УДК 550.31
Рубрика 37.01.11

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ПОИСКЕ ТРАДИЦИОННЫХ И НЕТРАДИЦИОННЫХ РЕСУРСОВ УГЛЕВОДОРОДОВ

APPLICATION OF THE MAGNETOTELLURIC SOUNDING METHOD FOR EXPLORATION OF TRADITIONAL AND UNCONVENTIONAL HYDROCARBON RESOURCES

Скрябин Артём Сергеевич[1,2], Петрищев Максим Сергеевич [1,2], Богомолов Николай Юрьевич[1,2]

Skryabin Artem Sergeevich[1,2], Petrishchev Maxim Sergeevich [1,2], Bogomolov Nikolay Yurievich[1,2]

[1]*СПбФ ИЗМИРАН*
[2] *ООО «ВЕГА»*

[1]*SPbF IZMIRAN*
[2] *LLC VEGA*

Аннотация

Рассмотрено применение метода магнитотеллурического зондирования (МТЗ) при решении нефтегазопоисковых задач. Выделены геологические обстановки, в которых МТЗ обладает преимуществами по сравнению с традиционной сейсморазведкой. Приведены результаты полевых работ в Республике Саха (Якутия) и на озере Байкал, демонстрирующие эффективность метода МТЗ для решения структурных задач и картирования залежей газогидратов.

Введение

За последние полтора-два десятилетия число съемок методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ) существенно возросло. По данным (Пальшин и др., 2017), только российские геофизические компании ежегодно выполняют МТЗ на десятках тысяч пунктов. Внедрение цифровых многоканальных регистраторов, разработка алгоритмов дву- и трехмерной инверсии, а также накопление базы опорных профилей вывели метод на качественно новый уровень информативности. Вместе с тем, потенциал метода реализуется не в полной мере – нередко метод МТЗ используется лишь как вспомогательный в дополнение к сейсморазведке, тогда как в ряде типичных геологических обстановок именно он, возможно, является наиболее эффективным.

Цель работы:

Выделение геологических условий, определяющих методические ограничения сейсморазведки и, напротив, благоприятные для применения МТЗ, с демонстрацией результатов полевых исследований.

Геологические обстановки, благоприятные для МТЗ

Традиционная сейсморазведка (МОГТ-2D/3D) остается ведущим методом нефтегазовой разведки, обеспечивая детальное выделение отражающих горизонтов и высокое пространственное разрешение в благоприятных геологических условиях. При этом ее информативность обусловливается контрастом упругих свойств среды (скорости и плотности). По результатам МТЗ определяется удельное электрическое сопротивление (УЭС), зависящее от состава насыщающего флюида, пористости и глинистости пород. Различная природа этих физических параметров составляет принципиальную основу для комплексирования двух методов, при совместной интерпретации они взаимно дополняют друг друга и ограничивают пространство геологических решений (Jegen et. al., 2009; Молодцов, 2017).

Применение МТЗ позволяет преодолеть фундаментальные ограничения сейсморазведки в четырех типах геологических обстановок, где возможности методов упругих волн существенно ограничены физикой среды. К первой из них относятся районы развития трапповых вулканических толщ. Базальтовые покровы и интрузивные тела, характеризующиеся высокими скоростями упругих волн и плотностью, создают мощный сейсмический экран. При этом полезный сигнал испытывает интенсивное рассеяние и поглощение, а изображение подбазальтовых горизонтов существенно искажается (Unsworth, 2005; Patro, 2017). Например, эта проблема имеет существенное значение для осадочных бассейнов Сибирской платформы, перекрытых пермо-триассовыми траппами Тунгусской синеклизы мощностью до 1-3 км (Пальшин и др., 2017). Для МТЗ высокоомный базальтовый экран практически прозрачен, электромагнитное поле проникает до подстилающих осадочных и кристаллических пород. При этом совместная инверсия данных МТЗ и гравиразведки позволяет получать надежные модели подбазальтовой структуры в тех случаях, когда независимые инверсии каждого из методов оказываются несостоятельными (Jegen et al., 2009).

Ко второй геологической обстановке относятся бассейны с развитой соляной тектоникой. Соляные тела, обладающие высоким акустическим импедансом и сложной геометрией, порождают множественные переотражения и затрудняют для сейсморазведки картирование подсолевых отложений и подошвы солевых структур. В МТЗ соль как диэлектрик формирует отчетливую аномалию высокого УЭС на фоне проводящих осадочных пород, что позволяет эффективно картировать соляные тела и уточнять положение их границ (Berdichevsky, Dmitriev, 2015).

