

УДК 550.837.81; 550.837.9; 550.8.053

**А.В.ВОРОБЬЕВА**, аспирант, *policina@mai.ru*

**К.В.ТИТОВ**, д-р геол.-минерал. наук, профессор, *kt\_496@mail.ru*

Санкт-Петербургский государственный университет

**А.Е.КАМИНСКИЙ**, руководитель группы интерпретации, *kaminae@yandex.ru*

**А.М.МАРЕНКО**, генеральный директор, *marenko@astrageo.spb.ru*

ЗАО «КТЭ «Астра», Санкт-Петербург

**A.V.VOROBYEVA**, post-graduate student, *policina@mai.ru*

**K.V.TITOV**, Dr. in geol. & min. sc., professor, *kt\_496@mail.ru*

Saint Petersburg State University

**A.E.KAMINSKIY**, chief of interpretation group, *kaminae@yandex.ru*

**A.M.MARENKO**, general director, *marenko@astrageo.spb.ru*

JSC «Geophysical company «Astra»

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕЖСКВАЖИННОЙ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДЛЯ ДЕТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ СУЛЬФИДНОГО ОРУДЕНЕНИЯ

Межскважинная электротомография (МЭТ) вызванной поляризации (ВП) – одно из развивающихся направлений электроразведки. Разрешающая способность этого метода позволяет детально изучать распределения удельного электрического сопротивления и поляризуемости в условиях сложных сред. В статье представлена одна из возможных технологий проведения МЭТ ВП во временной области, методика обработки и интерпретации данных. Приведены результаты МЭТ ВП на участке с сульфидным оруденением (Кольский полуостров).

**Ключевые слова:** электротомография, скважина, сульфиды, инверсия.

## EXPERIENCE OF CROSS-HOLE ELECTRICAL IP-TOMOGRAPHY FOR DETAILED STUDY OF SULFIDE MINERALIZATION

Cross-hole induced polarization tomography is a promoting area of electrical survey. The high resolution of this method allows detailed study of the distribution of electrical resistivity and chargeability in a hole-hole plane. In the paper we describe a used field technique, principles of data acquisition and inversion. We present results of the cross-hole induced polarization tomography obtained on a site with sulphide mineralization (Kola Peninsula).

**Key words:** electrical tomography, borehole, sulfides, inversion.

Объект исследования находится в пределах сложно построенной тектонической зоны севера Кольского полуострова и представляет собой метасоматический массив кварц-плагиоклазового состава, окруженный осадочными породами рифейского возраста. В теле массива и во вмещающих породах выявлены зоны сульфидной минера-

лизации, сопровождающиеся геохимическими аномалиями золота и элементов-спутников.

Для оценки перспективности геохимических аномалий потребовалось прослеживание границ массива и оконтуривание зон сульфидной минерализации в массиве и во вмещающих породах. Согласно геологическому заданию наблюдения выполнялись

