

УДК 550.837.211

ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ В ОСАДОЧНЫХ БАССЕЙНАХ

© 2017 г. Н.А. Пальшин¹, Е.Д. Алексанова², А.Г. Яковлев³,
Д.В. Яковлев², Р. Бревес Вианна⁴

¹ *Институт океанологии им. П.П. Ширшова, РАН, г. Москва, Россия*

² *ООО "Северо-Запад", г. Москва, Россия*

³ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

⁴ *ЛАСА Проспектоис Лтд, г. Рио де Жанейро, Бразилия*

Исследования осадочных бассейнов методом магнитотеллурического зондирования выполняются уже более полувека. За последние пятнадцать лет объёмы работ этим методом возросли многократно, что потребовало развития технологии анализа, инверсии и интерпретации получаемых данных и вывело информативность метода на новый уровень, благодаря чему он стал востребованным на рынке геофизических услуг. Особенно эффективно применение магнитотеллурических зондирований в областях развития базальтовых траппов, соляной тектоники и в складчатых областях, т.е. там, где сейсмические методы сталкиваются с определёнными трудностями.

В работе рассмотрены особенности электропроводности осадочных пород и ее зависимость от петро- и гидрофизических характеристик исследуемой среды – глинистости и пористости пород, солёности флюидов и их температуры. Определены специфические требования, предъявляемые к технологии магнитотеллурических исследований в осадочных бассейнах – по сравнению с глубинными академическими исследованиями это более широкий диапазон используемых периодов и существенно более плотная сеть наблюдений.

Авторами сформулированы основные направления дальнейшего развития магнитотеллурического метода для повышения эффективности изучения осадочных бассейнов.

Методика анализа и интерпретации магнитотеллурических данных включает анализ размерности и коррекцию приповерхностных искажений, многоэтапную инверсию данных и геологическое истолкование геоэлектрических разрезов. Необходимым является целенаправленное использование априорной геолого-геофизической информации.

В качестве примеров приведены результаты геологической интерпретации магнитотеллурических зондирований, выполненных в пределах крупнейших наземных областей распространения базальтовых траппов – в бассейне Парана (Бразилия) и в Восточной Сибири (Россия), где удалось детально изучить строение осадочной толщи и идентифицировать основные геологические формации. Также представлены результаты магнитотеллурических исследований на п-ове Таймыр (Россия), благодаря которым были обнаружены аномалии электропроводности, предположительно связываемые со скоплениями газогидратов, а также выявлено несколько новых объектов, перспективных на нефть и газ.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, осадочные бассейны, базальтовые траппы, солянокупольная тектоника, складчатые пояса, свойства коллекторов и покрышек, совместная и регуляризованная инверсия.

Введение

Метод магнитотеллурических зондирований (метод МТЗ) начал развиваться в 60-е годы прошлого века, главным образом, как метод изучения строения осадочных бассейнов (см. например, [Бердичевский, 1960, 1968; Безрук и др., 1964; Keller, 1968; Vozoff, 1972; Дмитриев и др., 2014]). При этом большая часть широко известных академических исследований и публикаций была сосредоточена на изучении глубинного

строения земной коры и верхней мантии, что обеспечивалось большой глубиной метода и относительной простотой регистрации длиннопериодных вариаций [Bedrosian, 2007; Korja, 2007]. Тем не менее, исследования собственно осадочных бассейнов проводились и проводятся с привлечением метода МТЗ в значительных объёмах в рамках коммерческих проектов. В последние годы только усилиями российских геофизических компаний магнитотеллурические зондирования выполнены в десятках тысяч пунктов. Не менее широко метод МТЗ используется в Китае, Канаде, Казахстане, Узбекистане, располагающих большим количеством современных магнитотеллурических станций. Однако результаты этих исследований малоизвестны академической общественности.

Безусловно, основными при исследовании осадочных бассейнов благодаря своей разрешающей способности по-прежнему остаются сейсмические методы, но существует целый ряд достаточно распространённых геологических ситуаций, когда более эффективным оказывается применение магнитотеллурических методов.

В первую очередь это относится к геологическим объектам, в разрезах которых в приповерхностной части имеются “жёсткие” сейсмические границы и/или наблюдается инверсия скоростей. Подобные ситуации характерны для перекрытых базальтовыми траппами осадочных бассейнов, которые часто нефтегазоносны [Patro et al., 2005; Berdichevsky et al., 2015; Patro, 2017]. Самые большие базальтовые покровы распространены на дне океанов; платформенный магматизм по объёму составляет менее 10 % общего объёма фанерозойских магматических пород и, в основном, представлен трапповой ассоциацией покровов толеитовых платобазальтов. Интрузивная трапповая формация состоит из силлов и даек; мощность первых может достигать сотен метров. Наличие многочисленных силлов и даек в осадочных толщах, с одной стороны, обеспечивает существование ловушек различного типа, а, с другой, прогрев во время излияний может влиять на процессы образования и миграции углеводородов [Гажула, 2008]. К наиболее крупным континентальным осадочным бассейнам описываемого типа относятся осадочные впадины Восточной Сибири, осадочный бассейн Парана и северо-западная часть Индостана [Saunders et al., 1992]. Образование траппов в названных регионах связано с мантийными плюмами, существовавшими во время распада суперконтинента Пангея на границе палеозоя и мезозоя (сибирские траппы), а также во время раскола суперконтинента Гондвана в мезозое (траппы бассейна Парана и северо-запада Индостана) [Зоненшайн, Кузьмин, 1983; Хаин, Ломизе, 2005; Patro, 2017].

К другому типу осадочных бассейнов, где эффективно применение метода МТЗ, относятся районы развития солянокупольной тектоники (см., например, [Aleksanova et al., 2009]). Соляные диапиры распространены во многих осадочных бассейнах, в разрезе которых присутствуют соленосные отложения, перекрытые мощными осадками, а также в складчатых поясах. Классические соляные диапиры (купола) образуются вследствие гравитационной неустойчивости в областях, которые не подверглись значительному тектоническому напряжению; но известны также соляные купола, образовавшиеся именно в тектонически активных регионах. К первым можно отнести области соляных структур Мексиканского залива, севера континентальной Европы и Северного моря, Прикаспийской впадины; ко вторым – соляные диапиры Ближнего Востока в Ираке, Иране и на Аравийском полуострове [Hudec, Jackson, 2007].

Почти все области соляной тектоники являются нефтегазоносными бассейнами, нередко крупными. Месторождения нефти и газа в них могут быть приурочены как к вершинам и склонам соляных куполов, так и к подсолевым отложениям. В последнем случае залегающие выше соленосные толщи служат высокоэффективными покрывками. Соляные диапиры имеют сложную форму, часто с крутопадающими границами и большими контрастами скоростей. Отражающие горизонты внутри соляных диапиров,

как правило, отсутствуют. Все это затрудняет интерпретацию сейсмических данных (временных разрезов), в особенности, в отношении подсолевых отложений.

Для метода МТЗ наличие соляных структур не является препятствием, а высокая глубинность метода позволяет получать достоверную информацию о строении подсолевых осадочных толщ.

Определённые преимущества метод МТЗ имеет и в складчатых областях с большими углами залегания геологических границ, также затрудняющими интерпретацию сейсмических данных [Berdichevsky et al., 2015]. Примерами перспективных с точки зрения нефтегазоносности складчатых регионов могут служить складчатые Таймыр и Загрос (северо-восточное побережье Персидского залива), северо-западная часть Колумбии, бассейн Чако в Боливии и Парагвае.

С учетом вышеизложенного на территории России основными регионами, в которых эффективно применение метода МТЗ, можно считать Восточную Сибирь (рис. 1, I), Прикаспий (II), Таймыр–Енисей–Хатангу (III) и Тиман–Печору (IV).

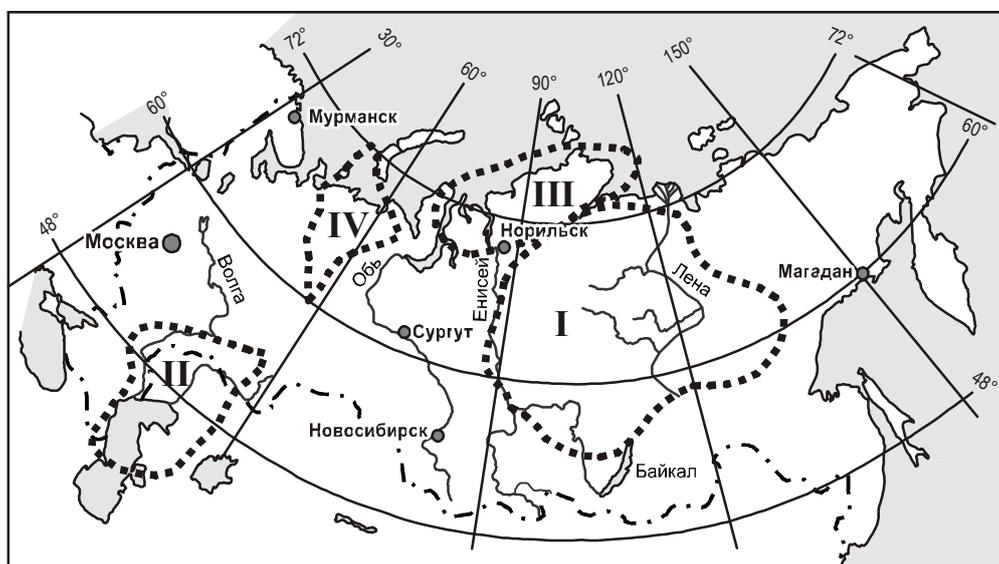


Рис. 1. Регионы эффективного применения метода МТЗ в России (окоптурены толстой пунктирной линией): I – Восточная Сибирь; II – Прикаспий; III – Таймыр–Енисей–Хатанга; IV – Тиман–Печора

Как правило, работы методом МТЗ в осадочных бассейнах направлены на решение следующих основных задач – региональные исследования по опорным профилям; поиск и разведка залежей углеводородов; поиск и разведка месторождений глубоко залегающих водоносных горизонтов; поиски геотермальных источников энергии. Наибольшее внимание традиционно сосредоточено на двух первых задачах – безусловно, самые большие объёмы исследований рассматриваемым методом выполнены и будут выполняться именно при их решении.

Электропроводность осадочных пород

Основным результатом исследований методом МТЗ является построение геоэлектрического разреза – двух- или трёхмерной модели распределения электрического сопротивления в среде. Завершающий и важнейший этап исследований – геологическая интерпретация построенного разреза. В случае анализа данных электроразведки применительно к поиску углеводородов в основе интерпретации лежит понимание факторов,

определяющих электропроводность осадочных пород. Отметим, что при существенном прогрессе, достигнутом в последние годы в понимании природы электропроводности пород верхней мантии Земли (см., например, [Yoshino, 2010]), особенности электропроводности осадочных пород, хорошо изученные геофизиками, специализирующимися на скважинных геофизических исследованиях, зачастую недостаточно известны геофизикам, занимающимся полевой электроразведкой.

Электропроводность σ равна произведению количества носителей электрических зарядов на их заряд и подвижность:

$$\sigma = \sum_1^N n_i \rho_i \mu_i,$$

где n – количество носителей заряда в единице объёма; ρ – заряд единичного носителя; μ – подвижность носителей заряда; N – количество типов носителей заряда.

По типу носителей заряда можно выделить три основных разновидности проводимости – электронную, ионную, полупроводниковую. Рассмотрим более подробно ионную проводимость, поскольку она доминирует в осадочных породах.

В первом приближении можно считать, что осадочные породы состоят из непроводящего скелета (матрицы) и проводящего флюида (водного раствора разных солей), свойства которого и определяют электропроводность породы в целом. Носителями заряда в растворах (флюидах) являются положительные и отрицательные ионы, на которые под действие воды (растворителя) разделяются молекулы солей, кислот, щелочей. В такой простейшей модели электропроводность осадочной породы зависит от электропроводности флюида и его объёма, который определяется коэффициентом пористости. Таким образом, сопротивление осадочной породы зависит главным образом всего от двух величин – электропроводности флюида и коэффициента пористости породы. Эти очевидные факты находят своё отражение в общеизвестном эмпирическом соотношении (законе) Арчи [Archie, 1942] $\rho_s = F^{-2} \rho_f$, где ρ_s – сопротивление породы; ρ_f – сопротивление флюида; F – эффективная пористость.

Однако лабораторные измерения электропроводности образцов разных осадочных пород показали, что во многих случаях это простейшее соотношение не выполняется. Оказалось, что существенное влияние оказывают, по крайней мере, ещё два фактора – флюидонасыщенность и свойства матрицы (порового пространства). Таким образом, соотношение Арчи может быть переписано в более полном виде – $\rho_s = a F^{-m} S_f^{-n} \rho_f$, где S_f – флюидонасыщенность; m – параметр цементации; n – параметр насыщения; a – коэффициент извилистости каналов, обычно принимаемый за 1.

Соотношение Арчи или аналогичная эмпирическая формула, предложенная В.Н. Дахновым [1941], могут быть применены при исследовании петро- и гидрофизических свойств большинства терригенных осадочных пород.