К третьей геологической обстановке могут быть отнесены районы с глубокими осадочными впадинами. В бассейнах с большой мощностью осадочного чехла (например, Западно-Сибирская плита и Предуральский краевой прогиб) сейсморазведка испытывает значительные методические трудности при изучении нижних структурных этажей, которые снижают достоверность глубинных построений. МТЗ в этих условиях обеспечивает независимую оценку глубины залегания кровли кристаллического фундамента и геоэлектрической структуры нижних горизонтов разреза, а совместная интерпретация существенно сокращает неопределенность геологической модели (Пальшин и др., 2017).

В четвертую геологическую обстановку могут быть выделены складчато-надвиговые пояса и разломно-блоковые зоны. В районах с крутонаклонными границами и развитой дизъюнктивной тектоникой отраженные волны образуются неэффективно, а сейсмический сигналы испытывает дифракционное рассеяние. В МТЗ при этом зоны тектонических нарушений в связи с насыщением флюидами, глинизации и развитием проводящих минералов характеризуются пониженными значениями УЭС и выделяются устойчиво (Palshin et al., 2020).

Отдельно следует отметить возможности метода аудимагнитотеллурического

зондирования (АМТЗ) для изучения верхней части разреза. В диапазоне частот 1 – 10000 Гц метод обеспечивает детализацию верхних 200-1000 м (в зависимости от УЭС разреза), позволяя уточнять мощность рыхлых отложений и корректировать статические поправки в сейсморазведке, что позволяет применять АМТЗ как эффективный инструмент перед проведением масштабных МОГТ-работ (Adam Cygal, 2021).

Результаты полевых работ

Приведем несколько примеров полевых работ, демонстрирующие эффективность МТЗ в различных геологических обстановках.

Первый участок работ расположен в Якутии в пределах осадочного бассейна с мощностью чехла порядка 2 км, разрез осложнен наличием солевых горизонтов, в разрезе отсутствуют выраженные антиклинальные структуры. АМТЗ и МТЗ были выполнены вдоль существующего сейсмического профиля протяженностью 10 км с применением пятиканальных станций российского производства VEGA VMTU-10 (производства ООО «Вега», г. Санкт-Петербург) и NORD (ООО «Северо-Запад», г. Москва), обе станции оснащены индукционными датчиками IMS (производства ООО «Вега», г. Санкт-Петербург). Профиль проходит через пробуренную непродуктивную скважину. Двумерная инверсия данных выполнялась в программе ZondMT2D (http://zond-geo.com).

Геоэлектрическая модель показала высокую корреляцию с результатами геофизических исследований скважины. На больших глубинах геоэлектрической модели установлены латеральные изменения проводимости, вероятно, указывающие на наличие зон литологического замещения или повышенной вторичной пористости. В условиях отсутствия выраженных антиклинальных структур такие аномалии, возможно, могут быть связаны с перспективными объектами нетрадиционного типа.

Второй пример относится к изучению газогидратов на озере Байкал вблизи пос. Большое Голоустное. Озеро Байкал представляет собой пример пресноводного газогидратного объекта, где наличие газогидратных залежей в донных осадках на глубинах свыше 400 м подтверждено прямыми пробоотборами. Зона распространения газогидратов характеризуются повышенным УЭС на фоне проводящих водонасыщенных осадков, при этом подстилающий слой свободного газа нередко формирует дополнительную контрастную аномалию проводимости. На участке работ выполнено МТЗ на 9 пунктах профиля по льду озера Байкал с применением станции VEGA VMTU-10 (Скрябин, Давыденко, 2023). По результатам двумерной инверсии построена геоэлектрическая модель, в которой отчетливо выделяются высокоомная толща пресной воды, слой донных отложений пониженного УЭС и локальная аномалия повышенного сопротивления, интерпретируемая как газогидратсодержащий горизонт (Рисунок 1). Была также выявлена анизотропия области газогидратов, проявляющаяся в виде неустойчивости двумерной инверсии и существенным расхождением между кривыми продольной и поперечной мод. Попытки интерпретации в рамках изотропных моделей приводили к сильной зависимости итогового результата от выбора начального приближения. Это наблюдение указывает на необходимость применения 3D инверсии для корректного разделения структурной и анизотропной составляющей аномалии (Молодцов, 2017).