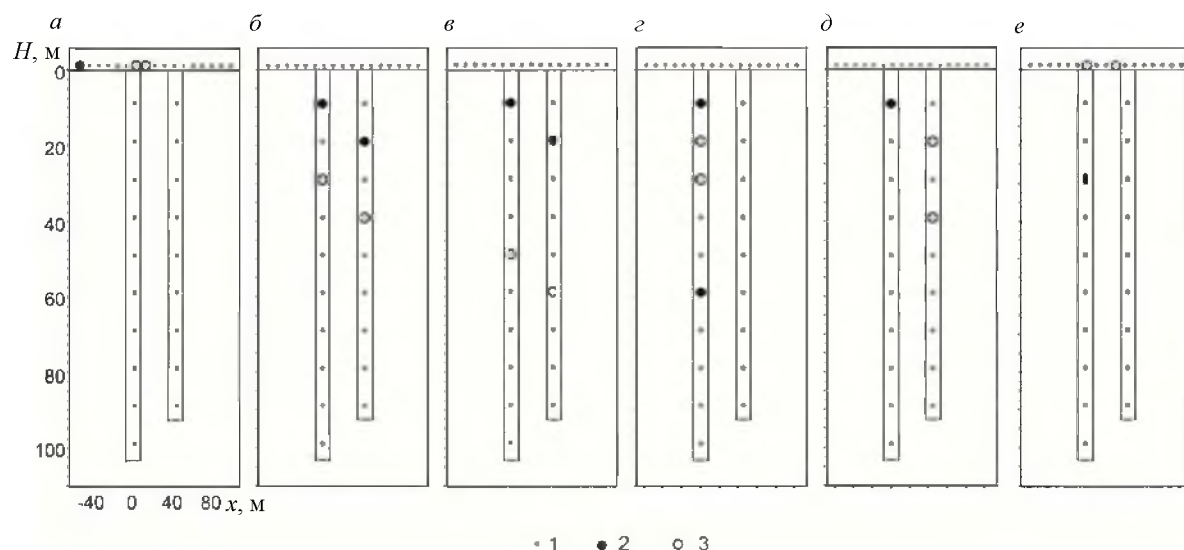


Рис.1. Схемы установок межскважинной томографии: *a* – трехэлектродная наземная; *б* – разностно-потенциальная длиной 20 м; *в* – разностно-потенциальная длиной 40 м; *г* – градиентная скважинная; *д* – трехэлектродная межскважинная; *е* – трехэлектродная скважино-поверхностная  
1, 2 и 3 – неактивные, питающие и приемные электроды соответственно

методом ВП [1] в модификации межскважинной электротомографии с использованием имеющихся на объекте скважин. При этом по распределению удельного электрического сопротивления ( $УЭС$ ) предполагалось оконтурить массив, а по распределению поляризуемости – проследить распространение зон сульфидной минерализации в межскважинном пространстве.

Для решения поставленных задач была выбрана система наблюдений, включающая измерения в стволе одной скважины, межскважинные измерения в парах скважин и измерения по системе скважина – поверхность (рис.1) [5]. Измерения проводились с использованием многожильных кос со свинцовыми приемными и питающими электродами. Расстояние между электродами 10 м. На поверхности в качестве приемных использовали стандартные неполяризующиеся  $Cu/CuSO_4$ -электроды. Коммутация приемных и питающих электродов производилась вручную.

При производстве измерений использовался комплект аппаратуры АИЭ-2 (ООО НПК «Элгео», Санкт-Петербург), включающий измеритель вызванной поляризации и генератор тока мощностью 1 кВт. Разнополярные импульсы тока имели длитель-

ность 2 с с двухсекундной паузой между ними. Для вычисления значений кажущегося сопротивления использовались значения

