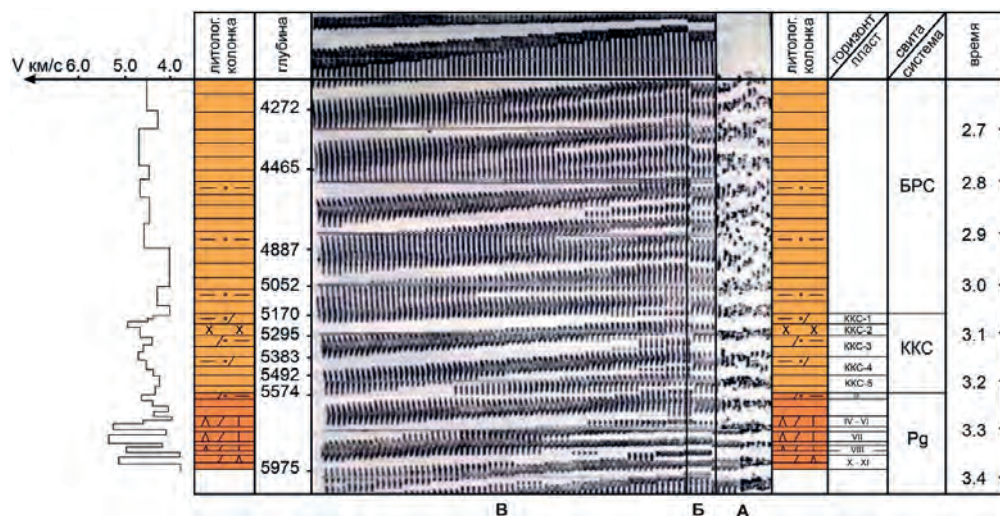
Ключевые слова: сейсморазведка 3D, Ферганская впадина, неоген, палеоген, акустический каротаж, моделирование.

Одним из основных вопросов интерпретации данных съемки 3D в Ферганской межгорной впадине (ФМВ) является детальная привязка отражающих границ (ОГ) с определением петрографических параметров изучаемых отложений. Кайнозойские отложения ФМВ, и особенно её нижне-неогеновая часть, представлена геологической средой, состоящей из тонкослоистого разреза, литологически весьма изменчивого, как по вертикали, так и по горизонтали [1]. В таких, достаточно сложных условиях, обеспечить более высокое качество привязки ОГ можно путем комплексного использования результатов геофизических исследований скважин (ГИС), а также материалов вертикального сейсмического профилирования (ВСП) и результатов моделирования волнового поля [2].

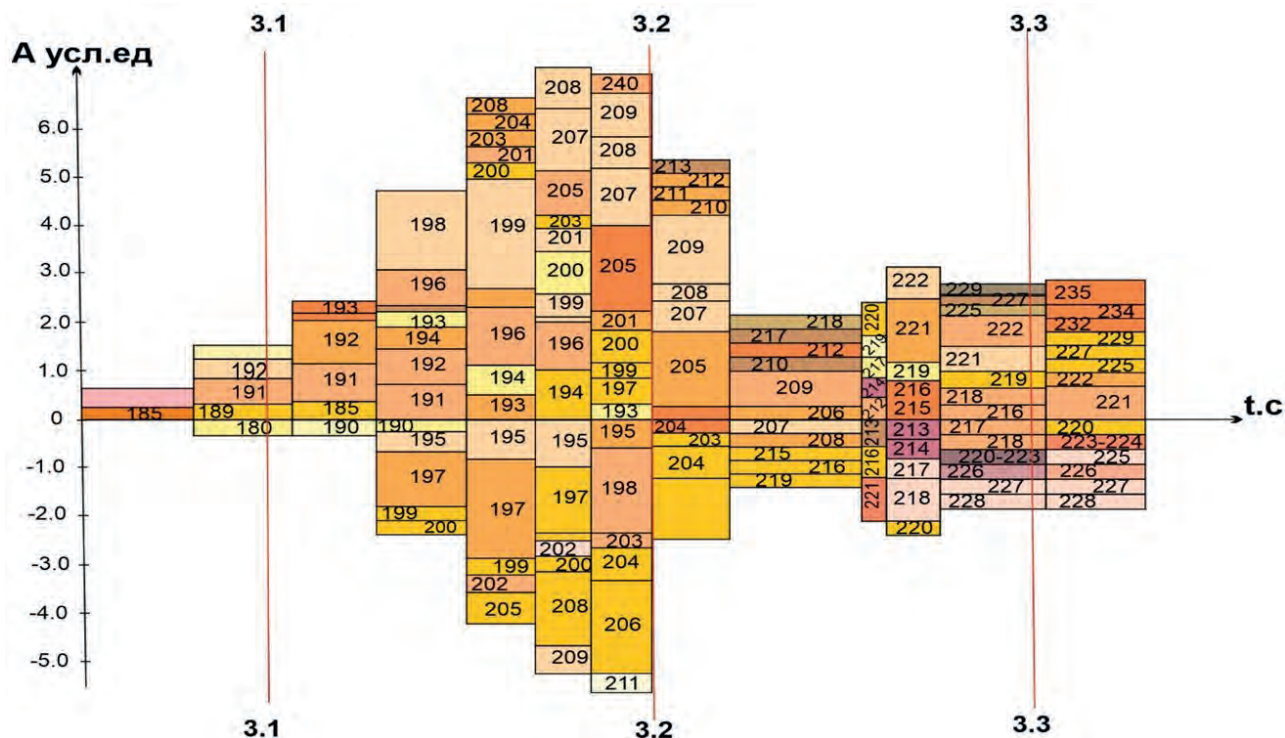
Методика исследований

Для детальной привязки отражающих границ использовались одномерные сейсмические модели (ОСМ), полученные путем свертки импульсной реакции геологической среды, т.е. временной последовательности коэффициентов отражения, с базовыми импульсами с колокольной огибающей. При этом импульсная реакция среды определялась по материалам акустического каротажа, а преобладающая частота базовых импульсов изменялась от 12 до 30 Гц.

Полученные таким образом варианты моделей, характеризующиеся различными спектральными характеристиками, сопоставлялись с соответствующими интервалами временного разреза ОГТ. И с целью проведения дальнейших исследо-



▲ Рис. 1. Волновая палетка. Площадь Ташбулак, скважина №6. А) фрагмент временного разреза, Б и В) модельные трассы при использовании базовых импульсов с различными преобладающими частотами.



▲ Рис. 2. Оценка вклада отдельных границ и тонких пластов в волновое поле для условий площади Ташбулак, по материалам скважины №6.

ваний для каждого из выбранных интервалов временного разреза ОГТ (ККС-1, ККС-2, ККС-3, ККС-4 и ККС-5) использовался именно тот вариант сейсмической модели, который в большей степени соответствовал динамике анализируемого участка разреза (рис. 1).

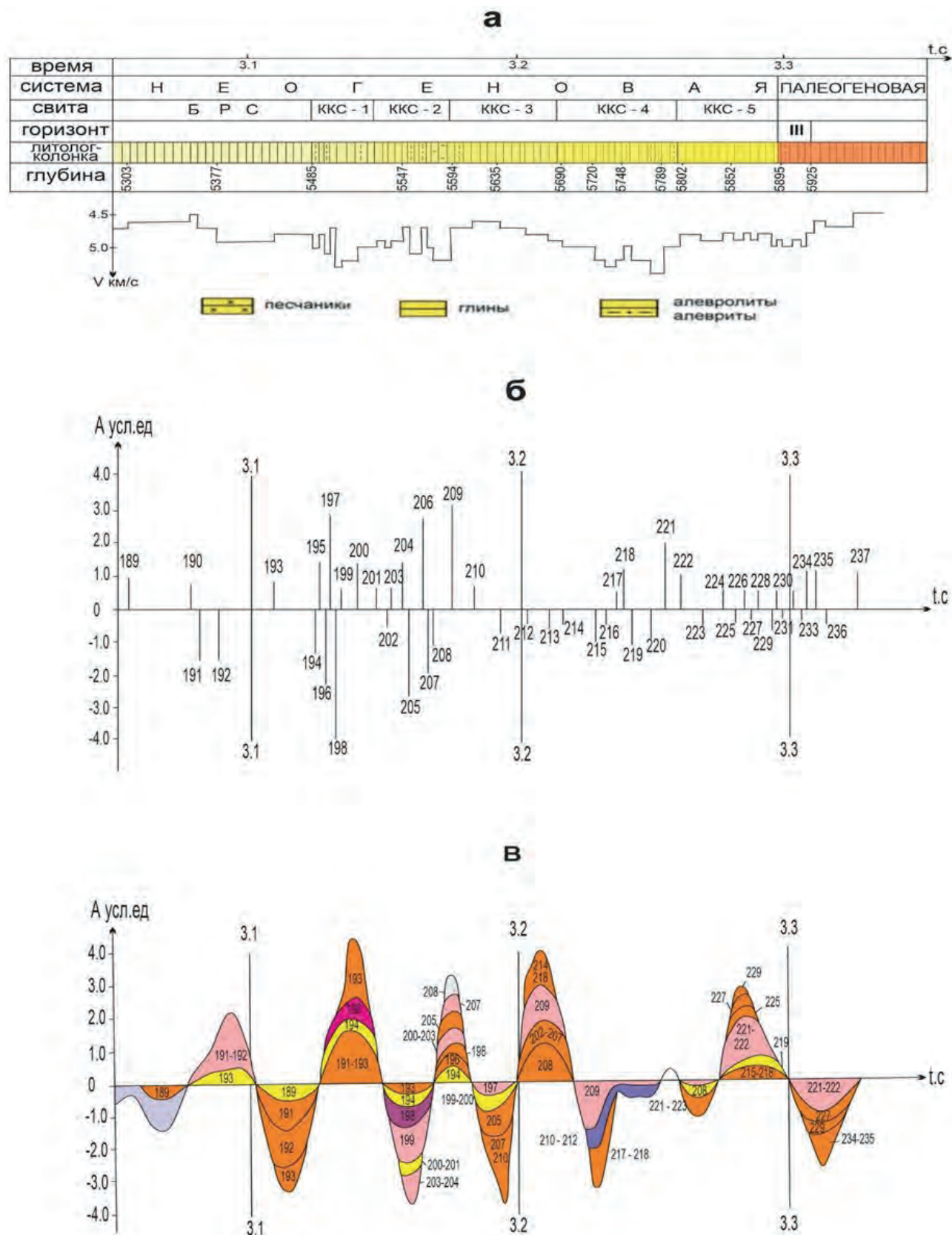
Далее изучался вклад отдельных границ и тонких пластов в волновое поле. Вычислялась и строилась диаграмма вклада, с указанием номеров акустических границ (рис. 2). С этой целью рассчитывались модельные сейсмограммы при условии обнуления импульсных реакций, формируемых одной или несколькими границами, наблюдаемыми по материалам акустического каротажа. Полученные таким образом модельные трассы, сопоставлялись с основной модельной трассой, построенной с учётом всех отражающих границ в исследуемом интервале разреза. При этом сравнительный анализ амплитудных значений сопоставляемых трасс позволял оценивать вклад, вносимый в суммарное поле той или иной границей. Если присутствие

