

УДК 550.370

ОЦЕНКА ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ОДНОМЕРНОГО И ТРЕХМЕРНОГО ПОДХОДОВ К ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ НА ПРИМЕРЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ЮГА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

© 2021 г. И.К. Семинский

*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия
ООО "СИГМА-ГЕО", г. Иркутск, Россия
e-mail: iks@crust.irk.ru*

При интерпретации данных электроразведочного метода зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), существует большая неопределенность, вызванная выбором оптимального подхода к инверсии. Одномерный подход считался классическим, однако, с развитием метода, в частности математического аппарата и вычислительных мощностей, сформировался трехмерный подход, в основе которого лежит представление, что зондируемое пространство по большей части горизонтально-неоднородно и применение одномерного подхода вносит критические неточности при интерпретации данных. Важная часть настоящей статьи – примеры эмпирической оценки эффективности применения одномерного и трехмерного подходов к инверсии данных, полученных методом ЗСБ, применительно к геологическим условиям, типичным для территории юга Сибирской платформы, при решении нефтегазопроисловых задач. Установлено, что, несмотря на универсальность трехмерного моделирования, выбор подхода к инверсии должен осуществляться в каждом случае индивидуально, исходя из размерности исследуемой среды. Для определения граничных уровней размерности среды, которой отвечают данные, полученные методом ЗСБ, проведен математический эксперимент, в ходе которого установлены критерии применения трехмерного подхода к инверсии данных. Указанными критериями являются среднее квадратическое расхождение кривых кажущегося сопротивления, полученных в пределах одной зондирующей установки, более 10 % и невязка одномерной инверсии более 10 %, минимизация которой невозможна в пространстве моделей, определяемых априорными данными. В остальных случаях геологические задачи, стоящие перед методом ЗСБ, успешно решаются посредством одномерного подхода. На основании упомянутых критериев проведен анализ размерности 90 тыс. физических наблюдений, полученных на юге Сибирской платформы, в ходе которого установлено, что применительно к ЗСБ, одномерный подход может рассматриваться как базовый.

Ключевые слова: электропроводность, ЗСБ, инверсия, трехмерное моделирование, юг Сибирской платформы, углеводороды.

Введение

На сегодняшний день метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) – один из наиболее часто применяемых методов электроразведки при решении нефтегазопроисловых задач на юге Сибирской платформы. Изученность указанной территории методом ЗСБ впечатляющая – более 150 тыс. физических наблюдений, причем около 100 тыс. из них получены в последнее десятилетие с помощью цифровых телеметрических станций [Шарлов, Агафонов, Стефаненко, 2010].

Результативность съемки, выполненной методом ЗСБ, на современном этапе развития метода сводится не только к картированию распространения перспективных в нефтегазовом отношении отложений, но и к оценке типа их насыщения, а главное, коллекторских свойств [Поспеев и др., 2018].

Однако с увеличением объемов проводимых методом ЗСБ работ растут и требования, предъявляемые к детальности и достоверности получаемых результатов. Это, в свою очередь, ставит вопрос об эффективности применяемых технологий интерпретации, т.е. выборе подхода, оптимального по трудоемкости и достоверности. Для того чтобы понять масштабность указанной проблемы, рассмотрим принцип ЗСБ и примеры интерпретации данных, зарегистрированных в средах с различным геолого-геоэлектрическим строением. Сразу отметим, что настоящая работа не претендует на подробное рассмотрение методических аспектов процедур интерпретации или же на обзор/сравнение программных продуктов для инверсии полученных методом ЗСБ данных (далее – данных ЗСБ).

Метод исследования

В методе ЗСБ в качестве источников и приемников электромагнитного поля используются квадратные незаземленные петли. Как правило, съемка методом ЗСБ производится с применением многоканальных установок – сигналы становления от одного источника поля регистрируются на нескольких приемниках поля. Принцип зондирования прост – в генераторную петлю (источник электромагнитного поля) подается токовой импульс, порождающий магнитное поле, вследствие затухания которого в зондируемом пространстве индуцируются вихревые токи, распространяющиеся от дневной поверхности в глубину со скоростью пропорциональной удельной электропроводности вмещающей среды. Затухание вихревых токов, в свою очередь, инициирует вторичное магнитное поле, затухание которого регистрируется на зажимах приемных контуров в виде спада электродвижущей силы (ЭДС). Для удобства интерпретации рассчитываются трансформации кривой ЭДС – кривые кажущегося сопротивления $\rho_r(t)$ и кажущейся проводимости $S_r(H_r)$ [Ваньян, 1965; McNeill, 1980].

Если разрез сложен горизонтально залегающими слоями, в поздней стадии вихревые токи в нижнем полупространстве распространяются равномерно. Однако когда вихревые токи достигают геоэлектрической проводящей неоднородности или несогласно залегающих (крутопадающих) слоев, их равномерное распределение нарушается, вследствие чего сигнал ЭДС осложняется влиянием неоднородности. Влияние неоднородности на индукционные переходные характеристики проявляется как их отличие по форме в рамках единой зондирующей установки по принципу: чем ближе зарегистрирована переходная характеристика к неоднородности, тем больше ее искажение [Тригубович, Персова, Соловейчик, 2009].

В случае осложнения данных влиянием неоднородности традиционный одномерный подход к интерпретации данных неэффективен – подбор теоретической кривой, рассчитанной путем решения прямой задачи посредством изменения толщины и сопротивления слоев подбираемой модели, к наблюдаемой (полевой) невозможен при условии соблюдения соответствия подбираемой модели априорной информации для территории исследования [Jang, Kim, 2015]. Тем самым, области, где одномерный подбор не работает, на комплексной геоэлектрической модели обозначаются как зоны осложненной интерпретации, прогноз геоэлектрического строения которых невозможен или, в лучшем варианте, приблизителен. В описанном случае, для учета влияния неоднородности, используется математическое трехмерное моделирование электромагнитных

данных [Luan *et al.*, 2019]. Механизм моделирования, основанный на методе конечных элементов, позволяет учитывать при расчете прямой задачи боковое влияние неоднородных объектов путем аппроксимации аномалиеобразующего тела и слоев вмещающей среды набором простых геометрических объектов с подобными геоэлектрическими характеристиками [Тригубович, Персова, Соловейчик, 2009]. В остальном моделирование осуществляется образом, подобным одномерному – рассчитанная теоретическая кривая подбирается к наблюдаемой (полевой) до достижения оптимальной невязки с учетом соответствия априорной геолого-геоэлектрической модели территории исследования.

Невязкой подбора модели (инверсии) считается среднее квадратическое отклонение рассчитанных теоретических и наблюдаемых (полевых) кривых. Невязка рассчитывается во всем временном диапазоне зарегистрированной кривой. Для южной части Сибирской платформы этот интервал, как правило, составляет от 10 до 300 мс. Важно отметить, что полевые данные подвержены широкому спектру электромагнитных помех (влияние объектов инфраструктуры территории работ, вариации планетарного электромагнитного поля, шумы измерительного каскада аппаратуры и проч.), напрямую влияющему на точность и достоверность измерений. Считается, что наблюдаемая индукционная переходная характеристика подлежит интерпретации до времени, когда отношение сигнал/помеха не ниже значения 2 [Инструкция ..., 1984]. В среднем для рассматриваемой территории указанное соотношение соблюдается до глубин 5–6 км, что делает интерпретацию данных, описывающих осадочный чехол (обычно до 2–3 км) достоверной [Гусейнов, 2015].

