

Электротомография в скважинном варианте

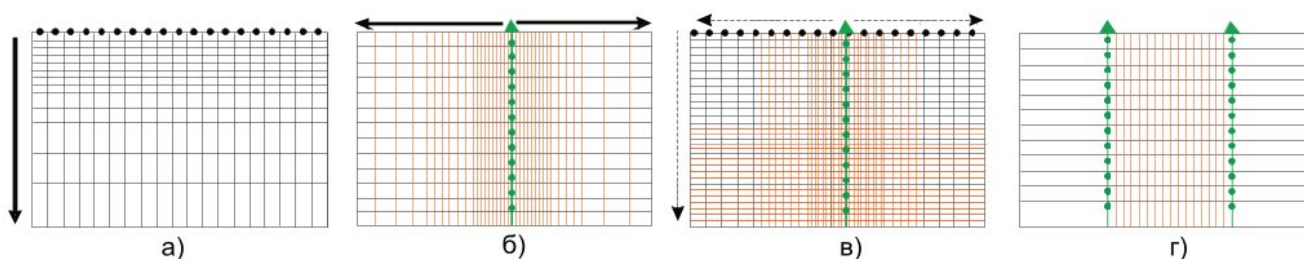
■ Бобачев А.А., Стойнова А.М., МГУ, г.Москва

Аннотация

Возможности и ограничения наземных методов электроразведки на постоянном токе в настоящее время хорошо изучены. Одной из основных проблем наземных методов является понижение разрешающей способности при увеличении глубины исследований. Это приводит к тому, что при решении многих практических задач наземные методы становятся менее эффективными. В отличие от наземной съемки, где разрешающая способность, то есть возможность выделить объект, резко падает с глубиной, в многоэлектродных зондированиях с применением скважин чувствительность системы плавно падает с удалением от ствола скважины. Таким образом, объединение скважинных и поверхностных измерений значительно повышает эффективность электроразведки за счёт увеличения разрешающей способности по глубине (рис. 1).

В данной работе демонстрируются методики многоэлектродных зондирований в различных модификациях:

- измерения в одной скважине (аналог стандартного каротажа по удельному сопротивлению и поляризуемости);
- скважинно-поверхностная электротомография.



▲ Рис. 1. Сеточная модель для измерений: а) на поверхности; б) в скважине; в) скважинно-поверхностных; г) межскважинных.

Стрелками указано направление падения разрешающей способности.

Введение

Метод электротомографии (ERT – electrical resistivity tomography) в настоящее время считается одним из наиболее эффективных в области электроразведки на постоянном токе. Однако, как и для всех наземных геофизических методов, разрешающая способность электротомографии уменьшается с увеличением глубины исследования. Это ограничение может быть частично компенсировано использованием скважинных методик измерения.

На данный момент большинство исследований по электротомографии с

применением скважинных измерений проведены в области межскважинной электротомографии. За рубежом такая методика работ чаще всего обозначается как Cross-borehole Tomography или Borehole Resistivity Tomography (BRT). Работы методом BRT проводят различные коммерческие, учебные и государственные компании в разных странах мира: Ливерморская национальная лаборатория (LLNL), компания Multi-Phase Technologies, компания Advanced Geosciences (Advanced Geosciences, Inc., 2003), Центр Шлюмберже Doll Research в Кембридже (США), Лундский технологи-

ческий институт (Швеция) и др. Было опубликовано несколько схем инверсии для данных межскважинной томографии (Daily W, 1991), (Morelli G, 1996). Успешное практическое применение методики межскважинной электротомографии было описано в литературе для различных областей инженерной геологии: гидрогеология и мониторинг окружающей среды (Daily W., 2000), (Slater L., 2000), (Goes B., 2004), а также при решении рудных задач (Бобачев А.А., 2008), (Куликов В.А., 2013). Работы методом межскважинной электротомографии в России единичны.

Публикации в периодической литературе по данной теме практически отсутствуют. Одной из первых российских компаний, начавшей применять в классическом виде межскважинную электротомографию при изучении сульфидных руд на Кольском полуострове является Санкт-Петербургская компания «АСТРА». Затем в 2011 г. московской геофизической компанией ООО «Северо-Запад» проводились работы методом межскважинной электротомографии на Масловском рудопроявлении Норильской рудной (Куликов В.А., 2013).

Одним из ограничений метода межскважинной электротомографии является то обстоятельство, что удовлетворительные результаты обычно получаются, когда отношение «глубина скважины/расстояние между скважинами» невелико.

Таким образом, обычно метод межскважинной томографии не может быть применён на практике в связи с большим расстоянием между соседними скважинами. В этом случае многоэлектродные измерения в одной скважине и использование скважинно-поверхностной томографии являются очевидной альтернативой.

Применение скважинно-поверхностной методики измерения электрического поля в литературе освещено слабо. Большинство публикаций ограничивается описанием метода заряженного тела (МЗТ); в зарубежной литературе этот метод называют *mise-à-la-masse* (Кормильцев В.В., 1987), (Бобачев А.А., 2010).