конкретной границы приводило к повышению амплитуды основной сейсмической модели, то величина ее вклада на диаграмме (рис. 2) графически изображалась выше нулевой линии, если же в следствие присутствия данной граница амплитуда основной модели уменьшалась, то величина ее вклада откладывалась ниже нулевой линии.

Приведем описание строения и анализ эффективных сейсмических моделей для интервалов ККС-1, ККС-2, ККС-3 и ККС-4 по скважине №6 площади Ташбулак Центральной Ферганы.

Эффективная сейсмическая модель свиты ККС-1 представляет собой чередование тонких пластов песчаников, алевролитов и глин мощностью от 3 до 25м, количество пластов-15, скорости продольных волн изменяются от 4,7 до 5,3 км/с, значения плотностей - от 2,64 до 2,68 г/см³ (рис. 3,а).

Основной вклад в скважине Ташбулак 6 в видимую фазу на временах от 3,106 до 3,146 (Рис. 2) вносят границы, находящиеся вблизи кровли свиты ККС 1: 191,



▲ Рис. 3. Расчет модельных трасс ОГТ с указанием вклада последовательности акустических границ в различные фазы отраженного сигнала, площади Ташбулак, по материалам скважины №6:

а – литологическая колонка с графиком пластовых скоростей по разрезу;
 б – последовательность коэффициентов отражения с указанием номеров границ;
 в – модель трассы ОГТ.

192, 193, 194, 196, 198, а границы 195, 197, 199, 200 уменьшают амплитуду. В видимые фазы на временах от 3,146 до 3,166 основной вклад вносят границы от кровли – подошвы ККС1: 194, 196, 198, 199, 200, 201, 203, 204, 205, 207, 208 а границы 195, 197, 202 уменьшают амплитуду (Рис. 2).

Эффективная сейсмическая модель свиты ККС-2, -3, -4 и -5 представлена, в основном, пластами глин с включением пластов алевролитов и песчаников. При этом отражения, соответствующие временному интервалу 3,060-3,160 с (см. рис.3) и характеризующиеся доминирующей частотой колебаний около 30 Гц, в основном, формируются за счёт границ в кровле и подошве ККС-1, а также в кровле ККС-2. С уменьшением преобладающей частоты колебаний от $f = 30$ до $f = 13$ Гц интерференция отражений от пластов ККС-1, ККС-2, ККС-3 становится более тесной, что в свою очередь приводит к увеличению амплитуды сигнала в $\approx 1,5$ раза (см. рис. 3).

Отмечено также, что с уменьшением доминирующей частоты сигнала от $f = 20$ до $f = 12$ Гц наряду с более тесной интерференцией отражений от пластов в ККС-1, ККС-2, ККС-3 в ряде случаев меняется и форма волны (число фаз, соотношение амплитуд фаз) и уменьшается общая интенсивность отражений.

Заключение

- отражения от нижней части неогеновых и от палеогеновых отложений формируются несколькими маломощными пластами, имеющими близкие акустические параметры, таких как плотность и коэффициент отражения;

- вклад каждой границы в сигнал зависит от литологического состава пласта, при этом положительный вклад, как правило, вносят песчаные пласты, а глинистые в большинстве случаев уменьшают амплитуду сигнала;

- одна видимая фаза сигнала в отложениях ККС охватывает часть разреза мощностью 50-120м, где присутствует множество тонкослоистых пластов разных литологических отложений. Этот фактор усложняет решение прогнозных задач с использованием динамических параметров сигнала;

- установленная геологическая природа неогеновых отражений позволяет выполнить сейсмостратиграфические интерпретации временных разрезов и дает возможность предварительно прогнозировать ожидаемый литологический состав нижнеогеновых отложений;

- результаты выполненных исследований позволяют повысить достоверность интерпретации данных сейсморазведки 3D в условиях Ферганской впадины.

Литература

1. Гриднев Н.И., 1971, Кайнозойские молассы Ферганской депрессии, Ташкент, «ФАН», 17-66.
2. Урманов А.Х., 1988, Возможности сейсморазведки при картировании стратиграфических несогласий Юго-Восточной Ферганы для обнаружения неантиклинальных ловушек углеводородов // Сб. науч. тр. «Прогнозирование перспективных объектов в нефтегазоносных областях Востока Средней Азии». - М.: «ВНИИОЭНГ», 70-74.

Подробнее об авторах



Урманов
Аскарали Хайдаралиевич

д. г-м. н,
ведущий геолог
АО «Узбекгеофизика».



Кострыгин
Юрий Петрович

д.т.н., заместитель
генерального директора
по научной работе
ООО «Новоросморгео»

УДК 553.98:550.8

Природный водород – топливо будущего!?

■ Череповский А.В., АО «Росгеология», г. Москва.

Аннотация. В ближайшие годы природный водород может вытеснить привычные нам виды топлива – а это нефть, газ и уголь – и снять вопросы об истощении природных ресурсов и о загрязнении воздуха из-за хозяйственной деятельности человека. Все знакомы с выражением «Газпром – национальное достояние России». Но различным отраслям промышленности, прежде всего химической промышленности, нужен не только природный газ – а это метан главным образом, – но и чистый водород. Водорода нужно очень много – ежегодно во всём мире вырабатывается более 100 млн тонн водорода. В настоящее время три четверти всего водорода получают из природного газа путём его расщепления или пиролиза. Влияние этого способа получения водорода на экологию считается низким, хотя есть побочный продукт – твёрдый углерод, а в некоторых случаях углекислый газ. Добыча природного водорода – наиболее чистая технология получения водорода, с минимальным влиянием на экологию. Но где и как образуется природный, он же белый или геологический водород? И где его искать и добывать?

Ключевые слова: природный водород, геологический водород, гипотеза Ларина, металлогидридная Земля, продувка мантии, водородная дегазация, гипотеза Блинова, субдукция, эдукция, растущая Земля.

География выходов природного водорода

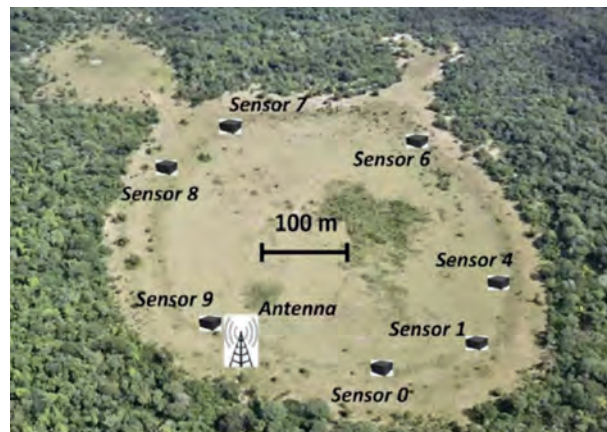
Феномен выхода глубинного природного (геологического) водорода на земную поверхность изучается уже более 50 лет [5, 7], но на вопрос, откуда берется водород под землей, наука пока не может ответить однозначно. В то же время на вопрос, где его искать, кажется, что ответить очень легко: водород ВЕЗДЕ выходит на поверхность Земли. В первую очередь, в самых тектонически активных регионах – при извержениях вулканов. Смесь водорода с кислородом или с воздухом – это очень взрывоопасный гремучий газ, и я думаю, что именно взрывы газовых смесей являются причинами землетрясений и мощных выбросов пепла и лавы из вулканов. Конечно же, водород есть в выбросах геотермальных источников. А также на дне океанов и в зонах континентального рифтинга, то есть в местах растрескивания и расширения земной коры, как это сейчас происходит в Эфиопии на востоке Африки.

Удивительно, но водород выходит на поверхность земли и в самых тектонически

спокойных регионах, на равнинах. На всех континентах, в лесах и на полях, встречаются загадочные круглые образования с угнетённой растительностью, а иногда болота и озёра, диаметром от нескольких десятков метров до первых километров. Это происходит именно из-за высоких концентраций водорода в грунтовых водах и выхода природного водорода на поверхность земли и в атмосферу (рис.1).

Есть и так называемые «магические круги» в пустынях Африки и Австралии, диаме-

▼ **Рис. 1.** Загадочные круги с угнетённой растительностью над местами выхода глубинного природного водорода.



тром до 10-15 м. Их образование сначала пытались приписать активности песчаных термитов, но затем исследователи сделали вывод, что термиты проникают в эти круги тогда, когда они уже образовались, то есть не создают их сами, а лишь используют. Логично предположить, что в практически безжизненных регионах термиты переселяются туда, где из-под земли поступает подпитка в виде флюидов и, возможно, микроорганизмов. Очевидно, что нужна постановка тщательных работ по геохимическому анализу грунта и содержания газов и органики в этих загадочных кругах.

