

УДК 550.83

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ МЕТОДА ДЛИННОГО КАБЕЛЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ НА УЧАСТКЕ “БАРОБИНСКИЙ” (СЕВЕРНЫЙ КАЗАХСТАН)

© 2020 г. А.Г. Фельдман¹, Н.В. Молокова¹, В.И. Иголкин²

¹ *Институт космических и информационных технологий Сибирского федерального университета,
г. Красноярск, Россия*

² *Ар ДиСайнс, г. Красноярск, Россия*

Представлен алгоритм обработки и интерпретации полевых материалов электроразведки, получаемых методом длинного кабеля с использованием низкочастотной аппаратуры КАН-ЭММ, включающий несколько этапов. На первом этапе осуществляется расчет аномальных значений горизонтальной и вертикальной составляющих магнитного поля. На втором строятся полные векторы магнитного поля, координатами которых являются вычисленные аномальные значения составляющих. На третьем выполняется построение нормалей к векторам и находятся точки их пересечений. Затем найденный набор точек с помощью алгоритма кластеризации *k*-средних разбивается на группы, соответствующие искомым аномальным областям; на завершающем этапе выделяются границы этих областей.

Данный алгоритм реализован в виде разработанного авторами программного модуля “Прогноз”, позволяющего определять местонахождение аномальных объектов в геологической среде, проводить анализ прослеженных локализаций низкого или высокого электрического сопротивления, получая полезную геофизическую информацию.

С помощью модуля “Прогноз” были обработаны полевые данные, полученные на стадии поисковых работ на золото в условиях слабой геологической изученности исследуемого участка рудопроявления “Баробинский” (Северный Казахстан). По результатам интерпретации были локализованы аномальные зоны проводимости, представляющие интерес для геологоразведки и подлежащие дальнейшему геологическому истолкованию с привлечением дополнительной геолого-геофизической информации. Выполненное на одном из пикетов (ПК 1420, профиль 7) бурение показало наличие на участке оруденения с присутствием золота, что согласуется с результатами проведенного исследования.

Разработанный программный модуль обеспечивает построение адекватных моделей геоэлектрических разрезов в условиях неполной геолого-геофизической информации на основе решения обратной задачи, позволяя существенно сократить временные и материальные затраты.

Ключевые слова: аномальный объект, алгоритм обработки и интерпретации геофизических данных, аппаратура КАН-ЭММ, геофизическое программное обеспечение.

Введение

Целью интерпретации геолого-геофизических данных является извлечение полезной информации из имеющихся полевых данных для построения геологических моделей сред изучаемых районов при проведении прогноза присутствия в них искоемых полезных ископаемых. Необходимость повышения эффективности работ, связанных с разработкой месторождений полезных ископаемых, требует создания надежных параметрических моделей. Развитие компьютерного моделирования и информационных технологий позволяет создавать программные модули, обрабатывающие большие объемы информации и решающие сложные геологические задачи с минимальной затратой времени.

Настоящая работа посвящена разработке программного модуля, предназначенного для обработки и интерпретации материалов полевых работ, проводимых методом длинного кабеля с применением комплекса низкочастотной аппаратуры КАН-ЭММ.

Аппаратура КАН-ЭММ [Иголкин и др., 2016], использующая частотный диапазон 312.5–10 000 Гц, предназначена для работы бесконтактным электромагнитным методом индуктивного возбуждения и приема магнитной составляющей электромагнитного поля. Также возможно возбуждение электрического тока контактным способом через заземления *A* и *B* и приём электрической составляющей с линии *MN*. Аппаратура выполнена в переносном варианте (рис. 1).

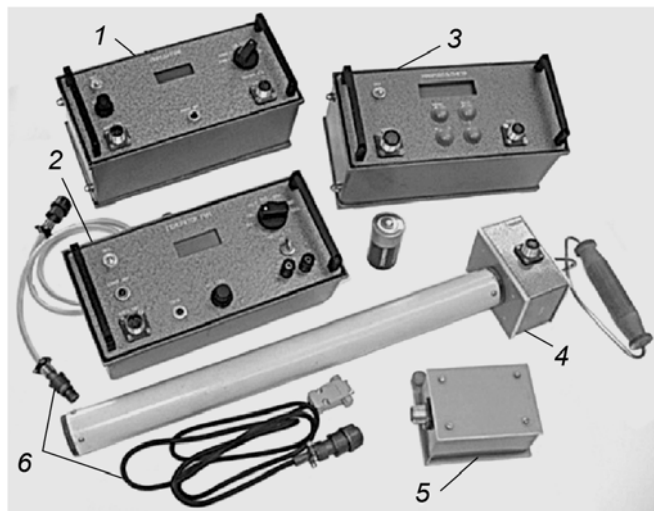


Рис. 1. Комплекс аппаратуры низкочастотной КАН-ЭММ (312.5–10 000 Гц): 1 – передатчик; 2 – генератор низкой частоты; 3 – микровольтметр; 4 – приёмный магнитный диполь; 5 – усилитель приёмных сигналов; 6 – соединительные кабели

Fig. 1. The complex of low-frequency equipment KAN-EMM (312.5–10 000 Hz): 1 – transmitter; 2 – low frequency generator; 3 – microvoltmeter; 4 – receiving magnetic dipole; 5 – amplifier of receiving signals; 6 – connecting cables

Генератор с помощью питающей линии *AB* создает в исследуемой среде электромагнитное поле (ЭМП), характер которого зависит от электромагнитных свойств среды. Приемник с помощью приёмного магнитного диполя измеряет вертикальную и горизонтальную компоненты ЭМП, величины которых в цифровом виде заносятся в его память. Возможность последующей передачи данных на персональный компьютер исключает необходимость ручной записи измеряемых величин в процессе проведения измерений.