Марескот в статье «Designing surface-to-borehole electrical resistivity tomography surveys using the Frechet derivative» описывает проблему поиска оптимальной методики по системе «скважина-поверхность» на основе матрицы чувствительности, но это исследование ограничено частным случаем, при котором скважины находились вдали от поверхностных электродов (Marescot L., 2002). Сходная стратегия скважинно-поверхностных измерений обсуждается также Локе (Loke M., 2010).

Среди публикаций на тему скважинно-поверхностных измерений, особый интерес представляет статья «Measurement and inversion schemes for single borehole-to-surface electrical resistivity tomography surveys» (Tsourlos P., 2011), так как в ней представлены результаты, полученные на основе не только синтетических, но и полевых данных. В русскоязычной литературе проблема скважинно-поверхностных измерений освещалась в статьях А.А.Бобачева (Бобачев А.А., 2008) и А. Каминского (Каминский А.Е., 2009), а также в диссертации Г.Н.Шкабарни (Шкабарня, 2007).

1. Многоэлектродные зондирования в стволе одной скважины

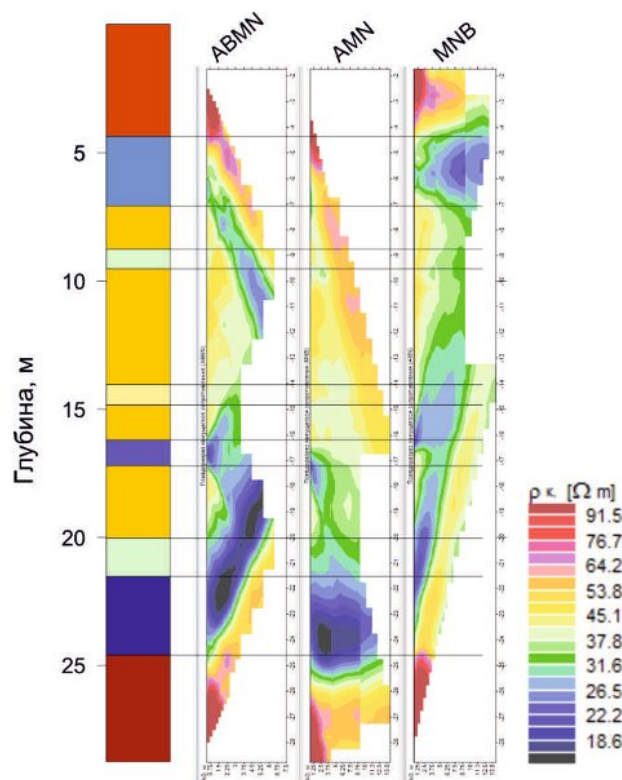
Методика многоэлектродных зондирований в скважине является аналогом стандартного электрического каротажа (точнее боковое каротажное зондирование с различными установками), который выполняется с неподвижной косой с

шагом 0.5 – 1 м. Полученные данные можно интерпретировать либо качественно, либо в рамках одномерной модели. Применение нескольких разностей позволяет оценить эффект зоны проникновения. Использование неподвижной косы упрощает измерение эффекта вызванной поляризации.

Работа в необсаженной скважине всегда имеет риск обвала ствола скважины. Использование дешевых кос минимизирует потери при невозможности поднять косу из скважины. С другой стороны, можно оставлять косу в скважине для проведения повторных наблюдений (геофизический мониторинг).

Рассмотрим результаты многоэлектродных измерений в скважинах рядом с геофизическим полигоном МГУ в Калужской области. По результатам наземной магнитометрической съемки была выявлена узкая (до 70 м) аномалия магнитного поля амплитудой до 40 нТл. По оси аномалии было пробурено несколько скважин, в которых были проведены многоэлектродные измерения с тремя установками (дипольная осевая, прямая и встречная трехэлектродные). Для измерений использовалась коса с шагом 0.5 метра на 36 электродов и станция Syscal-Pro (IrisInstruments, Франция). Псевдорезультаты кажущегося сопротивления для одной из скважин представлены на рис. 2.

Слева от них показан результат качественной интерпретации. Разрез представлен в основном суглинками, которые при описании скважины выделялись в один слой мощностью 20 метров. По результатам электрометрии в этом слое удалось выделить три горизонта с более низкими сопротивлениями. Отметим, что при такой съемке уверенно разделяются горизонты, отличающиеся по удельному сопротивлению всего на 10%, что



▲ Рис. 2. Псевдорезультаты кажущегося сопротивления (справа) и результат качественной интерпретации (слева)

практически недостижимо при поверхностных наблюдениях.

Для выделения пород, с которыми связана магнитная аномалия, была выполнена каппаметрия поднятого керна, на которой проявился четкий максимум (до 25010-5 ед.СИ) (рис. 3). Этот максимум достаточно хорошо коррелируется со слоем с повышенной поляризуемостью.

Результатом многоэлектродных измерений в односкважинном варианте является распределение удельного сопротивления и поляризуемости горных пород вдоль ствола скважины.