Вспомним, что 70% нашей планеты покрыто водой, и именно океаны скрывают от нас наиболее важные современные геологические процессы планетарного масштаба. Я имею в виду расширение всех океанов – он же спрединг по-английски – и самые длинные на Земле горные цепи – это срединно-океанические хребты общей длиной более 80 тысяч км. Бытует представление, что в океанах жизнь сосредоточена у их берегов, особенно на пронизанных солнцем коралловых рифах. Действительно, это самая плотная и разнообразная экосистема Мирового океана, в которой число видов достигает одного миллиона. А остальное безбрежное пространство океана представляется однообразной безжизненной равниной... В целом, это так. Но нужно подчеркнуть, что это

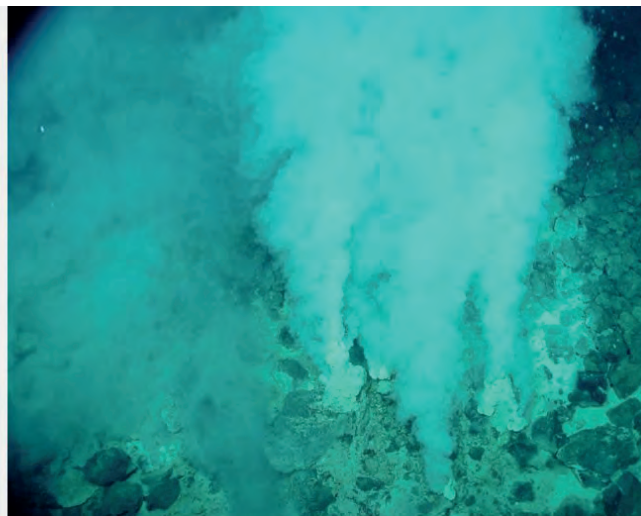
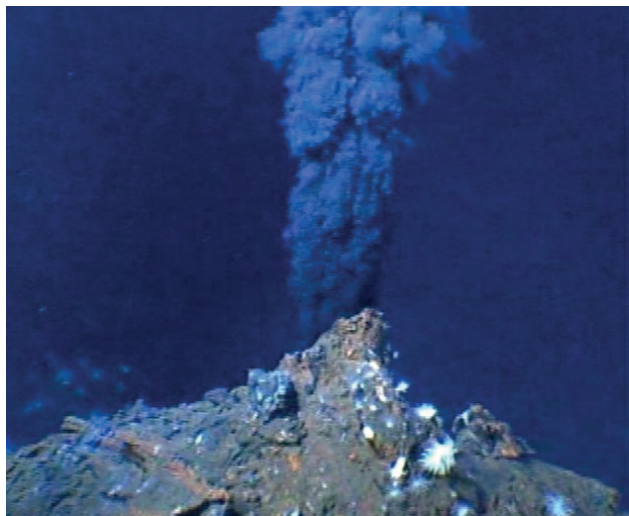
не относится к срединным хребтам и к глубоководным желобам.

Жизнь в отсутствие солнечного света

Более 20 лет в исследованиях дна Атлантического океана принимала участие канд. геол.-мин. наук И.Г.Добрецова [3, 4]. Исследования велись с помощью научно-исследовательского судна «Профессор Логачев» в Российском разведочном районе (РРР), выбранном на срединном Атлантическом хребте. Задача ставилась чисто геологическая: поиски месторождений глубоководных полиметаллических сульфидных руд. Но одним из важнейших открытий в РРР стало обнаружение богатой фауны на больших глубинах, где нет солнечного света. Оказалось, что в полной темноте, в отсутствие фотосинтеза, на срединных хребтах процветает множество животных. Это двусторчатые моллюски и актинии, креветки, крабы и бактериальные маты, существующие в условиях хемосинтеза. И животные эти сконцентрированы вблизи так называемых «курильщиков» – выходов горячих флюидов и дыма из-под дна океана (рис.2). Хороший вопрос – чем питаются эти животные на дне океана в отсутствие растительности? Что в начале пищевой цепочки?

Добрецова изучила массу фото и видеоматериалов со дна Атлантики и обра-

▼ Рис. 2. Черные и белые курильщики на срединно-океанических хребтах в океанах.



тила внимание на то, что глубоководные крабы, обитающие вблизи «курильщиков», покрыты бактериями как шубкой. Значит, в начале пищевой цепочки находятся микроорганизмы, которые в свою очередь, находят себе пропитание во флюидах, выносимых на дно моря по каналам дегазации. Эти каналы могут быть и малозаметными, с прозрачными дымами, но их признаком обычно служат скопления двустворок и других донных животных.

Ещё более значимое для морской геологии открытие было сделано при изучении глубоководных желобов, где точно никто не ожидал увидеть жизнь при страшном давлении, беспросветной тьме и очень низкой температуре воды (ниже 4°C) на глубинах до 10 и даже до 11 км...

Об открытии богатой фауны в глубоководных желобах рассказывал доктор биол. наук А.В.Гебрук в своём докладе в Институте океанологии Российской академии наук осенью 2025 года. Для погружений использовался китайский пилотируемый глубоководный аппарат «Фэньдоучжэ» (что в переводе означает «Борец»). Его создали в 2020 году, и он рассчитан на погружения на максимальную глубину Мирового океана - до 11 000 метров. С помощью этого аппарата изучался Курило-Камчатский жёлоб с максимальной глубиной 9717 м. В диапазоне глубин от 7300 м до 9533 м было обнаружено множество различных животных с трудными для неспециалиста названиями: это полихеты, гастроподы, голотурии и так далее...

Естественно, возникает мысль: если есть разнообразные формы жизни – значит, есть кормовая база, то есть питательная среда в желобах? Что это может быть? Логично предположить, что как и в случае срединно-океанических хребтов, в желобах есть каналы дегазации с выходами водорода, метана и других газов и достаточно сложных химических соединений.

Будем надеяться, что состав выходящих из глубин флюидов, а может быть и микроорганизмов, будет изучен при следующих глубоководных погружениях.

Субдукция или эдукция?

Скорее всего, открытие богатой фауны в глубоководных желобах поставило в затруднительное положение морских геологов, потому что согласно общепринятой ныне точке зрения, глубоководные желоба находятся над зонами субдукции, то есть над зонами предполагаемого погружения океанической коры или всей океанической литосферы в глубины мантии, на сотни и даже тысячи км... [6]. При этом сторонники общепринятой уже 50 лет теории тектоники литосферных плит показывают слой молодых водонасыщенных осадков, который без корабления или сдирания аккуратно уходит вниз в гораздо более плотную мантию (рис.3). Казалось бы, это неправдоподобное допущение. Но оно объясняется тем, что такой процесс самопогружения океанической коры абсолютно необходим в рамках теории тектоники плит. Согласно этой теории все океаны Земли расширяются, в них идёт спрединг, но размеры Земли тем не менее строго постоянны благодаря компенсирующим процессам субдукции...

Но очевидная проблема в том, что в условиях субдукции трудно ожидать каких-либо восходящих потоков флюидов из мантии, обеспечивающих существование богатых экосистем в желобах. Тогда приходится допустить, что под желобами происходит не опускание океанической коры, а подъём глубинных пород, как и в срединно-океанических хребтах! Это давнишняя идея блестящего советского геолога, Ю.В.Чудинова, который поддерживал гипотезу неуклонного расширения Земли и долгое время развивал идеи об эдукции мантийного материала под желобами и об образовании новой оке-



▲ Рис. 3. Геологические процессы под глубоководными желобами: субдукция или эдукция?

анической коры в активных зонах между континентами и океанами.

Вопрос, каков на самом деле ход геологических процессов под желобами, можно решить путём глубоководного бурения и установления возраста океанической коры в окрестности желобов, но – увы – пока нет плавучих буровых установок, которые могли бы пробурить скважины при глубинах океана более 6 км. И тайна геологических процессов под желобами остаётся неразрешимой...

Вопрос природного водорода в нашей стране

Как известно, в 2023 году природный водород был включён в Общероссийский классификатор полезных ископаемых и подземных вод. Но ещё в 2020 году была создана компания Газпром-водород, которая заявила о развитии водородной энергетики в двух основных направлениях: 1) промышленное производство водорода из природного газа (метана); 2) поиск месторождений природного (геологического) водорода в недрах.

В 2024 году компания Газпром-водород приступила к изучению возможности добычи природного водорода

и получила первые образцы в южной части Сибирской платформы, в Иркутской области, на крупнейшем Ковыктинском газоконденсатном месторождении. Выделить участки с повышенным содержанием водорода в водорастворённых газах помогли специалисты новосибирского научно-исследовательского института СНИИГГиМС, которые провели геохимическую съёмку. Ожидаемый результат исследований – цифровой проект под названием «Природный водород Восточной и Западной Сибири».

Известны выходы природного водорода на Восточно-Европейской платформе [9]. Как известно, на сельскохозяйственных территориях встречаются загадочные круги (размером от нескольких сотен метров до первых километров) с высоким содержанием водорода в грунтовых водах. Благодаря длительным микросейсмическим наблюдениям удаётся построить глубинные разрезы, на которых выделяются субвертикальные зоны с пониженными скоростями сейсмических волн на глубинах до 20 км. Эти зоны указывают на породы, обладающие повышенной пористостью и заполненные флюидами – жидкостью

или газом. Таким образом, есть инструмент для картирования глубинных каналов, по которым водород поступает на поверхность Земли. Поскольку глубина канала намного превышает мощность осадочного чехла, то можно утверждать, что водород поднимается через глубоко-залегающие кристаллические породы и имеет явно неорганическую природу.

Разведка и добыча природного водорода за рубежом

Очень хороший обзор всемирного состояния дел в области разведки и добычи природного водорода был сделан осенью 2025-го года Габором Тари в рамках онлайн-лекции Американского общества геофизиков (SEG). На лекции была показана карта с местами выхода природного водорода на поверхность Земли на всех континентах (рис.4). Особенно много выходов природного водорода показано на территории Европы, но я думаю, что это связано не с геологией, а с гораздо более детальными геологическими исследованиями в Европе.