Однако, несмотря на то, что трехмерное моделирование исключает грубые интерпретационные ошибки, невязки инверсии, и как следствие, детальность подбора, с его использованием несколько выше, чем при применении одномерного подхода. Также важно отметить необходимость обеспечения для трехмерной интерпретации значительно больших, по сравнению с одномерным подходом, вычислительных мощностей.

Иными словами, в целях оптимизации интерпретации необходимо предложить способ оценки эффективности одномерного и трехмерного подходов к инверсии данных в средах с различным геологическим строением, позволяющий численно определить области применимости одномерного и трехмерного подходов к интерпретации данных ЗСБ.

Интерпретационные примеры

В качестве примеров использования одномерного и трехмерного подходов к интерпретации данных на территории юга Сибирской платформы рассмотрим участки с горизонтально-однородным и горизонтально-неоднородным геологическим строением, а также оценим прирост геологической информации в первом и во втором случаях.

Осадочный чехол Сибирской платформы в геоэлектрическом отношении делится на три комплекса: верхний проводящий (надсолевой) с сопротивлением от десятков до сотен ом-метров, средний высокоомный (карбонатно-галогенный) и нижний проводящий (подсолевой) с удельным электрическим сопротивлением (УЭС) от единиц до первых сотен ом-метров. Для большей части территории толщина осадочного слоя составляет около 2–3 км. УЭС пород кристаллического фундамента составляет многие сотни ом-метров.

В пределах осадочного обрамления платформы наименьшим значением УЭС (10–100 Ом·м) обладают осадки в меловых и кайнозойских впадинах. Кристаллические породы высокоомны (300–5000 Ом·м). В пределах аномально проводящих зон в

осадочном чехле и кристаллическом основании сопротивление падает до десятых и сотых долей ом-метра, что может быть обусловлено наличием ионно-проводящих минерализованных рассолов, заполняющих зоны повышенной трещиноватости, а также электронно-проводящих минералов (графита, сульфидов и т.п.).

Осадочный чехол платформы в своей наиболее древней части сложен верхнепротерозойскими (среднерифейско-вендскими) образованиями. Они выполняют Присяянский, Прибайкальский прогибы, а также известны во внутреннем поле Иркутского амфитеатра [Мац и др., 2001].

Наибольшая вероятность наличия углеводородного насыщения ассоциируется с подсолевой частью разреза, точнее с породами мотской свиты (или ее возрастными аналогами) и рифейскими отложениями. УЭС целевых горизонтов зависит от степени обводненности, например, УЭС мотской свиты, вмещающей водонасыщенный коллектор составляет около 20–40 Ом·м, углеводородонасыщенный – примерно 40–60 Ом·м [Поспеев и др., 2018]. Однако оценка граничных уровней УЭС, соответствующих разным типам насыщения, должна производиться индивидуально для конкретного участка работ, с использованием анализа данных бурения и петрофизических расчетов.

Значительные запасы углеводородов связывают с тремя крупными структурными элементами строения юга Сибирской платформы: Непским и Камовским сводами, а также Ангаро-Ленской ступенью.

Участок с горизонтально-неоднородным геологическим строением

Высокоплотная съемка методом ЗСБ была выполнена на “Расчетном” месторождении углеводородного сырья, расположенном в южной части Непского свода Сибирской платформы. Промышленная нефтегазоносность территории связана с подсолевыми горизонтами песчаников базальной ярактинской пачки в мотской свите кембрия.

Осадочный чехол представлен породами вендского и кембрийского возрастов, перекрытыми маломощными юрскими и четвертичными отложениями. Главным поисковым объектом являются терригенные отложения кембрия. В границах месторождения находится несколько скважин глубокого бурения, давших притоки воды и углеводородов из продуктивного интервала.

Изначально для территории исследования была проведена одномерная инверсия данных, показавшая высокую эффективность в западной части территории исследования – невязки инверсии не превышали 2 %. Однако, в восточной части участка ввиду влияния трехмерной неоднородности, предположительно вала, при помощи одномерной инверсии не удалось добиться невязок инверсии менее 12–20 %. Схема распределения удельного электрического сопротивления, построенная для перспективного в отношении локализации запасов углеводородов ярактинского горизонта, представлена на рис. 1, *слева*. Можно видеть, что использование одномерного подхода позволяет определить УЭС целевого интервала отложений в западной части участка, в восточной же части подбор моделей невозможен.

На втором этапе интерпретации проводилась трехмерная инверсия в программном комплексе *EMDataProcessor* [Тригубович и др., 2015], при которой аномалиеобразующий объект и слои вмещающей модели аппроксимировались набором эквивалентными им по геоэлектрическим характеристикам геометрическими объектами – кубами и параллелепипедами. Геометрические и геоэлектрические характеристики подбираемого объекта выбирались таким образом, чтобы принципиально аппроксимировать аномальный вклад в данные, при этом не создав противоречия между подобранной и типичной для участка работ моделями. Используя трехмерную интерпретацию для осложненного

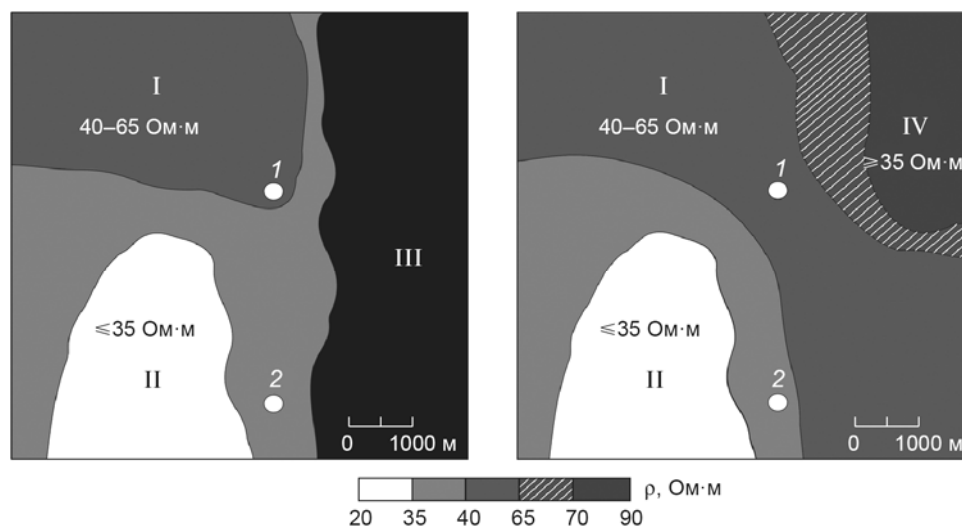


Рис. 1. Схемы распределения удельного электрического сопротивления (ρ , Ом·м) отложений мотской свиты по результатам одномерной (слева) и трехмерной (справа) инверсии. I–IV – выделенные зоны: I – углеводороды, II – вода, III – зона осложненной интерпретации, IV – неколлектор; 1, 2 – скважины глубокого бурения, давшие притоки углеводородов (1), углеводородов и воды (2)

