

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

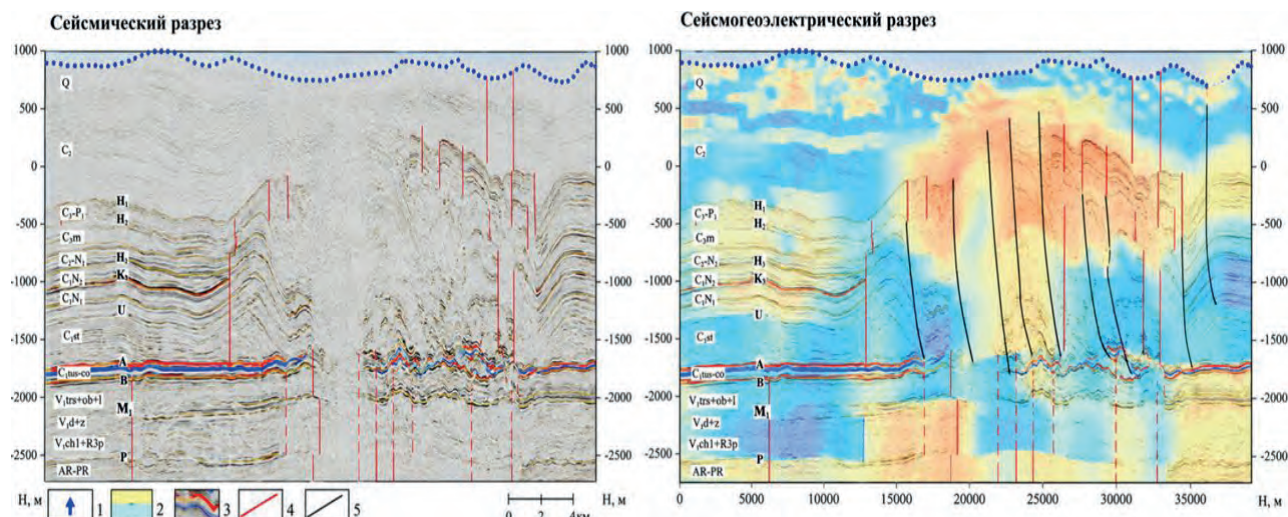
Первое направление связано с использованием независимой геоэлектрической информации в зонах, где сейсмическая модель недостаточно устойчива. В соленосных и тектонически нарушенных разрезах изменения сопротивления могут маркировать зоны вторичного изменения, разуплотнения и флюидопроницаемости, которые 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].

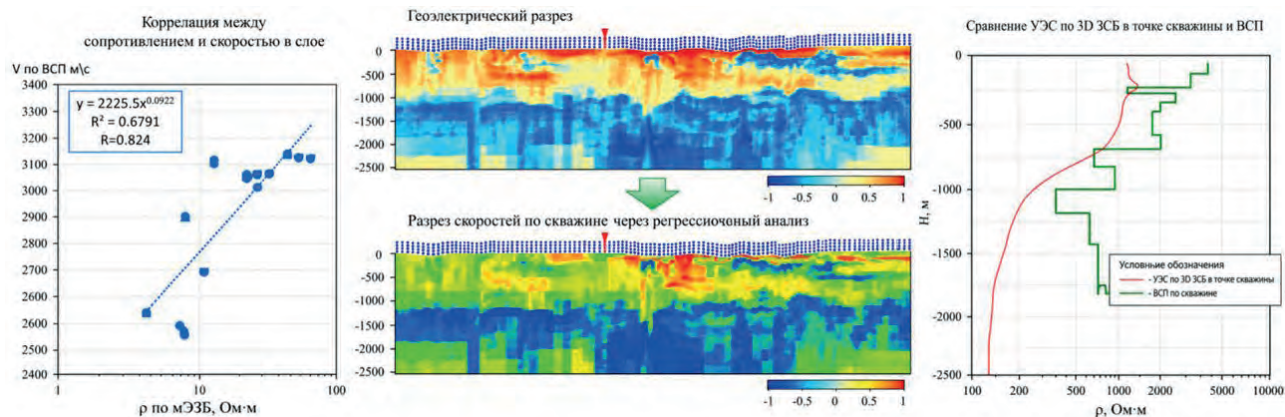
Существует еще один современный способ использования электроразвед-

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 ВСР) 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 «сейсмсоэлектротомографической» 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].