Карту выходов природного водорода Габор Тари назвал вершиной айсберга, потому что не очень понятно, откуда бе-

рётся весь этот водород. Как уже было сказано, он встречается под землёй в самых разнообразных условиях – почти в любых! Такая неразборчивость водорода к поверхностным и приповерхностным условиям однозначно говорит о том, что природный водород имеет глубинное, мантийное происхождение, и является следствием какого-то важнейшего планетарного геохимического процесса в мантии или даже в ядре Земли.

Красной стрелкой на карте (рис.4) обозначено первое действующее месторождение природного водорода в Западной Африке. Природный водород в Мали был обнаружен случайно – при бурении на воду в 1987 году. Неожиданно для гидрогеологов с глубины 112 м из скважины пошёл газ, в котором оказалось 98% водорода! В местечке Буракебугу в течение двух лет было пробурено 24 скважины, которые подтвердили, что запасы водорода имеются на площади как минимум 780 кв.км. В результате интерпретации геологических данных было выделено пять интервалов, содержащих крупные залежи водорода исключительной чистоты. Каждая залежь водорода имеет покрывку из прочных магмати-

▼ Рис.4. Места выхода природного (геологического) водорода на поверхность Земли.



ческих пород – долеритов, которые предотвращают просачивание летучего водорода на поверхность. Мелкие залежи водорода встречаются на глубинах от 30 до 135 м, а глубокие залежи – на глубинах до 1,5 км. Объем природного водорода оценивается на данном месторождении в 2-3 млрд. куб.м. Из одной только скважины выходит более 8 тысяч куб.м газа в день. Давление на устье скважины равно 4 барам, и что удивительно – оно не падает в течение пяти лет стабильной добычи.

С 2012 года скважина в деревне Буракебугу используется для выработки электричества. С тех пор местные жители получают энергию именно из водорода, добываемого из-под земли. Скважина Буракебугу стала первой в мире продуктивной скважиной, доказавшей, что водород может встречаться в природе в виде залежей.

На вебсайте под названием «Интересный инжиниринг», в сообщении от 13 июля этого года сказано, что Канада готовится к промышленной эксплуатации первого в мире месторождения природного водорода. Первая скважина была установлена в степях провинции Саскачеван в ноябре 2025 года. Эта скважина будет нацелена на вершину подземной структуры площадью около 15 кв.км. Компания «Макс Пауер» поясняет, что это первая

найденная в Канаде крупная подземная ловушка с природным водородом, амплитудой до ста метров. Она была обнаружена весной 2026 года с помощью площадных сейсмических исследований. В этом регионе всё началось со скважины-первооткрывательницы в местечке Лоусон, где доля водорода в выходящих из скважины газов составила 28,6 процента, и доля гелия также была значительной.

Как известно, Европа очень нуждается в природных энергетических ресурсах, поэтому можно ожидать, что поиски природного водорода прежде всего активизируются в Европе. Действительно, на европейской конференции геоученых и инженеров (EAGE) в прошлом 2025 году был сделан доклад о так называемой пассивной сейсмике [10], а именно об установке сейсмических датчиков в Пиренеях, на границе Испании и Франции, для проведения трехкомпонентного микросейсмического мониторинга (рис.5). Ожидается, что длительная регистрации фона сейсмических колебаний – в течение 40 дней – с помощью двух групп по 500 датчиков, установленных на общей площади 900 кв.км, позволит построить более точные геологические модели и оконтурить возможные залежи природного водорода в Пиренеях и пути его миграции наверх.



◀ Рис.5.
Установка трехкомпонентных пунктов приема для длительного сейсмического мониторинга в Пиренеях.

Надо отметить, что сейсморазведка на природный водород – это быстро растущее направление, которое может сыграть важнейшую роль в энергетике будущего. Для оптимизации этого вида сейсморазведки и получения достоверных изображений генерирующих водород толщ и его резервуаров необходимы дальнейшие технологические и научные разработки.

Происхождение природного водорода под вопросом

Как известно, подавляющее число геологов-нефтяников и геохимиков придерживаются органической теории происхождения нефти и природного газа в земной коре. Считается, что все виды углеводородов поэтапно возникли в результате длительного теплового воздействия и высокого давления на органику — это останки водорослей, планктона и животных — в относительно глубоко залегающих, так называемых нефтематеринских комплексах пород, на глубинах от 1 до 10 км.

По инерции, абсолютное большинство геологов предпочитает искать органический след в происхождении природного водорода и собирается начинать его разведку в пределах известных нефтяных и газовых месторождений со структурными или антиклинальными ловушками лёгких жидкостей и газов, стремящихся найти пути миграции на поверхность земли. Но по всей видимости, это изначально неправильный подход к поискам и разведке природного водорода.

Профессор Валерий Бессель пишет [1], что среди предполагаемых механизмов образования водорода в земной коре сейчас наиболее популярны геохимические и микробиологические процессы, и даже радиолиз воды — то есть разложение молекул воды под воздействием радиоактивного излучения местных скоплений урана или тория. Но очевидно то, что такие механизмы, которые могут протекать

в верхних слоях земной коры, способны создавать только локальные и можно сказать, случайные скопления природного водорода, хотя — как уже было подчёркнуто, — выходы водорода наблюдаются повсеместно на поверхности Земли, в самой разной геологической и тектонической обстановке, и скорее всего, природный водород имеет глубинное происхождение, а не поверхностное.

Гипотеза металлогидридной Земли

Более 50 лет назад доктор геол.-мин. наук В.Н. Ларин выдвинул гипотезу об изначально металлогидридной Земле [5]. Согласно предположению Ларина, ядро ранней горячей Земли было не просто металлическим, а состояло из гидридов металлов — то есть соединений металлов с водородом. По мере остывания ядра Земли, гидриды металлов начали постепенно высвобождаться из ядра, и происходила продувка мантии и земной коры водородом. Химически водород очень активный, и при подъёме вверх, через мантию, он образовывал множество соединений, включая воду, сероводород, метан и более сложные соединения с углеродом и кислородом. Тогда образование и накопление разнообразных углеводородов в земной коре является частью процесса выведения газообразных веществ из мантии нашей планеты. Часть глубинного водорода по разломам и трещинам достигает поверхности Земли и выходит в атмосферу, и это называют водородной дегазацией.

К сожалению, идеи Ларина, подкреплённые измерениями концентраций водорода в почве в разных странах, не были восприняты ни в России, ни за рубежом, и даже в нашем просвещённом 21-м веке они игнорируются. Современным продолжателем дела Ларина я бы прежде всего назвал доктора геол.-мин. наук В.Л.Сывороткина [7], автора книги «Глубинная дегазация Земли и глобаль-

ные катастрофы». Из названия книги видно, что Сывороткин рассчитывал, что через экологические проблемы – а именно проблему разрушения озонового слоя в стратосфере, на высоте от 10 до 50 км от поверхности Земли – проще привлечь внимание властей и большой науки к явлению водородной дегазации, а потом уже подтягивать вопросы использования природного водорода в промышленности. Но пока он не преуспел.

Гипотеза расширяющейся Земли с увеличением массы

Гипотеза Ларина об изначально металлогидридной Земле и её постепенном расширении была очень важным шагом в геонауках в 20-м веке и содержательной альтернативой теории тектоники плит на планете неизменных размеров. Но согласно Ларину, выход глубинного водорода из ядра Земли заканчивается в современную эпоху, и в перспективе Земля у Ларина выглядит так же, как и у официальной науки. А именно, постепенное остывание нашей планеты и потеря океанов и атмосферы. На Интернет-канале «Мифы и реальность» приведены цифры, что сейчас из атмосферы Земли происходит утечка лёгких газов – 3 кг водорода в секунду и 50 грамм гелия в секунду. И в далёком будущем, через 3 млрд лет, наша Земля будто бы полностью потеряет водно-газовую оболочку, и её поверхность будет напоминать нынешний Марс...

Я придерживаюсь другого сценария, поскольку отдаю предпочтение идеям другого яркого мыслителя – В.Ф.Блинова, который написал книгу «Растущая Земля: из планет в звёзды» [2]. По Блинову, генерация водорода в ядре Земли продолжается в наши дни, геологическая активность планеты растёт, а не ослабевает, и будущее нашей планеты – стать водно-газовым гигантом вроде Юпитера. Об этом можно задуматься, если в ускоренном

виде посмотреть на ураганы и тайфуны на нашей планете из космоса!

В любом случае, геологическая жизнь нашей планеты очень неспешная по человеческим меркам, и у современной цивилизации есть достаточно времени для адаптации к нарастающей активности Земли и, соответственно, меняющейся среде обитания.

Литература

1. Бессель В.В., Перспективы добычи и применения природного водорода в России и оценка мирового опыта. – НЕФТЕГАЗ.РУ, 4 июля 2025 г.
2. Блинов В.Ф., Растущая Земля: из планет в звёзды. – Киев, 2011. – 305 с.
3. Добрецова И.Г., Процессы дегазации на дне Атлантического океана. – Вестник Геонаук, №5, май 2025 г.
4. Добрецова И.Г., Процессы дегазации на Срединном Атлантическом хребте. – доклад в ИО РАН 20 ноября 2025 г.
5. Ларин В.Н., Наша Земля. Происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли. – М., 2005, 242 с.
6. Мировой океан. Том 1. Геология и тектоника океана. Катастрофические явления в океане. – М.: Научный мир, 2013. – 644 с.
7. Сывороткин В.Л., Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. – М.: ООО "Геоинформцентр", 2002. – 250 с.
8. Чудинов Ю.В., Моя геология. Эдукция и расширение Земли. – М.: ГЕОС, 2024. – 312 с.
9. Gabor Tari, Natural hydrogen exploration: where do we stand? – SEG online talk, October 14, 2025.
10. Natural hydrogen exploration on the Pyrenees foothills using 3C passive seismic recorded with compact autonomous nodes. – 86th EAGE annual conference & exhibition, Toulouse, France, June 2–5, 2025.