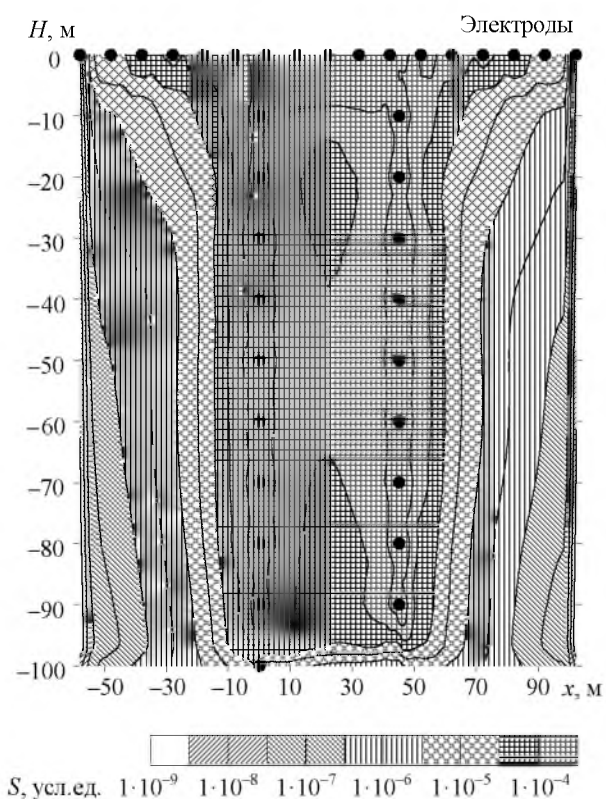


Рис.2. Распределение чувствительности для всей системы наблюдений

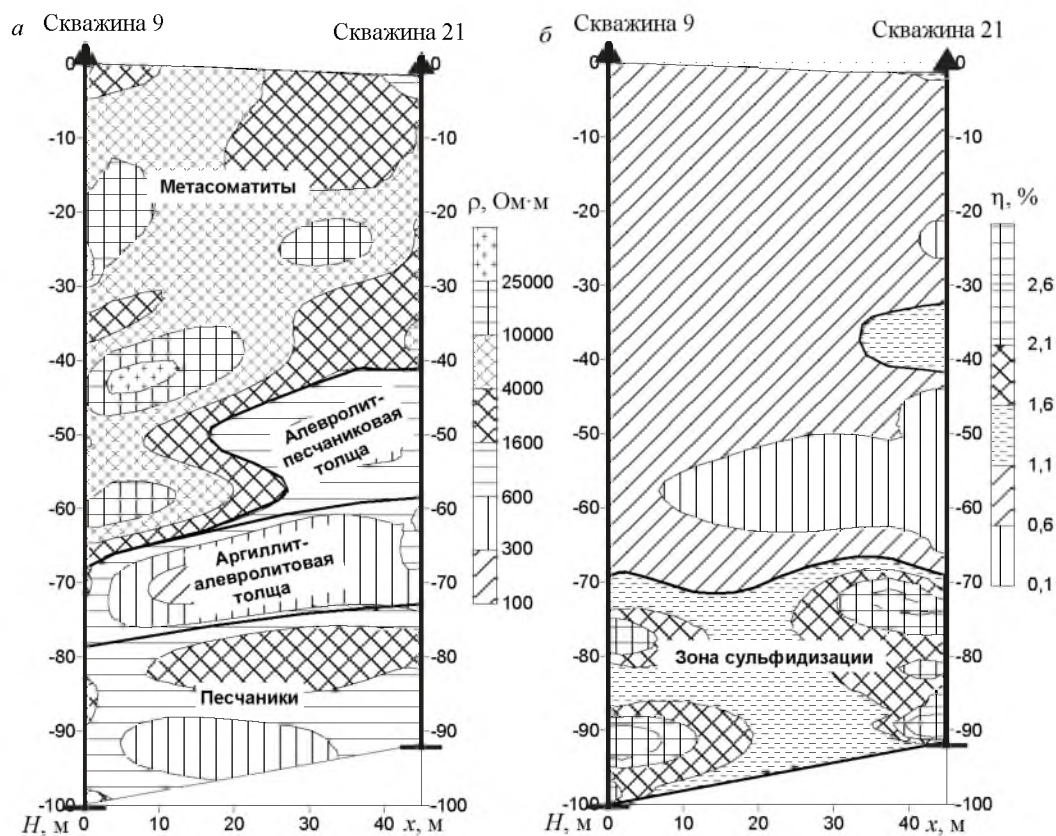


Рис.3. Геоэлектрический разрез по линии скважин 9-21: а и б – распределение УЭС и поляризуемости соответственно

напряжения в конце токового импульса. Измерения переходных процессов проводились в паузе с нарастающей длительностью временных окон, что позволяло сохранять приемлемое отношение сигнал/шум. Спад ВП характеризовался семнадцатью измерениями.

Для уточнения геологических границ в околоскважинном пространстве был выполнен каротаж методом ВП с использованием трехэлектродных зондов кровельного (M1N4B) и подошвенного (A4M1N) типов с шагом наблюдения 1 м. Сеть наблюдений позволила получить около 500 измерений на одну пару скважин в интервале глубин  $H = 100$  м. Такая плотность наблюдений позволяет детально изучить межскважинный геоэлектрический разрез.

