Современные подходы к комплексным геофизическим исследованиям сложнопостроенных территорий

Самсонов М.Б., Богомолов Н.Ю., Скрябин А.С., Артюгин А.И., Бухтеев Е.М., компания "ВЕГА", г. Москва.

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 надежную 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 задач. 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.

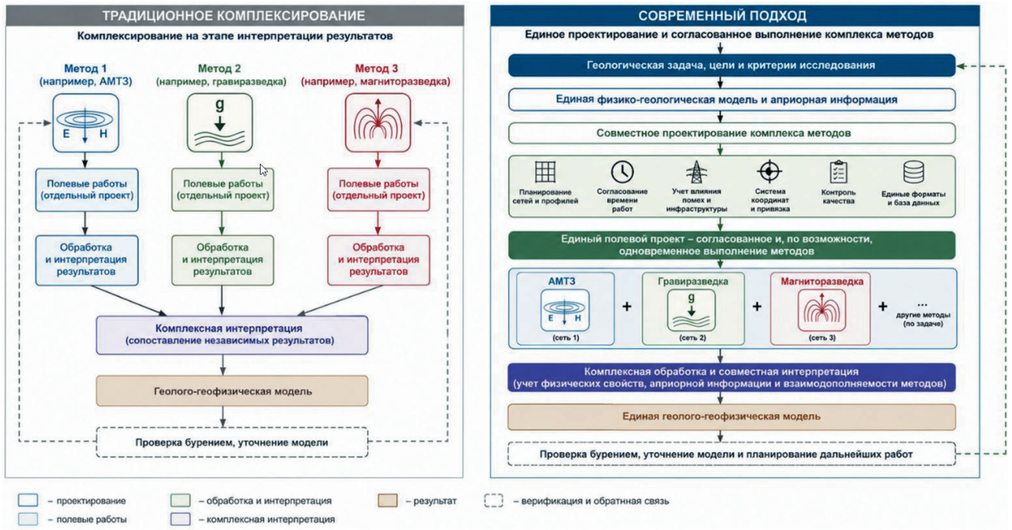
Классическая методология комплексирования уже содержит принцип формирования комплекса исходя из геологической задачи и физико-геологической модели. Выделяются типовые, рациональные и оптимальные комплексы, причём рациональный комплекс формируется с учётом конкретных геологических, геоморфологических 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 для сгущения сети или уточнения положения профиля другого метода. 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.

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



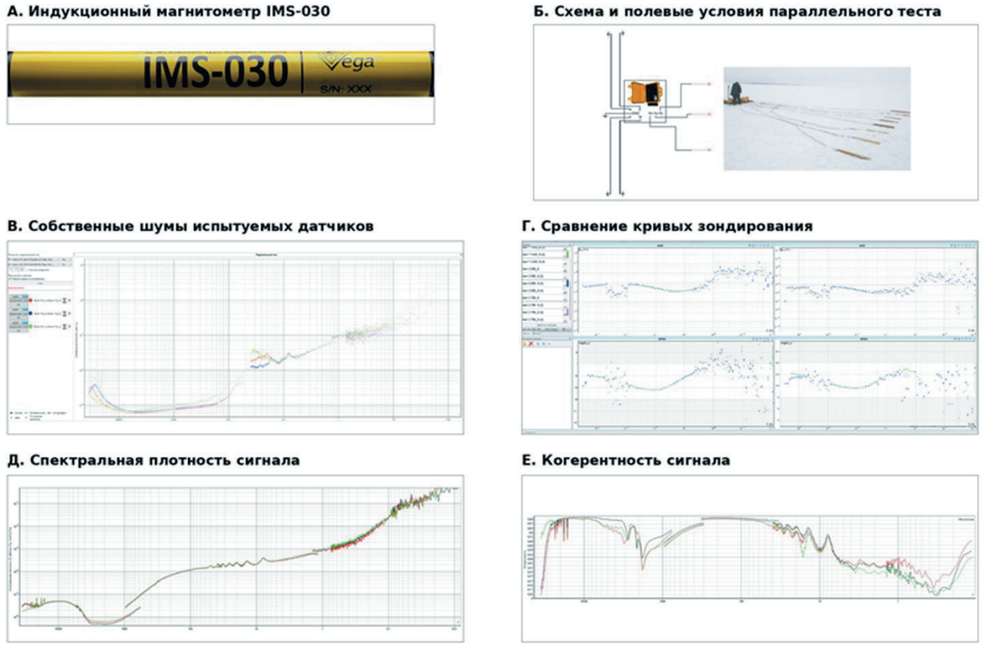
Принципы единого проектирования и технологического обеспечения реализованного на проектах компании «Вега».