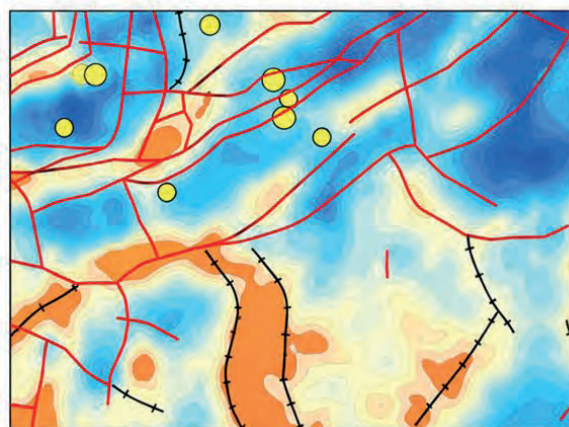
Важно, что комплексирование должно выполняться на уровне согласованной координатной и стратиграфической модели. Недостаточно сопоставить две карты. Необходимо обеспечить единую геометрию горизонтов, корректный переход время-глубина, одинаковую систему разломов и сопоставимый интервал пространственного 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

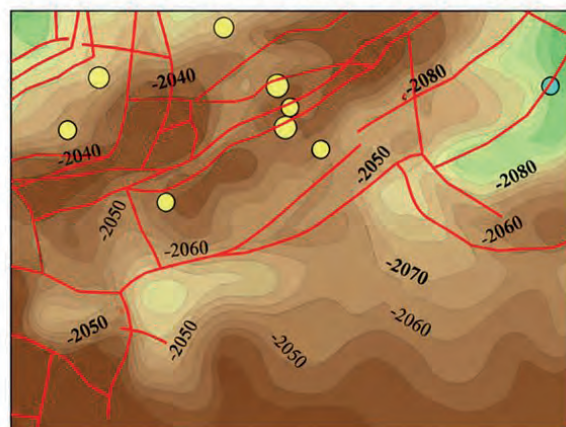
из месторождений Сибирской платформы использованы данные 3D ЗСБ совместно со структурной моделью 3D МОГТ и петрофизическими зависимостями. Продольная проводимость целевого интервала была разделена на вклад коллектора и вмещающих пород, после чего с учётом эффективной мощности и пористости рассчитан прогнозный 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

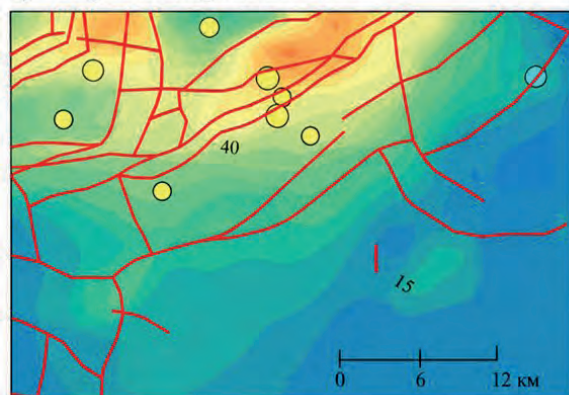


0 0.05 0.15 0.4 0.8 1.2 1.6 2 2.4 2.8 3.2 S, См

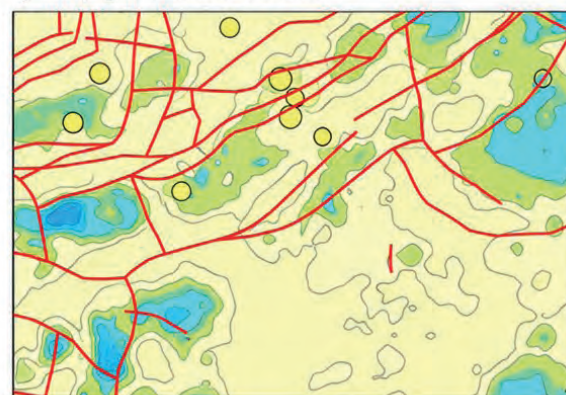
б) Структурная карта по кровле чорской свиты (ОГ М₂)