Следует отметить, что на электропроводность оказывает влияние только эффективная пористость – отношение объёма связанных пор к общему объёму породы. Возникает трудно оцениваемый параметр связности пор. Очевидно, что если все поры несвязные, то электропроводность породы никак не будет зависеть от пористости. Безусловно, также очень важна и структура матрицы (скелета).

Оказалось, что для глинистых пород, содержащих значительное количество частиц с эффективным диаметром менее 10 мкм, упоминаемые выше формулы плохо применимы, поскольку электропроводность таких пород слабо зависит от солёности (проводимости) флюида (рис. 2). Это связано с тем, что в глинистых породах поры имеют субкапиллярные размеры, вследствие чего начинает действовать так называемая “поверхностная” проводимость.

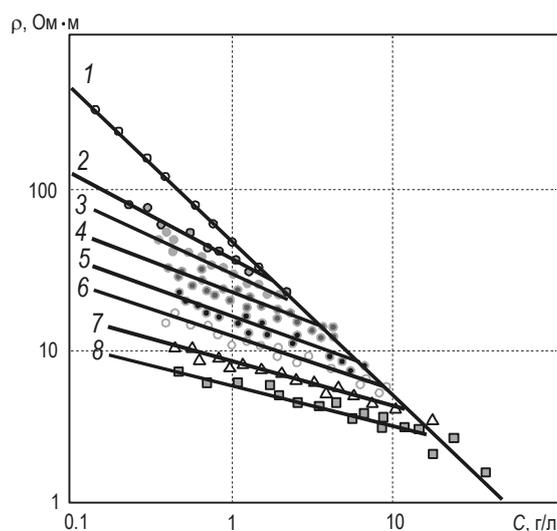


Рис. 2. Зависимость удельного электрического сопротивления песчано-глинистых осадков от концентрации NaCl в поровом флюиде (двойной логарифмический масштаб)

1 — чистый песок; 2–7 — песок с разным процентным содержанием глины (2 — 10 %; 3 — 15 %; 4 — 20 %; 5 — 30 %; 6 — 40 %; 7 — 60 %); 8 — чистая глина. Из [Рыжов, Судоплатов, 1990] с изменениями

Двойные электрические слои, образующиеся на контакте электролита с матрицей, имеют размер, сопоставимый с размерами пор (капилляров), а раствор электролита в капилляре обладает большей удельной электропроводностью, чем раствор в объёме. При этом концентрация ионов на границах раздела фаз существенно увеличивается, образуются параллельные проводящие каналы, и проводимость породы возрастает. Особенно сильно этот эффект проявляется в случае, если флюид изначально имел низкую концентрацию растворенных веществ и, соответственно, низкую проводимость [Рыжов, Судоплатов, 1990].

Таким образом, электропроводность осадочных пород зависит от глинистости, структуры порового пространства, пористости, флюидонасыщенности и, наконец, от электропроводности порового флюида. Первые четыре фактора характеризуют петро- и гидрофизические свойства породы. Последний фактор является самым важным, поскольку именно от него в значительной степени зависит электропроводность большинства неглинистых осадочных пород.

Электропроводность поровых флюидов определяется прежде всего концентрацией и химическим составом растворенных веществ (солей, кислот и/или щелочей) и температурой. Состав флюидов, как и концентрация растворенных в нем веществ, весьма разнообразен и обуславливается геолого-структурными особенностями, геологической историей исследуемой территории, а также геоморфологическими, метеорологическими и гидрологическими факторами. В областях современной и молодой складчатости часто встречаются углекислые и азотные воды. Для глубоко залегающих осадочных горизонтов складчатых поясов (предгорные впадины) характерны высокоминерализованные флюиды, часто обогащенные сероводородом. В глубоких слоях осадочных бассейнов распространены хлоридно-кальциевые и хлоридно-натриевые воды. В целом, в состав флюидов главным образом входят хлориды, бикарбонаты и карбонаты металлов натрия, кальция, калия, магния. Содержание хлористого натрия может достигать до 90 % от общего содержания солей, поэтому в большинстве случаев можно ограничиться рассмотрением этих растворов.

С увеличением концентрации удельная электропроводность растворов сначала возрастает, затем после достижения некоторого максимального значения начинает уменьшаться. Эта зависимость очень чётко выражена для сильных электролитов и значительно хуже для слабых. Наличие максимума на кривых объясняется тем, что в разбавленных растворах сильных электролитов скорость движения ионов мало зависит от концентрации и сначала растёт почти прямо пропорционально числу ионов. Однако с увеличением концентрации усиливается взаимодействие ионов, что уменьшает скорость их движения. Для слабых электролитов наличие максимума на кривой обусловлено тем, что с ростом концентрации уменьшается степень диссоциации, и при достижении определённой концентрации число ионов в растворе начинает увеличиваться медленнее, чем концентрация. На практике уменьшение электропроводности с ростом концентрации наблюдается лишь в концентрированных растворах в поровых флюидах осадочных пород, встречающихся крайне редко.

С ростом температуры (t) удельное сопротивление растворов (ρ_t) убывает благодаря увеличению скорости движения ионов за счёт снижения вязкости раствора и уменьшения сольватированности ионов (удельная проводимость при этом возрастает). Величина удельного сопротивления раствора может быть определена соотношением

$$\rho_t = \frac{\rho_{18^\circ\text{C}}}{1 + a(t - 18)},$$

в котором $\rho_{18^\circ\text{C}}$ – сопротивление раствора при 18 °С; a – безразмерная

константа, равная 0.025 для NaCl.

Очевидно, что зависимость удельного сопротивления флюида и, следовательно, всей породы от температуры лежит в основе применения электроразведочных методов для геотермальных исследований (наряду с выделением аномалий электропроводности, вызванных гидротермальными изменениями пород).

Сопротивление осадочных пород зависит от многих факторов и, как правило, провести однозначное геологическое истолкование полученных аномалий без дополнительной петро- и гидрофизической информации сложно. Во многих случаях, когда имеются данные (или представления) о литологических, петро- и гидрофизических свойствах осадков (глинистость, структура порового пространства, флюидонасыщенность, типичные значения солёности поровых флюидов), становится возможной оценка эффективной пористости как показателя качества коллектора (или глинистости как показателя качества покрышки).

Именно благодаря возможности оценки коллекторских свойств осадочных пород и/или свойств покрышек по электропроводности данные магнитотеллурических исследований находят применение при поисках и разведке углеводородов и водоносных горизонтов.

Инверсия магнитотеллурических данных и комплексная геологическая интерпретация

Важнейшим этапом любого геофизического исследования является построение физических моделей среды по наблюдаемым данным, т.е. решение обратной задачи или инверсия данных. Интерпретация как завершающий этап исследования заключается в геологическом истолковании полученных физических моделей и построении геологических и/или литологических моделей. Как на этапе инверсии, так и на этапе интерпретации, использование доступных геолого-геофизических данных позволяет повысить эффективность исследований и достоверность получаемых результатов.

Наиболее информативным методом геофизики при изучении строения осадочных бассейнов, как уже отмечалось, является сейсморазведка, обладающая высоким

пространственным разрешением. Сейсмические данные более чувствительны к геологическим структурам (границам слоев с различными упругими свойствами), тогда как магнитотеллурические – к петро- и гидрофизическим характеристикам пород. Поэтому очевидно, что совместное использование результатов дополняющих друг друга методов позволяет существенно повысить достоверность результатов геофизических исследований. Одним из наиболее технологичных и эффективных подходов является совместная инверсия данных разных геофизических методов.

Можно выделить для основного подхода к совместной инверсии геофизических данных – собственно совместную инверсию (*joint inversion*) и инверсию с ограничениями (*constrained inversion*).

В первом случае выполняется инверсия данных двух (или более) методов с помощью единого алгоритма в одной процедуре. При этом итоговая модель содержит, главным образом, элементы и объекты, которые влияют на все используемые данные [Haber, Gazit, 2013]. Такой подход эффективен только тогда, когда физические параметры разных методов связаны между собой какой-либо зависимостью. Типичным примером может служить совместная инверсия сейсмических и гравиметрических данных, основанная на связи сейсмических скоростей и плотности вещества. К сожалению, нередко связь между сейсмическими скоростями и удельным сопротивлением пород слабая или отсутствует вовсе. Следует заметить, что использование совместной инверсии магнитотеллурических данных и данных сейсморазведки может привести к тому, что существенная часть информации, которая содержится как в сейсмических, так и в магнитотеллурических данных, в моделях отражена не будет. Тем не менее, встречаются геологические ситуации, например, в областях развития эвапоритов, когда при существующей связи между сейсмической скоростью и сопротивлением совместная инверсия даёт хорошие результаты (см., например, [Medina et al., 2012]).

В ряде случаев, например, в областях развития солянокупольной тектоники, может быть весьма эффективной совместная инверсия данных гравиметрии и электроразведки, что обусловлено тем, что соленосные отложения по сравнению с вмещающими осадочными породами имеют как высокое электрическое сопротивление, так и низкую плотность. В этом конкретном случае совместная инверсия оправдана и эффективна, поскольку аномалии электропроводности и плотности, характеризующие объект, хорошо коррелируют между собой (см., например, [Jegen et al., 2009]).

Инверсия с ограничениями заключается в использовании результатов (элементов моделей) одного или нескольких других методов. Чаще всего такой подход основан на использовании данных сейсморазведки при инверсии других методов. В частности, часто сейсмические отражающие горизонты отождествляются с геоэлектрическими границами, которые в ходе инверсии не изменяются. В этом случае инверсия сводится к определению распределения электропроводности в пределах фиксированных слоев.

Именно второй подход наиболее эффективен при совместном использовании данных сейсмо- и электроразведки. Действительно, электропроводность и скорость сейсмических волн в осадочных породах имеют, как правило, различную природу и слабо коррелируют между собой. С одной стороны, в большинстве случаев это делает малоэффективной совместную инверсию данных; с другой, этот факт открывает большие возможности совместного использования данных сейсмо- и электроразведки, поскольку их результаты дополняют друг друга.

В основе совместного использования сейсмических и магнитотеллурических данных (инверсии с ограничениями) лежит наличие в осадочных бассейнах субгоризонтальных границ, отображающих резкую смену литологии осадков. Таким границам соответствуют контрастные значения сопротивлений и/или сейсмических скоростей (отражающие границы). Сейсмические границы могут совпадать с геоэлектрическими,

а могут и не совпадать, но во втором случае они, как правило, конформны из-за характерной для осадочных бассейнов слоистости. Именно на выделении и сопоставлении таких границ, если они существуют в разрезе, основаны методы инверсии с ограничениями, при которой на основе уверенно выделенных отражающих горизонтов в осадочной толще фиксируется геометрия модели (количество слоёв и их мощности). При таком подходе процедура инверсии заключается в определении распределения сопротивления в пределах фиксированных по геометрии слоёв (рис. 3).

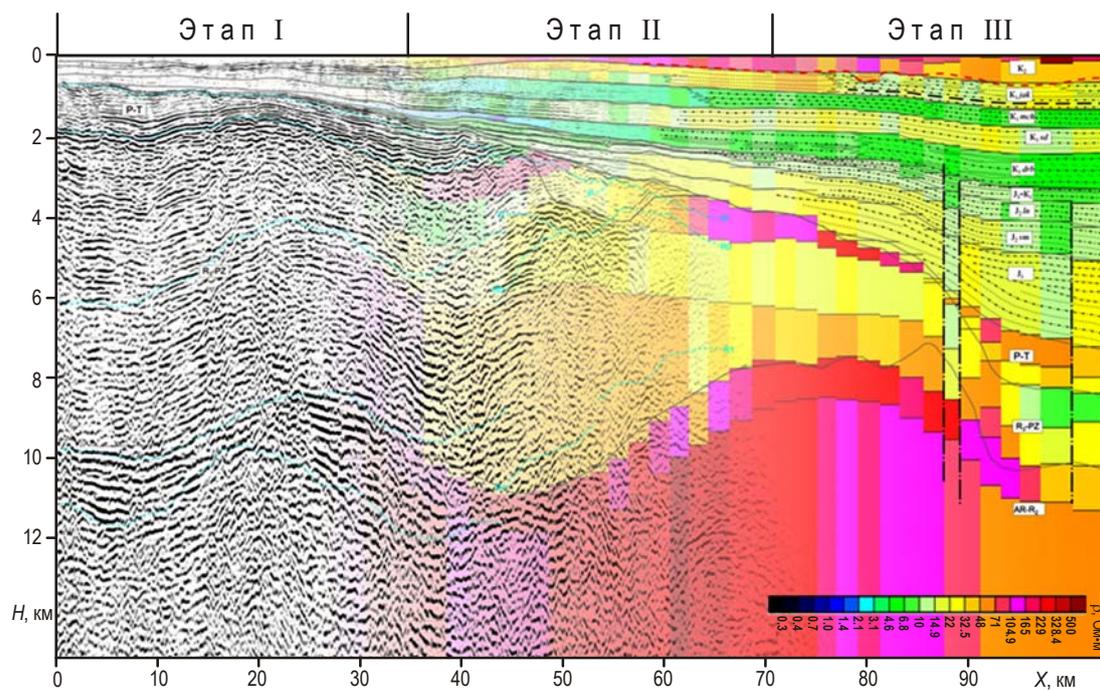


Рис. 3. Этапы инверсии магнитотеллурических данных с использованием результатов сейсмических исследований. Этап I – интерпретация данных сейсморазведки, корреляция основных горизонтов; Этап II – наполнение сейсмического разреза информацией о сопротивлении пород по данным МТЗ; Этап III – построение литологического разреза с учетом значений сопротивления на базе данных ГИС опорной скважины

Возможность некорректной детерминированности геоэлектрических границ должна исключаться привлечением априорной геолого-геофизической информации, важнейший источник которой – результаты геофизических методов исследования скважин. Прямое сравнение геоэлектрических моделей, получаемых методом МТЗ, с данными каротажа, как правило, некорректно в силу разного масштаба.

