

Магнитотеллурическое зондирование как инструмент оптимизации геологоразведки небольших объектов

■ Самсонов М.Б., ООО «ВЕГА», г. Москва.



*Компания ВЕГА предлагает
«Сначала локализация физических
аномалий — затем сейсморазведка»*

Аннотация: *Сегодня острее, чем когда-либо встает вопрос экономической обоснованности выполнения поисковых работ. Стадийность геологоразведочных работ (ГРР) рекомендует в первую очередь поиск перспективных объектов «лёгкими» и сравнительно дешёвыми несейсмическими методами геофизики с последующим проведением площадной 3D-сейсморазведки только по перспективным участкам, а не по всей площади. Для небольших проектов, в которых потенциальная прибыль от эксплуатации небольших объектов сопоставима со стоимостью поискового этапа, принятие инвестиционных решений в условиях высокой геологической неопределенности сопряжено с существенными рисками.*

В статье рассматривается альтернативный сценарий организации работ на ранней стадии ГРР, основанный на применении магнитотеллурического зондирования (МТЗ) для решения структурных задач и изучения глубинного строения участка. На основе условного модельного примера показано, как использование МТЗ на первом этапе позволяет локализовать перспективные зоны, повысить достоверность геологической интерпретации и оптимизировать применение сейсморазведки.

Представленный подход демонстрирует возможности снижения инвестиционных рисков и повышения экономической эффективности геологоразведочных работ за счет комплексирования методов и возможностях комплекса «легких» несейсмических методов как инструмента снижения рисков проекта в целом.

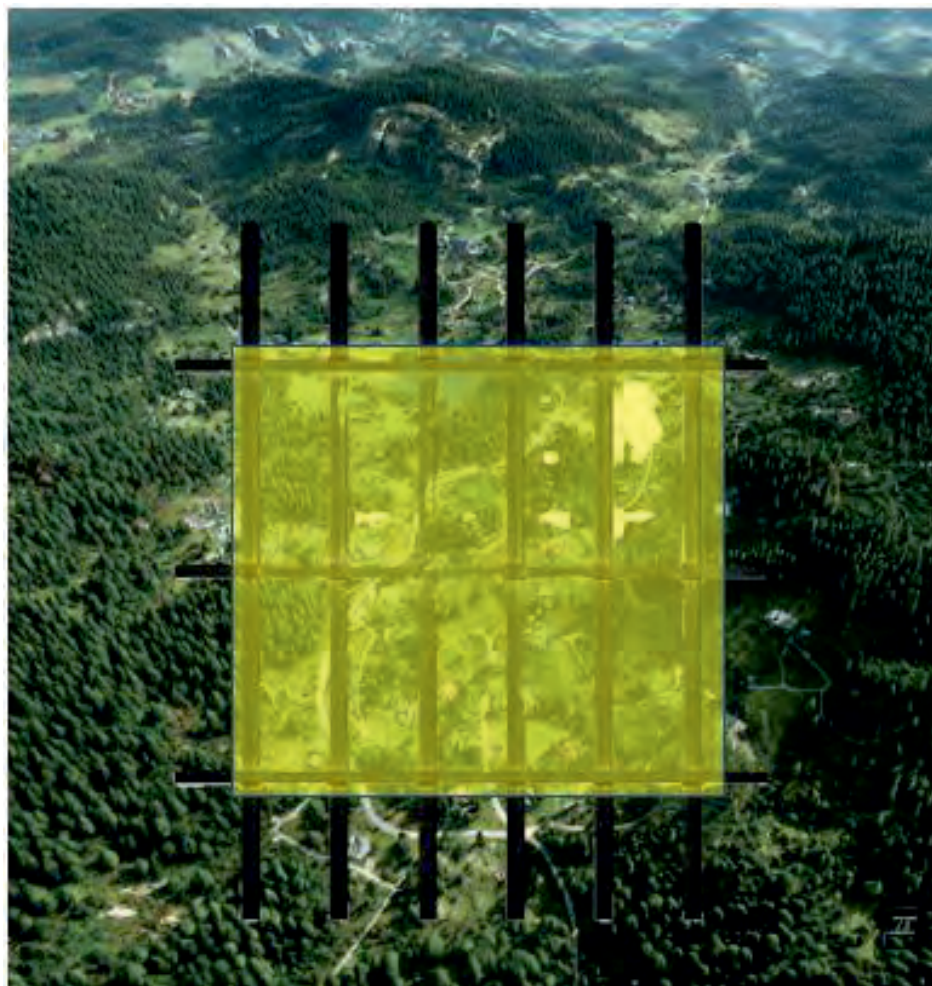
Актуальность работ на малых и средних объектах

За последние десятилетия геологоразведка в нефтегазовой отрасли существенно изменилась. Крупные и хорошо изученные структуры в большинстве нефтегазоносных провинций страны уже разведаны, и основной прирост ресурсной базы всё в большей мере обеспечивается за счёт малых и средних объектов, доразведки ранее изученных территорий и ревизии накопленного фонда материалов.