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 контрольных 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.*



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

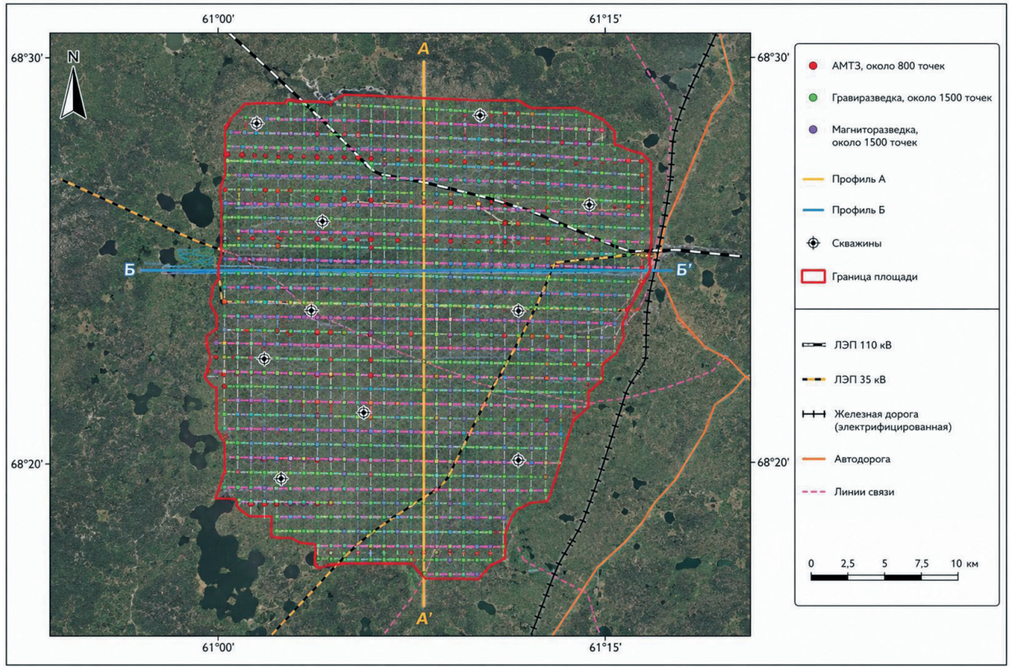
Практическая реализация комплексного подхода зависит от аппаратурно-методической базы. Для АМТЗ существенны уровень собственных шумов, динамический и рабочий частотный диапазоны, масса и габариты оборудования, поскольку эти параметры одновременно определяют качество данных и производительность полевых 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. Опытно-методические работы включали оценку собственных шумов, сравнение с IMS-050 и анализ когерентности сигналов.

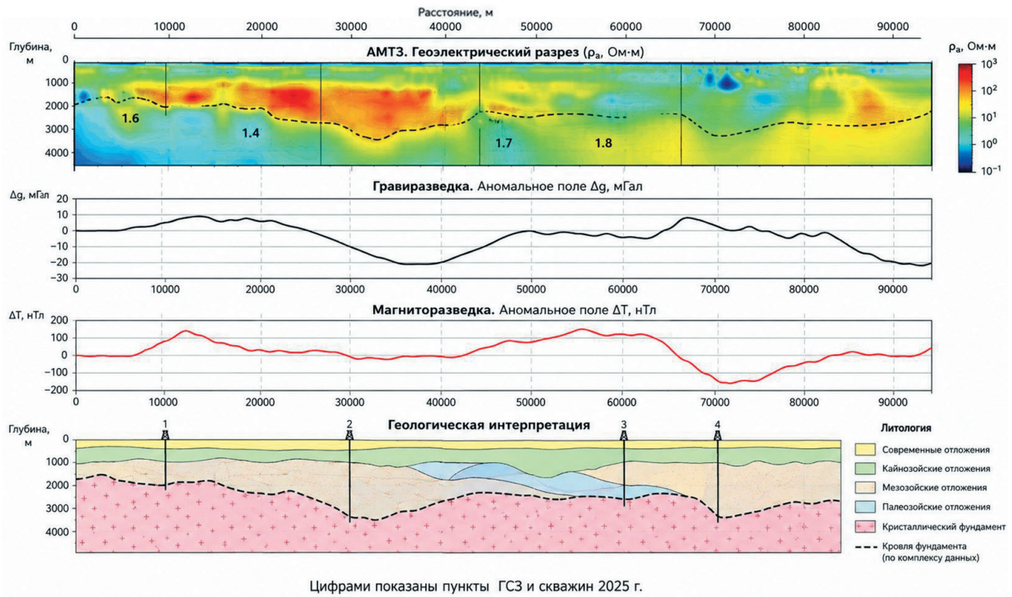
Испытания показали, что выбранная конструкция IMS-030 по собственным шумам и когерентности сопоставима с IMS-050. Полевые записи аппаратурой NORD с двумя типами датчиков дали практически идентичные кривые зондирования. В середине 2026 года первые рабочие экземпляры IMS-030 были испытаны непосредственно 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.*



▲ *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.