Для более адекватного сопоставления геоэлектрических моделей, полученных по данным магнитотеллурических зондирований и электрического каротажа, проводится дополнительный анализ и обработка данных последнего с помощью метода, предложенного в [Pedersen et al., 1988]¹. Этот метод учитывает особенности каротажных данных и анализирует анизотропию электропроводности пород. При этом используются формулы, по сути соответствующие формулам для вычисления эквивалентного сопротивления цепи из параллельно (ρ_L) и последовательно (ρ_N) соединённых резисторов;

¹ Этот метод был успешно применен, в частности, при анализе данных каротажа Кольской сверхглубокой скважины [Жамалетдинов, 2011].

в первом случае складываются проводимости (величины, обратные сопротивлению), во втором – сами сопротивления:

$$\rho_L = \frac{\sum \Delta z_i}{\sum \frac{\Delta z_i}{\rho_k(z_i)}}, \quad \rho_N = \frac{\sum \Delta z_i \cdot \rho_k(z_i)}{\sum \Delta z_i};$$

здесь $\rho_k(z_i)$ – значение удельного сопротивления по диаграмме каротажа на глубине z_i ; Δz_i – разница глубин (мощность “элементарного слоя”). Поскольку чаще всего каротаж выполняется с фиксированным шагом по глубине, то значение Δz_i постоянно по всей диаграмме и равно шагу дискретизации значений ρ_k .

Таким образом, в формуле для ρ_L в числителе имеем сумму мощностей неких “элементарных слоёв”, а в знаменателе – сумму их проводимостей. Для ρ_N в числителе – сумма поперечных сопротивлений “элементарных слоев”, а в знаменателе – их суммарная мощность. С учётом того, что на результаты каротажа большое влияние оказывает ρ_N , данные оценки нельзя считать истинными. Однако они дают представление о возможной анизотропии сопротивлений. Осреднение проводится либо по выбранным стратиграфическим или литологическим интервалам, либо с некоторым радиусом, величина которого сопоставима с длиной волны. Анализ данных электрического (особенно индукционного) каротажа позволяет выделять границы осадочных комплексов и делать их стратиграфическую привязку, а при наличии сейсмокаротажа возможно и сопоставление сейсмических границ с геоэлектрическими.

К сожалению, во многих случаях объем доступных геолого-геофизических данных недостаточен для выполнения инверсии с ограничениями и проводится “обычная” (*unconstrained*) инверсия без ограничений. В этом случае важную роль играет выбор начального приближения и априорной модели. Для осадочных бассейнов в качестве начального приближения и априорной модели, как правило, используется сглаженная одномерная модель, полученная по продольным или в ряде случаев эффективным кривым кажущегося сопротивления. При этом инверсия выполняется в несколько этапов, а использование поперечных кривых в случае выраженной двумерности среды позволяет выделять в разрезе высокоомные объекты. Многоэтапная инверсия представляет собой ряд последовательных инверсий с различными параметрами; при этом начальным приближением каждого следующего этапа является итоговая модель предыдущего. Параметрами инверсии могут быть диапазон используемых периодов, набор используемых компонент (кажущееся сопротивление и фазы для двух мод, значения типпера и пр.) и их весов и/или задаваемые минимальные ошибки (*error floor*), а также параметры сглаживания. При правильном подборе параметров и последовательности этапов, который достигается, к сожалению, только методом проб и ошибок, контролируя изменение привязки, можно существенно повысить эффективность инверсии.

Естественным развитием магнитотеллурических исследований является постепенный переход от профильных (двумерных) измерений к площадным (трёхмерным), что требует решения обратной задачи для трёхмерных сред (см., например, [Siripunvaraporn, 2012; Kelbert et al., 2014]). Надо отметить, что трёхмерный подход имеет как свои преимущества, так и свои недостатки.

С одной стороны, при трёхмерном подходе отсутствуют ограничения на размерность модели, т.е. исключается, пожалуй, наиболее трудно учитываемый фактор – ошибки, связанные с использованием двумерного или одномерного подхода при инверсии данных, полученных в реальных (трёхмерных) средах. С другой стороны, решение трёхмерных задач требует не только высокого качества площадных данных,

но и исключительно больших вычислительных ресурсов. Если большинство двумерных обратных задач может быть решено с помощью современных персональных компьютеров за сравнительно небольшое время (несколько часов на один этап), то для решения трёхмерной обратной задачи необходимы многопроцессорные системы с большой оперативной памятью, а время вычисления для одного этапа может составлять несколько дней.

Очевидно, что трёхмерный подход не может быть “панацеей” от проблем, связанных с использованием одномерного или двумерного подхода. При изучении осадочных бассейнов наиболее разумным представляется сочетание традиционного двумерного (или даже одномерного) подхода, позволяющего получать детальные модели, с трёхмерным, который дает возможность оценить региональное трёхмерное распределение электропроводности.

Особенности технологии проведения магнитотеллурических исследований в осадочных бассейнах

Проводимые в осадочных бассейнах полевые магнитотеллурические наблюдения по сравнению с аналогичными глубинными исследованиями имеют свои особенности:

глубинность исследований составляет, как правило, от первых десятков метров до 10–20 км, т.е. до кровли кристаллического фундамента;

требуется высокая плотность наблюдений и оптимальное расположение профилей (не менее 5 точек на объект; дополнительные измерения за границами исследуемых участков);

необходимость обеспечения высокой производительности полевых работ для снижения себестоимости измерений;

необходимость обеспечения возможности получения качественных данных при наличии промышленных помех и/или низкого уровня вариаций.

Из перечисленного вытекают вполне очевидные требования к технологии проведения полевых работ. Для большинства осадочных бассейнов суммарная проводимость осадочной толщи не превышает 500–1000 См, в связи с чем для обеспечения необходимой глубинности исследований достаточно получать оценки переходных функций для периодов от 0.001–0.025 до 1000 с (во многих случаях достаточно и более коротких интервалов периодов – до 100–200 с).

В названном диапазоне периодов основными источниками вариаций являются удалённые грозы и геомагнитные пульсации, между которыми имеется “мёртвый” диапазон с низким уровнем естественных вариаций (примерно от 1 до 10 с).

Источниками удалённых гроз служат тропические районы Африки, Южной Америки и Азии. Электромагнитное поле от молний распространяется по всей планете по волноводу, образованному земной поверхностью и ионосферой. Эти источники имеют некоторый суточный и сезонный ход, однако из-за суперпозиции нескольких источников в диапазоне периодов от первых кГц до первых Гц достаточно мощный сигнал существует практически всегда (круглые сутки и во все сезоны). Повсеместно наблюдается связанное со свойствами атмосферы повышение интенсивности вариаций в утренние и вечерние часы.

В качестве основного источника вариаций в диапазоне периодов от 1 до ~200–500 с рассматриваются геомагнитные пульсации нескольких типов, характеризующиеся разной природой и свойствами. Важным свойством пульсаций разных типов является их повышенная интенсивность в утренние и вечерние (по местному времени) часы.

Важно отметить, что, в отличие от полярных суббурь и магнитных бурь, у этих источников отсутствует явно выраженная зависимость от широты и солнечной активности. Зависимость от общей геомагнитной активности существует лишь для некоторых типов пульсаций.

Таким образом, оптимальным временем регистрации вариаций электромагнитных полей в необходимом для изучения осадочного чехла диапазоне периодов является временной интервал с середины одного дня до середины следующего (по местному времени) общей длительностью 16–20 ч. Важно, чтобы регистрация велась в вечерние и утренние часы (рис. 4). При таком режиме каждая станция записывает одну точку в сутки с учётом переезда и смотки–размотки.

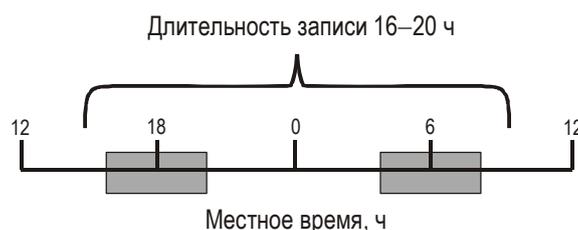


Рис. 4. Оптимальная длительность записи вариаций электромагнитных полей при изучении строения осадочных бассейнов. Затитыми прямоугольниками показаны интервалы времени, соответствующие повышенной интенсивности удалённых гроз и геомагнитных пульсаций

В случае если геологическое задание предполагает изучение не только осадочного чехла, но и земной коры, и требуемая глубинность исследований составляет 40–60 км, длительность записи может составлять 2–3 дня. При этом максимальный период, на котором могут быть получены оценки переходных функций, составляет 3000–5000 с (редко до 10 000 с). Нужно иметь в виду, что самые длиннопериодные вариации в диапазоне от 500 до 3000 с индуцируются полярными суббуриями, интенсивность и частота которых зависит от магнитной широты точки наблюдения, солнечной активности, времени года и суток. Наиболее интенсивны вариации в высоких широтах, во время равноденствий, а также в утреннее и вечернее время. Однако в отличие от удалённых гроз и пульсаций, полярные суббури могут отсутствовать в течение нескольких дней в зависимости от солнечной активности, что делает сложной задачу уверенного получения данных в длиннопериодном диапазоне в ограниченный промежуток времени. Из сказанного вытекает, что увеличение глубинности исследований до 40–60 км может привести к многократному снижению производительности работ и, как следствие, к возрастанию стоимости одной точки.

Оптимальный состав полевого отряда включает одного техника (оператора) и двух–трёх рабочих. При наличии дорог для перемещения по профилю используется гужевой или автотранспорт (полноприводный пикап или квадроцикл типа “Арго”). В зависимости от условий местности один отряд может осуществлять в день от двух до четырех перемещений по профилю. Таким, образом, при одновременной работе двух отрядов производительность достигает 7–8 точек в день. На опорной точке в измерениях целесообразно участие (по возможности) ещё одного геофизика, который обеспечивает также контроль качества получаемых данных и их окончательную обработку на полевой базе.

Измерения вариаций электромагнитного поля выполняются магнитотеллурическими станциями с индукционными катушками в качестве датчиков магнитного поля. Серийно выпускаемые современные станции *Metronix Geophysics*, *Phoenix Geophysics*,

Zonge International удовлетворяют требованиям, предъявляемым к аппаратурным комплексам при изучении осадочных бассейнов, обеспечивая:

наличие многоканальных 24- или 32-битных АЦП с эффективными входными каскадами для фильтрации и усиления электрического поля и высоким входным сопротивлением;

автономность и малое энергопотребление, обеспечивающее не менее 1–2 суток непрерывной записи с высокой частотой дискретизации (одновременная регистрация на нескольких частотах) при использовании стандартной автомобильной аккумуляторной батареи;

использование малошумящих индукционных датчиков, обеспечивающих регистрацию вариаций магнитного поля в широком диапазоне частот от 10 кГц до 0.0003 Гц;

работоспособность в широком диапазоне температур от -40° до $+50^{\circ}$ и при высокой влажности.

Другой важный аспект, зависящий от геологического задания, – это оптимальное планирование измерений (ориентация профилей, расстояние между пунктами наблюдения по профилю и между профилями и т.п., длительность записи). Чаще всего эти параметры задаются заказчиком работ, однако следует придерживаться определенных правил:

- профили должны быть перпендикулярны простиранию региональных структур;
- должно быть не менее 5 точек на профиле на объект, т.е. размер объекта исследования, например, соляного купола или рифовой структуры, определяет расстояние между пунктами наблюдения и между профилями;
- длина профиля должна превышать глубинность исследований в 5–10 раз;
- на каждом профиле должно быть не менее 20–30 пунктов измерений;
- следует по возможности выполнять дополнительные измерения за границами исследуемого участка для обеспечения геоэлектрической модели данными на концах профилей (рис. 5);
- при планировании профилей следует учитывать расположение источников промышленных электромагнитных помех (электрифицированные железные дороги, ЛЭП, карьеры, трубопроводы, электропастухи и т.п.).