УДК 550.834:378.147

Практика, которая помогает полюбить профессию

■ Фролов А.С., Дорошенко А.А., Игнатова А.С., Овчарюк М.А., Сталбо Л.А.,
РГУ Нефти и Газа им И.М. Губкина, г. Москва.

Аннотация. В статье описан подход к проведению учебной практики студентов РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. Описаны исследования, проведенные с помощью программно-аппаратного комплекса «Геотом», предоставленного ООО «Фирма «Геосейс». Представлены полученные данные и результаты обработки. Показано, что погружение в реальные научно-производственные задачи и живое общение с практикующими специалистами формируют у студентов устойчивый интерес и любовь к профессии геофизика..

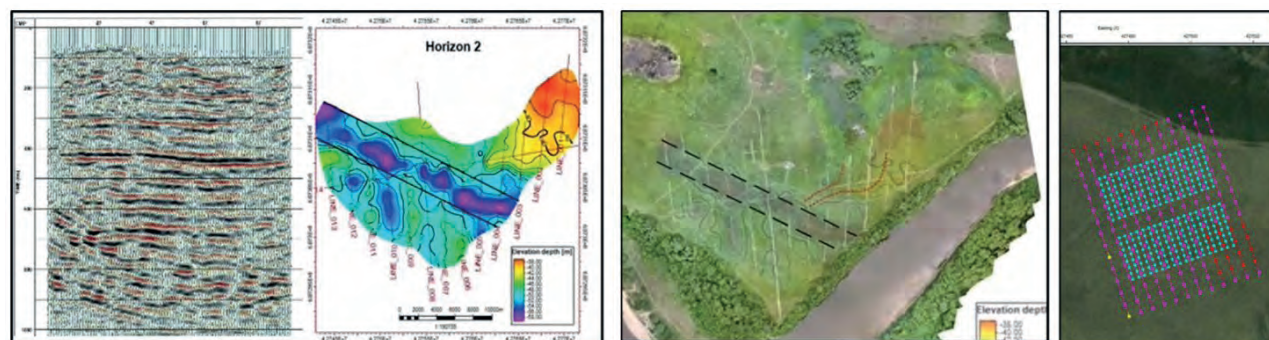
Летняя полевая практика студентов РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в 2026 году вновь подтвердила, что именно этот этап образовательного процесса становится той ступенью, где будущий инженер начинает по-настоящему понимать и чувствовать геофизику. Концепция практики строится не только на освоении методов исследований, но и на погружении студентов в атмосферу поиска, совместной работы и реальных научно-производственных задач.

В предыдущие годы студенты открывали для себя геофизику на археологических памятниках Гнездова — одного из крупнейших центров Древней Руси. В ходе практики они решали реальные научные задачи: с помощью геофизических методов выявляли перспективные участки для последующих археологических раскопок, участвовали в поиске палеорусла Днепра, положение которого помогало объяснить логику древних поселений, прогнозировать места, где могли находиться жилые кварталы средневеко-

вого города. Большой интерес вызывали экскурсии, организованные археологами заповедника, позволявшие увидеть, как результаты геофизических исследований становятся основой для исторических открытий. Такое сочетание полевых работ, живого прикосновения к истории и решения уникальных исследовательских задач наглядно показывало студентам, что именно геофизика помогает находить ответы на вопросы, скрытые под землей, и значительно повышало значимость выбранной ими профессии.

В 2026 году в рамках профессионального партнерства компания «Фирма «Геосейс» предоставила для учебных задач российский телеметрический программно-аппаратный комплекс «Геотом». Основной площадкой практики стал учебный полигон в Залучье (район Вышнего Волочка), где впервые были реализованы исследования с использованием бескабельной системы регистрации. Универсальные возможности комплекса позволили выполнить работы, ранее

▼ Рис. 1. Картирование палеорусла Днепра в рамках студенческой практики в Гнездово.



недоступные в рамках учебной практики: провести трехмерные наблюдения методом преломленных волн, организовать транзитные исследования через акваторию с применением специально разработанных плавучих платформ для регистраторов, сравнить эффективность кабельной и бескабельной технологий и познакомиться с современными цифровыми подходами к организации полевых сейсморазведочных работ.

Основной целью практики в 2026 году было дать студентом опробовать разнообразные методики работ с использованием широкого спектра оборудования и способов его применения. Исходя из этого были проведены исследования 4 видов:

- отстрел сухопутного профиля 2D с помощью бескабельной и кабельной систем;
- отработка транзитного профиля с применением разных видов источников;
- работы 3D МПВ;
- работы 3D ВСП.

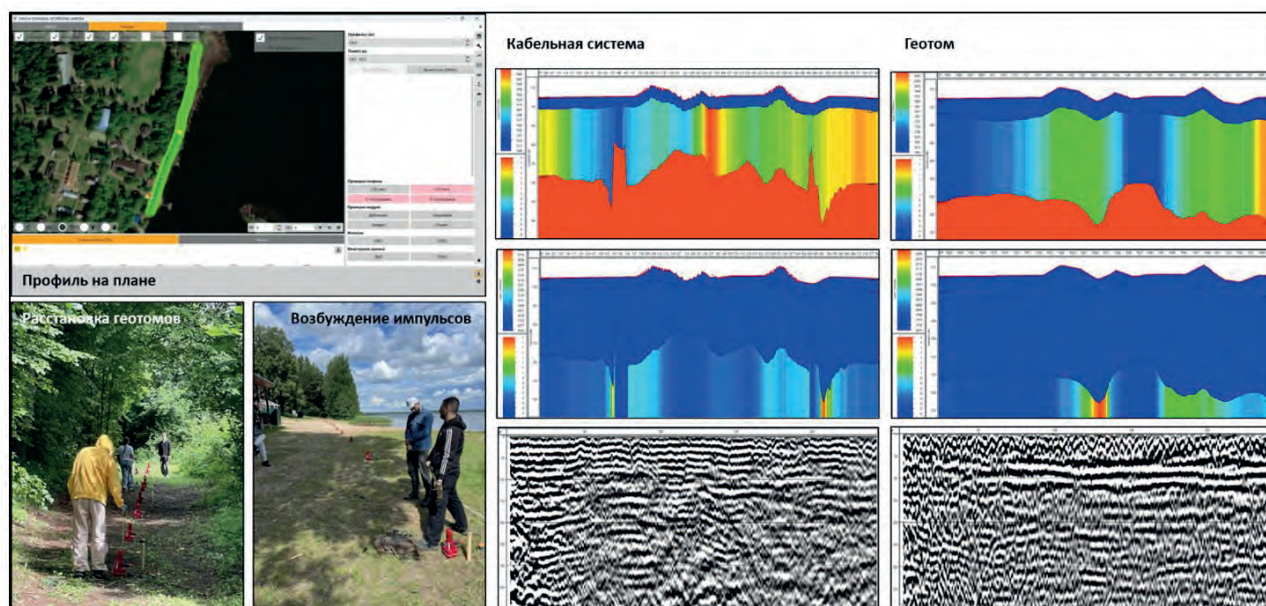
В рамках сухопутных работ было запроектировано два профиля протяженностью около 300 метров (для кабельной и для бескабельной систе-

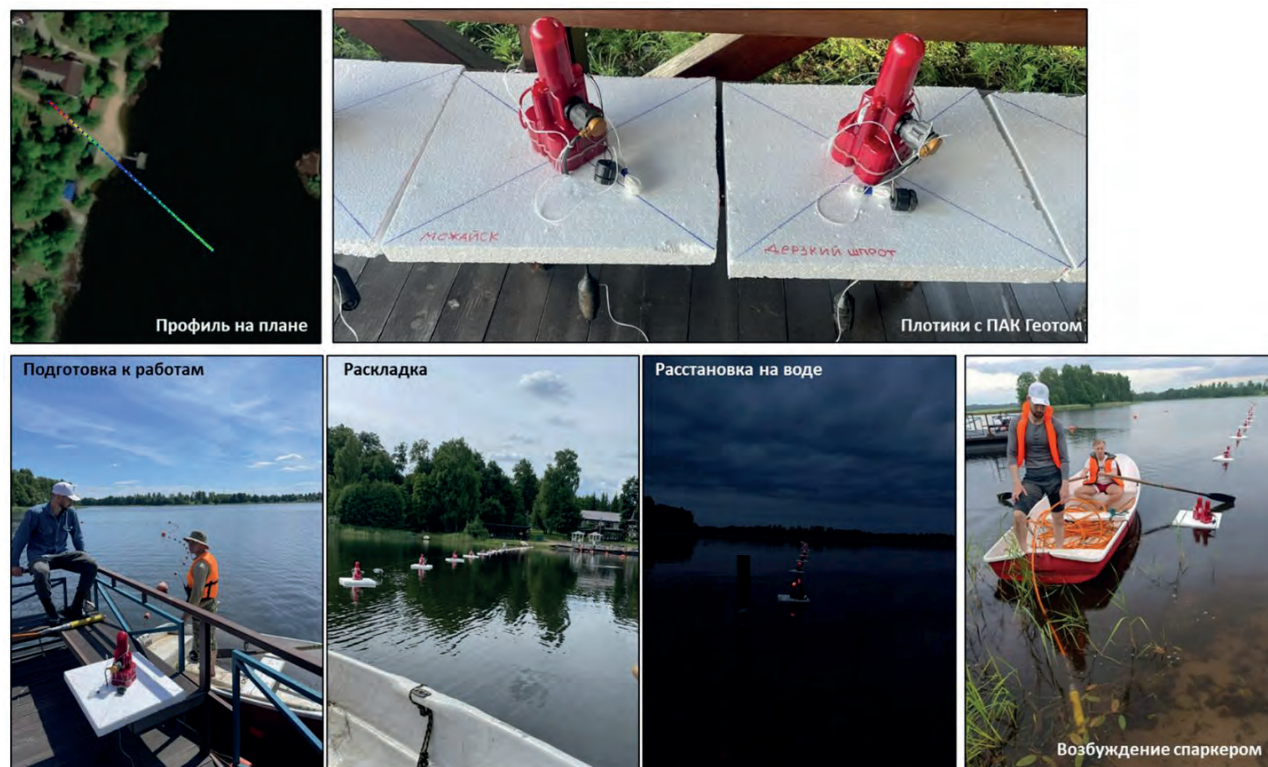
мы). Первый профиль включал три расстановки, каждая по 80 приемников и 80 источников с шагом 2 м. Каждая последующая расстановка перекрывала предыдущую на половину длины (для формирования равномерного покрытия по кратности), при этом итоговый профиль имел длину 318 м. Возбуждение на профиле происходило с использованием «падающего груза».