На подобных проектах, как правило, имеется определенный информацион-

ный базис: старые сейсмические материалы, данные отдельных скважин, региональные геологические модели, сведения по соседним, более изученным участкам. Однако этих данных часто бывает недостаточно для обоснованного принятия решения о постановке бурения.

Тем не менее, многие недропользователи продолжают практиковать проведение дорогостоящей площадной 3D-сейсморазведки на всей площади лицензионного участка (ЛУ). Для перспективного участка с размером порядка 10×5 км в плане это может означать проведение



◀ Рис. 1. Стандартный сценарий проекта геологического изучения недр (ГИН) предусматривает проведение сейсморазведочных работ 3D даже на небольших ЛУ.

работ на площади до 120–150 км² с учетом выносов пунктов приемных за пределы контура ЛУ для набора кратности. Стоимость такого проекта составляет сотни миллионов рублей, а полный цикл от полевых работ до окончательной интерпретации может занимать до восьми месяцев.

Ключевой риск при данном подходе заключается в том, что потенциальный объект может не оправдать подобных инвестиций. Согласно [Черников и др., 2020], включение несейсмических методов в комплекс геофизических работ увеличивает общую стоимость полевого этапа лишь на 1–6%, тогда как снижение геологической неопределённости по экспертным оценкам составляет 14–18%, что свидетельствует о высоком потенциале несейсмических методов на ранней стадии ГРР.

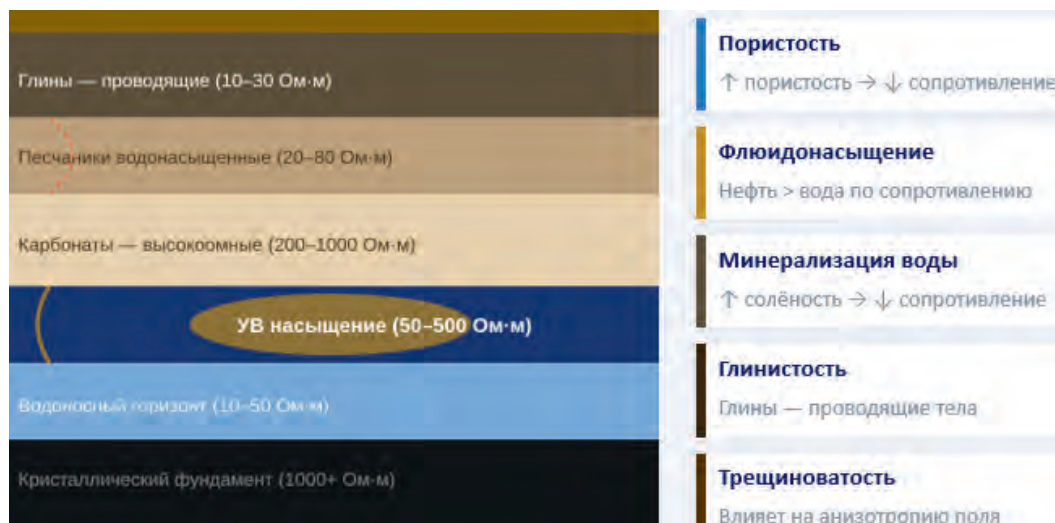
В этих условиях особую актуальность приобретает применение методов, позволяющих на ранней стадии снизить геологическую неопределенность и локализовать наиболее перспективные зоны до постановки дорогостоящих работ.

Принцип метода магнитотеллурического зондирования

Магнитотеллурическое зондирование относится к методам пассивной электроразведки. Метод основан на регистрации естественных вариаций электромагнитного поля Земли,

источниками которых являются процессы в ионосфере и магнитосфере, а также грозовая активность. Электромагнитные волны распространяются в земной коре и взаимодействуют с геологической средой. В зависимости от элек-

► Рис. 2.
Влияние
геологии
на электри-
ческие харак-
теристики
среды.