Рис. 5. Планирование профиля (D – глубинность исследований). Серым цветом показана область уверенного восстановления геоэлектрического разреза без дополнительных измерений (треугольники с заливкой – пункты основных измерений); более светлым тоном – дополнительные области уверенного восстановления геоэлектрического разреза при наличии дополнительных измерений в точках, отмеченных треугольниками без заливки

Для повышения производительности работ при слабой горизонтальной изменчивости разреза допустимо измерение только двух горизонтальных компонент электрического поля на каждом втором–третьем пункте; при этом для обработки данных используется магнитное поле, полученное на соседнем пункте (пунктах).

Безусловным требованием является использование технологии удалённой опорной точки (или нескольких опорных точек) для подавления промышленных шумов (*remote reference*). Важно применять современные робастные статистическо-спектральные

методы обработки. В случае площадных работ появляется возможность использования принципиально новых подходов к обработке данных (см. например, [Smirnov, Egbert, 2012]), что может существенно повысить эффективность и помехозащищённость магнитотеллурических исследований.

Также необходимым этапом является коррекция гальванических искажений, вызванных влиянием локальных приповерхностных неоднородностей. При детальном работе с расстоянием между пунктами 200–300 м можно использовать статистические методы коррекции статического смещения кривых. При шаге по профилю 1 км и более для вычисления поправок в каждом пункте МТЗ следует выполнять измерения методом зондирования становлением поля в ближней зоне (метод ЗСБЗ). Этот подход основан на иммунности метода ЗСБЗ к гальваническим искажениям [Strack et al., 2003]. Использование данных названного метода позволяет также избежать возможной при статистическом подходе систематической ошибки определения уровня кривых.

Региональные магнитотеллурические исследования

В задачи региональных работ, как правило, входит изучение строения всей земной коры, включая осадочные бассейны, пересекаемые профилем. В России существует программа комплексных геофизических исследований по геотраверсам, заказчиком которых является Министерство природных ресурсов и экологии РФ. Схема расположения на территории России основных региональных профилей (геотраверсов) представлена на рис. 6.

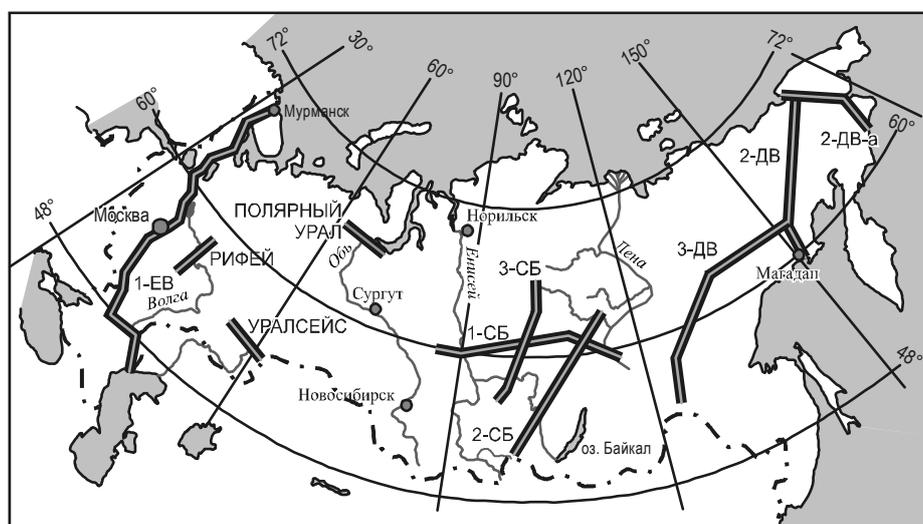


Рис. 6. Расположение основных региональных профилей на территории России. Названия профилей приведены в соответствии с Программой комплексных геофизических исследований по геотраверсам Министерства природных ресурсов и экологии РФ

Глубинность исследований на региональных профилях достигала 40 и более километров, позволяя изучать строение не только осадочной толщи, но и большей части земной коры, включая в ряде случаев верхнюю мантию. В последние годы аналогичные работы проводятся и в других регионах Земного шара – в Бразилии, Индии, Китае.

В комплекс геофизических исследований вдоль региональных геотраверсов входят исследования методом МТЗ, выполняемые с шагом 1–3 км по профилю при максимальном оценивании передаточных операторов с периодом 3000 с.

Ниже в качестве примера рассматриваются результаты региональных магнитотеллурических исследований, выполненных в осадочном бассейне Парана (южная часть Бразилии) и в Восточной Сибири (Россия). Для двух этих регионов характерно наличие в верхней части разреза базальтовых траппов. В обоих случаях исследования проводились по методике удаленной базы с использованием измерительной аппаратуры *MTU-5 (Phoenix Geophysics Ltd.)* с индукционными датчиками МТС-50. В бассейне Парана магнитотеллурические зондирования сопровождались дополнительными измерениями методом ЗСБЗ для исследования верхней части разреза и коррекции статических искажений.

Региональные исследования в осадочном бассейне Парана, расположенном в южной части Бразилии (штаты Мату Гроссу ду Суль, Сан Паулу и Парана), были выполнены в 2014 г. силами ООО “Северо-Запад” (Россия) и компании *Lasa Prospeccoes S.A.* (Бразилия) по контракту с Национальным нефтегазовым агентством Бразилии. Главной целью работ была оценка перспектив нефтегазоносности исследуемого региона и разграничение лицензионных участков. Геологическое задание включало картирование диабазовых интрузий, оценку мощности траппов, глубины залегания их подошвы, прослеживание латеральной неоднородности траппов, выявление разломных зон, изучение осадочной толщи, залегающей под базальтовыми траппами, выделение слоёв с разным сопротивлением, оценку латеральной неоднородности распределения сопротивления, картирование поверхности кристаллического фундамента, выделение зон пониженного сопротивления в земной коре.

Измерения выполнялись в центральной, наиболее глубокой части впадины по трём профилям. Расстояние между пунктами измерения составляло ~2 км, длительность записи – ~40 ч; максимальный период, на котором оценивались передаточные функции, – 2000 с (для решения геологической задачи достаточными оказались периоды до 100 с). В каждом пункте наблюдения проводились измерения методом ЗСБЗ, что позволило изучить разрез верхних 200–400 м и выполнить эффективную коррекцию уровня кривых кажущегося сопротивления, смещённых приповерхностными искажениями (*staticshift correction*).

Помимо коррекции уровня кривых кажущегося сопротивления проводился анализ размерности полученных оценок импеданса и были выделены квазипродольные (*TE*) и квазипоперечные (*TM*) компоненты. Анализ размерности, выполняемый главным образом по фазовому тензору [Booker, 2014], показал, что до периодов 100–200 с может применяться двумерный подход.

Выполненная для всех профилей многоэтапная двумерная инверсия позволила получить геоэлектрические разрезы до глубин 10 км с нормированной средней квадратичной невязкой (*RMS*), не превышающей 2.5.

На рис. 7 приведён геоэлектрический разрез по одному из профилей и его геологическая интерпретация, на рис. 8 – сопоставление наблюдаемых и расчётных значений кажущегося сопротивления и фазы импеданса для квазипродольной (*TE*) и квазипоперечной (*TM*) компонент кажущегося сопротивления и фазы импеданса.

Главная особенность полученных геоэлектрических разрезов – наличие в их средней части промежуточного высокоомного слоя, залегающего в интервале глубин от 2 до 4 км, в котором присутствует большое количество интрузивных тел (силлов). Таким образом, осадочная толща, залегающая под базальтовыми траппами формации Сера Жераль, делится на верхнюю и нижнюю части с сильной неоднородностью по латерали, в которых прослеживаются квазивертикальные зоны повышенного сопротивления, соответствующие областям вторичного преобразования осадочных пород интрузивными телами (дайками).

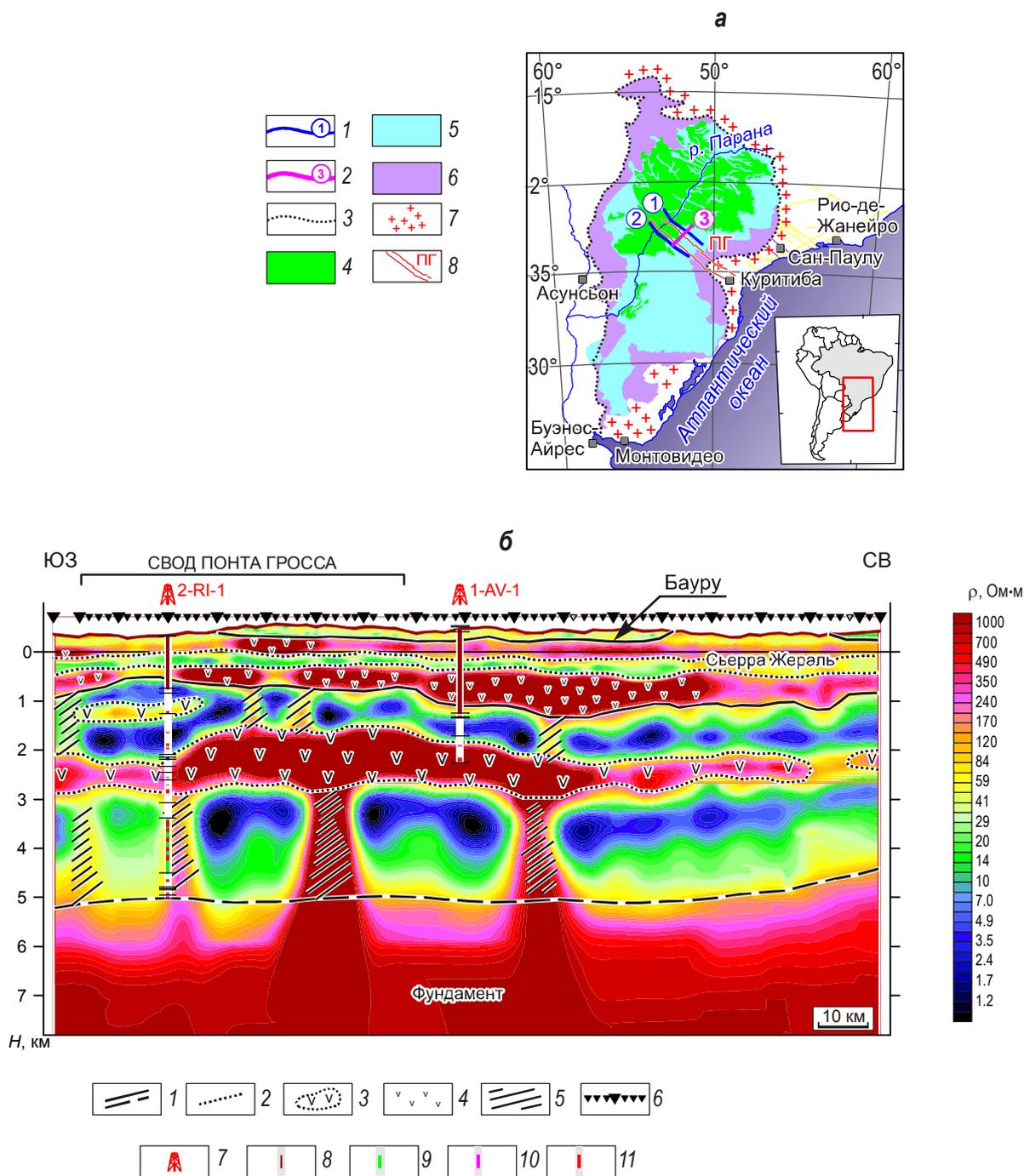


Рис. 7. Осадочный бассейн Парана, Бразилия. Схема исследуемого района (а) и результаты геологической интерпретации данных МТЗ по профилю 3 (б)

На а: 1 – положение профилей 1, 2, 3; 2 – положение профиля 3; 3 – границы осадочного бассейна; 4 – песчаники формации Бауру; 5 – базальты формации Серра Жераль; 6 – осадочные породы МZ–PZ; 7 – кристаллические породы фундамента; 8 – положение поднятия Понта Гросса [Frank et al., 2009]. На врезке красный прямоугольник – границы исследуемого района

На б: 1 – границы основных геоэлектрических комплексов; 2 – дополнительные границы внутри них; 3 – зоны с существенным вкладом интрузивных пород; 4 – зоны с преобладанием магматических пород в формации Серра Жераль; 5 – зоны измененных пород; 6 – точки МТЗ; 7 – положение скважин; данные бурения: 8 – породы формации Серра Жераль; 9 – породы формации Понта Гросса (палеозойские осадочные породы); 10 – породы докембрийского кристаллического фундамента; 11 – интрузивные породы