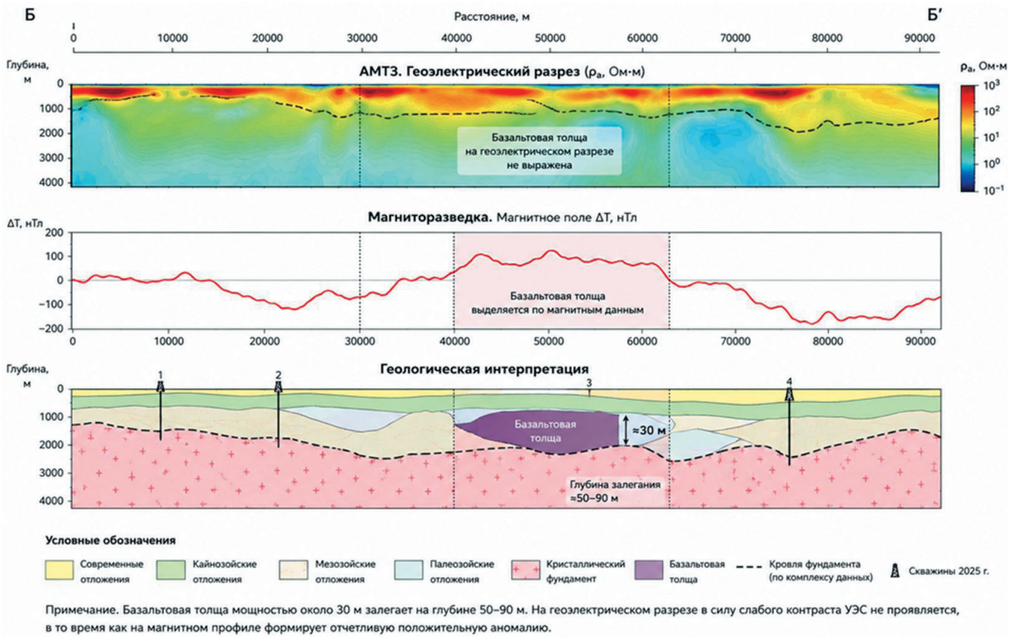
Основными задачами исследований являлись уточнение строения перспективных участков, прогноз глубины залегания кристаллического фундамента, прослеживание особенностей его строения и возможное выделение базальтовых пластов. Для их решения применён комплекс, включавший аудиомагнитотеллурическое зондирование, 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 существенные 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



Примечание. Базальтовая толща мощностью около 30 м залегает на глубине 50–90 м. На геоэлектрическом разрезе в силу слабого контраста УЭС не проявляется, в то время как на магнитном профиле формирует отчетливую положительную аномалию.

▲ *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.

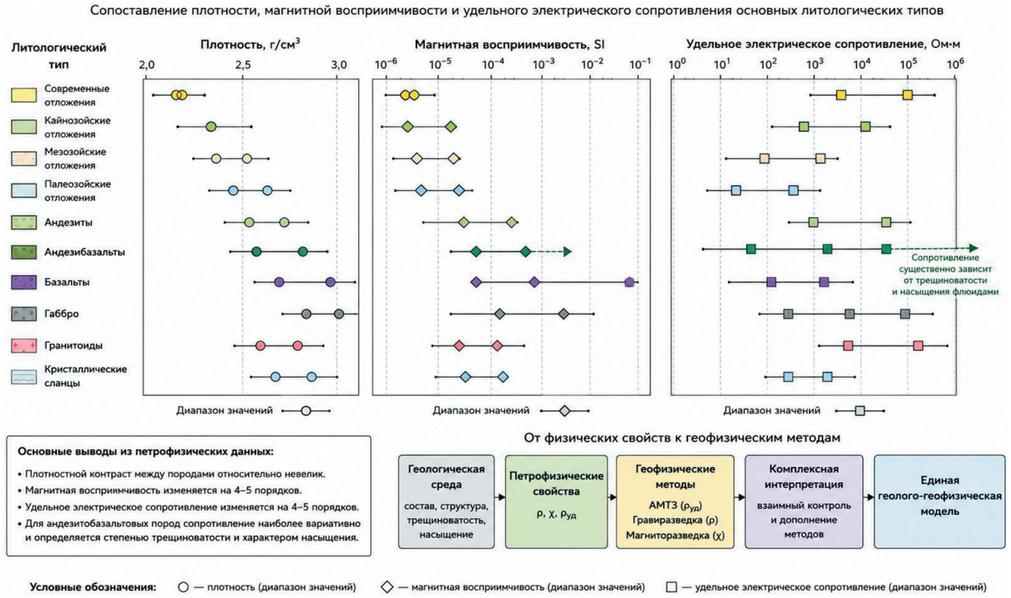
Этот пример принципиален для понимания комплексирования: его ценность определяется не обязательным совпадением признаков одного объекта во всех физических полях, а возможностью одного метода восполнять недостаточную информативность другого. Расхождения между результатами могут содержать дополнительную 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 $0{,}04\times10^{-3}$ до $16{,}23\times10^{-3}$ ед. СИ, а для отдельных образцов андезитобазальтов достигает $51{,}42\times10^{-3}$ 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 → сопоставление → анализ расхождений → корректировка 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.