трических свойств пород происходит изменение амплитуды и фазового соотношения электрической (Е) и магнитной (Н) компонент поля.

Измеряя эти параметры на поверхности и анализируя их зависимость от частоты, можно определить импеданс среды $Z = E/H$, и, по результатам инверсии, построить модель распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) от глубины.

Глубина проникновения сигнала (скин-глубина) определяется соотношением $\delta \approx 503\sqrt{(\rho/f)}$ м, где f — частота в Гц, а ρ — кажущееся сопротивление. Зондирование на низких частотах обеспечивает исследование на глубинах в первые км, тогда как высокочастотная часть спектра применяется для изучения верхних слоев разреза.

УЭС геологической среды определяется совокупностью факторов (рис. 2): минерализацией и характером флюидонасыщения пород, содержанием глинистых минералов, пористостью, трещиноватостью и степенью вторичных преобразований. Именно эта многофакторная зависимость УЭС и делает метод информативным при изучении геологического разреза.

Следует отметить, что пространственная разрешающая способность метода

на глубинах порядка 1–2 км существенно ниже, чем у сейсморазведки. Мощность углеводородных коллекторов нередко составляет лишь 10–20 м, что значительно меньше характерной вертикальной разрешающей способности магнитотеллурического метода на указанных глубинах. В связи с этим магнитотеллурические данные не позволяют непосредственно фиксировать отдельные продуктивные пласты малой мощности на больших глубинах. Более корректно рассматривать МТЗ как метод, обеспечивающий информацию о структуре геологической среды в целом и о распределении электропроводности в более широких интервалах разреза. Выявляемые аномалии электрического сопротивления отражают интегральные изменения физических свойств пород, связанные с литологическими вариациями, тектоническими нарушениями, флюидонасыщением и другими факторами, формирующимися в пределах значительных интервалов геологического разреза.

Формирование залежей углеводородов может сопровождаться геологическими и геохимическими процессами, изменяющими электрические свойства вмещающих пород: замещение минерализованных вод углеводородами в коллекторе, вторичная сульфидная

минерализация (пиритизация), перераспределение минерализации поровых вод в зоне влияния залежи. Совокупность этих факторов способна формировать геоэлектрическую аномалию, охватывающую интервал разреза, превышающий мощность самого продуктивного пласта.

Выделение подобных аномальных зон может служить эффективным инструментом ранней геофизической «фильтрации» перспективных объектов и уточнения геологической модели территории.

Компетенции компании ВЕГА

Компания ВЕГА базируется в Санкт-Петербурге и Нижнем Новгороде и представляет собой научно-производственную геофизическую организацию, специализирующуюся на разработке и применении несейсмических методов для решения широкого круга геолого-геофизических задач, а также разработки и производстве аппаратно-программных решений для их выполнения. Особенностью компании является сочетание научных исследований, инженерных разработок и практического опыта выполнения полевых работ. Такой синтез науки и практики позволяет не только использовать существующие геофизические технологии, но и разрабатывать новые методические решения для исследования сложных геологических объектов.

Деятельность компании охватывает полный цикл геофизических исследований — от разработки аппаратуры и проектирования полевых работ до обработки, интерпретации данных и подготовки геолого-геофизических отчётов. В составе коллектива работают специалисты в области электроразведки, методов потенциальных полей и комплексной интерпретации геофизической информации. Практический опыт компа-