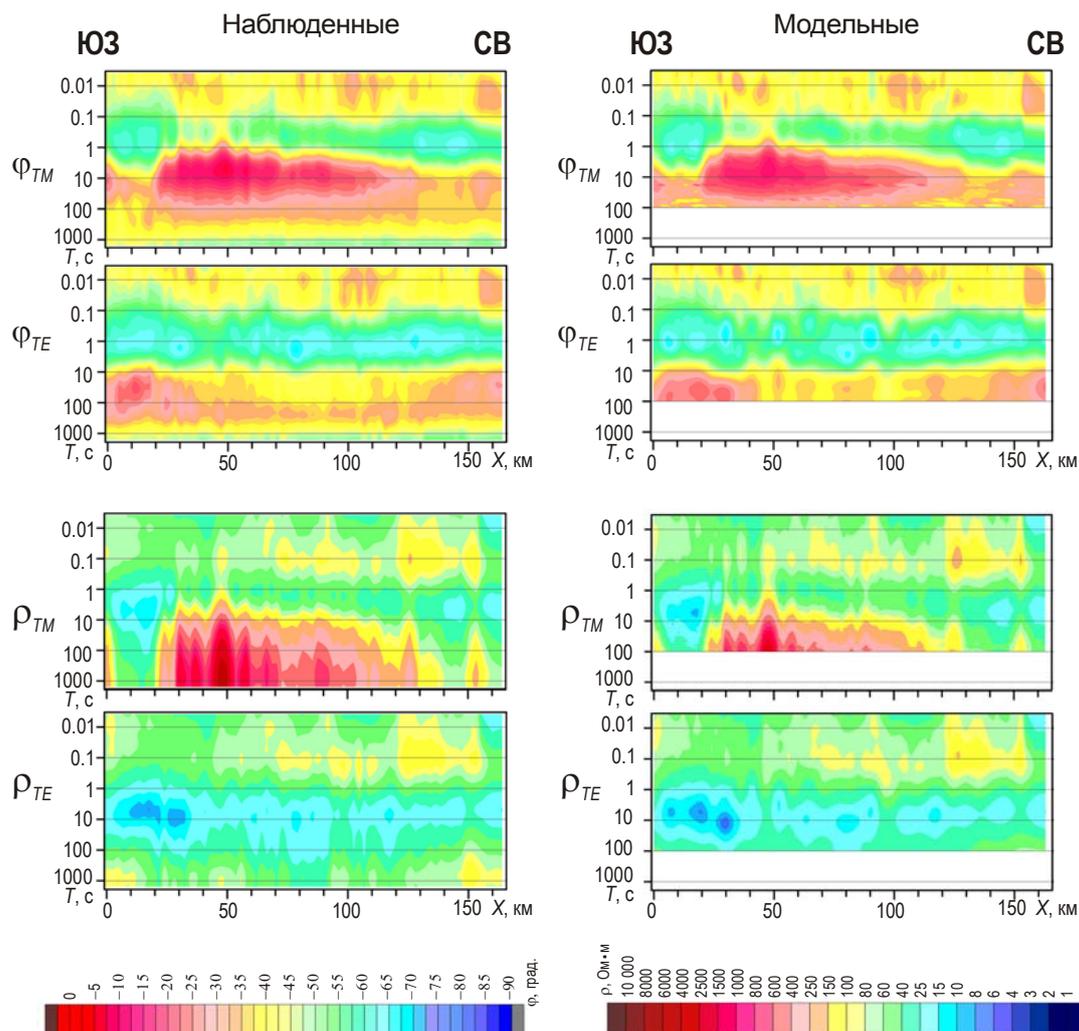


Рис. 8. Осадочный бассейн Парана, Бразилия. Сопоставление наблюдаемых (слева) и модельных (справа) данных (псевдоразрезы) для профиля 3. Положение профиля см. на рис. 7, а

По полученным данным уверенно выделяется неоднородная высокоомная толща, соответствующая траппам Серра Жераль, и залегающие на ней пески формации Бауру; установлены вертикальная и горизонтальная неоднородности базальтовой толщи. Прослеженное в центральной части профиля утолщение высокоомного промежуточного слоя с двумя подводящими вертикальными каналами соответствует известному своду Понта Гросса, который отчётливо выделяется по данным магниторазведки и, по мнению геологов, представляет собой “веер” дайковых комплексов [Piccirillo et al., 1990; Raposo et al., 1991; Frank et al., 2009]. Определена глубина залегания кристаллического фундамента, меняющаяся на исследуемой территории от 3 км на юго-востоке до 5.5 км в центральной части. Полученные результаты хорошо совпадают с имеющимися данными литологических и геофизических исследований скважин.

В 2012–2015 гг. силами ООО “Северо-Запад” были проведены региональные работы методом МТЗ на Сибирской платформе в междуречье Подкаменной и Нижней Тунгусок. Эта территория с севера примыкает к районам, в которых расположены крупнейшие месторождения углеводородов Восточной Сибири (например, Ковыктинское газовое месторождение), и рассматривается как перспективная на углеводороды.

Основной задачей работ было построение геоэлектрической модели осадочного чехла северной части Байкитской антеклизы и южной части Курейской синеклизы на основании комплексной интерпретации магнитотеллурических данных с использованием результатов сейсморазведки МОГТ, бурения, каротажа, изучения потенциальных полей, а также выявление аномалий электропроводности, связанных с улучшением коллекторских свойств в нижнепалеозойских, вендских и рифейских отложениях.

Интерпретация данных метода МТЗ проводилась по сети профилей, измерения на которых были выполнены разными коллективами в период с 1999 г. по 2015 г. Длительность регистрации на пунктах составляла около 20 ч, диапазон периодов – от 0.003 до 2000 с. На профиле 2 (рис. 9, а) между скв. Чуньская 120 и скв. Лебяжинская 2 дополнительно с использованием аппаратного комплекса “Импульс-Д” (ООО ГП “СибГеоТех”) были проведены многоразностные измерения методом ЗСБЗ с генераторными петлями 500×500 м и силой тока до 40 А. Это позволило построить трёхмерную модель верхней части разреза до глубины 1.5–2 км и успешно провести коррекцию эффекта статического смещения кривых МТЗ.

Выполненный по фазовому тензору [Booker, 2014] анализ размерности модели показал возможность использования двумерной инверсии по выделенным квазипродольным и квазипоперечным кривым. На основе анализа имеющейся геолого-геофизической информации было сформировано представление о геоэлектрическом строении площади, выделены сейсмические отражающие горизонты, совпадающие с геоэлектрическими границами. В качестве начального приближения при многоэтапной двумерной инверсии принимались одномерные модели, построенные по квазипродольным кривым с использованием данных сейсморазведки в качестве структурного каркаса.

На рис. 9 приведены результаты комплексной интерпретации данных МТЗ по одному из профилей, а на рис. 10 представлено сопоставление наблюдаемых и расчётных значений квазипродольной (TE) и квазипоперечной (TM) компонент кажущегося сопротивления и фазы импеданса.

В осадочном чехле выделены три основных геоэлектрических комплекса – надсолевой, галогено-карбонатный и подсолевой. Геоэлектрические разрезы, графики и карты геоэлектрических параметров выделенных комплексов, полученные в результате интерпретации данных МТЗ, позволили выявить следующие основные закономерности геоэлектрического строения.

1. Отложения надсолевого комплекса разделяются на несколько геоэлектрических слоёв. Высокоомные слои и объекты хорошо коррелируют с выделенными в скважинах интрузивными телами траппового комплекса. Эти прослеживаемые практически повсеместно высокоомные тела имеют переменную мощность и глубину залегания.

2. Отложения галогенно-карбонатного комплекса в целом имеют высокие сопротивления (сотни Ом·м), но часто в них присутствуют аномально проводящие области, которые могут быть связаны с зонами произошедших при внедрении траппов изменений пород.

3. Подсолевой комплекс представлен вендскими и рифейскими отложениями. Отложения венда неоднородны по сопротивлению. Наблюдается корреляция между увеличением мощности и снижением сопротивления выделяемого геоэлектрического слоя, что связано с увеличением мощности терригенного слоя, содержащего песчаники с высокой пористостью (ванаварская свита). В ряде мест отложения венда имеют низкие сопротивления, что может быть объяснено повышенной трещиноватостью карбонатных пород. Относительно проводящие толщи рифея имеют сопротивление от десятков до первых сотен Ом·м и залегают в двух крупных прогибах субмеридионального простирания – Приенисейском и Ангаро-Котуйском.

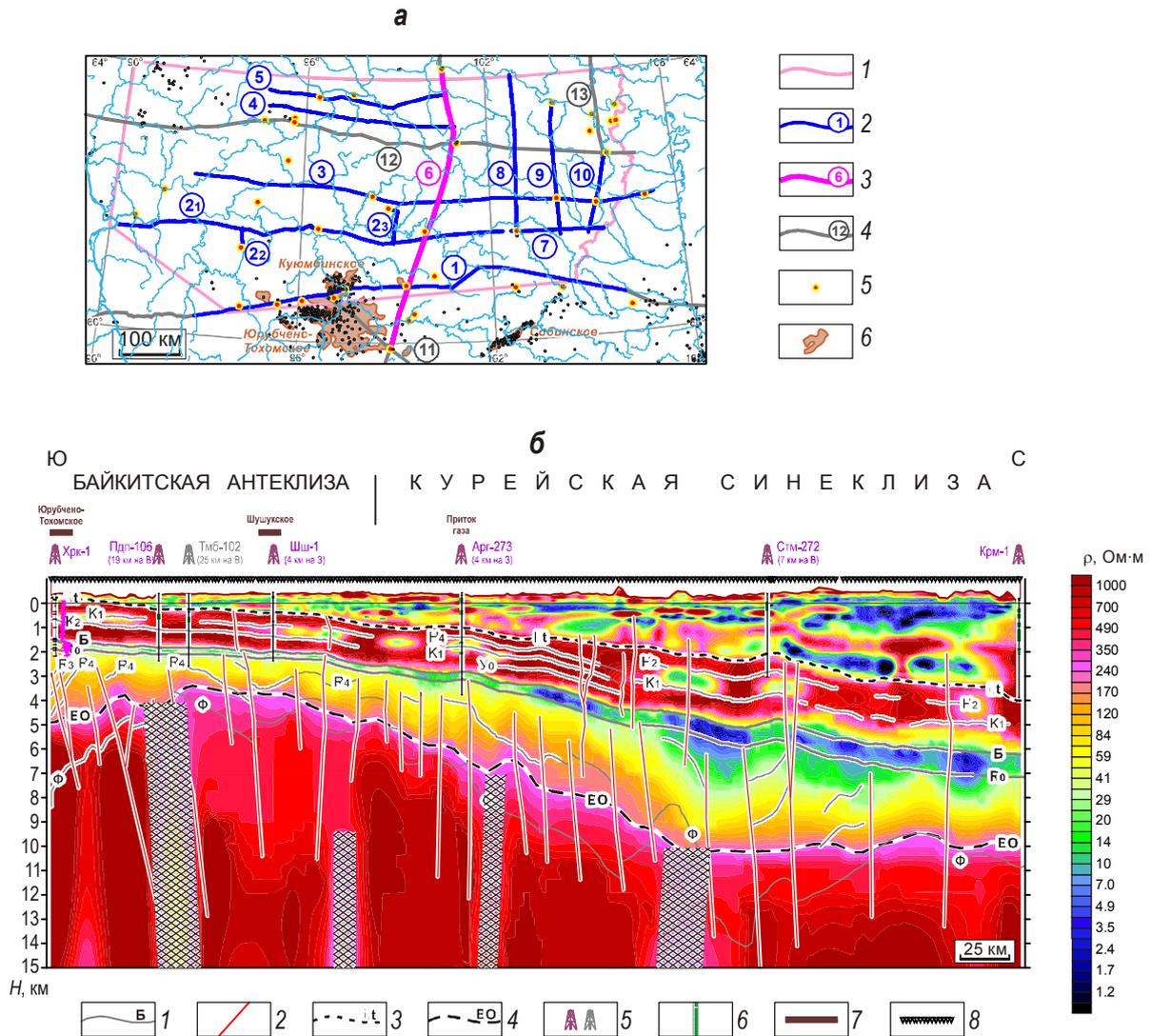


Рис. 9. Восточная Сибирь. Схема расположения профилей в исследуемом районе (а) и результаты интерпретации данных МТЗ по профилю 3-СБ (“Алтай – Северная Земля”) (б)

На а: 1 – границы площади исследований; 2 – профили МОГТ и МТЗ, по которым проводилась комплексная интерпретация; 3 – участок профиля 3-СБ (“Алтай – Северная Земля”); 4 – профили МОГТ; 5 – глубокие скважины, использованные при комплексной интерпретации; 6 – месторождения углеводородов

На б: 1 – отражающие горизонты по данным МОГТ; 2 – зоны тектонических нарушений по данным МОГТ; 3 – кровля галогенно-карбонатного комплекса осадочного чехла (литвинцевской свиты) по данным МОГТ и бурения; 4 – высокоомное основание по данным МТЗ; 5 – положение скважин; 6 – интрузивные породы по данным бурения; 7 – положение месторождений углеводородов; 8 – точки МТЗ

Изменение сопротивления соответствует существующим представлениям о фациальных замещениях и различных условиях осадконакопления в разных частях бассейнов. По данным МТЗ выделена граница высокоомного основания разреза, ниже которого залегают либо кристаллические породы фундамента, либо высокоомные породы рифея с низкой пористостью.

Результаты, полученные в двух разных осадочных бассейнах, перекрытых мощными трапповыми покровами, убедительно свидетельствуют о высокой эффективности применения метода МТЗ в подобных регионах.