Fig. 1. Schemes of the distribution of electrical resistivity (ρ , Ohm·m) of the motskaya suite formations based on the results of one-dimensional (on the left) and three-dimensional (on the right) inversion. I–IV – highlighted zones: I – hydrocarbons, II – water, III – zone of complicated interpretation, IV – non-reservoir; 1, 2 – deep drilling wells that produced inflows of hydrocarbons (1), hydrocarbons and water (2)

участка удалось снизить невязки инверсии (по сравнению с одномерным подходом) до 5–8 %. На схеме распределения УЭС видно, что после применения трехмерного подхода влияние трехмерной неоднородности (вала) на данные минимизировано, что дало возможность проследить область распространения коллекторов вблизи трехмерной неоднородности (см. рис. 1, справа).

В результате моделирования получена геолого-геоэлектрическая модель “Расчетного” месторождения, влияние трехмерной геоэлектрической неоднородности учтено, что позволило оценить потенциал углеводородного насыщения подсолевой части разреза. Оценка типов насыщения по данным УЭС в рассматриваемом примере произведена на основе анализа данных бурения и расчета петрофизической зависимости Дахнова-Арчи, которая связывает УЭС коллектора и его параметры (коэффициент пористости (K_p) и коэффициент водонасыщенности (K_v)) [Добрынин, Вендельштейн, Кожевников, 2004].

На карте распределения продольного сопротивления мотской свиты в юго-западной части исследуемой территории выделяется область распространения предположительно водонасыщенного коллектора с типичным УЭС ≤ 35 Ом·м.

В северном и восточном направлениях насыщение коллектора, вероятнее всего, меняется на преимущественно углеводородное с УЭС мотской свиты 40–65 Ом·м и подтвержденное притоками из скважин 1 и 2 (см. рис. 1). К областям ухудшенных коллекторских свойств и зонам неколлектора относятся области со значениями УЭС ≥ 70 Ом·м, располагающиеся в северо-восточной части рассматриваемой территории, в районе залегания вала, который играет роль тектонического ограничителя коллектора.

Важно отметить, что в данном описании геоэлектрических свойств продуктивного горизонта речь идет не об УЭС самого тонкого коллектора, а об УЭС толщи, вмещающей коллектор [Seminskiy et al., 2016].

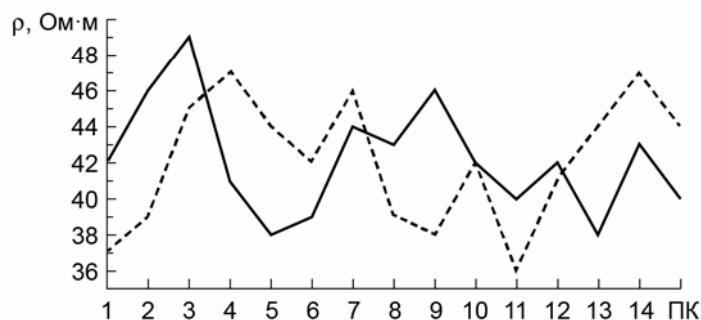
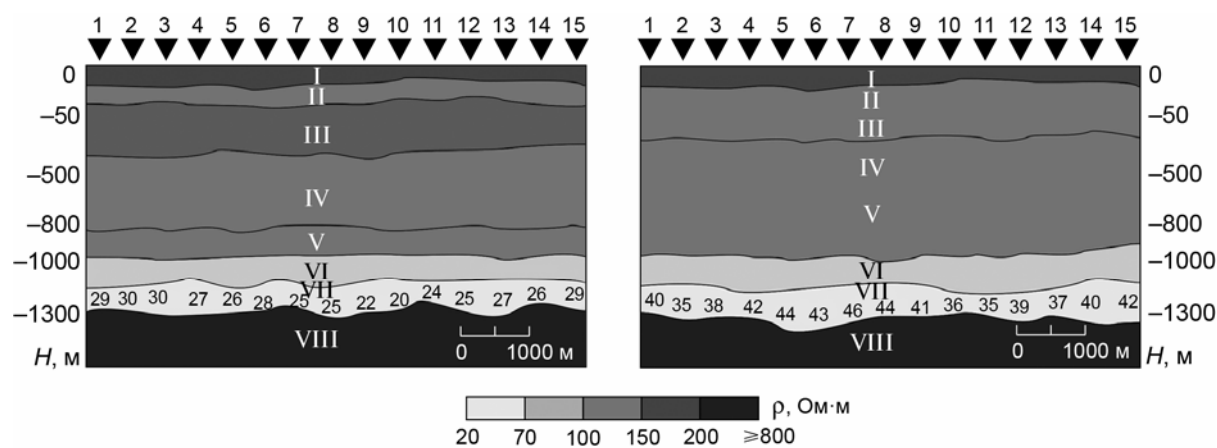
Участок с горизонтально-однородным геологическим строением

В качестве еще одного интерпретационного примера рассмотрим результаты работ на месторождении “Расчетное-2”, расположенном на Непском своде.

Промышленные притоки нефти и газа в данном районе связаны с отложениями венд-нижнекембрийского подсолевого терригенно-карбонатного и галогенно-карбонатного нефтегазонасных комплексов. Наибольшей продуктивностью в отношении локализации углеводородного сырья отмечается нижнемотская свита. В составе свиты выделяется ванаварский продуктивный горизонт, сложенный песчаниками с прослоями аргиллитов, алевролитов и в редких случаях гравелитов. Образование коллекторов контролируется постседиментационными процессами, которые обусловлены эпигенетической карбонатизацией, сульфидизацией, регенерацией и особенно засолением. Упомянутые процессы нарушили связь между литологическими и физическими параметрами.

Результаты одномерной и трехмерной инверсии, проведенной для данных, которые получены на одном и том же профиле, представлены на рис. 2. Невязка одномерной интерпретации на территории работ составила от 0.5–2 % (рис. 2, *вверху слева*). По результатам трехмерной интерпретации невязки подбора моделей составили 3–5 % (см. рис. 2, *справа*).

Можно видеть, что между результатами одномерного и трехмерного подходов к инверсии данных значительных отличий не выявлено: УЭС нижнемотской свиты, включающей горизонт-коллектор, варьирует от 35 до 50 Ом·м (см. рис. 2, *внизу*).



Принципиальная схожесть полученных результатов сводится к восстановленному по результатам инверсий уровню УЭС свиты, соответствующему априорным представлениям о строении территории работ, а также подтверждающемуся данными геотомографической системы и петрофизическими расчетами.