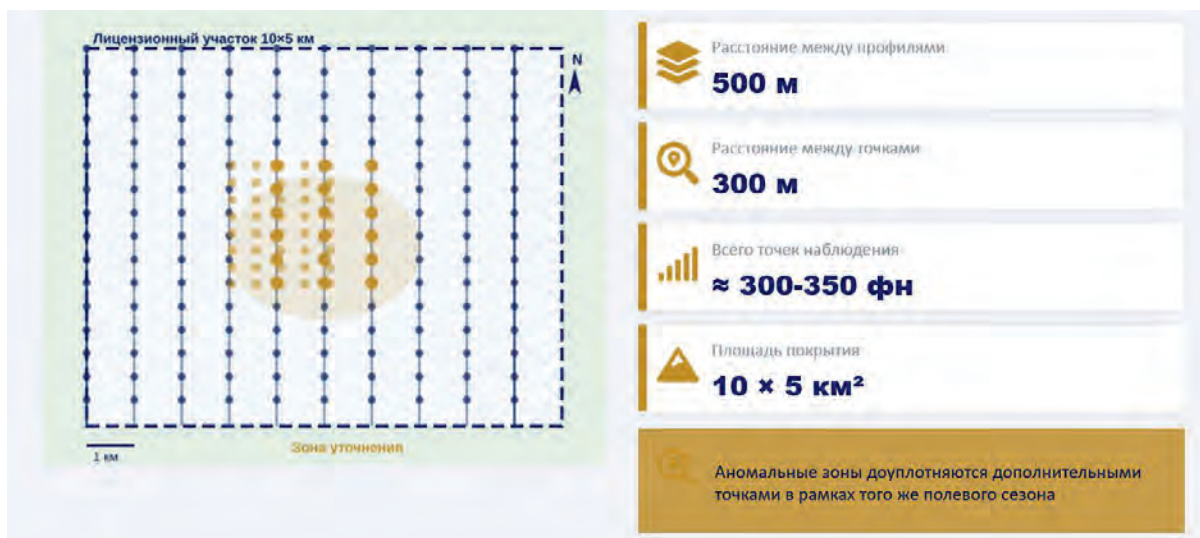
нии включает решение широкого спектра задач, связанных с поисками и разведкой месторождений углеводородов и твердых полезных ископаемых, а также выполнением инженерно-геофизических и гидрогеологических исследований.

Важным направлением деятельности является разработка собственной геофизической аппаратуры и программного обеспечения.

Специалистами компании создан ряд технических решений для регистрации и обработки данных магнитотеллурического зондирования, включая магнитные индукционные датчики, системы регистрации электрического поля и специализированные программные комплексы для обработки и интерпретации геофизической информации. Наличие собственной приборной базы позволяет адаптировать технологии исследований под конкретные геологические условия и обеспечивать высокий уровень качества получаемых данных.

Помимо магнитотеллурических исследований, компания выполняет гравиразведку, магниторазведку, электротомографию, георадиолокацию и различные виды инженерно-геофизических работ. Использование комплекса несейсмических методов и их интеграция с геологической информацией позволяет эффективно решать сложные и нетривиальные задачи изучения строения геологической среды.

Сочетание научной школы, собственной приборной базы и практического опыта выполнения полевых работ формирует ключевую компетенцию компании ВЕГА — разработку и применение комплексных геофизических технологий для повышения достоверности геологоразведочных исследований и оптимизации геологоразведочных проектов.



▲ Рис. 3. Схема полевой съемки МТЗ, включая уплотняющие съемки над аномалиями.

Альтернативный сценарий изучения лицензионного участка малых размеров

Рассмотрим условный пример перспективного участка размером 10×5 км, расположенного в платформенной области. По данным архивных сейсмических материалов на глубине около 1,5 км выделяется перспективная толща мощностью порядка 100 м. Вблизи участка имеются несколько реперных скважин, однако их данных недостаточно для обоснованной локализации структурных ловушек.

В стандартном сценарии для уточнения геологического строения выполняется площадная 3D-сейсморазведка. Однако альтернативный подход предполагает проведение на первом этапе электроразведки методом МТЗ.

По участку закладывается сеть параллельных профилей с расстоянием между ними 500 м и шагом пунктов наблюдения 300 м. В результате формируется сеть примерно из 300 пунктов наблюдения. (рис. 3). В ходе полевых работ предусматривается дополнительное сгущение сети над выявляемыми аномалиями в пределах того же полевого сезона, что позволяет своевременно уточнить их конфигура-

цию без организации отдельного полевого этапа.

По результатам инверсии строятся карты удельного электрического сопротивления (УЭС) в интервале глубин, соответствующих перспективной толще, а также геоэлектрические разрезы по профилям. Выделяются контрастные зоны аномального УЭС, интерпретируемые с привлечением данных реперных скважин.

По результатам работ первого этапа выделяются наиболее перспективные зоны, требующие дальнейшего изучения. Следующим этапом может стать комплексная гравимагнитная интерпретация. А следующим этапом может стать постановка профильной 2D-сейсморазведки над выявленными аномальными участками. В типичном сценарии достаточно нескольких пересекающихся профилей общей протяженностью порядка 50 погонных километров. Сейсморазведка уточняет геометрическое строение структур: изгибы отражающих горизонтов, положение разрывных нарушений, мощности стратиграфических комплексов — информацию, которую метод МТЗ не предоставляет.