Второй профиль был расположен там же, где и первый, но включал 61 модуль «Геотом» с низкочастотными приемниками с шагом 5 метров – всего 300 м. Для повышения кратности данных было принято решение сделать пункты возбуждения каждые 2 метра – всего 151 ПВ. В рамках проведенной работы студентам удалось оценить скорость производства работ с бескабельными системами (бескабельный профиль был отработан за 1.5 дня, тогда как отработка кабельного заняла 3 дня из-за необходимости переключений). В то же время из-за невозможности визуальной оценки сейсмограммы сразу после отстрела полевой бригаде пришлось адаптироваться к работе «вслепую» и аккуратно выбирать оптимальный момент для начала записи.

Обработка полученных данных про-

▼ Рис. 2. Работы по сравнению бескабельной и кабельной системы.





▲ Рис. 3. Отработка профиля в транзитной зоне.

водилась по методам МПВ и МОВ ОСТ. В рамках обработки МПВ по пропикированным вручную первым вступлениям строились исходные модели среды, которые впоследствии уточнялись методом сеточной томографии.

Обработка метода ОСТ производилась по простейшему графу, включавшему в себя ввод статических поправок, многоканальное шумоподавление, учет кинематики и суммирование.

Транзитные наблюдения были выполнены по профилю длиной 170 м, пересекавшему береговую линию. Из 35 пунктов приема 15 размещались на суше и 20 — в акватории. При этом приемные модули в акватории размещались на специально подготовленных плавучих платформах, раскладка и смотка осуществлялись студентами с весельных лодок. Шаг между приемниками составлял 5 м, между пунктами возбуждения — 2 м. На наземной части использовался ударный источник, в акватории — спаркер, закрепленный на корме лодки.

Перед обработкой данных студенты

дополнительно ознакомились с приведением «геофон-гидрофон». В остальном сам процесс обработки данных не сильно отличался от обработки сухопутных данных. Тем не менее нельзя не отметить чрезвычайно интересные результаты этой самой обработки. И на данных МПВ и на данных ОСТ (что нехарактерно для района работ) наблюдается крайне яркая скоростная граница на глубинах около 20 метров и временах 100-150 мс. Так как глубина озера в районе работ 2-4 метра, вероятнее всего этот контраст обусловлен переходом от слабоконсолидированного ила к более твердым коренным породам.

Следующим этапом была 3D сейсморазведка методом преломленных волн, которая проводилась на ровной площадке футбольного поля. Модули расставлялись квадратной сеткой 9×9 пунктов приема (81 приемник) размером 40×40 м с шагом 5 м между пунктами. С целью сокращения времени отработки система пунктов возбуждения строилась по нерегулярной схеме: центральная плотная группа пунктов дополнялась двумя внеш-

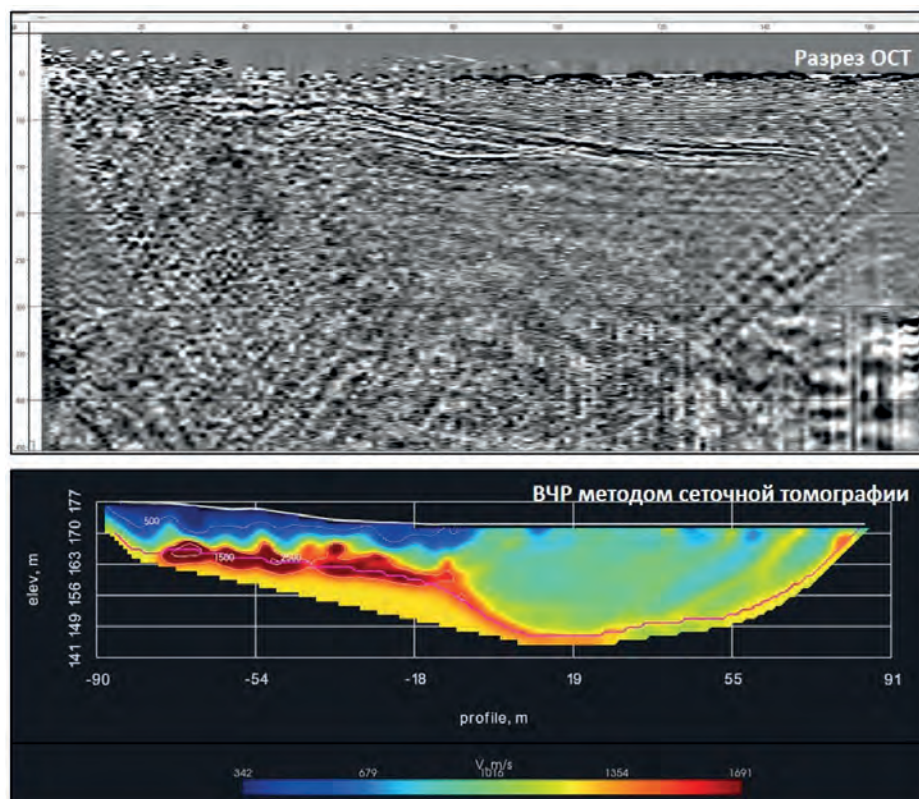


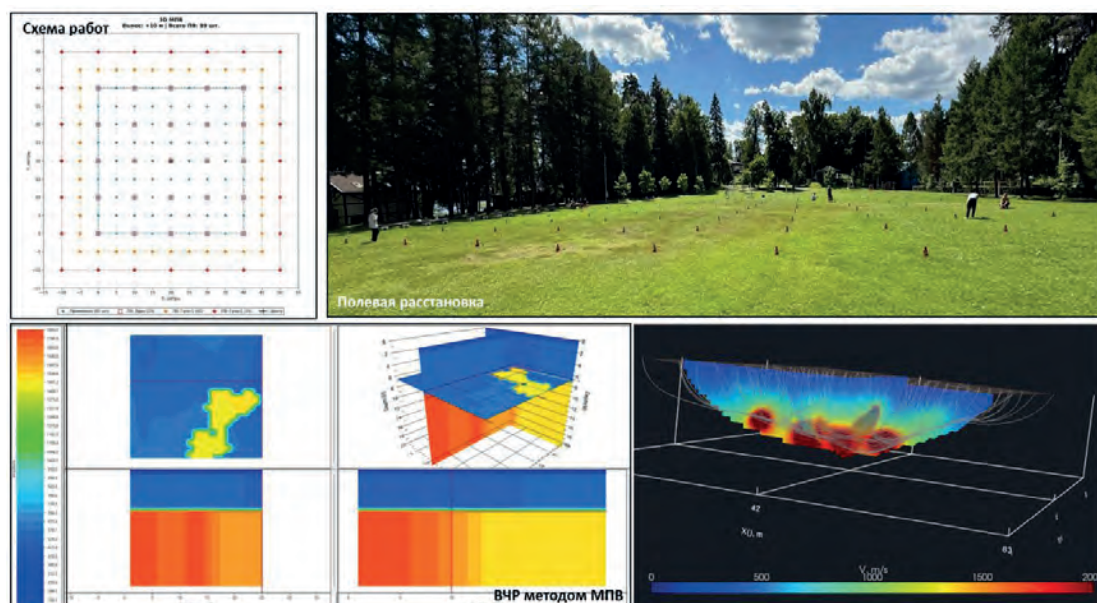
Рис. 4. Результаты работ в транзитной зоне.

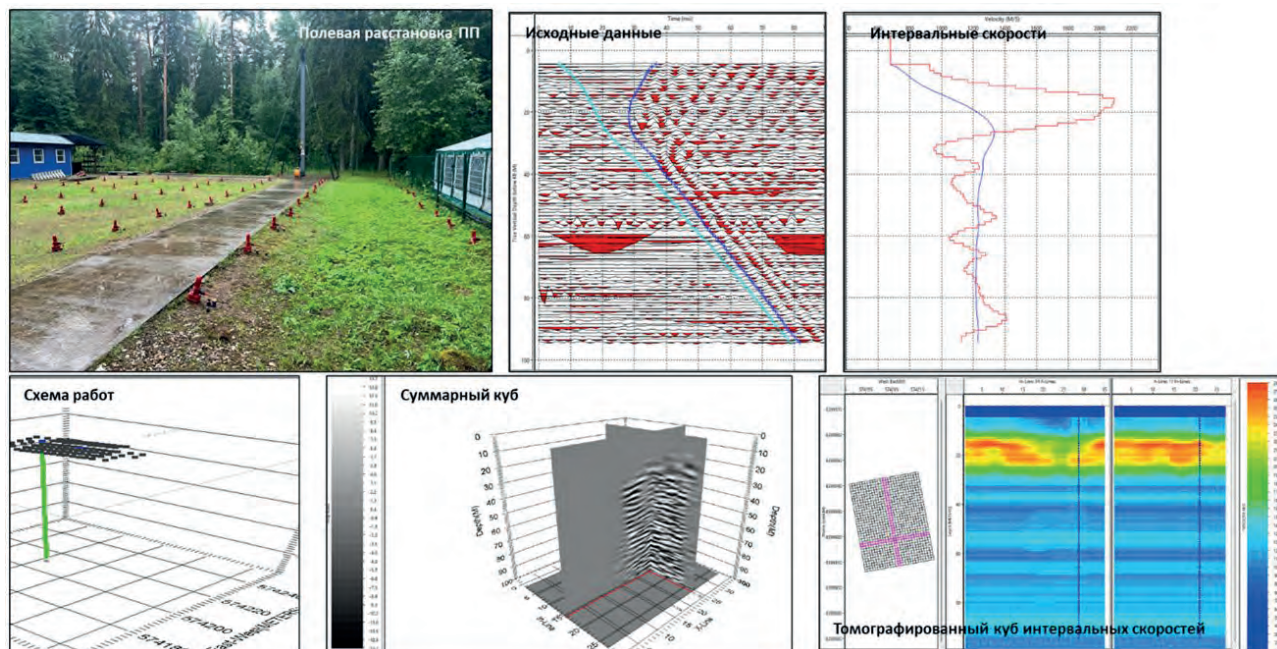
ними контурами, вынесенными за пределы приемной сетки на 10 м, – всего 89 пунктов возбуждения. Вынос обеспечил увеличение удаления источник-приемник, а «сгущение» пунктов в ядре – детальность в центре площади. Такая схема обеспечивала покрытие площади наблюдения, достаточное для построения скоростной модели по всему участку. В рамках данной работы студенты впер-

вые ознакомились с 3D сейсмограммами и особенностями присвоения 3D геометрии. Обработка проводилась исключительно методом МПВ, в результате чего были получены трехмерные скоростные модели ВЧР.