2. Скважинно-поверхностная электротомография

Для повышения эффективности многоэлектродных зондирований за счёт увеличения разрешающей способности и области чувствительности системы

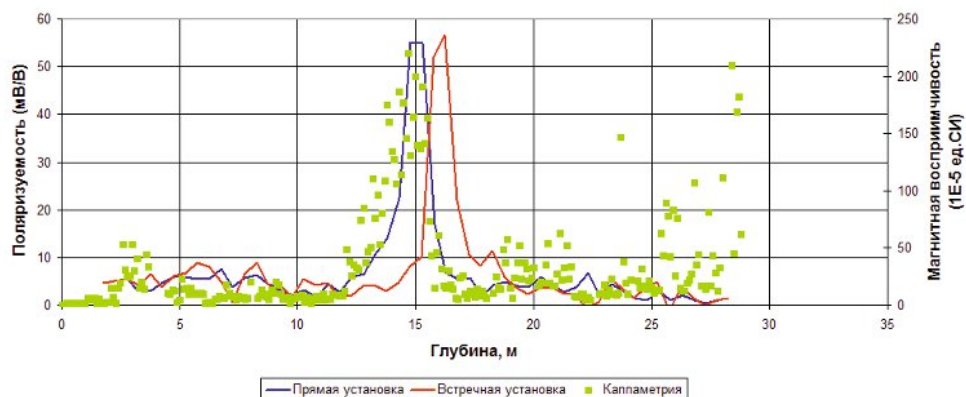


Рис. 3. Измерение вызванной поляризации и каппа-метрия.

применялся измерительный комплекс объединяющий:

- поверхностные измерения - все электроды находятся на поверхности;
- скважинные измерения - электроды являются погруженными;
- «чисто» скважинно-поверхностные измерения - питающий электрод находится в скважине, а приёмный диполь – на поверхности, и наоборот, питающий электрод находится на поверхности, а приёмный диполь – в скважине.

Благодаря такому разнообразному объёму данных, мы имеем возможность обрабатывать и интерпретировать результаты не только в целом скважинно-поверхностных измерений, но и выделять отдельные массивы данных – поверхностные, скважинные и чисто скважинно-поверхностные (рис. 5). Это позволяет за один цикл измерений стандартным электрофотографическим комплексом получать наиболее полную и универсальную информацию о разрезе.

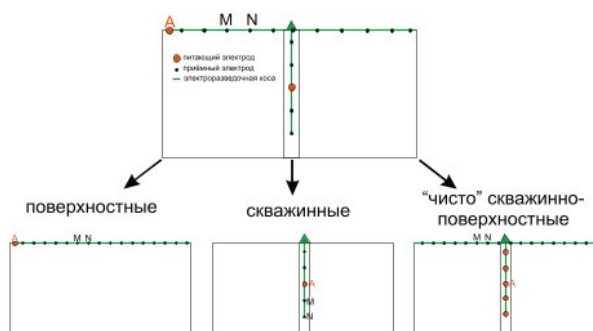


Рис. 5. Разделение скважинно-поверхностных данных.

Опытно-методические работы проводились в июле 2012 года в районе карстового провала в Нижегородской области. Для решения поставленных задач по результатам численного моделирования была выбрана «Т-образная» система наблюдения, включающая измерения в стволе одной скважины и поверхностные измерения по системе «скважина – поверхность» (рис. 4).

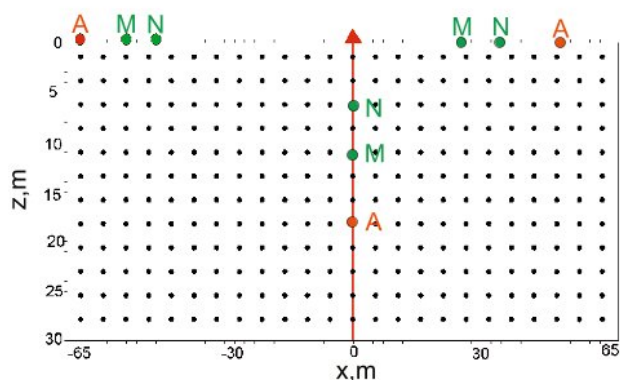


Рис. 4. Схема измерения по системе «скважина-поверхность» с принципиальными положениями питающих (А) и приёмных электродов (М, N).

Шаг по косе составлял 1.5 м, а максимальный разнос $AO=60.75$ м. Длина наземной установки (два сегмента косы по 32 электрода) составляла 94.5 м, длина скважинной косы (20 электродов) – 28.5 м. В качестве электроразведочной установки применялась комбинированная (прямая плюс встречная $Amn+mnB$) трехэлектродная установка Шлюмберже. Электроразведочные косы подключаются к станции с коммутирующим устрой-

ством. Используя коммутатор (COM x 64), проводят измерения измерителем МЭРИ-24, перебирая все возможные положения приемных и питающих электродов. В качестве генератора мы использовали генератор АСТРА-100.

Проведение большого числа измерений при различных положениях питающего электрода позволяет применять автоматическую инверсию для определения распределения удельного сопротивления.