По результатам одномерной инверсии невязки подбора моделей составили менее 2 %, по результатам трехмерной – около 4–6 %. Указанные невязки, в условиях учета априорной информации, говорят о большей детальности одномерной инверсии по сравнению с трехмерным подходом. Меньшая детальность геоэлектрической модели, полученной посредством трехмерной инверсии, также подтверждается аппроксимацией двух близких по значениям УЭС слоев единым геоэлектрическим горизонтом (литвинцевская и ангарская свиты, усольская и верхнемотская свиты). Стоит отметить, что по сравнению с одномерным подходом, трехмерное моделирование – процесс ресурсоемкий, т.е. при работе с горизонтально-слоистым разрезом (или близким к нему) в производственных интересах целесообразно ограничиваться одномерным подходом к интерпретации данных. Исходя из сказанного, становится очевидной необходимость обоснования граничных уровней “трехмерности” изучаемого пространства, посредством которых возможно определение области применимости одномерного и трехмерного подходов к интерпретации данных. Для обоснования упомянутых критериев предлагается следующий математический эксперимент.

Численные критерии применимости одномерного и трехмерного подходов к интерпретации данных ЗСБ

В ходе эксперимента была создана трехмерная геоэлектрическая модель, аппроксимирующая осадочный чехол центральной части Непского свода, включающий тонкий углеводородонасыщенный пласт-коллектор в мотской свите кембрия, и трапповую интрузию в надсолевой части разреза (рис. 3). Несмотря на то, что трапп является магматическим телом, УЭС которого составляет сотни ом-метров, за счет обводненного траппового пространства, интрузия на геоэлектрических разрезах и картах проявляется в виде аномалии повышенной проводимости.



Рис. 2. Месторождение “Расчетное-2” на Непском своде. *Вверху:* разрезы удельного электрического сопротивления (ρ , Ом·м) осадочной толщи, построенные по результатам одномерной (*слева*) и трехмерной (*справа*) инверсии. I–VII – свиты: верхнеленская (I), литвинцевская (II), ангарская (III), бельская, булайская и усольская (IV), верхнемотская (V), среднемотская (VI), нижнемотская (VII); VIII – кристаллический фундамент; цифры в слое VII – значения ρ на каждом пикете; здесь и на рис.4 цифры с треугольниками над разрезами – номера пикетов. *Внизу:* график изменения ρ нижнемотской свиты при одномерной (пунктирная линия) и трехмерной (сплошная линия) инверсии

Fig. 2. Deposit “Raschotnoye-2” at the Nepsky arch. *Above:* sections of electrical resistivity (ρ , Ohm·m) of the sedimentary strata, constructed from the results of one-dimensional (*on the left*) and three-dimensional (*on the right*) inversions. I–VII – suites: verkhnelenskaya (I), litvintsevskaya (II), angarskaya (III), belskaya, bulayskaya and usolskaya (IV), verkhnemotskaya (V), srednemotanskaya (VI), nizhnemotskaya (VII); VIII – crystal base; numbers in layer VII are ρ values at each picket; here and in Fig. 4, the numbers with triangles above the sections are the picket numbers. *Below:* graph of the change in ρ of the nizhnemotskaya suite under one-dimensional (dashed line) and three-dimensional (solid line) inversions

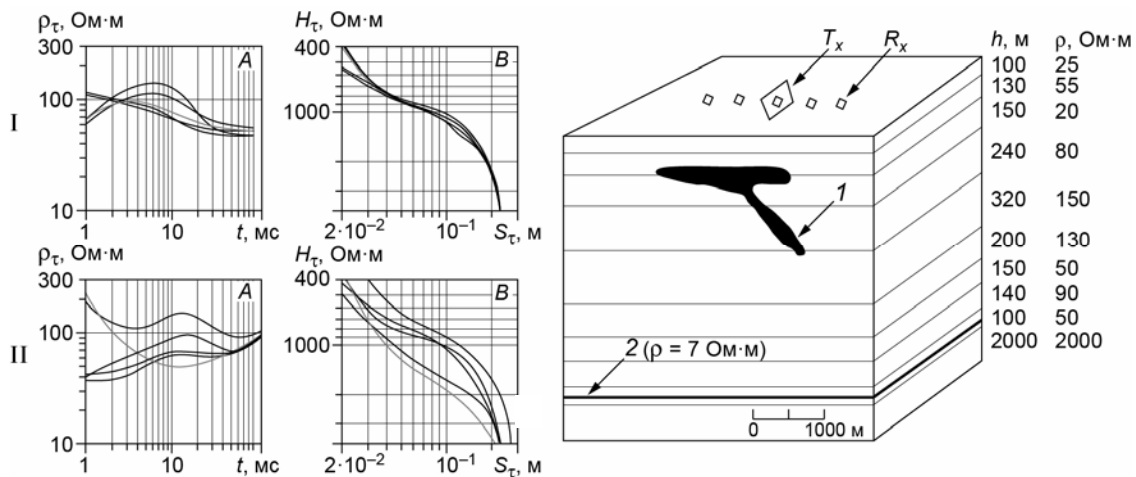


Рис. 3. Геолого-геоэлектрическая модель, использованная в синтетических расчетах, и фрагменты кривых ЗСБ, полученных в пределах многоразностной зондирующей установки (*A* – кажущееся сопротивление $\rho_{\tau}(t)$; *B* – кажущаяся проводимость $S_{\tau}(H_{\tau})$), осложненных влиянием трапповой интрузии с УЭС: *I* – 20 Ом·м; *II* – 2 Ом·м. T_x и R_x – источник и приемники электромагнитного поля; *1* – трапповая интрузия; *2* – углеводородный коллектор. Здесь и на рис. 4 справа от модели указаны толщина (h , м) и УЭС (ρ , Ом·м) каждого слоя

Fig. 3. Geological and geoelectric model used in synthetic calculations, and fragments of TEM curves obtained within the multidifferential sounding installation (*A* – apparent resistivity $\rho_{\tau}(t)$; *B* – apparent conductivity $S_{\tau}(H_{\tau})$), complicated by the influence of trap intrusion with resistivity: *I* – 20 Ohm·m; *II* – 2 Ohm·m. T_x and R_x – source and receivers of the electromagnetic field; *1* – trap intrusion; *2* – hydrocarbon reservoir. Here and in Fig. 4 to the right of the model, the thickness (h , m) and resistivity (ρ , Ohm·m) of each layer are indicated

В ходе анализа кривых ЗСБ, сгенерированных от указанной модели, установлено, что среднеквадратическое расхождение между кривыми $\rho_{\tau}(t)$ от одного источника электромагнитного поля составляет около 8 % (см. рис. 3). Отметим, что в случае горизонтально-слоистой модели без неоднородности расхождение между кривыми в ближней зоне отсутствовало бы полностью. Средняя невязка одномерной инверсии модельных кривых составила 5 %. По результатам инверсии обнаружено что, геоэлектрические свойства вмещающей среды, интрузии, а главное, пласта-коллектора прослеживаются с приемлемой точностью (рис. 4, *слева*).