-2150 -2140 -2130 -2120 -2110 -2100 -2090 -2080 -2070 -2060 -2050 -2040 Н, м

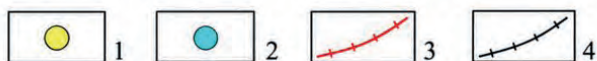
в) Нэф коллектора по 3D МОГТ



2 6 10 18 22 26 30 34 38 42 46 Нэф, м

г) К_в прогнозные по 3Д ЗСБ

0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 Прогноз Кв, д.е.



▲ Рис. 4. Расчет К_в по 3Д ЗСБ через петрофизическую зависимость и данные МОГТ 3Д.

Условные обозначения:

1 – скважины с газом; 2 – скважины с водой; 3 – тектонические нарушения по данным МОГТ 3Д;

4 – тектонические нарушения по данным 3Д ЗСБ.

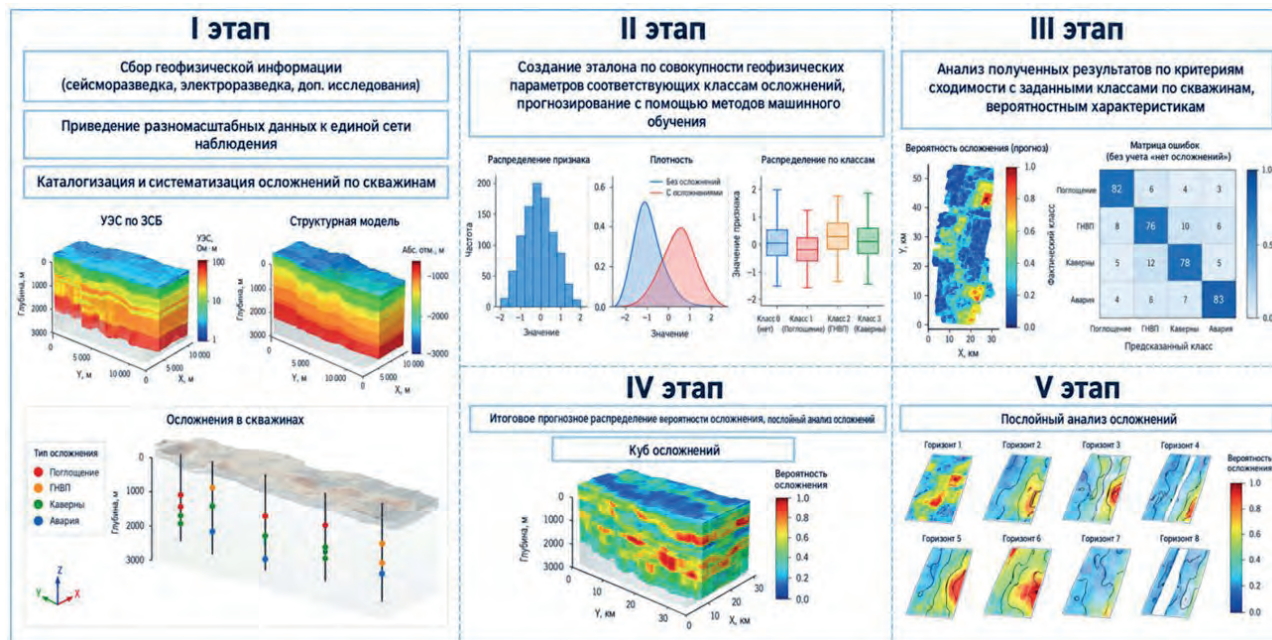
личие важно, поскольку оно определяет, передается ли неопределенность СРР в ЭРР и обратно.

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 3Д 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. Комплексирование геофизических методов: учебное пособие. - Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2012. - 167 с. - ISBN 978-5-7944-2025-8.

11. Комплексирование 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. Комплексирование 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.