Математическое моделирование электрического поля

Для оценки эффективности применения предложенной скважинно-поверхностной методики по сравнению с традиционными поверхностными измерениями были решены следующие задачи численного моделирования:

- моделирование электрического поля над рассматриваемой физико-геологической моделью (ФГМ) среды;
- обнаружение локальных объектов;

Поставленные задачи решались на основе численного моделирования в программе ie2dp (Бобачев А.А., Геологический ф-т МГУ) при расположении электродов на поверхности и для системы наблюдений «скважина-поверхность». После решения прямой задачи рассчитывалась двумерная инверсия с помощью программы Res2DInv (Geotomo Software, Малайзия) (Loke M.H., 1996). В результате, были получены геоэлектрические разрезы для моделей по поверхностной и скважинно-поверхностной методике измерения.

Физико-геологическая модель (ФГМ) изучаемой среды построена на основе данных бурения и каротажа (электро- и гамма-каротажа) на месте проведения опытно-методических работ (рис. 15). В первом приближении она представляет

1	суглинок	$\rho_1=80 \text{ Ом*м}$ $d_1=7.7 \text{ м}$
2	песок	$\rho_2=250 \text{ Ом*м}$ $d_2=15.9 \text{ м}$
3	песок глинистый	$\rho_3=100 \text{ Ом*м}$ $d_3=23.4 \text{ м}$
4	мергель	$\rho_4=20 \text{ Ом*м}$

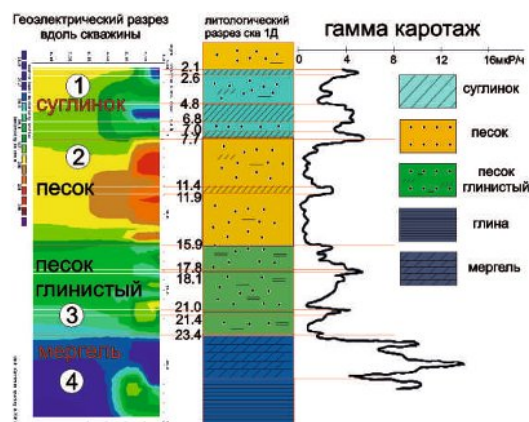
▲ Рис. 6. Физико-геологическая модель среды.

собой горизонтально-слоистую среду, на которой выделяются четыре литологических слоя: суглинок, песок, песок глинистый и мергель. ФГМ изучаемой среды с удельным электрическим сопротивлением (УЭС) и глубиной для каждого слоя представлена на рис. 6.

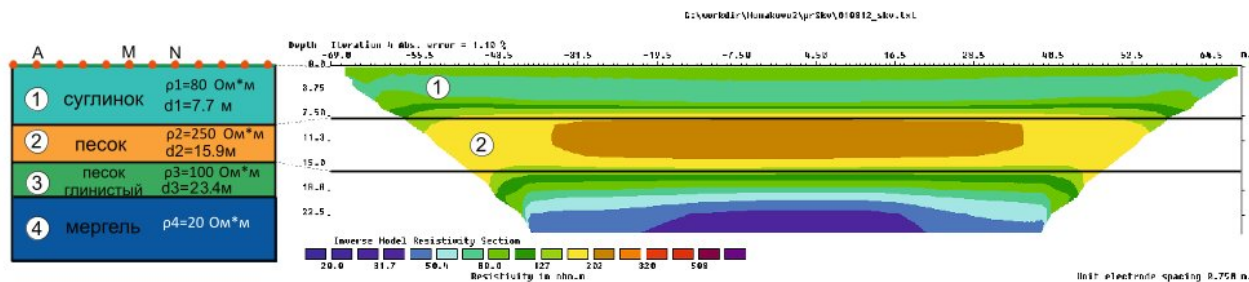
Моделирование электрического поля над рассматриваемой ФГМ среды

На первом этапе было выполнено моделирование над рассматриваемой ФГМ с целью выявления наиболее эффективной методики измерения в условиях горизонтально-слоистой среды.

В результате моделирования для методики поверхностных измерений



▲ Рис. 15. Сопоставление геоэлектрического разреза вдоль скважины с литологическим разрезом и кривой по гамма-каротажу.

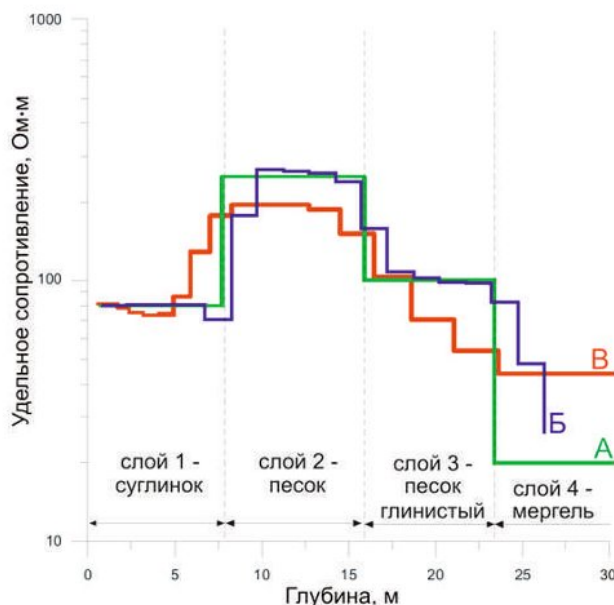


▲ Рис. 7. Моделирование по поверхностной системе наблюдения над рассматриваемой ФГМ среды.