Вторым этапом эксперимента было усложнение геоэлектрической модели – снижение УЭС интрузии с 20 до 2 Ом·м, моделирование синтетических данных ЗСБ и их последующая инверсия. В результате выявлено, что среднее квадратическое расхождение между кривыми $\rho_{\tau}(t)$ от одного источника поля составило около 14 % (см. рис. 3), а невязки одномерной инверсии превысили 15 %. Такой уровень невязок не позволяет проследить геоэлектрические свойства осадочного чехла и трапповой интрузии (рис. 4, *справа*).

Анализируя результаты первой и второй частей эксперимента становится ясно, что граница между одномерной и неоднородной средами, применительно к методу ЗСБ, лежит между рассмотренными экспериментальными геоэлектрическими характеристиками трехмерного объекта и вмещающей среды. Иными словами, границами области применения одномерного подхода к инверсии данных ЗСБ служат:

1) невязка подбора теоретической кривой к практической (в рамках одномерной инверсии) более 10 %;

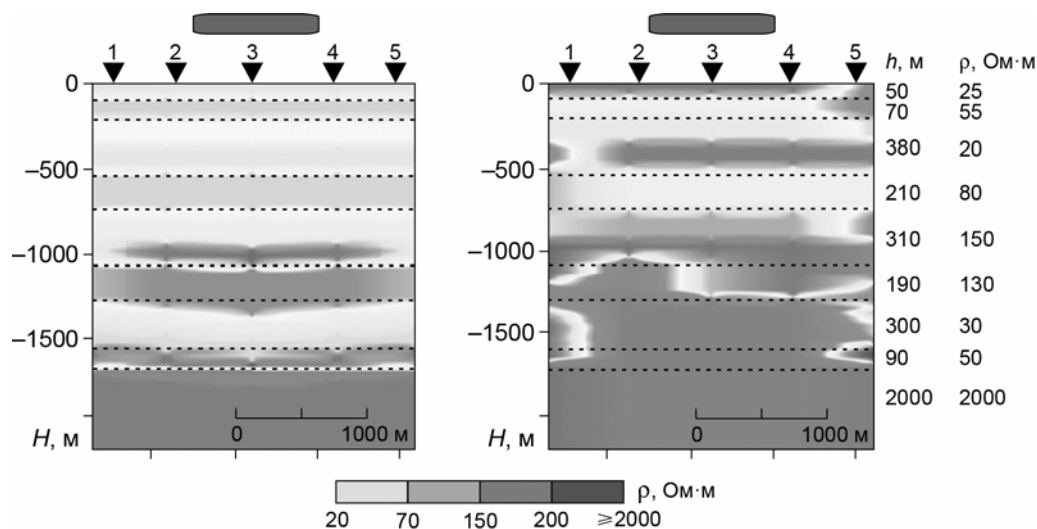


Рис. 4. Разрезы удельного электрического сопротивления (ρ , Ом·м) по результатам одномерной инверсии данных ЗСБ, осложненных влиянием интрузии с $\rho=20$ Ом·м (слева) и $\rho=2$ Ом·м (справа). Над разрезами – проекция трапповой интрузии на дневную поверхность. Пунктирные линии – истинные границы слоев исходной геоэлектрической модели

Fig. 4. Sections of electrical resistivity (ρ , Ohm·m) based on the results of one-dimensional inversion of TEM data, complicated by the influence of intrusion with $\rho=20$ Ohm·m (on the left) and $\rho=2$ Ohm·m (on the right). Above the sections – the projection of the trap intrusion onto the surface. Dashed lines – true boundaries of the layers of the original geoelectric model

2) среднее квадратическое расхождение кривых кажущегося сопротивления $\rho_t(t)$ от одной установки более 10 %.

Безусловно, указанные критерии являются приблизительными и оценочными, однако применение их обосновано, особенно на первых этапах интерпретации данных.

Определение базового подхода к интерпретации данных ЗСБ применительно к геологическим условиям юга Сибирской платформы

Имея в распоряжении уникальный постоянно пополняющийся архив данных ЗСБ, состоящий из 90 тыс. физических наблюдений, которые зарегистрированы на юге Сибирской платформы, на основании приведенных выше критериев можно произвести оценку размерности кривых и определить базовый подход к инверсии данных.

Однако если информация о значении невязки решения обратной задачи уже имеется и хранится в базе данных, то значение среднее квадратическое расхождения кривых $\rho_t(t)$ в пределах одной установки зондирования необходимо вычислить для упомянутого массива данных. Сделать это предлагается с применением программы *EMQC* для оценки качества данных ЗСБ, позволяющей также оценивать средние расхождения кривых ЗСБ, уровень дисперсии кривых и вклад таких геологических эффектов как суперпарамагнетизм (СПМ) и индукционно-вызванная поляризация (ВПИ) [Гусейнов и др., 2015].

Для корректной оценки размерности среды, которой отвечают данные ЗСБ, полученные в южной части Сибирской платформы, необходимо исключить из выборки данные, осложненные эффектами СПМ и ВПИ. Известно, что упомянутые эффекты, как правило, отображаются на кривых, полученных в контуре генераторной петли, причем эффект СПМ отражается на данных как проявление ложной проводимости на поздних

временах соосной кривой (времена, соответствующие глубинам более 3 км, для юга Сибирской платформы – от 120 мс), а эффект ВПИ – как недостаток проводимости [Компаниец, Кожевников, Антонов, 2013].

Детектирование данных, осложненных эффектами СПИ и ВПИ, возможно с помощью оценки среднего расхождения сигналов становления на поздних временах, что более контрастно проявляется на трансформациях $\rho_\tau(t)$ и $S_\tau(H_\tau)$. Для количественной оценки применяется процентное отклонение кажущейся проводимости от ее среднего значения (K_S) на заданной глубине

$$K_{Si} = \left| \frac{\overline{S(H_B)} - S_i(H_B)}{\overline{S(H_B)}} \right| \cdot 100 \%,$$

где $\overline{S(H_B)}$ – среднеарифметическое значение суммарной продольной проводимости на глубине H_B для сигналов от одного источника электромагнитного поля.

Таким образом, чем меньше значение K_S , тем больше сигналы становления соответствуют отклику от среды без влияния эффектов ВПИ и СПМ (рис. 5).