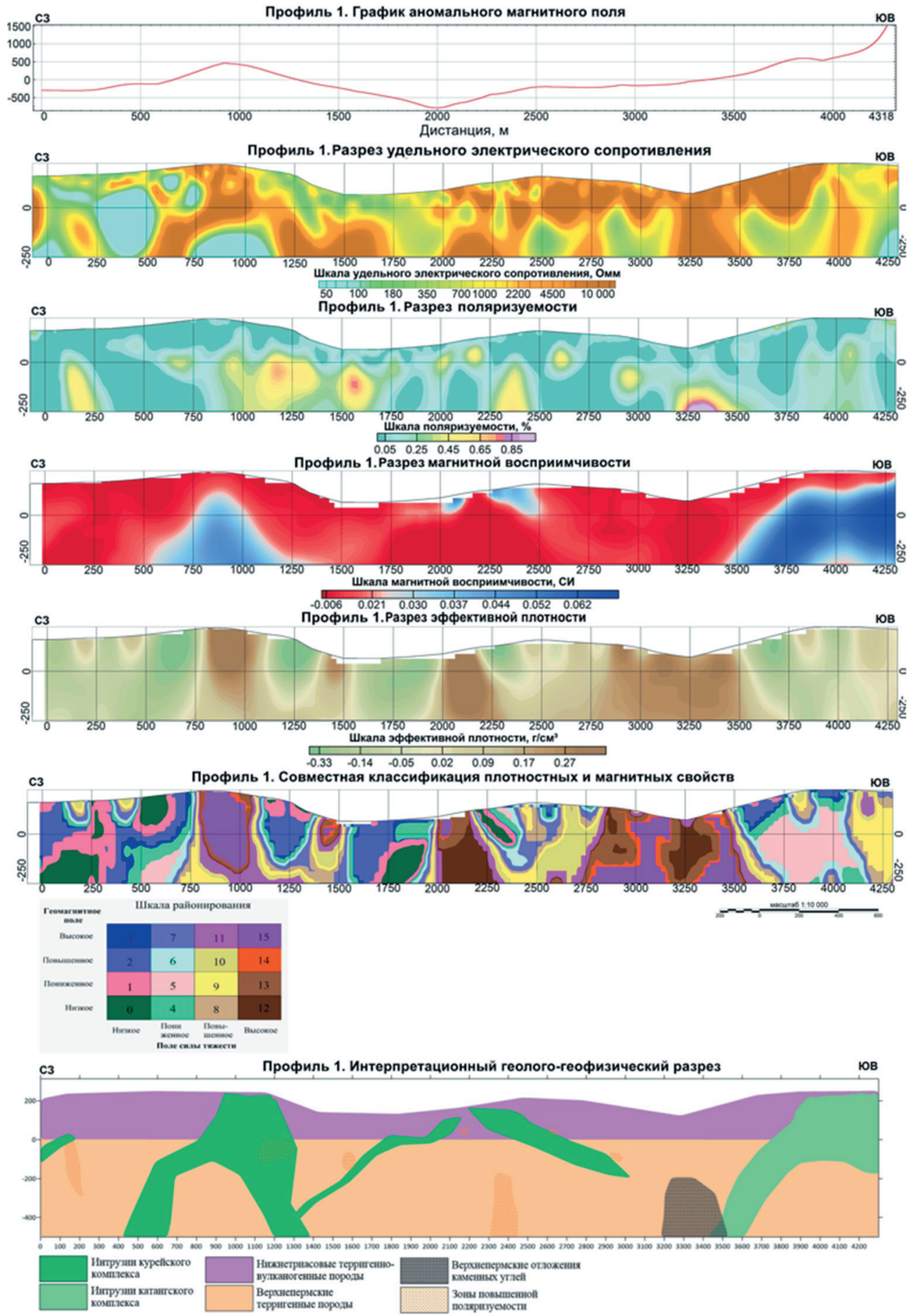
В рассматриваемом примере комплексирование методов позволило также снизить возможность неверной интерпретации полученных данных. На ПК 3100-3500 по данным инверсии ЭТ-ВП расположена зона с повышенными значениями сопротивлений и аномально высокими значениями поляризуемости, что аналогично выделенным интрузивам, 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 технологию 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, грави- 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 нефтегазопоисковая электроразведка 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.