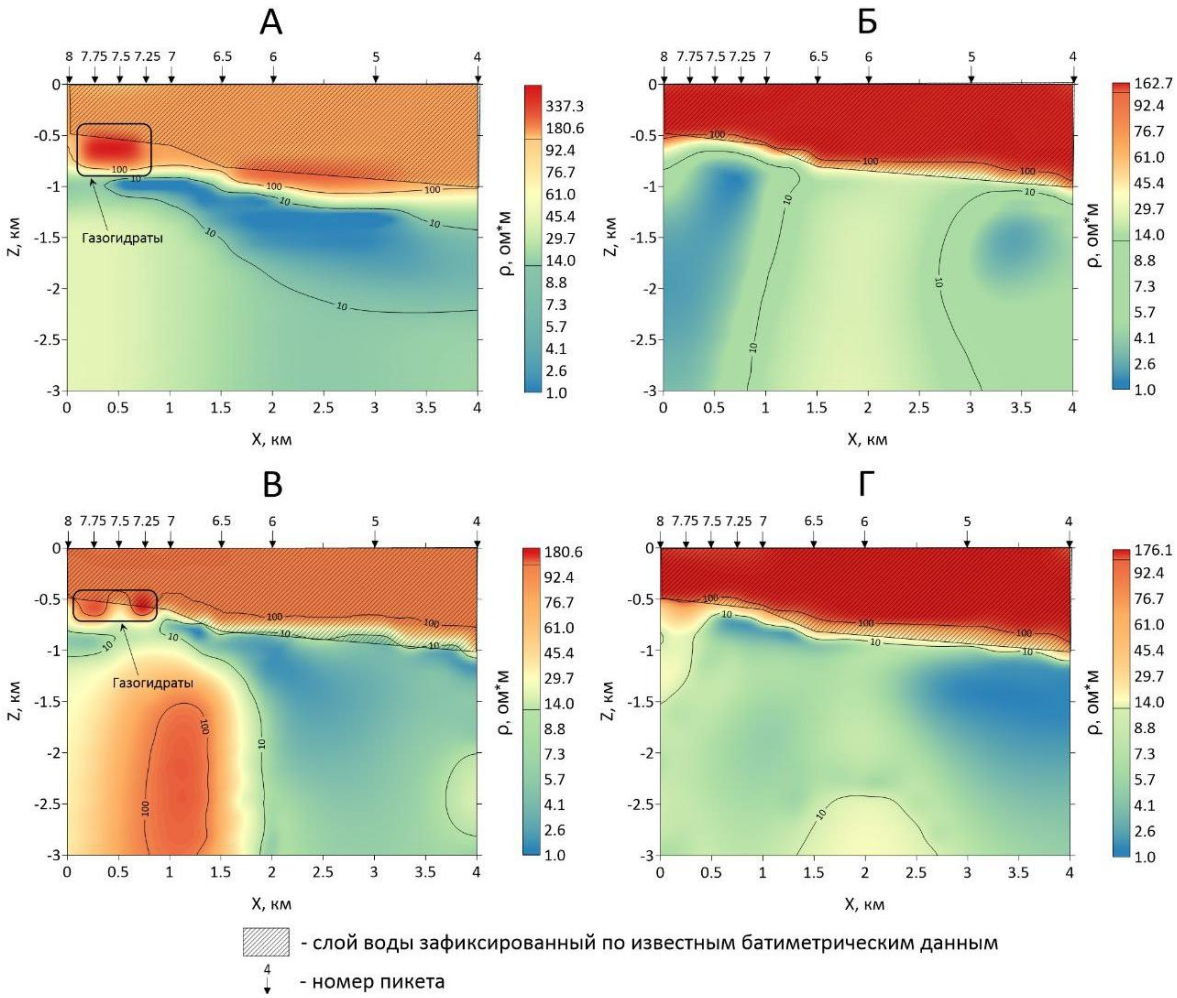


Рисунок 1. Двумерная инверсия кривых зондирования с привлечением априорной информации о глубине дна озера: а – инверсия поперечных (TM) кривых кажущегося сопротивления и фазовых кривых (RMS error – 9,4%); б – инверсия продольных (TE) кривых кажущегося сопротивления и фазовых кривых (RMS error –11,8%); в – инверсия поперечных и продольных (TE + TM) кривых кажущегося сопротивления и фазовых кривых (RMS error – 10,5%); г – инверсия эффективных кривых кажущегося сопротивления (RMS error – 11,1%) (Скрябин, Давыденко, 2023).