был получен геоэлектрический разрез, представленный на рис. 7. На разрезе выделяются два верхних слоя, мощность и удельное сопротивление которых выдержаны и совпадают с параметрами модели. Третий слой, кровля которого выделяется на полученном разрезе, соответствует по значению удельного сопротивления нижнему слою мергелей на ФГМ.

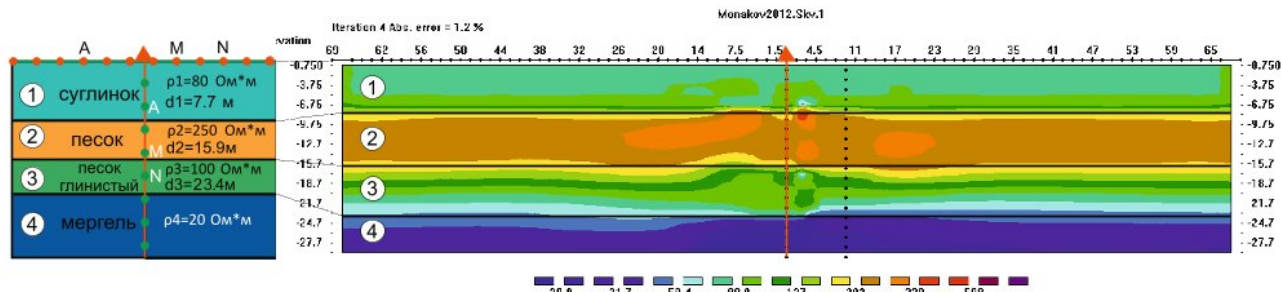
Такое сопоставление приводится на графиках псевдокаротажных кривых по инверсии для поверхностной методики наблюдения и ФГМ (рис. 9). Псевдокаротажная кривая по инверсии для поверхностной методики наблюдения соответствует трёхслойной модели. При сопоставлении этой модели с ФГМ можно видеть, что первые два слоя (суглинок, песок) практически совпадают, третий слой (песок глинистый) на модели по поверхностной методике отсутствует, а сопротивление четвёртого слоя (мергель) заметно завышено по сравнению со значением удельного сопротивления по ФГМ.

По результатам моделирования для системы наблюдения «скважина-



▲ Рис. 9. Псевдокаротажные кривые для ФГМ (кривая А), скважинно-поверхностной (кривая В) и поверхностной (кривая В) методик наблюдения. Стрелками отмечены литологические слои, выделенные в соответствии с ФГМ.

▼ Рис. 8. Моделирование по системе наблюдения «скважина-поверхность» над рассматриваемой ФГМ среды.



поверхность» получен геоэлектрический разрез (рис. 8). На разрезе выделяются четыре слоя, мощность и удельное сопротивление которых выдержаны и полностью совпадают с параметрами ФГМ.

Подводя итоги моделирования над ФГМ среды, следует отметить, что по поверхностной системе наблюдения отчетливо выделяются первые два слоя (суглинок, песок), третий слой (песок глинистый) отсутствует, четвертый слой имеет существенно завышенное сопротивление, а по системе наблюдения «скважина-поверхность» уверенно выделяются все четыре слоя, полностью совпадающие по параметрам с ФГМ.

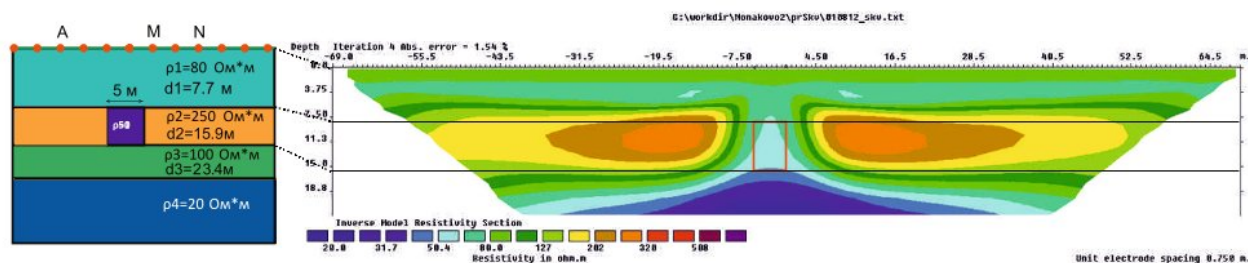
Таким образом, предлагаемая методика скважинно-поверхностной томографии позволяет более детально изучить распределение УЭС в условиях горизонтально-слоистой среды по сравнению со стандартной методикой поверхностных измерений.