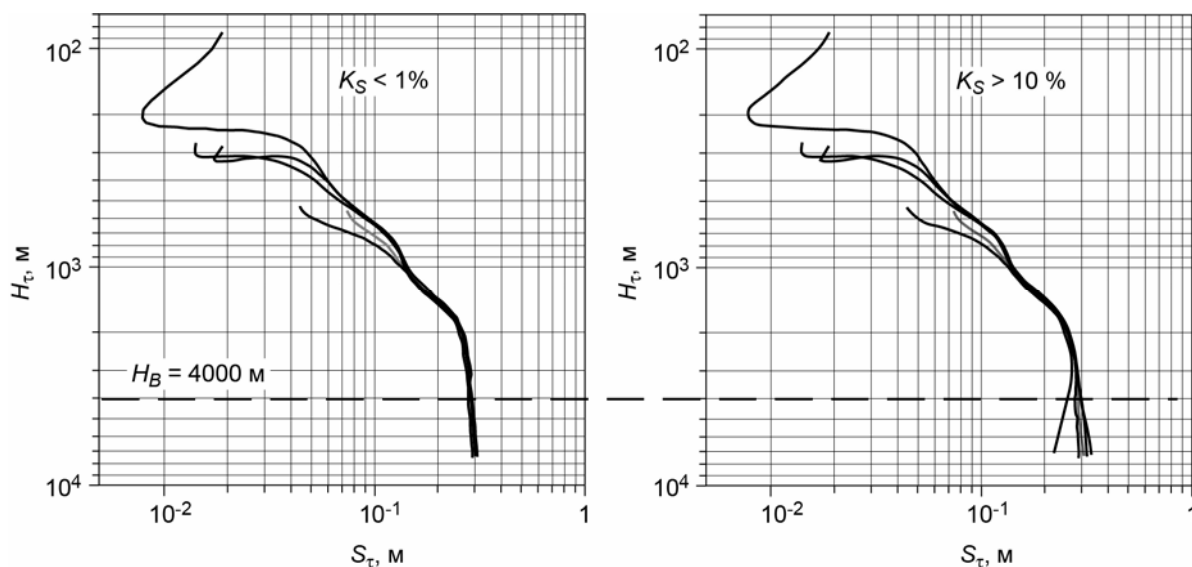


Рис. 5. Кривые кажущейся проводимости $S_\tau(H_\tau)$, полученные в пределах многоразностной зондирующей установки: *слева* – свободные от влияния эффектов ВПИ и СПМ; *справа* – подверженные влиянию ВПИ. K_S – процентное отклонение $S_\tau(H_\tau)$ от ее среднего значения; штриховая линия – заданная глубина оценки K_S

Fig. 5. Curves of the apparent conductivity $S_\tau(H_\tau)$, obtained within multi-spacing sounding set-up: *on the left* – free from the influence of the induced polarization and superparamagnetism effects; *on the right* – influenced by induced polarization. K_S is the percentage deviation of $S_\tau(H_\tau)$ from its mean value; dashed line – predetermined estimation depth K_S

После исключения из выборки осложненных эффектами ВПИ и СПМ индукционных переходных характеристик была произведена оценка размерности оставшихся данных. По результатам оценки установлено, что 70 % данных ЗСБ, полученных на площадях юга Сибирской платформы, соответствуют модели горизонтально-слоистого разреза, а 11 % – горизонтально-неоднородной (с включением трехмерных геоэлектрических неоднородностей); кроме этого, имеется область неоднозначной оценки, к которой относятся 19 % данных. Схема ранжирования южной части Сибирской платформы по степени влияния на данные ЗСБ трехмерных неоднородностей приведена на рис. 6.

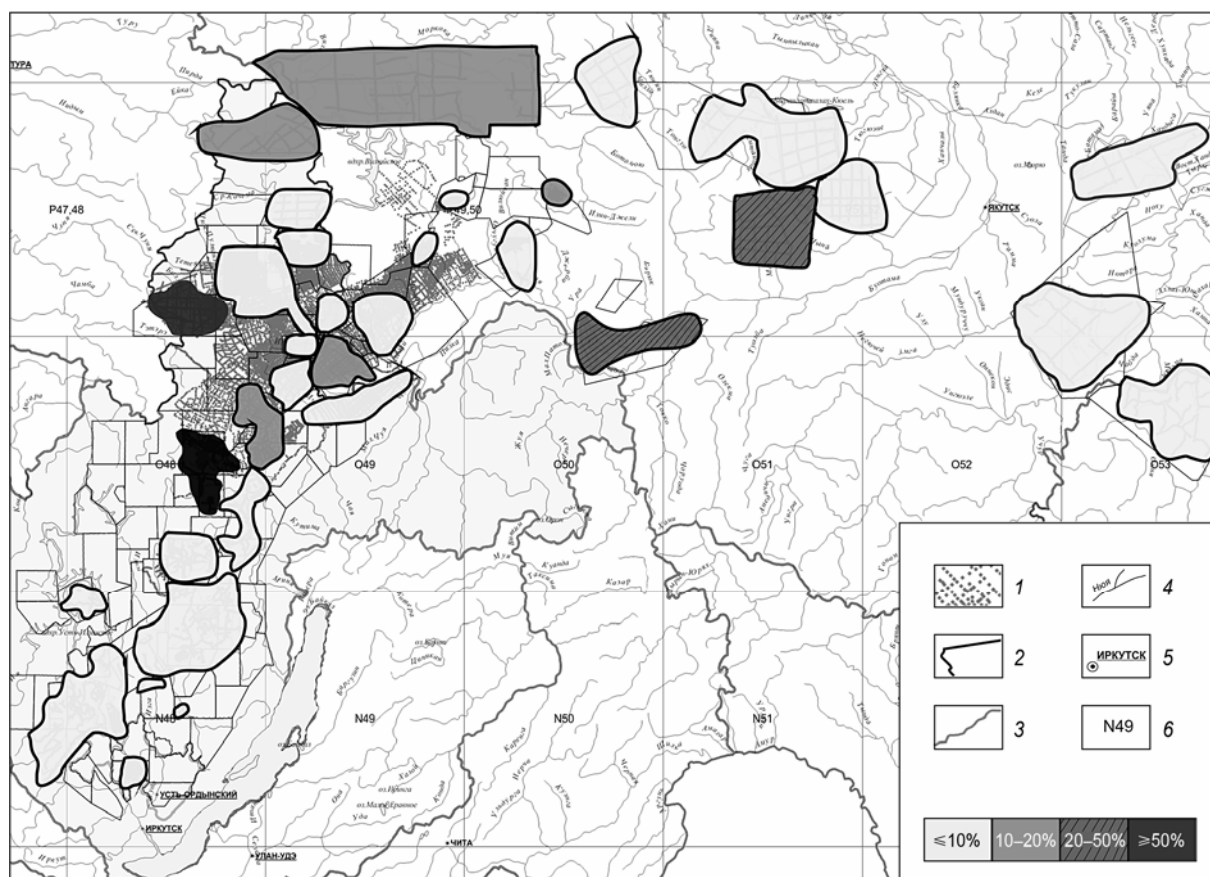


Рис. 6. Схема ранжирования южной части Сибирской платформы по степени влияния трехмерных неоднородностей на данные ЗСБ

1 – архивные данные ЗСБ; 2, 3 – границы: лицензионных участков (2) и субъектов Российской Федерации (3); 4 – речная сеть; 5 – населенные пункты; 6 – номера листов топографической карты; шкала отражает степень осложнения данных ЗСБ влиянием трехмерных неоднородностей

Fig. 6. Ranking scheme of the southern part of the Siberian craton according to the degree of influence of three-dimensional inhomogeneities on the TEM data

1 – archived data of TEM; 2, 3 – boundaries: licensed areas (2) and constituent entities of the Russian Federation (3); 4 – river network; 5 – settlements; 6 – numbers of sheets of the topographic map; the scale reflects the degree of complication of the TEM data by the influence of three-dimensional inhomogeneities

Приведенные на шкале проценты отражают количество физических наблюдений, осложненных влиянием трехмерных неоднородностей относительно их общего числа, зарегистрированных на конкретном участке недр. Таким образом, для районов, где количество таких данных менее 10 % одномерный подход к инверсии данных может рассматриваться как базовый. И, наоборот, там, где более 50 % данных подвержено влиянию неоднородностей, в качестве основного метода необходимо рассматривать трехмерный подход или комбинацию одномерного и трехмерного подходов. Вероятнее всего трехмерное влияние на данные в исследуемом регионе является следствием присутствия в геологическом разрезе в различной степени обводненных разрывных нарушений и магматических тел. Отметим, что архивные данные ЗСБ (до 2007 г.) анализу не подвергались.