Финальным этапом было проведение работ 3D ВСП на учебной скважине. Работы проводились методом обращённого ВСП: система включала 94 пункта

Рис. 5. Работы 3D МПВ.





▲ Рис. 6. Работы 3D ВСП.

приёма и 92 пункта возбуждения (в диапазоне глубин от 96 до 5 м с шагом 1 м). Возбуждение проводилось в скважине с помощью спаркера. Такая конфигурация была удобнее расположения источников на поверхности, что также соответствовало задачам проведения работ в 3D-модификации и облегчалось использованием ПАК «Геотом».

Обработка полученных данных включала в себя построение скоростной модели методом томографии, шумоподавление и преобразование ВСП-ОГТ. По результатам обработки был получен куб сейсмических данных, а также глубинные изображения, на которых прослеживается отражённая волна, образование которой обусловлено наличием высокоскоростного слоя. Этот слой также фиксируется на скоростной модели, полученной по результатам томографии. Кроме того, на скоростной мо-

дели наблюдается разуплотнение пород вблизи скважины, на что указывает плавное уменьшение скоростей.

Практика стала не только знакомством с новым оборудованием, но и площадкой для профессионального общения. В рамках партнерства компании «Геосейс» и Губкинского университета Д.Н. Слонов прочитал студентам лекции о современных тенденциях развития сейсморазведки и инновационных возможностях ПАК «Геотом». Живое обсуждение современных технологий позволило связать университетские знания с реальными задачами отрасли и вызвало большой интерес у будущих специалистов.

Верность такого подхода, рождающего не просто интерес – любовь к профессии – в организации практики отражают отзывы самих студентов.



Любовь Сталбо призналась, что благодаря «Геотому» удалось выполнить множество необычных исследований, в том числе организовать работы на воде с использованием собственноручно изготовленных плотов для бескабельных модулей.

Мария Овчарюк с улыбкой вспоминает «волшебную палочку», с помощью которой активировали блоки, сама же гордо приняла звание ведьмочки.



Альбина Игнатова считает главным итогом практики не только новые знания по сейсморазведке, но и настоящих друзей.

По словам Анастасии Дорошенко, работа со спаркером и возможность обсудить перспективы развития геофизики со специалистами помогли ей определить направления, которые хочется изучать дальше.



Практика еще раз показала, что современное оборудование само по себе не является целью обучения. Оно становится инструментом, который вдохновляет студентов на творчество, позволяет смело экспериментировать и видеть результат своих идей. Именно такие экспедиции помогают сделать первый шаг от знакомства с геофизикой к искреннему увлечению профессией.

Практика 2026 года убедительно показала, что сочетание увлекательных полевых исследований, работы на современных отечественных геофизических комплексах и живого общения с практикующими специалистами позволяет решать не только образовательную задачу, но и главную задачу любого профильного университета — воспитывать инженеров, искренне влюбленных в свою профессию.

У Лукоморья снова вместе друзья сошлись на «Геофесте»

«Геофест-2026»: идеи, технологии и люди, которые создают будущее геофизики.



В июле состоялась IX конференция «Геофест-2026», вновь объединившая разработчиков геофизического оборудования, представителей ВИНК, сервисных компаний, научных организаций и молодых специалистов.

Лейтмотивом конференции стало «Лукоморье». Сказочный антураж и образы героев подчеркнули главную идею форума – инженерное творчество начинается с фантазии.

Открывая форум, председатель оргкомитета Сергей Владимирович Гурьев обозначил базовый принцип развития отрасли – «ФИЗ: Фантазируй. Изобретай. Зарабатывай», - раскрыв по-новому про-

стую и емкую трактовку «физов» (сокращенное название физических наблюдений в разведочной геофизике), - «В этих трех словах заключена логика любого технологического развития. Каждое инженерное решение начинается с фантазии. Затем появляется изобретение, а настоящую ценность оно приобретает только тогда, когда начинает работать на производстве и приносить реальную пользу отрасли».

Этой логике следовала вся деловая программа: фокус был не на текущем состоянии технологий, а на будущем геофизики.

Одним из первых выступлений стал доклад **Александра Ляндреса («СЖЖ-Восток»)** «Мне уже за 30 — самое время мечтать». На технической конференции он говорил не о приборах и программном обеспечении, а о людях, способных видеть будущее. Речь шла о том, что крупные инженерные достижения всегда начинаются с мечты, с желания сделать невозможное возможным.

▼ Рис. 1. «Фантазируй. Изобретай. Зарабатывай» – доклад Гурьева С.В. на открытии конференции «Геофест-2026».

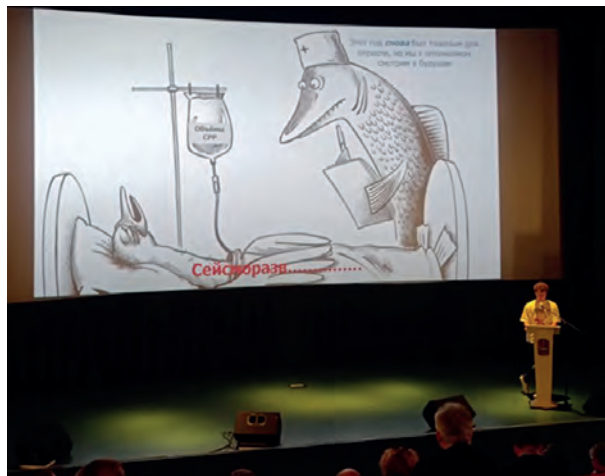


Причем, многие технические решения, применимые в геофизике уже существуют в других сферах нашей жизни – промышленные роботы, беспилотные системы, ИИ в различных ипостасях.

Совершенно иной взгляд на будущее представил **Евгений Гордич (ПАО «Лукойл»)**. Его доклады были посвящены современным технологиям и вопросам качества сейсморазведочных работ. Эти темы объединяла одна важная идея: развитие отрасли невозможно без постоянного совершенствования всей технологической цепочки — от постановки задачи и выбора методики исследования до итогового результата. Современная аппаратура становится все более совершенной, однако главным фактором успеха по-прежнему остается грамотное инженерное применение новых возможностей.

Большой интерес вызвало выступление **Радия Гафарова (АО «Башнефтегеофизика»)**, посвященное нестандартным требованиям заказчиков при проведении вибрационной сейсморазведки. За конкретными производственными примерами скрывалась гораздо более масштабная тема — качество подготовки проектов, ответственность исполнителей и необходимость заранее учитывать факторы, которые впоследствии могут повлиять на результат работ.

Логичным продолжением этой темы стал доклад **Виталия Зазули (ООО «ТСГК»)** о комплексном развитии технологий сейсморазведки в компании. Вместо обсуждения отдельных технических новинок был представлен системный взгляд на развитие отрасли, в котором совершенствование аппаратуры, программного обеспечения, технологических наблюдений и организации производства рассматривается как единый процесс. Именно такой подход сегодня позволяет получать качественно новый результат.



▲ Рис. 2. Яркие доклады участников остаются в памяти участников. Выступление Евгения Гордича.

Не менее оживленной оказалась дискуссия «Будущее сейсморегистраторов», которую вел Анатолий Череповский. Доклад быстро вышел за рамки сравнения характеристик отдельных приборов. Участники говорили и о перспективах бескабельных технологий, и о развитии новых типов датчиков, и об интеллектуальном контроле качества полевых работ и о требованиях, которые уже сегодня предъявляются к современным системам регистрации.



▲ Рис. 3. Дискуссия «Будущее сейсморегистраторов», Череповский Анатолий.

Одним из ярких событий «Геофеста-2026» стала полевая демонстрация современных технологий разведочной геофизики, организованная при участии журнала «Приборы и системы разведочной геофизики». Журнал не

только выступил информационным партнером мероприятия, но и принял непосредственное участие в формировании программы демонстрации, объединив на одной площадке разработчиков геофизического оборудования, представителей сервисных компаний и специалистов, заинтересованных в практическом применении новых технологий.

В отличие от традиционной выставочной экспозиции, здесь все представленные решения можно было увидеть в действии и обсудить непосредственно с их создателями. Компания «Сейстех» представила программно-аппаратный комплекс «Геотом», компании CGL и ВРУ познакомили участников с собственными техническими разработками китайских производителей. Компания «Новый Восток Гео», представляя широкую линейку своей продукции, сделала акцент на внедрении передовых технологических решений в практику российских исследований, попутно показав в работе комплекс ULS, форсировав Москва-реку сейсмическим оборудованием. Компания «ТюменьГеоТехнология» продемонстрировала цифровые решения для организации полевых работ, а «Сигма-ГЕО» представила действующую модель электроразведочного комплекса, наглядно демонстрирующую принципы проведения исследований.