В качестве оценки разрешающей способности выбранной системы наблюдений изучено распределение чувствительности, которое характеризует степень влияния каждой ячейки модели на результаты измерений.

Функция чувствительности для модели однородного полупространства (рис.2) рассчитана при помощи программы ZondCHT2D (А.Е.Каминский, ЗАО «КГЭ "Астра"») по формуле

$$S = \text{diag}(A^T A_{ij}),$$

где  $A_{ij} = \frac{\partial \lg \rho_k^i}{\partial \lg \rho^j}$ ;  $\rho_k^i$  – кажущееся удельное электрическое сопротивление в точке  $i$  на поверхности,  $\rho^j$  – удельное электрическое сопротивление в ячейке  $j$ -й модели [5].

Полученные данные обработаны с помощью программы ZondCHT2D. Использован метод наименьших квадратов Ньютона с регуляризацией в модификации Оссам [2], который позволяет получить гладкие и наиболее устойчивые распределения геоэлектрических параметров. Обработка проводилась в несколько этапов:

1) одномерная инверсия данных электрического каротажа по кажущемуся сопротивлению и кажущейся поляризуемости  $\eta$ ;

2) двумерная инверсия [3, 4] данных остальных схем наблюдений, при этом данные по УЭС, полученные при инверсии каротажа, использовались в качестве стартовой модели для характеристики окоскважинного пространства;

3) инверсия данных кажущейся поляризуемости на основе полученной модели распределения УЭС.

Аналогичным образом использовались результаты подбора поляризуемости по каротажу для моделирования окоскважинного пространства.

В качестве критериев оптимального решения обратной задачи были приняты минимальная невязка между измеренными и вычисленными данными, «гладкость» распределения геоэлектрических параметров и соответствие полученной модели априорной информации (данным бурения и каротажа).

В результате получены геоэлектрические разрезы в виде распределений удельного электрического сопротивления и поляризуемости. Распределение УЭС главным образом отражает литологическую характеристику пород, распределение поляризуемости позволило выделить зоны сульфидной минерализации (рис.3).

Метасоматические породы массива на фоне переслаивающихся песчаников алевролитов и аргиллитов характеризуются повышенными значениями УЭС и оконтурены по изолинии УЭС 2000 Ом·м. Песчаники характеризуются широким диапазоном УЭС: от 500 до 2000 Ом·м. Наиболее низкоомными являются аргиллиты и алевролиты, УЭС

которых составляет 50-100 Ом·м. Зоны сульфидизации отвечают повышенным значениям поляризуемости и выделены по изолинии 1,5 %.

Опыт работ показал, что предлагаемая методика межскважинной томографии позволяет детально изучить распределение УЭС и поляризуемости геологических объектов в межскважинном пространстве при расстоянии между скважинами не более 70 м.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. Л., 1980. 391 с.
2. Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data // Geophysics. 1987. P.287-300.
3. Daily W., Owen E. Cross-borehole resistivity tomography // Geophysics. 1991. P.1228-1235.
4. Lesur V., Cuer M., Straub A. 2-D and 3-D interpretation of electrical tomography measurements. Part 1: The forward problem // Geophysics. 1999. P. 386-395.
5. Zhou B., Greenhalgh S.A. Cross-hole resistivity tomography using different electrode configuration // Geophysical Prospecting. 2000. P. 887-912.

## REFERENCES

1. Komarov V.A. Geoelectrics method of induced polarization. Leningrad, 1980. 391 p.
2. Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data // Geophysics. 1987. P.287-300.
3. Daily W., Owen E. Cross-borehole resistivity tomography // Geophysics. 1991. P.1228-1235.
4. Lesur V., Cuer M., Straub A. 2-D and 3-D interpretation of electrical tomography measurements. Part 1: The forward problem // Geophysics. 1999. P. 386-395.
5. Zhou B., Greenhalgh S.A. Cross-hole resistivity tomography using different electrode configuration // Geophysical Prospecting. 2000. P. 887-912.