Такой подход позволяет существенно

Вариант работ	Стоимость, млн руб.	Срок результатов
Площадная 3D-сейсморазведка (120–150 км ²)	200–250	до 8 мес.
МТЗ (~350 пунктов наблюдений, 10×5 км)	~20–25	3–4 мес.
Адресная 2D-сейсморазведка (~50 пог. км)	~45–55	3–4 мес.
МТЗ + 2D-сейсмика (итого)	~65–80	6–7 мес.

▲ Табл. 1. Ориентировочное сравнение затрат и сроков для двух сценариев освоения малого ЛУ 10×5 км.

повысить достоверность интерпретации за счет комплексирования методов.

МТЗ обеспечивает площадное картирование электрических свойств среды и локализацию зон аномального строения разреза, тогда как сейсморазведка уточняет геометрию структур в этих зонах. Совпадение структурных элементов по сейсмическим данным с зонами аномального УЭС по данным МТЗ существенно повышает обоснованность геологической интерпретации и снижает вероятность ложных целей при постановке поискового бурения [Агафонов и др., 2025].

Магнитотеллурическое зондирование обеспечивает картирование электрических свойств среды, а сейсморазведка позволяет уточнить геометрическое строение структур.

Совпадение структурных элементов и аномалий сопротивления существенно повышает вероятность выявления перспективных объектов и снижает вероятность ложных целей.

Экономическая эффективность

Сравнение типовых затрат по двум сценариям освоения малого ЛУ (10×5 км) представлено в табл. 1. Приведённые цифры являются ориентировочными и могут варьировать в зависимости от

региона работ, условий производства и конъюнктуры рынка.

Суммарный бюджет двухэтапного подхода (МТЗ + профильная 2D-сейсморазведка) оказывается более чем в три раза ниже стоимости полного 3D-проекта. При этом к завершению первых двух этапов заказчик располагает значительно более обоснованной геологической моделью участка, поскольку в неё интегрированы данные двух независимых и взаимодополняющих методов.

Важна и опциональность подхода. Если по результатам двух этапов перспективность участка подтвердится, заказчик может принять решение о постановке 3D-сейсморазведки на локализованной площади (а не по всему ЛУ), что дополнительно сокращает бюджет. Если результаты окажутся отрицательными, сэкономленные средства многократно превысят стоимость всего первого этапа.

Заключение

Следует подчеркнуть, что реальные геологоразведочные проекты значительно сложнее рассмотренного схематичного примера. Геологическое строение участков может быть существенно более неоднородным, а влияние различных факторов на физические свойства пород — более сложным.

Тем не менее именно на ранних стадиях изучения территории особенно важно использовать комплекс геофизических методов, позволяющий снизить неопределенность геологической модели. Описанный двухэтапный подход является практически реализуемой схемой оптимизации поисковых программ: снижение инвестиционных рисков, сокращение сроков получения результатов и повышение обоснованности геологической интерпретации достигаются за счёт последовательного комплексирования взаимодополняющих методов [Горбачев и др., 2025].

Такой подход позволяет не только повысить достоверность интерпретации, но и значительно сократить объем неоправданных затрат.

В условиях растущей стоимости геологоразведочных работ и необходимости более взвешенного управления инвестициями комплексирование несейсмических и сейсмических методов становится одним из ключевых факторов успешной реализации поисковых проектов на малых лицензионных участках.

Литература

1. Черников К.С., Горбачев С.В., Голованов Д.Ю., Клещина Л.Н., Мазекина А.В., Ульянов Г.В., Мятчин О.М. Геологическая и экономическая эффективность применения гравиразведки и магниторазведки на разных стадиях геолого-разведочных работ // Геология нефти и газа. – 2020. – № 2. – С. 107–120. DOI: 10.31087/0016-7894-2020-2-107-120.

2. 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 систе-

мы разведочной геофизики. – 2025. – Спецвыпуск. – С. 38–48.

3. Горбачев С.В., Терёхина Я.Е., Токарев М.Ю., Соловьева М.А., Буланова И.А. О необходимости изучения верхней части разреза на начальных этапах геологоразведочных работ на шельфе Печорского моря с применением методики специальной обработки и интерпретации // Геофизика. – 2025. – № 3. – С. 11–19. DOI: 10.34926/geo.2025.41.26.002.

Подробнее об авторе



Самсонов
Михаил Борисович

Генеральный
директор ООО «ВЕГА»