Обнаружение локальных объектов

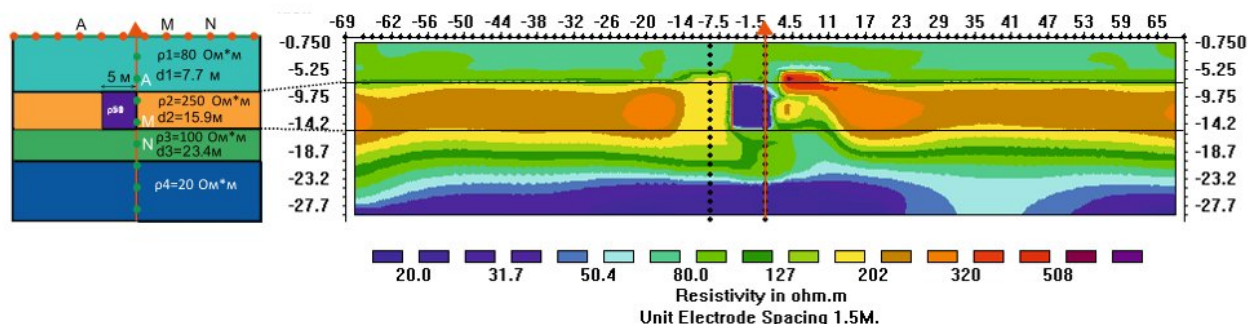
Рассмотрим задачу обнаружения локального объекта. Для этого поместим проводящее тело прямоугольной формы в изучаемую ФГМ. Сопротивление локального объекта - $\rho=10$ Ом м, геометрические размеры - 5×8.2 м.

Результаты моделирования по поверхностной методике измерения и по системе наблюдения «скважина-поверхность» представлены на рис. 10 и 11, соответственно.

Основными критериями обнаружения локальных объектов являются форма и амплитуда аномальной области. Сравнение полученных результатов моделирования демонстрирует, что измерения по системе «скважина-поверхность» намного эффективнее при решении задачи обнаружения и оконтуривания локальных объектов по сравнению со стандартной поверхностной методикой. Так, на геоэлектрическом разрезе по поверхностной системе наблюдения над моделью с



▲ Рис. 10. Моделирование по поверхностной системе наблюдения над горизонтально-слоистой моделью с локальным объектом.



▲ Рис. 11. Моделирование по системе наблюдения «скважина-поверхность» над горизонтально-слоистой моделью с локальным объектом.

локальным объектом эффект от локального объекта проявляется достаточно слабо: амплитуда аномалии, равная порядка 50 Ом м, существенно выше заданного сопротивления локального объекта $\rho=10$ Ом м; локальная аномалия не имеет ярко выраженных границ и формы. Зато на разрезе по системе наблюдения «скважина-поверхность» над горизонтально-слоистой моделью с локальным объектом отлично выделяется аномалия, полностью повторяющая геометрию локального объекта. Амплитуда аномалии совпадает с удельным сопротивлением локального объекта.

К сожалению, на геоэлектрическом разрезе по системе наблюдения «скважина-поверхность» вместе с аномалией пониженного сопротивления от локального объекта появляется ложная, сопутствующая аномалия повышенного сопротивления. Этот эффект, по всей видимости, связан с неустойчивостью двумерной инверсии.

Обработка полевых скважинно-поверхностных данных

Применяя скважинные методики измерений, мы, с одной стороны, получаем больше информации и решаем проблему падения разрешающей способности с глубиной, с другой стороны, сталкиваемся с целым рядом сложностей, связанных со слабым развитием алгоритмов инверсии в данной области.

Мы использовали следующий граф обработки скважинно-поверхностных данных:

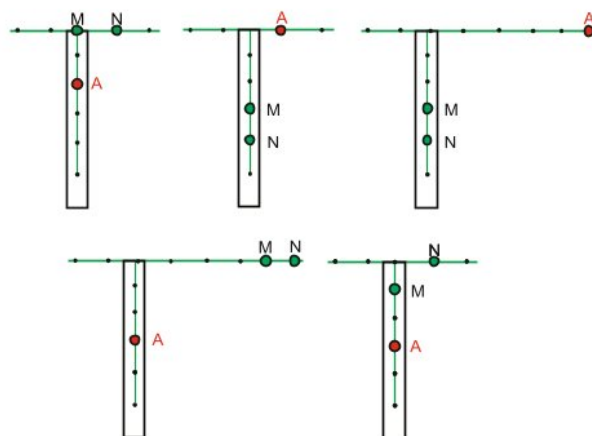
1. Расчёт кажущегося сопротивления;
2. Построение разрезов кажущегося сопротивления для скважинно-поверхностных данных $\rho_k(x, R)$;
3. Отбраковка данных по геометрическому коэффициенту;
4. 2D инверсия по скважинно-по-

верхностным данным. Построение итогового геоэлектрического разреза.

Принципиально отличительным этапом обработки является отбраковка данных по геометрическому коэффициенту. Такая процедура проводилась для решения проблемы некорректности используемой «Т-образной» установки. Некорректность скважинно-поверхностной установки связана с нарушением геометрии при некоторых положениях приёмных и питающих электродов, следовательно, значения электрического поля в этих точках необходимо отбраковывать. Оптимальным критерием такой фильтрации, на наш взгляд, является отбраковка по величине геометрического коэффициента установки.