Полученная схема позволяет прогнозировать потенциальные сложности в процессе интерпретации данных при планировании работ методом ЗСБ, а также сделать вывод и масштабах применимости одномерного подхода к инверсии данных.

Выводы

В представленной работе предложен способ оценки размерности сред, применительно к подходам интерпретации данных ЗСБ. На основании приведенных интерпретационных примеров и математического эксперимента подтверждено, что выбор подхода к инверсии данных должен диктоваться размерностью зондируемого пространства, которая для геологических условий юга Сибирской платформы может быть оценена с помощью следующих эмпирических критериев:

1) невязки подбора теоретической кривой к практической (в рамках одномерной инверсии) более 10 %;

2) среднеквадратического расхождения кривых кажущегося сопротивления $\rho_{\tau}(t)$ от одной установки более 10 %.

Имеющиеся на сегодняшний день средства для интерпретации данных ЗСБ, полученные с использованием 3D-моделирования, не всегда обеспечивают лучший геологический результат по сравнению с одномерной инверсией. Несомненно, средства трехмерной инверсии данных ЗСБ продолжают совершенствоваться, и точность подбора модели вырастет, но на данный момент наилучший способ получения приемлемого результата – это комбинирование одномерного и трехмерного подходов (в случаях, когда применение трехмерного подхода диктуется “трехмерностью” зондируемого пространства).

В результате оценки размерности 90 тыс. индукционных переходных характеристик ЗСБ, полученных на юге Сибирской платформы, установлено, что подавляющее количество данных надежно интерпретируется посредством одномерного подхода к инверсии, что позволяет считать одномерный подход базовым для упомянутой территории.

Благодарности

Автор признателен сотрудникам “СИГМА-ГЕО” генеральному директору, кандидату технических наук Ю.А. Агафонову, исполнительному директору М.В. Шарлову, а также главному геофизику, кандидату геолого-минералогических наук И.В. Буддо за всестороннюю поддержку, оказанную в ходе проведения исследования.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук на 2021–2025 гг. по теме “Современная геодинамика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии” (шифр научной темы FWEF-2021-0009).

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Литература

- Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1965. 109 с.
- Гусейнов Р.Г. Система оценки качества сигналов нестационарных электромагнитных зондирований: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. 24 с.
- Гусейнов Р.Г., Петров А.В., Агафонов Ю.А., Шарлов М.В., Буддо И.В., Гомульский В.В. Система оценки качества сигналов нестационарных электромагнитных зондирований // Вестник ИрГТУ. 2015. № 5(100). С.53–60.
- Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика (Физика горных пород). М.: Изд-во “Нефть и газ”, 2004. 367 с.
- Инструкция по электроразведке. Наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахтно-рудничная электроразведка, аэроэлектроразведка, морская электроразведка. Л.: Недра, 1984. 534 с.
- Компаниец С.В., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Проявление и учет индукционно-вызванной поляризации при изучении осадочного чехла юга Сибирской платформы методом ЗСБ // Геофизика. 2013. № 1. С.35–40.
- Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М., Алакишин А.М., Поспеев А.В., Шимараев М.Н., Хлысов О.М. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал “Гео”, 2001. 252 с.
- Поспеев А.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А., Шарлов М.В., Компаниец С.В., Токарева О.В., Мисюркеева Н.В., Гомульский В.В., Суков Л.В., Ильин А.И., Емельянов В.С., Мурзина Е.В., Гусейнов Р.Г., Семинский И.К., Шарлов Р.В., Вахромеев А.Г., Сень Е.А. Современная практическая электроразведка. Новосибирск: Академическое издательство “Гео”, 2018. 231 с.
- Тригубович Г.М., Белая А.А., Чернышев А.В., Симанкович Н.В. Комплексная интерпретация электроразведочных данных М-ЗСБ и МТЗ в программном комплексе EM-DataProcessor // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Т. 2, № 2. С.237–242.
- Тригубович Г.М., Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г. 3D-электроразведка становлением поля. Новосибирск: Наука, 2009. 217 с.
- Шарлов М.В., Агафонов Ю.А., Стефаненко С.М. Современные телеметрические электроразведочные станции SGS-TEM и FastSnap // Приборы и системы разведочной геофизики. 2010. Т. 31, № 1. С.20–24.
- Jang H., Kim H.J. Mapping deep-sea hydrothermal deposits with an in-loop transient electromagnetic method: Insights from 1D forward and inverse modeling // Journal of Applied Geophysics. 2015. V. 123. P.170–176.
- Luan H., Geng Y., Yu Y., Guan S. Three-Dimensional Transient Electromagnetic Numerical Simulation Using FDFD Based on Octree Grids // IEEE Access. 2019. V. 7. P.161052–161063.
- McNeill J.D. Application of transient electromagnetic techniques. Missisagua, Canada: Geonics Limited. TN-7, 1980. 17 p.
- Seminskiy I.K., Buddo I.V., Agafonov U.A., Belaya A.A., Trigubovich G.M. Experience a Combination of 1D and 3D Approaches Interpretation TEM-Data in Solving the Problems of Oil and Gas in Eastern Siberia // GeoBaikal 2016: European Association of Geoscientists & Engineers. 2016. V. 2016. P.1–5.

Сведения об авторе

СЕМИНСКИЙ Игорь Константинович – кандидат геолого-минералогических наук, начальник центра комплексного мониторинга опасных геологических процессов, Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук. 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128; ведущий специалист по технологиям электроразведки, ООО “СИГМА-ГЕО”. 664039, г. Иркутск, ул. Звездинская, д. 6. Тел.: +7(950) 071-42-69. E-mail: iks@crust.irk.ru

ASSESSMENT OF THE APPLICATION FIELDS OF ONE- AND THREE-DIMENSIONAL APPROACHES TO TEM DATA INTERPRETATION ON THE EXAMPLE OF GEOLOGICAL CONDITIONS IN THE SOUTH OF THE SIBERIAN CRATON

I.K. Seminskiy

*Institute of the Earth's Crust of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia
LLC "SIGMA-GEO", Irkutsk, Russia
e-mail: iks@crust.irk.ru*