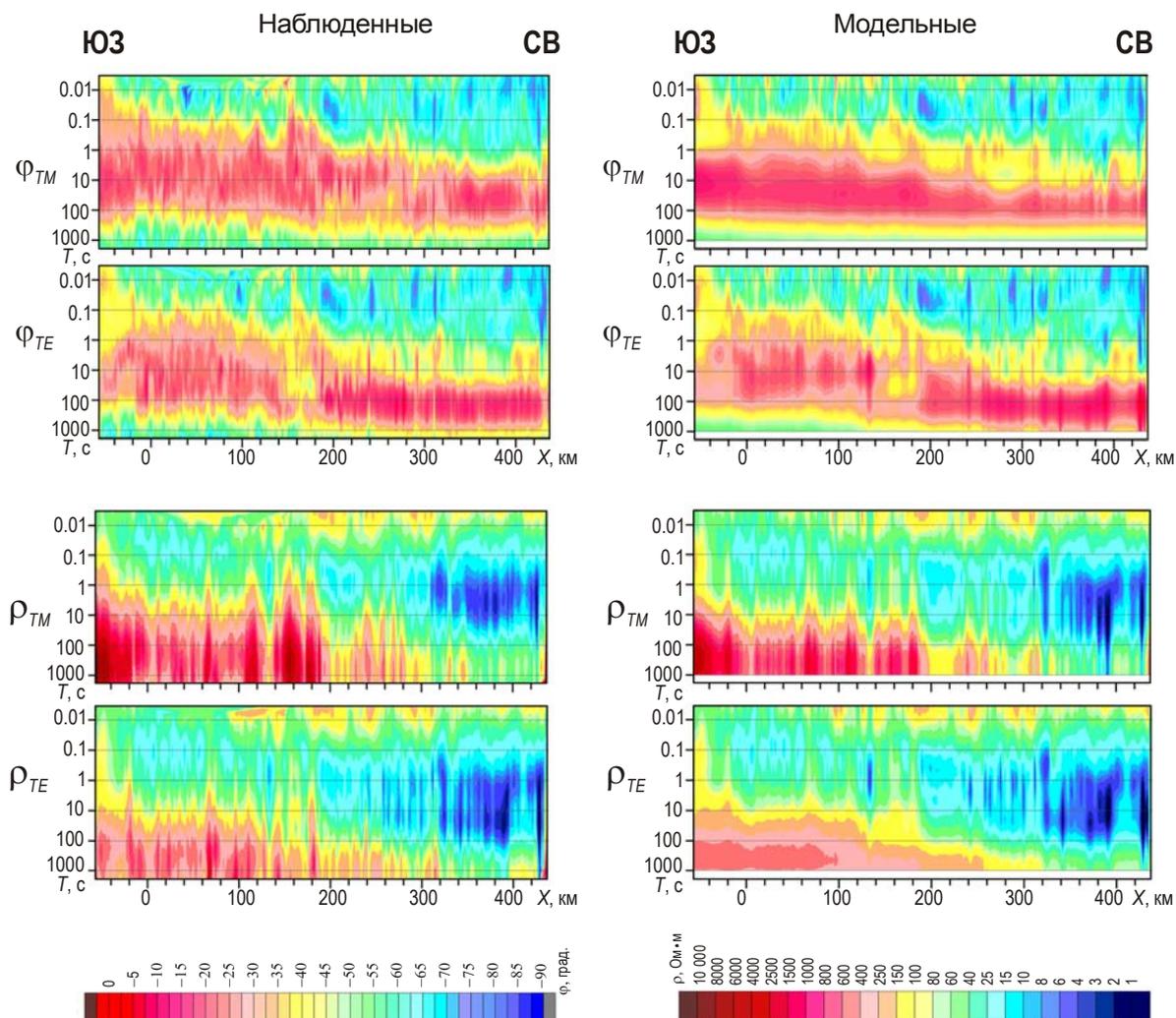


Рис. 10. Сопоставление наблюдаемых (слева) и модельных (справа) данных (псевдорезрезы) для фрагмента профиля 3-СБ (“Алтай – Северная Земля”). Положение профиля см. на рис. 9, а

Применение метода магнитотеллурического зондирования для оценки перспектив нефтегазоносности п-ова Таймыр

С 2005 г. на п-ове Таймыр при участии ООО “Северо-Запад” по сети профилей проводятся финансируемые Федеральным агентством Роснедра комплексные геофизические исследования, основная цель которых – выделение новых перспективных на углеводороды зон для проведения на них детальных геофизических исследований с последующим лицензированием участков. К настоящему времени общая протяженность отработанных профилей составляет ~20 тыс. погонных километров.

Основу геофизического комплекса, использованного при изучении как Горного Таймыра, так и Енисей-Хатангского прогиба, составляют сейсморазведка МОГТ-2D и электроразведка методом МТЗ. При интерпретации привлекаются также архивные материалы грави- и магниторазведки.

В 2005–2009 гг. комплексные геофизические исследования выполнены на западе Горного (или Складчатого) Таймыра, который представляет собой коллизионный складчатый пояс, сформировавшийся в конце палеозоя. В мезозойское время он испытал существенную перестройку, связанную с внутриплатформенными деформациями.

В современном структурном плане Горный Таймыр – это система надвинутых к югу складчатых пластин, сложенных преимущественно палеозойскими отложениями.

Работы методом МТЗ выполнялись вдоль сейсморазведочных профилей с помощью аппаратуры *MTU-5 (Phoenix Geophysics)*. Длительность непрерывной записи составляла 15–25 ч, что позволяло получать данные в частотном диапазоне 0.025–2000 с. Шаг между пунктами измерений на профилях составлял 2–3 км со сгущением вблизи их пересечений с другими профилями. Всего проведены зондирования в 609 пунктах на 11 профилях общей протяжённостью около 1300 км.

Коррекция влияния приповерхностных неоднородностей осуществлялась путём статистической нормализации, которая заключалась в пространственной фильтрации значений модуля тензора импеданса на выбранном периоде. В каждом пункте наблюдений вычислялся коэффициент нормализации, на который умножались амплитудные кривые во всем частотном диапазоне.

Был выполнен анализ размерности полученных оценок импеданса и выделены квазипродольные и квазипоперечные кривые кажущегося сопротивления и фаз импеданса. Для всех профилей применялась многоэтапная двумерная бимодальная инверсия магнитотеллурических данных, результатом которой стали геоэлектрические разрезы до глубины 25 км.

Комплексная интерпретация геоэлектрического и сейсмического разрезов с привлечением данных грави- и магниторазведки позволила существенно уточнить представления о геологическом строении региона, в частности, обнаружить группу крупных, ранее неизвестных геологических объектов, не выходящих на дневную поверхность, и выделить перспективные на углеводороды зоны.

На рис. 11 приведены результаты геофизических исследований по одному из профилей. В средней части профиля выделен крупный Гыдано-Таймырский прогиб, в пределах которого мощность осадочного комплекса достигает 20 км (порядка 10 км палеозойских отложений и столько же верхнерифейских).

Совместный анализ сейсмического и геоэлектрического разрезов показал, что наиболее крупные аномалии сейсмического волнового поля совпадают с аномалиями удельного электрического сопротивления; с учётом палеореконструкций можно предположить, что, вероятно, эти аномалии отображают рифовые тела и проявления соляной тектоники (рис. 12).

Установлено, что чётко оконтуренные на геоэлектрическом разрезе высокоомные зоны соответствуют участкам резкой потери корреляции отражающих горизонтов на сейсмическом. При этом в одном случае рассматриваемым аномалиям соответствуют локальные минимумы гравитационного поля, что позволило связывать их с ангидритовыми телами пониженной плотности (соляные купола), в другом – локальные максимумы, увязываемые с наличием плотных карбонатных отложений (риффы).

Магнитотеллурические зондирования занимают важное место в комплексе геофизических методов, применяемых для изучения Горного Таймыра. Именно результаты МТЗ дали возможность создать обобщённый литологический прогноз фанерозойского разреза, уточнить положение подошвы трапповой толщи и юрско-меловых отложений, выделить “слепые” интрузивные тела в верхней части разреза, сделать важные заключения о нефтегазоносности изучаемого разреза, наметить стратегию дальнейших глубинных исследований региона. Применение метода МТЗ позволило говорить, в частности, о наличии в разрезе принципиально новых для региона крупными потенциально нефтегазоносных структур.

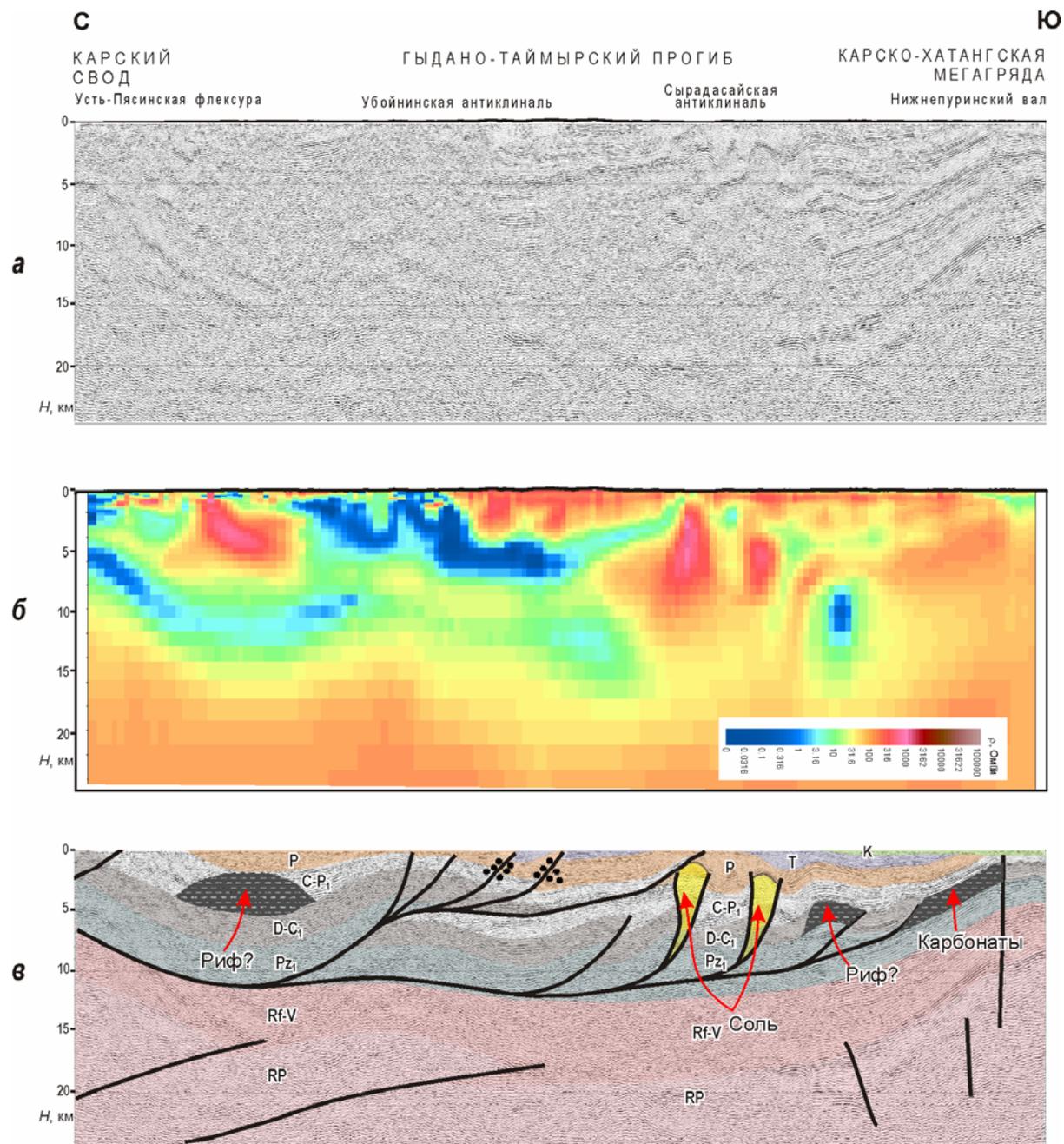


Рис. 11. Сейсмический (а), геоэлектрический (а) и итоговый геолого-геофизический (в) разрезы. Черными линиями на в показаны выделенные разломы

В 2014–2015 гг. геофизические исследования методами МОГТ-2D и МТЗ проводились на западе Енисей-Хатангского регионального прогиба. На правом берегу Енисея было отработано пять профилей, закрывающих “белое пятно” на карте изученности западной части п-ова Таймыр (Новотаймырская площадь). Профили пересекли ряд известных нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений. Расстояние между пунктами наблюдения составляло 500 м, что позволило повысить детальность полученных геоэлектрических разрезов.