Обсуждение результатов

Приведенные примеры подтверждают сделанный в ряде работ вывод о том, что область эффективного применения МТЗ определяется взаимным дополнением с сейсморазведкой. В тех ситуациях, когда изменения упругих и электрических свойств обусловлены разными факторами (например, литологией и минерализацией флюида), совместная интерпретация обеспечивает наиболее полную и достоверную характеристику разреза (Unsworth, 2005; Patro, 2017).

С точки зрения развития методологии наиболее актуальным представляется переход от двумерной к трехмерной инверсии. Как показал опыт выполнения МТЗ на озере Байкал, анизотропия реальных геологических объектов порождает артефакты при двумерной обработке, в то время как трехмерные алгоритмы позволяют учитывать латеральную неоднородность явным образом. Активно развиваемое в последнее время направление совместной инверсии МТЗ и сейсмических данных с применением структурных ограничений (Jegen et al., 2009; Молодцов, 2017) должно существенно сужать пределы неоднозначности решения обратной задачи.

Существенную роль в расширении области применения МТЗ сыграло развитие приборной базы: появление цифровых многоканальных регистраторов с широким динамическим диапазоном, малошумящих прецизионных индукционных датчиков, качественных неполяризующихся электродов. Это обеспечило повышение качества полевых данных и помехоустойчивость метода, особенно в условиях слабого естественного электромагнитного сигнала.

Заключение

Востребованность метода МТЗ в нефтегазовой разведке определяется его чувствительностью к литологическому составу и характеру флюидонасыщенности разреза. В четырех выделенных геологических обстановках, на основании авторского опыта и известных данных (Unsworth, 2005; Пальшин и др., 2017; Palshin et al., 2020) отметим, что МТЗ позволяет успешно решать нестандартные геологические задачи. Результаты приведенных работ указывают на перспективность применения метода как в нефтегазовой разведке, в том числе в области нетрадиционных ресурсов углеводородов – прежде всего газогидратов арктического шельфа.

Список литературы

1. Молодцов Д. В. Совместная инверсия сейсмических, магнитотеллурических и гравиметрических данных с использованием структурных ограничений: автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук. СПб., 2018. 23 с.

2. Пальшин Н. А., Алексанова Е. Д., Яковлев Д. В. и др. Опыт и перспективы применения метода магнитотеллурических зондирований в осадочных бассейнах // Геофизические исследования. 2017. Т. 18, № 2. С. 27–54. DOI: 10.21455/gr2017.2-2.

3. Скрябин, А. С. Магнитотеллурические зондирования на льду озера Байкал / А. С. Скрябин, Ю. А. Давыденко // Электроразведка 2022: сборник тезисов научно-практической конференции, Москва, 26–28 октября 2022 года. – Москва: Издательский Дом "Академия Естествознания", 2023. – С. 185-191. – EDN OLKZCW.

4. Berdichevsky M. N., Dmitriev V. I. Models and Methods of Magnetotellurics. Berlin: Springer, 2015. 561 p.

5. Cygal A., Stefaniuk M., Kret A. Integrated magnetotelluric and seismic investigation of Cenozoic graben structure near Obrzycko, Poland //Acta Geophysica. – 2021. – Т. 69. – №. 2. – С. 711-723.

6. Jegen M. D., Hobbs R. W., Tarits P., Chave A. D. Joint inversion of marine magnetotelluric and gravity data incorporating seismic constraints: Preliminary results of sub-basalt imaging off the Faroe Shelf // Earth and Planetary Science Letters. 2009. Vol. 282. P. 47–55. DOI: 10.1016/j.epsl.2009.02.018.

7. Palshin N. A., Giraudo R. E., Yakovlev D. et al. Detailed magnetotelluric study of the northern part of Subandean fold belt, Bolivia // Journal of Applied Geophysics. 2020. Vol. 181. P. 104188. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2020.104188.

8. Patro P. K. Magnetotellurics for hydrocarbon and geothermal resources: Examples from the Asian region // Surveys in Geophysics. 2017. Vol. 38. P. 1013–1029. DOI: 10.1007/s10712-017-9439-x.

9. Unsworth M. New developments in conventional hydrocarbon exploration with electromagnetic methods // CSEG Recorder. 2005. Vol. 30, No. 4. P. 34–38.