На рис. 12 представлены типичные случаи нарушения геометрии установки:

- питающий электрод находится в скважине, а приёмный диполь - на поверхности непосредственно у ствола скважины (рис. 12а);
- питающий электрод находится на поверхности у ствола скважины, а приёмный диполь - в скважине (рис. 12б);
- питающий электрод находится на поверхности как можно дальше от скважины, а приёмный диполь - в скважине (рис. 12в);



▲ Рис. 12. Примеры нарушения геометрии установки при «Т-образной» системе наблюдения. Комментарии см. в тексте.

- питающий электрод находится в скважине, а приёмный диполь – на поверхности как можно дальше от скважины (рис. 12г);

- один приёмный электрод находится в скважине, а другой - на поверхности; питающий электрод может в это время находиться как в скважине, так и на поверхности (рис. 12д).

Двумерная инверсия по скважинно-поверхностным данным

Заключительным этапом обработки скважинно-поверхностных данных является 2D инверсия и построение итогового геоэлектрического разреза.

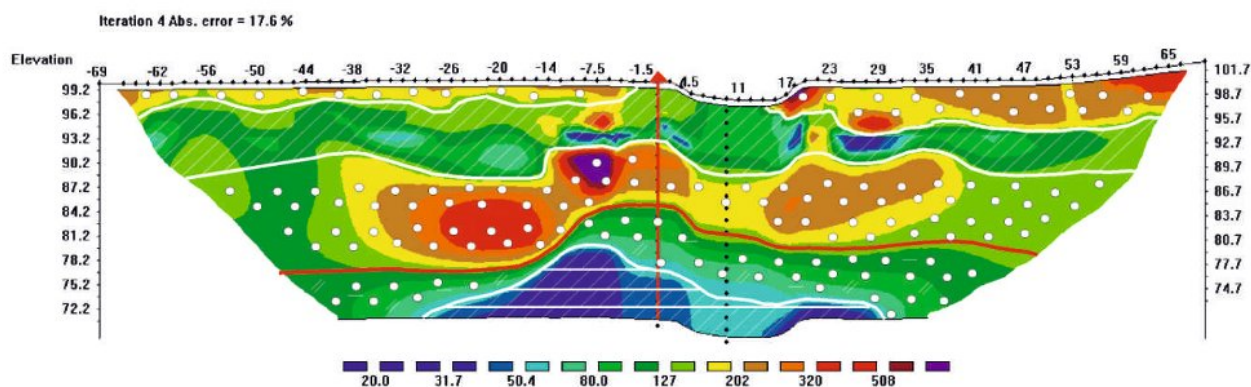
Двумерная инверсия скважинно-поверхностных данных электротомографии осуществлялась с помощью программ Res2DInv (Geotomo Software, Малайзия). Программа превосходно зарекомендовала себя при решении обратной задачи для поверхностных и межскважинных методик измерения. Однако для расчёта инверсии по скважинно-поверхностным данным дела обстоят не так гладко. В основном, это связано с недостаточной универсальностью программы и отсутствием практического опыта решения подобных задач, так как данная методика ранее не применялась. Так как сама программа при работе

со скважинными данными рассчитана только на межскважинные методики измерения, мы использовали формат входного файла для межскважинных данных. Для межскважинной системы наблюдения необходимы две скважины, поэтому в наших расчётах вторую скважину мы считали фиктивной.

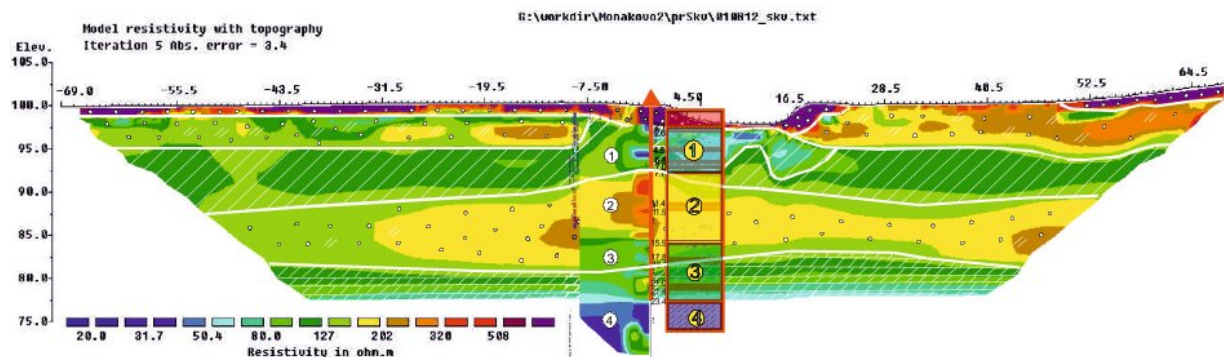
Первым этапом расчёта инверсии было тестирование программы на синтетических данных по скважинно-поверхностной системе наблюдения. После того, как в программе Res2DInv для модельных данных был получен хороший и устойчивый результат инверсии, подобран ряд оптимальных параметров инверсии, при которых получается устойчивое решение вблизи ствола скважины, выбрано положение фиктивной скважины, мы применили процедуру двумерной инверсии с подобранными параметрами для полевых скважинно-поверхностных данных.

Рассчитав, таким образом, инверсию в программе Res2DInv по всем полевым скважинно-поверхностным данным, мы получили геоэлектрический разрез, представленный на рис. 13.