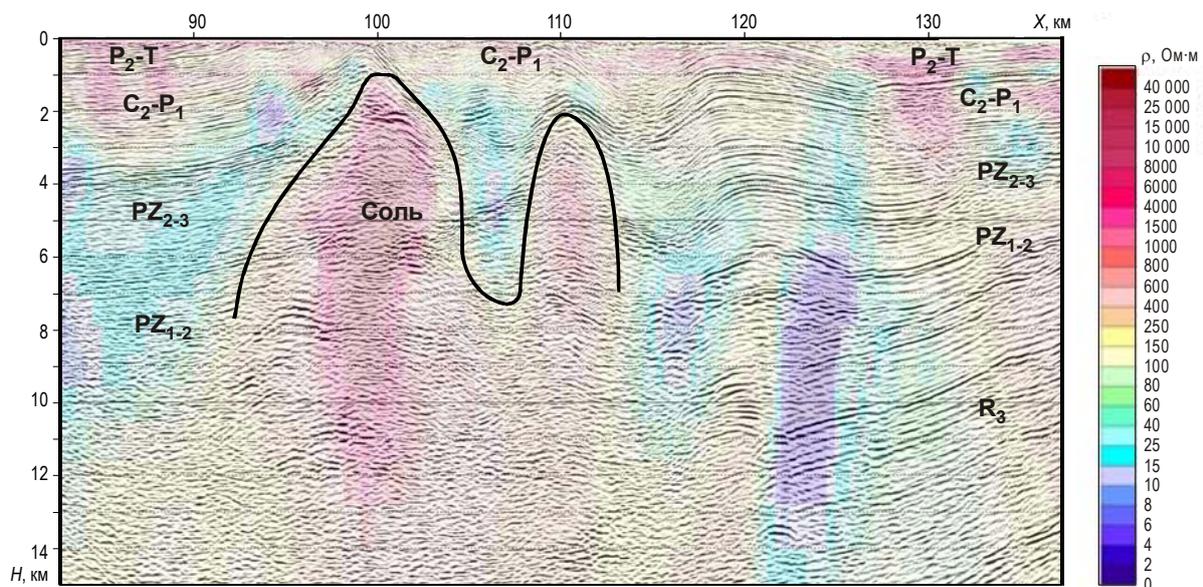


Рис. 12. Пример выделения соляных куполов по геоэлектрическому и сейсмическому разрезам. Показана кровля выделенных соляных структур

На рис. 13 приведён геоэлектрический разрез для одного из профилей и его геологическая интерпретация. В северной части профиль пересекает Байкаловское нефтегазоконденсатное месторождение, в центральной – Пайяхское нефтяное месторождение, в южной – Муксухинскую структуру. В последней на момент проведения описываемых геофизических исследований испытания на нефтегазоносность ещё не были проведены.

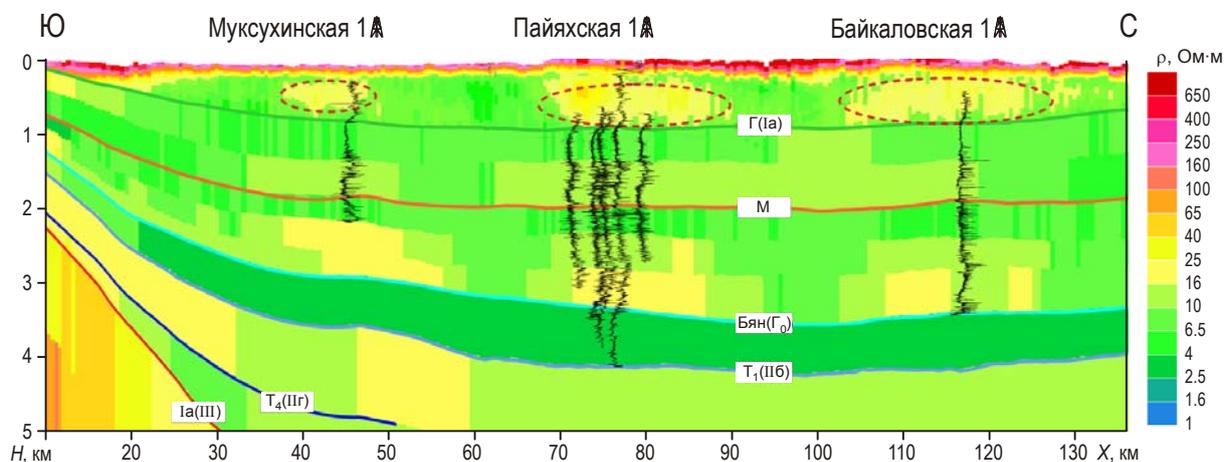


Рис. 13. Геоэлектрический разрез по профилю на Новотаймырской площади и его геологическая интерпретация. Красные штриховые овалы – границы выявленных зон повышенного сопротивления (см. текст). Из [Афанасенков и др., 2015] с изменениями

Важнейший результат исследований – выделение в интервале глубин 200–700 м аномалий повышенного сопротивления над известными месторождениями и над Муксухинской структурой. Границы этих аномальных зон обозначены на рис. 13 красными штриховыми овалами. Если сопротивление вмещающих пород составляет 10–15 Ом·м, то в выявленных аномалиях оно достигает 35–40 Ом·м. Зоны повышенного сопротивления

подтверждаются данными электрического каротажа (каротажные кривые вынесены на рис. 13).

Анализируя природу выявленных аномалий сопротивления, можно предположить, что наиболее вероятным объяснением их возникновения является скопление газогидратов (метана) под покрывкой из многолетнемерзлых пород, залегающих в приповерхностном слое. Подобные скопления могут образовываться над месторождениями углеводородов в зоне стабильности газогидратов на глубинах 200–800 м за счёт вертикальной миграции летучих углеводородов по зонам трещиноватости [Афансенков, Волков, Яковлев, 2015]. Если эта гипотеза подтвердится, то существование зон повышенного сопротивления на глубинах 400–800 м может рассматриваться как новый поисковый признак, что подтверждает эффективность применения метода МТЗ при поисках и разведке месторождений углеводородов в условиях существования многолетнемерзлых пород.

Выводы и направления развития метода

1. Магнитотеллурические зондирования являются эффективным методом изучения геологического строения осадочных бассейнов. Они широко применяются при региональных исследованиях, поисках и разведке месторождения нефти и газа, а также при решении гидрогеологических и геотермальных задач во многих странах мира.

2. Важнейшее преимущество метода – широкий диапазон исследуемых глубин и возможность оценки петро- и гидрофизических характеристик осадочных пород.

3. Магнитотеллурические исследования осадочных бассейнов имеют ряд отличий от глубинных исследований земной коры и верхней мантии – меньшая глубинность (от десятков метров до 10–20 км) и, соответственно, более короткопериодный диапазон (от 0.0025 до 1000 с), более плотная сеть наблюдений с шагом по профилям от 50–100 м до 2 км.

4. Особенно эффективно применение метода МТЗ в областях распространения базальтовых траппов и солянокупольной тектоники, а также в складчатых поясах.

Дальнейшее развитие метода требует решения важнейших задач, среди которых:

– расширение частотного диапазона измерений в сторону высоких частот для повышения эффективности учёта влияния приповерхностных искажений и повышения достоверности интерпретации;

– снижение себестоимости исследований с помощью использования многоканальных автономных МТ станций;

– дальнейшее развитие методики измерений и методов многоточечной робастной обработки данных с целью повышения помехоустойчивости метода;

– развитие технологий площадных трёхмерных исследований и оптимальное сочетание трёхмерного подхода с традиционными одно- и двумерными подходами;

– развитие метода инверсии с ограничениями и совместной инверсии данных МТЗ и других геофизических методов (сейсмических, гравиразведочных, ГИС).

Благодарности

Авторы признательны Национальному нефтегазовому агентству Бразилии за любезное разрешение на публикацию результатов магнитотеллурических исследований в бассейне Параны на юго-востоке Бразилии и благодарны рецензентам за их полезные замечания и комментарии.

Работа выполнена при организационной и финансовой поддержке ООО “Северо-Запад”, Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-05-00791-а) и Госзаказа № 149-2014-0031.

Литература

- Афанасенков А.П., Волков Р.П., Яковлев Д.В. Аномалии повышенного электрического сопротивления под слоем многолетнемерзлых пород – новый поисковый признак залежей углеводородов // Геология нефти и газа. 2015. № 6. С.40–51.
- Безрук И.А., Бердичевский М.Н., Ключкин В.Н., Куликов А.В. Применение теории случайных функций к анализу магнитотеллурического поля // Прикладная геофизика. 1964. № 39. С.75–90.
- Бердичевский М.Н. Электрическая разведка методом теллурических токов. М.: Гостоптехиздат, 1960. 238 с.
- Бердичевский М.Н. Электрическая разведка методом магнитотеллурического профилирования. М.: Недра, 1968. 255 с.
- Гажула С.В. Особенности траппового магматизма в связи с условиями нефтегазоносности Сибирской платформы // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2008. Т. 3, № 1. С.1–8.
- Дахнов В.Н. Каротаж скважин. Интерпретация каротажных диаграмм. М.: Гостоптехиздат, 1941. 498 с.
- Дмитриев В.И., Яковлев А.Г., Голубцова Н.С., Пушкарев П.Ю., Куликов В.А., Хмелевской В.К., Шустов Н.Л. Магнитотеллурический метод и научная школа геофизиков МГУ // Геофизика в МГУ. Вчера. Сегодня. Завтра. 1944–2014: Сборник трудов научной конференции, посвящённой 70-летию кафедры геофизики в Московском университете. М.: Сампринт, 2014. С.80–98.
- Жамалетдинов А.А. О флюидной природе промежуточных проводящих слоев в земной коре по результатам электромагнитных зондирований и каротажа сверхглубоких скважин // Физика Земли. 2011. № 2. С.53–63.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И. Внутриплитовый вулканизм и его значение для понимания процессов в мантии Земли // Геотектоника. 1983. № 1. С.28–45.
- Рыжов А.А., Судоплатов А.Д. Расчёт удельной электропроводности песчано-глинистых пород и использование функциональных зависимостей при решении гидрогеологических задач // Научно-технические достижения и передовой опыт в области геологии и разведки недр. М., 1990. С.27–41.
- Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики: учебник для вузов по направлению “Геология”. 2-е изд. М.: Изд-во Книжный дом университет, 2005. 559 с.
- Aleksanova E.D., Alekseev D.A., Suleimanov A.K., Yakovlev A.G. Magnetotelluric studies in salt-dome tectonic settings in the Pre-Caspian depression // First Break. 2009. V. 27, N 3. P.105–109.
- Archie G.E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics // Petroleum Transactions of AIME. 1942. V. 146. P.54–62.
- Berdichevsky M.N., Bubnov V., Aleksanova E., Alekseev D., Yakovlev A., Yakovlev D. Magnetotelluric studies in Russia: Regional-scale surveys and hydrocarbon exploration // Methods in Geochemistry and Geophysics, Electromagnetic Sounding of the Earth’s Interior: Theory, Modeling, Practice (second edition) / Ed. V.V. Spichak. Elsevier, 2015. P.379–401.
- Bedrosian P.A. MT+, Integrating Magnetotellurics to Determine Earth Structure, Physical State, and Processes // Surv. Geophys. 2007. V. 28. P.121–16.
- Booker J.R. The Magnetotelluric Phase Tensor: A Critical Review // Surv. Geophys. 2014. V. 35. P.7–40.
- Frank H.T., Gomes M.E.B., Formoso M.L.L. Review of the areal extent and the volume of the Serra Geral Formation, Parana Basin, South America // Pesquisas Geocikncias. 2009. V. 36, N 1. P.49–57.
- Haber E., Gazit H.M. Model fusion and joint inversion // Surv. Geophys. 2013. V. 34. P.675–695.

- Hudec M., Jackson M.* Terra Infirma: Understanding Salt Tectonics // *Earth Sci. Rev.* 2007. V. 82. P.1–28.
- 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 Planet. Sci. Lett.* 2009. V. 282. P.47–55.
- Kelbert A., Meqbel N., Egbert G.D., Tandon K.* ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data // *Computers & Geosciences.* 2014. V. 66. P.40–53.
- Keller G.* Electrical prospecting for oil // *Quarterly Journal of the Colorado School of Mines.* 1968. V. 63, N 2. P.1–268.
- Korja T.* How is the European Lithosphere Imaged by Magnetotellurics? // *Surv. Geophys.* 2007. V. 28. P.239–272.
- Medina E., Lovatini A., Andreais F.G., Re S., Snyder F.* Simultaneous joint inversion of 3D seismic and magnetotelluric data from Walker Ridge // *First Break.* 2012. V. 30. P.85–88.
- Patro P.B.K., Brasse H., Sarma S.V.S., Harinarayana T.* Electrical structure of the crust below the Deccan Flood Basalts (India), inferred from magnetotelluric soundings // *Geophys. J. Int.* 2005. V. 163, N 3. P.931–943.
- Patro P.B.K.* MT studies for petroleum and geothermal resources: Examples with emphasis on Asian region // *Surv. Geophys.* 2017 (in press).
- Pedersen L.B., Zhang P., Rasmussen T.* Electrical conductivity structure around the Gravberg well // *Deep Drilling in Crystalline Bedrock. V. 1. The Deep Gass Drilling in the Siljan Impact structure, Sweden and Astroblemes.* 1988. P.95–103.
- Piccirillo E.M., Bellieni G., Cavazzini G., Comin-Chiaramonti P., Pertini R., Melfi A.J., Pinese J.P.P., Zantadeschi P., De Min A.* Lower Cretaceous tholeiitic dyke swarms from the Ponta Grossa Arch (southeast Brazil): Petrology, Sr-Ndisotopes and genetic relationships with the Parana flood volcanics // *Chemical Geology.* 1990. V. 89. P.19–48.
- Raposo M.I.B., Ernesto M.* Paleomagnetism of the dykes of the Ponta Grossa // *Arch. Bol. IG-USP, Publ. Esp.* 1991. V. 10. P.85–89.
- Saunders A.D., Storey M., Kent R.W., Norry M.J.* Consequences of plume–lithosphere interactions // *Magmatism and the Causes of Continental Breakup / Eds. B.C. Storey, T. Alabaster, R.J. Pankhurst.* London: Geological Society of London Special Publication, 1992. V. 68. P.41–60.
- Siripunvaraporn W.* Three-Dimensional Magnetotelluric Inversion: An Introductory Guide for Developers and Users // *Surv. Geophys.* 2012. V. 33. P.5–27.
- Smirnov M.Yu., Egbert G.B.* Robust principal component analysis of electromagnetic arrays with missing data // *Geophys. J. Int.* 2012. V. 190, N 3. P.1423–1438.
- Strack M.A., Soyer W., Hallinan S., Watts M.D.* Distortion effects on magnetotelluric sounding data investigated by 3D modelling of high-resolution topography // *GRC Transactions.* 2013. V. 37. P.521–528.
- Vozoff K.* The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins // *Geophysics.* 1972. V. 37. P.98–141.
- Yoshino T.* Laboratory electrical conductivity measurement of mantle minerals // *Surv. Geophys.* 2010. V. 31. P.163–206.