Abstract. When interpreting the data of the electrical prospecting method of sounding by transient electromagnetic method in the near zone (TEM), there is a large uncertainty caused by the choice of the optimal approach to inversion. The one-dimensional approach was considered classical, however, with the development of the method (in particular, the mathematical apparatus and computing power), a three-dimensional approach was formed, which is based on the idea that the probed space is mostly horizontally inhomogeneous and the use of the one-dimensional approach introduces critical inaccuracies in data interpretation. An important part of this article is examples of empirical assessment of the effectiveness of applying one-dimensional and three-dimensional approaches to inversion of TEM data in relation to geological conditions, typical of the south Siberian craton, when solving oil and gas prospecting problems. It was established that, despite the versatility of three-dimensional modeling, the choice of an approach to inversion should be carried out individually in each case, based on the dimension of the studied environment. To determine the boundary levels of the dimension of the medium, which corresponds to the TEM data, a mathematical experiment was carried out, during which the criteria for applying the three-dimensional approach to data inversion were established. The mentioned criteria are the root-mean-square divergence of the apparent resistivity curves obtained within one sounding installation, more than 10% and the discrepancy of one-dimensional inversion of more than 10 %, which minimization is impossible in the space of models determined by a priori data. In other cases, the geological problems facing the TEM method are successfully solved using a one-dimensional approach. On the basis of the above criteria, an analysis of the dimension of 90 thousand physical observations obtained in the south of the Siberian craton was carried out, during which it was established that in relation to the TEM, the one-dimensional approach can be considered as the basic one.

Keywords: electrical conductivity, TEM, inversion, three-dimensional modeling, south of the Siberian craton, hydrocarbons.

Acknowledgements

The author is grateful to the staff of "SIGMA-GEO": the General Director, Cand. Sci. (Eng.) Yu. A. Agafonov, Executive Director M. V. Sharlov, as well as to the chief geophysicist, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.) I.V. Buddo for the comprehensive support provided in the course of the study.

Funding

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of the Earth's Crust of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences for 2021–2025 on the topic "Modern geodynamics, mechanisms of lithospheric destruction and dangerous geological processes in Central Asia" (code of the scientific topic FWEF-2021-0009).

Conflict of interest

The author declares they have no conflict of interest.

References

- Dobrynin V.M., Vendelstein B.Yu., Kozhevnikov D.A., *Petrofizika (Fizika gornyykh porod)* (Petrophysics (Rock Physics)), Moscow: Izdatel'stvo "Neft' i gaz", 2004, 367 p. [In Russian].
- Guseinov R.G., A system for assessing the quality of signals of TEM: Extended Abstract of Doctoral Sci. (Geol.-Mineral.) Dissertation, Irkutsk: Izdatel'stvo IRNITU, 2015, 24 p. [In Russian].
- Guseinov R.G., Petrov A.V., Agafonov U.A., Sharlov M.V., Buddo I.V., Gomulskiy V.V., System for assessing the quality of signals from TEM, *Vestnik IrGTU (ISTU Bulletin)*, 2015, no. 5(100), pp. 53-60. [In Russian].
- Instruktsiya po elektrorazvedke. Nazemnaya elektrorazvedka, skvazhinnaya elektrorazvedka, shakhtno-rudnichnaya elektrorazvedka, aereoel'ektorazvedka, morskaya elektrorazvedka* (Instructions for electrical exploration. Ground electrical prospecting, borehole electrical prospecting, mine electrical prospecting, aerial electrical prospecting, marine electrical prospecting), Leningrad: Nedra, 1984, 534 p. [In Russian].
- Jang H., Kim H.J., Mapping deep-sea hydrothermal deposits with an in-loop transient electromagnetic method: Insights from 1D forward and inverse modeling, *Journal of Applied Geophysics*, 2015, vol. 123, pp. 170-176.
- Kompaniets S.V., Kojevnikov N.O., Antonov E.U., Manifestation and consideration of induction-induced polarization in the study of the sedimentary cover of the south of the Siberian craton by the TEM, *Geofizika (Geophysics)*, 2013, no. 1, pp. 35-40. [In Russian].
- Luan H., Geng Y., Yu Y., Guan S., Three-Dimensional Transient Electromagnetic Numerical Simulation Using FDFD Based on Octree Grids, *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 161052-161063.
- Mac V.D., Ufimcev G.F., Mandel'baum M.M., Alakshin A.M., Pospeev A.V., Shimaraev M.N., Hlysov O.M., *Kainozoi Baikalskoi riftovoi vpadiny: stroenie i geologicheskaya istoriya* (Cenozoic Baikal Rift Basin: Structure and Geological History), Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN, filial "Geo", 2001, 252 p. [In Russian].
- McNeill J.D., *Application of transient electromagnetic techniques*, Missasagua, Canada: Geonics Limited, TN-7, 1980, 17 p.
- Pospeev A.V., Buddo I.V., Agafonov U.A., Sharlov M.V., Kompaniets S.V., Tokareva O.V., Misurkeeva N.V., Gomulskiy V.V., Surov L.V., Il'in A.I., Emel'yanov V.S., Murzina E.V., Guseinov R.G., Seminskiy I.K., Sharlov R.V., Vahromeev A.G., Sen' E.A., *Sovremennaya prakticheskaya elektrorazvedka* (Modern practical electroprospecting), Novosibirsk: Akademicheskoe izdatel'stvo "Geo", 2018, 231 p. [In Russian].
- Seminskiy I.K., Buddo I.V., Agafonov U.A., Belaya A.A., Trigubovich G.M., Experience a Combination of 1D and 3D Approaches Interpretation TEM-Data in Solving the Problems of Oil and Gas in Eastern Siberia, *GeoBaikal 2016: European Association of Geoscientists & Engineers*, 2016, vol. 2016, pp. 1-5.
- Sharlov M.V., Agafonov U.A., Stefanenko S.M., Modern telemetry electrical survey stations SGS-TEM and FastSnap, *Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki* (Devices and systems of exploration geophysics), 2010, vol. 31, no. 1, pp. 20-24. [In Russian].
- Trigubovich G.M., Belaya A.A., Chernishov A.V., Simancovich N.V., Integrated interpretation of electrical exploration data TEM and MT in the EM-DataProcessor software package, *Interexpo Geo-Sibir'* (Interexpo GEO-Siberia), 2015, vol. 2, no. 2, pp. 237-242. [In Russian].
- Trigubovich G.M., Persova M.G., Soloveychik U.G., *3D-elektorazvedka stanovleniem polya* (3D electroprospecting TEM), Novosibirsk: Nauka, 2009, 217 p. [In Russian].
- Van'yan L.L., *Osnovy elektromagnitnykh zondirovaniy* (Fundamentals of electromagnetic sounding), Moscow: Nedra, 1965, 109 p. [In Russian].

About the author

SEMINSKIY Igor Konstantinovich – Cand. Sci (Geol.-Mineral.), Head of the Center for integrated monitoring of dangerous geological processes, Institute of the Earth's Crust of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Lermontov str., 128, Irkutsk, 664033; Leading specialist in Electrical Exploration Technologies, SIGMA-GEO. Zvezdinskaya str., 6, Irkutsk, 6664039. Tel.: +7(950) 071-42-69. E-mail: iks@crust.irk.ru