А также, выделяя отдельно скважинные и поверхностные данные из массива скважинно-поверхностных измерений, мы построили двумерную инверсию и



▲ Рис. 13. Геоэлектрический разрез по всем полевым скважинно-поверхностным данным с выделенными литологическими границами.



▲ Рис. 14. Сопоставление геоэлектрического разреза по поверхностным данным, разреза вдоль скважины и литологического разреза.

получили геоэлектрические разрезы по поверхностным данным и геоэлектрический разрез вдоль скважины (рис. 14).

В итоге, мы получили возможность сравнивать полученные разрезы между собой, а также сопоставлять их с априорной геологической информацией, что способствует к более комплексному подходу к интерпретации данных.

Сопоставляя геоэлектрический разрез, полученные по скважинно-поверхностной системе наблюдения и стандартной поверхностной, можно сделать вывод, что предлагаемая методика скважинно-поверхностной томографии позволяет более достоверно и детально изучить распределения УЭС по сравнению со стандартной методикой поверхностных измерений.

Выводы

Использование многоэлектродных измерений в скважинах позволяет повысить разрешающую способность метода сопротивлений по глубине. Несомненно, что есть целый ряд технических и математических проблем, которые мешают широкому внедрению этой методики. Однако другого пути для существенного увеличения разрешающей способности в методе сопротивлений, наверное, не существует.

Литература

Бобачев А. А. Скважинные и межскважинные измерения методом электротомографии [Конференция] // Инженерная и рудная геофизика. - Геленджик, 2013.

Бобачев А.А. Информационный отчет по опытным работам по измерениям методом сопротивлений и ВП на экспериментальном участке подпорной стенки [Отчет]. - 2013.

Бобачев А.А. Куликов В.А. Разработка методов заряженного тела и скважинного варианта вызванной поляризации в условиях Норильской зоны [Статья] // <http://geo.web.ru/>. - 2010 г.

Бобачев А.А. Куликов В.А. Современные модификации скважинно-наземных и межскважинных измерений ВП при решении рудных задач [Статья] // Разведка и охрана недр. - 2008 г. - стр. 6-12.

Каминский А.Е. Воробьева А.В., Титов К.В., Маренко А.М. Развитие методики интерпретации данных межскважинной электротомографии [Конференция] // тезисы доклада на конференции «Инженерная и рудная геофизика». - Геленджик, 2009.

Кормильцев В.В. Семенов В.Д. Электро-разведка методом заряда [Книга]. : Недра, 1987.

Куликов В.А. Бобачев А.А., Груздева И.Д., Яковлев А.Г. Межскважинная электротомография при изучении глубоко залегающего рудного тела в Норильском районе [Статья] // Геофизика. - 2013 г.

Шкабарня Г.Н. Развитие метода электрической томографии на основе математического моделирования электрических полей

[Конференция] // Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. - Владивосток, 2007.

Advanced Geosciences, Inc. Cross Borehole Electrical Resistivity Tomography (ERT) Measurements. - Austin, 2003 г.

Dahlin T. The development of DC resistivity imaging techniques [Статья] // Computers & Geosciences. - 2001 г. - 27.

Daily W Owen E Cross-borehole resistivity tomography [Статья] // Geophysics. - 1991 г. - стр. 28–35.

Daily W Ramirez L Electrical imaging of engineered hydraulic barriers [Статья] // Geophysics. - 2000 г. - стр. 83–94.

Goes B. Meekes J. An effective electrode configuration for the detection of DNAPLs with electrical resistivity tomography [Статья] // J. Environ. Eng. Geophys. - 2004 г. - стр. 127–41.

Griffiths D.H. Barker R.D. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology [Статья] // J. Appl. Geophysics. - 1993 г. - 29.

Loke M. Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys [Статья] // <http://www.geoelectrical.com>. - 2010 г.

Loke M.H. Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudo-sections by a quasi-Newton method [Статья] // Geophysical Prospecting 44. - 1996 г.

Marescot L. Palma Lopes S., Lagabriele R., Chapellier D. Designing surface-to-borehole electrical resistivity tomography surveys using the Frechet derivative [Статья] // Proc. 8th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society—European Section. - 2002 г.

Morelli G LaBrecque D Advances in ERT inverse modeling [Статья] // Eur. J. Environ. Eng. Geophys. - 1996 г. - стр. 171–86.

Slater L. Binley A., Daily W., Johnson R. Cross-hole electrical imaging of a controlled saline tracer injection [Статья] // J. Appl. Geophys. - 2000 г. - стр. 85–102.

Tsourlos P. Ogilvy R., Papazachos C., Meldrum P. Measurement and inversion schemes for single borehole-to-surface electrical resistivity tomography surveys [Статья] // J. Geophys. Eng. 8. - 2011 г.

Подробнее об авторах



Бобачев
Алексей Анатольевич

доцент кафедры
геофизики геологического
факультета МГУ
им. М.В. Ломоносова



Стойнова
Александра Марковна

аспирант кафедры
геофизики геологического
факультета МГУ
им. М.В. Ломоносова