Сведения об авторах

ПАЛЬШИН Николай Алексеевич – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. 117997, Москва, Нахимовский просп., д. 36. Тел.: +7(499) 124-79-56. E-mail: palshin@ocean.ru

АЛЕКСАНОВА Елена Дмитриевна – ведущий геофизик, ООО “Северо-Запад”. 142784, Румянцево, Бизнес-парк “Румянцево”, корп. 1А, оф. 412А. Тел.: +7(495) 922-28-36. E-mail: alexlen@inbox.ru

ЯКОВЛЕВ Андрей Георгиевич – кандидат физико-математических наук, доцент, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. 119899, Москва, Воробьевы Горы. Тел.: +7(495) 939-2970. E-mail: mail@nw-geophysics.com

ЯКОВЛЕВ Денис Васильевич – ведущий геофизик, ООО “Северо-Запад”, 142784, Румянцево, Бизнес-парк “Румянцево”, корп. 1А, оф. 412А. Тел.: +7(495) 922-28-36. E-mail: nw.yakovlev@gmail.com

БРЕВЕС ВИАНА Роберто – геолог, геофизик, Ласа Проспексоис Лтд. Проспект Айртон Сены, 2541, проезд F1, кор. 04, Аэропорт Якапапагуа, Барра де Тижук, Рио де Жанейро, Бразилия, 22775-002. Тел.: +55 21 3501 7700. E-mail: mailto:brevesvianna.vianna2@gmail.com

EXPERIENCE AND PROSPECTS OF MAGNETOTELLURIC SOUNDING APPLICATIONS IN SEDIMENTARY BASINS

N.A. Palshin¹, E.D. Aleksanova², A.G. Yakovlev³, D.V. Yakovlev², R. Breves Vianna⁴

¹ P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

² “Nord-West”, Ltd., Moscow, Russia

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁴ LASA Prospecções S.A., Rio de Janeiro, Brazil

Abstract. Studies of sedimentary basins using the magnetotelluric (MT) sounding method have been carried out for more than 50 years. Over the past fifteen years the number of MT surveys increased manifold, which prompted the development of MT data acquisition technology, inversion and interpretation methods and the efficiency of the method achieved a new level. MT sounding method have become in high demand in the market of geophysical services. The application of MT sounding is especially effective in the regions with basalt traps, salt tectonics and folded belts, i.e. in the areas where seismic methods are confronted with certain difficulties. The paper deals with special features of sedimentary rocks electrical conductivity and its dependency on petrophysical and hydrophysical parameters: clay content, porosity, fluid salinity and temperature. Specific requirements to MT studies technology in sedimentary basins are formulated: wider period range in use and significantly smaller distances between acquisition sites to compare with deep academic studies. MT analysis and interpretation technology includes: dimensionality analysis, static shift correction, multistage data inversion and geological interpretation of resistivity structure. The use of a priori geological and geophysical information is essential.

The results of a geological interpretation of MT sounding data obtained in the Parana Basin and in the Eastern Siberia (the biggest inland areas of basalt traps) are given as examples. MT data interpretation enables to study structure of sedimentary basins in details and to identify main geological formations. Also the results of MT investigations in the Taimyr, where several new objects with good prospect for oil and gas were revealed and resistivity anomalies probably related to gashydrates were singled out, are presented. The basic directions of the further development of the MT method to enhance the efficiency of studying sedimentary basins were formulated.

Keywords: magnetotelluric sounding, sedimentary basin, basalt traps, salt dome tectonics, fold belts, reservoir and sealing properties, joint and constraint inversion.

References

- Afanasenkov A.P., Volkov R.P. and Yakovlev D.V., High electric resistivity anomaly under permafrost sediment layer as a new prospecting indicator for hydrocarbon prospecting. *Oil and Gas Geology*, 2015, no 6, pp. 40-51.
- Aleksanova, E.D., Alekseev, D.A., Suleimanov, A.K., and Yakovlev, A.G., Magnetotelluric studies in salt-dome tectonic settings in the Pre-Caspian depression, *First Break*, 2009, vol. 7, no. 3, pp. 105-109.
- Archie, G.E., The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Petroleum Transactions of AIME*, 1942, vol. 146, pp. 54-62.
- Bezruk, I.A., Berdichevsky, M.N., Klyuchkin, V.N., Kulikov, A.V., Application of theory of stochastic functions to magnetotelluric field analysis, *Prikladnaya geofizika (Applied Geophysics)*, 1964, no 39, pp. 75-90.

- Berdichevsky, M.N., Electrical prospecting using telluric current method, Gostoptekhizdat, 1960.
- Berdichevsky, M.N., Electrical prospecting using magnetotelluric profiling method, Nedra, 1968.
- Berdichevsky, M.N., Bubnov, V., Aleksanova, E., Alekseev, D., Yakovlev, A. and Yakovlev, D., Magnetotelluric studies in Russia: Regional-scale surveys and hydrocarbon exploration, *Methods in Geochemistry and Geophysics, Electromagnetic Sounding of the Earth's Interior: Theory, Modeling, Practice (second edition)*, Spichak, V.V. (Ed.), 2015. Elsevier, pp. 379-401.
- Bedrosian, P.A., MT+, Integrating Magnetotellurics to Determine Earth Structure, Physical State, and Processes, *Surv. Geophys.*, 2007, vol. 28, pp. 121-16.
- Booker, J.R., The Magnetotelluric Phase Tensor: A Critical Review, *Surv. Geophys.*, 2014, vol. 35, pp. 7-40.
- Dakhnov, V.N. *Well Logging. Interpretation of well logs*, Moscow: Gostoptekhizdat, 1941.
- Dmitriev, V.I., Yakovlev, A.G., Golubtsova, N.S., Pushkarev, P.Yu., Kulikov, V.A., Khmelevskoy, V.K. and Shustov, N.L., Magnetotelluric method and scientific school of geophysicists of MSU, *Geofizika MGU. Vchera. Segodnya. Zavtra. 1944-2014*. (Geophysics in MSU. Yesterday. Today. Tomorrow. 1944–2014), Proceedings of Scientific Conference devoted to 70 year anniversary of Geophysical Department in MSU, Samprint, Moscow, 2014, pp. 80-98.
- Frank, H.T., Gomes, M.E.B. and Formoso, M.L.L. Review of the areal extent and the volume of the Serra Geral Formation, Parana Basin, South America, *Pesquisasem Geocikncias*, 2009, vol. 36 (1), pp. 49-57.
- Gazhula, S.V., Peculiarities of trap magmatism in relation with conditions of hydrocarbon prospects in Siberian Platform, *Neftegazovaa Geologia: Teoria i Praktika (Oil and Gas geology: Theory and Practice)*, 2008. vol. 3, no 1. pp. 1-8.
- Haber, E. and Gazit, H. M., Model fusion and joint inversion, *Surv. Geophys.*, 2013, vol. 34, pp. 675–695.
- Hudec, M. and Jackson, M., Terra Infirma: Understanding Salt Tectonics, *Earth Sci. Rev.*, 2007, vol. 82, pp. 1–28.
- 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 Planet. Sci. Letters*, 2009, vol. 282, pp. 47-55.
- Kelbert, A., Meqbel, N., Egbert, G. D. and Tandon, K., ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data, *Computers & Geosciences*, 2014, vol. 66, pp. 40-53.
- Keller, G., Electrical prospecting for oil, *Quarterly Journal of the Colorado School of Mines*, 1968, vol. 63, no 2, pp. 1-268.
- Khain, V.E. and Lomize, M.G., *Geotektonika s osnovami geodinamiki (Geotectonics and basics in geodynamics)*, 2d edition, M.: KDU, 2005. 560 p.
- Korja, T., How is the European Lithosphere Imaged by Magnetotellurics? *Surv. Geophys.*, 2007, vol. 28, pp. 239-272.
- Medina, E., Lovatini, A., Andreais, F.G., Re, S. and Snyder, F., Simultaneous joint inversion of 3D seismic and magnetotelluric data from Walker Ridge, *First Break*, 2012, vol. 30, pp. 85-88.
- Patro, P.B.K., Brasse, H., Sarma, S.V.S. and Harinarayana, T., Electrical structure of the crust below the Deccan Flood Basalts (India), inferred from magnetotelluric soundings, *Geophys. J. Int.*, 2005, vol. 163, no 3, pp. 931-943.
- Patro, P.B.K, MT studies for petroleum and geothermal resources: Examples with emphasis on Asian region, *Survey in Geophysics*, 2017 (in press).
- Pedersen L.B., Zhang P. and Rasmussen, T., Electrical conductivity structure around the Gravberg well, *Deep Drilling in Crystalline Bedrock, V.1. The Deep Gass Drilling in the Siljan Impact structure*, Sweden and Astroblemes, 1988, pp. 95-103.
- Piccirillo, E.M., Bellieni, G., Cavazzini, G., Comin-Chiaramonti, P., Pertini, R., Melfi, A.J., Pinese, J.P.P., Zantadeschi, P., De Min, A. Lower Cretaceous tholeitic dyke swarms from the Ponta Grossa Arch (southeast Brazil): Petrology, Sr-Nd isotopes and genetic relationships with the Parana flood volcanics, *Chemical Geology*, 1990, vol. 89. pp. 19-48.
- Raposo, M.I.B., Ernesto, M., Paleomagnetism of the dykes of the Ponta Grossa, *Arch. Bol. IG-USP, Publ. Esp.*, 1991, vol. 10, pp. 85-89.
- Ryzhov, A.A., Sudoplatov, A.D., Calculation of electrical conductivity of sand-clay rocks and application of functional dependences for solving hydrogeological problems, *Nauchno-tekhicheskie dostizheniya i perezodovoi opyt v oblasti geologii i razdedki neдр* (Scientific and technical achievements and experience in geology and prospecting), Moscow, 1990, pp. 27-41.
- Saunders, A.D., Storey, M., Kent, R.W., Norry, M.J., Consequences of plume–lithosphere interactions, *Magma-tism and the Causes of Continental Breakup*, Storey, B.C., Alabaster, T., Pankhurst, R.J. (Eds.), 1992, vol. 68. Geological Society of London Special Publication, London, pp. 41-60.
- Siripunvaraporn, W., Three-Dimensional Magnetotelluric Inversion: An Introductory Guide for Developers and Users, *Surv. Geophys*, 2012, vol. 33, pp. 5-27.

- Smirnov, M.Yu. and Egbert, G.B., Robust principal component analysis of electromagnetic arrays with missing data, *Geophys. J. Int.*, 2012, vol. 190, no 3, pp. 1423-1438.
- Strack, M.A., Soyer, W., Hallinan, S. and Watts, M.D., Distortion effects on magnetotelluric sounding data investigated by 3D modelling of high-resolution topography, *GRC Transactions*, 2013, vol. 37, pp. 521-528.
- Vozoff, K., The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins, *Geophysics*, 1972, vol. 37, pp. 98-141.
- Yoshino, T., Laboratory electrical conductivity measurement of mantle minerals, *Surv. Geophys.*, 2010, vol. 31, pp. 163-206.
- Zhamaletdinov, A.A., On the fluid nature of intermediate conductive layers in the Earth's crust: Evidence from electromagnetic sounding and super deep well logging, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2011, vol. 47, Issue 2, pp. 127-137.
- Zonenshain, L.P. and Kuzmin, L.P. Intraplate tectonism and its importance for understanding Earth's mantle processes, *Geotektonika* (Geotectonics), 1983, no 1, pp. 28-45.