Важной частью программы стало выступление Артема Фролова (РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина) о вовлечении студентов в профессию «Влюбить студента в геофизику. От первой практики — к профессии на всю жизнь». Доклад показал, что современные российские технологии становятся не только эффективным производственным инструментом, но и при интеграции их в учебные практики — важным элементом подготовки будущих специалистов.



▲ Рис. 4. Полевая демонстрация оборудования для разведочной геофизики.



▲ Рис. 5. Макет «умного вагон-дома» в рамках проекта цифровой трансформации сейсморазведки представлен компанией ТГТ.



▲ Рис. 6. Модель электроразведки в миниатюре от компании «Сигма-ГЕО»

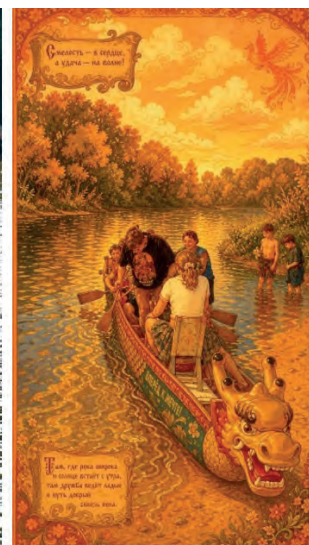


▲ Рис. 7. ПАК «Геотом» - это ярко, красиво и перспективно.

► Рис. 8. Компании, представившие свои разработки и оборудование, отмеченные за активное участие в проведении конференции «Геофест-2026».



▼ Рис. 9. Встреча друзей и сказочный антураж «Геофеста-2026».





▲ Рис. 10. Участники конференции «Геофест-2026».

Геофест-2026 еще раз подтвердил миссию — объединять профессионалов, вдохновлять на создание новых технологий и помогать воплощать инженерные идеи в реальные производственные решения. Именно так реализуется принцип ФИЗ: **фантазировать, изобретать и создавать технологии, которые становятся основой успешного развития отрасли.**

Москва впадает в Волгу

Это не только географический факт, но и красивый символ завершения нынешнего «Геофеста», прошедшем в живописных «Лесных далях» на берегу Москва-реки. Как воды Москвы-реки, пройдя свой путь, вливаются в Волгу, так и идеи, прозвучавшие на конференции, не исчезают с ее очередным этапом. Они продолжают жить в новых приборах, совместных проектах, научных статьях, производственных технологиях и в людях, которые будут воплощать их в жизнь.

Поэтому финальным аккордом «Геофеста-2026» стал анонс **«Встреч на Волге – 2027»**. Это не просто приглашение на очередную конференцию. Это естественное продолжение традиции практикоориентированных встреч про-

фессионалов-геофизиков, людей, которым интересно создавать новое.

Настоящая река становится шире, принимая в себя новые притоки. Так и «Геофест» — объединяет новые идеи, компании, опытных инженеров и молодых специалистов, для которых слова «Фантазируй. Изобретай. Зарабатывай.» — основа профессиональной жизни.

От экспертной информации-
к поиску решений



ГЕОФИЗ

КАТАЛОГ

геофизкаталог.рф



Единое пространство
геофизического рынка России



Встречи на Волге

2027

22-24 сентября

НАУКА • ТЕХНОЛОГИИ • ПРАКТИКА

Приглашаем принять участие!

Конференцию отличает практикоориентированный формат: новые технологии и оборудование можно будет не только обсудить, но и увидеть в реальной работе. Полевая демонстрация пройдет на живописном берегу Волги и впервые объединит показ геофизического оборудования на суше, на воде и в транзитной зоне.



НОВЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ



ДЕМОНСТРАЦИЯ
ОБОРУДОВАНИЯ



ОБМЕН
ОПЫТОМ



УНИКАЛЬНАЯ
ПОЛЕВАЯ ПЛОЩАДКА
НА БЕРЕГУ ВОЛГИ



**ПРИБОРЫ и СИСТЕМЫ
РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ**

ОБЩЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЕЖЕКВАРТАЛЬНЫЙ ЖУРНАЛ



встречинаволге.рф



Кашик Алексей Сергеевич

27.04.1938 - 05.06.2026

С глубокой скорбью сообщаем, что 5 июня 2026 ушел из жизни Алексей Сергеевич Кашик - выдающийся российский ученый-геофизик, доктор технических наук, академик Российской академии естественных наук, лауреат Государственной премии СССР, почетный нефтяник, заслуженный работник Минтопэнерго Российской Федерации.

Его уход стал тяжёлой утратой не только для коллег и друзей, но и для всей российской геофизической науки.

Алексей Сергеевич родился 27 апреля 1938 года в городе Иркутске. В 1961 году окончил Московский геологоразведочный институт им. С. Орджоникидзе, после чего посвятил свою жизнь созданию современного научно-исследовательского геофизического предприятия, развитию отечественной геофизической науки, новых цифровых технологий и подготовке научных кадров.

Алексей Сергеевич родился 27 апреля 1938 года в городе Иркутске. В 1961 году окончил Московский геологоразведочный институт им. С. Орджоникидзе, после чего посвятил свою жизнь созданию современного научно-исследовательского геофизического предприятия, развитию отечественной геофизической науки, новых цифровых технологий и подготовке научных кадров.

С 1969 года Алексей Сергеевич работал в Центральной геофизической экспедиции Министерства нефтяной промышленности СССР – главный инженер, с 1974 года начальник экспедиции. Он сыграл важную роль в формировании ключевых направлений деятельности организации со дня ее основания - создания современных методов и технических средств обработки, хранения и интерпретации

нефтепромысловой и сейсморазведочной информации.

Алексей Сергеевич занимался теоретическими исследованиями в области фокусировки электрических полей, решением обратных задач электрометрии скважин, разработкой аппаратуры для многоэлектродных фокусированных зондов электрического каротажа. Им предложены и разработаны методы электрокаротажа обсаженных скважин.

Научные результаты Алексея Сергеевича оказали большое влияние на развитие отечественной и мировой цифровой геофизики. Он был одним из авторов новых подходов к регистрации и анализу сейсмических полей, внес значительный вклад во внедрение адаптивных методов обработки геофизических данных и развитие автоматизированных

систем комплексной интерпретации результатов исследований.

Под его руководством создавались экспертные системы нового поколения, основанные на принципах многомерной динамической визуализации информации.

В течение 17 лет, с 1974 по 1991 год, Алексей Сергеевич возглавлял Международный координационный центр стран - членов Совета Экономического Взаимодействия (СЭВ) по нефтяной геофизике, способствуя развитию научного сотрудничества и обмену передовыми технологиями между специалистами разных стран.

За годы научной и профессиональной деятельности Алексей Сергеевич Кашик стал автором более 120 научных публикаций и около 50 изобретений в области разработки технических средств, обработки и представления геофизических данных. Он подготовил множество докторов и кандидатов наук, воспитал специалистов, продолживших его научные традиции.

Его выдающийся вклад в науку и промышленность был отмечен высокими государственными и профессиональными наградами: Государственной премией СССР по науке и технике, орденом Дружбы народов, медалями ВДНХ СССР, наградами стран-членов СЭВ, медалью «За доблестный труд», званием «Отличник нефтяной промышленности», премией «Золотой РОСИНГ» и званием «Заслуженный работник Минтопэнерго РФ».

Алексей Сергеевич был не только выдающимся научным деятелем, но и человеком большой души, оставившим след в сердцах многих. Обладая поэтическим даром, он писал стихи, в которых раскрывал глубину своей души, делился

размышлениями о жизни, природе и человеческом предназначении. Сочетание аналитического ума ученого и лирического дара поэта делало его личность уникальной и вдохновляющей.

Коллеги, ученики и друзья всегда будут помнить Алексея Сергеевича как выдающегося ученого, мудрого наставника, талантливого организатора, человека высокой культуры, доброжелательности и принципиальности. Его профессиональная честность, преданность науке и забота о молодых специалистах оставили глубокий след в сердцах всех, кому довелось с ним работать.

Светлая память о Алексее Сергеевиче Кашике сохраниться в сердцах всех, кто его знал, ценил и уважал.

Коллеги, друзья и сотрудники АО «ЦГЭ»



Your Gateway to Business in Eurasia

Стратегический и управленческий консалтинг на нефтесервисном рынке Ближнего Востока

Анализ состояния рынка и перспективных направлений в регионе под интересы клиентов;

Разработка стратегии вхождения на рынок;

Поиск и подбор решений по расширению и оптимизации бизнеса в странах Ближнего Востока;

Развитие Вашего бизнеса «под ключ».

Партнерство

Представление интересов клиента в странах региона;

Поиск местных партнёров и заказчиков, организация переговоров;

Привлечение инвестиций под перспективные проекты.

Поставки оборудования и разработка технологических решений

Аренда и продажа нового и бывшего в употреблении оборудования и комплектующих для геологоразведки на море и на суше;

Подготовка проектных решений под запрос.

Россия, г. Москва:

+7 (985) 222 48 44

Россия, г. Уфа:

+7 (347) 246 90 74

ОАЭ, г. Дубай,

+971(56) 170 2553

info@eurasia-oil-services.com



www.eurasia-oil-services.com

В ЧЕМ СУПЕРСИЛА ПИСАТЕЛЯ?

— Неиссякаемая
работоспособность!

— Глубина
наблюдений!

— Безупречная
точность!

— Спасибо за оценку, коллеги.

Сейсморегистрирующая бескабельная система ГЕОТОМ

- Высокоточная сейсморегистрация
- Контроль приемной расстановки
- Контроль уровня микросейсм
- Российская, импортоопережающая
- Адаптируется под любые геофизические задачи и условия работы



Программно-аппаратный
комплекс «ГЕОТОМ»



Производство и аренда:
ХОЛДИНГ «ГЕОСЕЙС»
Тел: +7 (495) 694-1940
www.geoseis.rf



сейстех

Разработчик ГЕОТОМа:
ООО «СЕЙСТЕХ»
Тел: +7 (495) 737-9285
www.seistex.rf