Метод длинного кабеля основан на исследовании электромагнитного поля кабеля, которое распространяется в геологической среде на расстояния (по площади и глубине), соизмеримые с длиной самого кабеля. Задачей метода является обследование геологического разреза как на малых (десятки метров), так и на больших (сотни метров) глубинах. В первом случае обеспечивается высокое разрешение, во втором – разрешение более низкое.

Магнитное поле кабеля (рис. 2) создаётся как сумма магнитных полей переменного тока [Краев, 1965] – поля тока, текущего в кабеле; поля тока в точках заземления кабеля (заряды *A* и *B*); поля тока в нижнем полупространстве (в горных породах при протекании тока между электродами *A* и *B*).

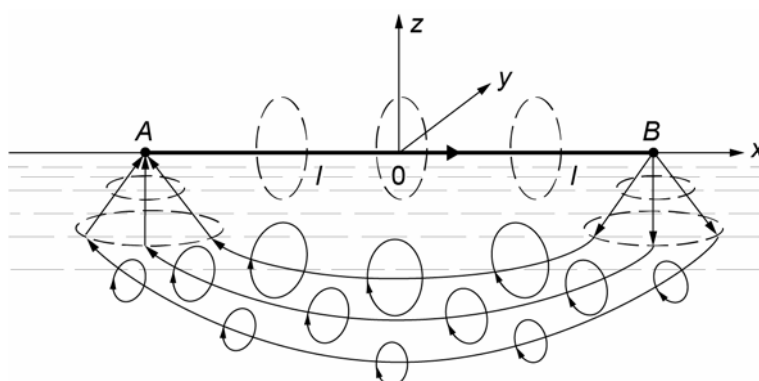


Рис. 2. Схема электрического и магнитного полей длинного кабеля. A, B – точки заземления кабеля, l – половина длины кабеля. Размеры эллипсов условно отображают интенсивность магнитного поля

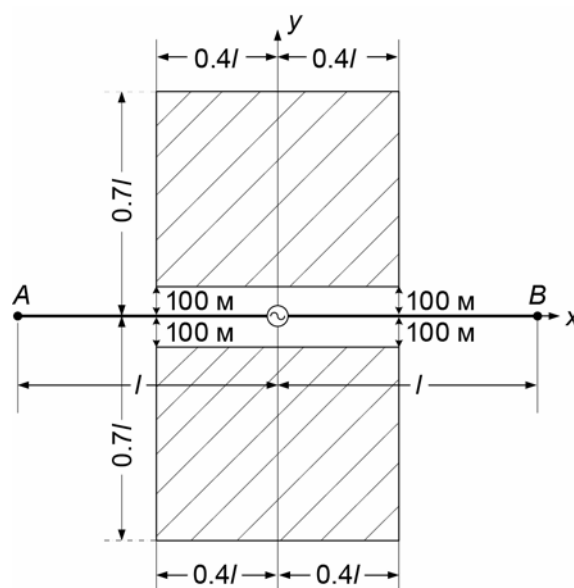
Fig. 2. Plot of electric and magnetic fields of a long cable. A, B – cable grounding points, l – half the cable length. The sizes of ellipses conventionally reflect the intensity of the magnetic field

При прохождении тока по замкнутой электрической цепи каждый её элемент создаёт магнитное поле своей конфигурации (см. рис. 2), при синхронном проявлении которых все поля суммируются. В результате этого создаётся сложно построенное в пространстве единое (суммарное) магнитное поле H , которое распространяется в окружающем пространстве, затухая к периферии с конфигурацией фронта, соответствующей электрофизическим свойствам окружающей среды.

В каждой точке пространства, в том числе на земной поверхности на рабочих профилях, вектор напряжённости суммарного магнитного поля H направлен строго по касательной к фронту электромагнитной волны. Съёмка магнитного поля проводится по обе стороны от длинного заземлённого на концах кабеля, по которому пропускается переменный ток фиксированной частоты (рис. 3).

Рис. 3. Рабочая схема, используемая в методе длинного кабеля. Штриховкой выделены области значений горизонтальной H_y и вертикальной H_z составляющих, удовлетворяющие условиям поля длинного кабеля. l – половина длины кабеля

Fig. 3. The working plot used in the long cable method. Hatching shows ranges of values of horizontal H_y and vertical H_z satisfying the conditions of the long cable field. l – half the cable length



Для достижения большей глубинности исследований применяется диапазон низких частот. В каждой точке наблюдения измеряются [Инструкция..., 1984] горизонтальная H_y и вертикальная H_z составляющие магнитного поля, по отношению которых

H_y/H_z вычисляется эффективное сопротивление $\rho_{\text{эф}}$ [Вешев, 1980] с использованием его зависимости от $\rho/(l^2 f)$ для разных значений расстояния от кабеля до точки наблюдения y [Вешев, 1980], где l – половина длины кабеля; f – рабочая частота, Гц;

По сравнению с другими индуктивными методами, используемый нами метод имеет ряд преимуществ – его отличают большая глубинность исследований, лучшая разрешающая способность и меньшая зависимость результатов наблюдения от рельефа дневной поверхности.

В электроразведке аномальным объектом считается фрагмент геоэлектрического разреза, существенно отличающийся от окружающей среды значением сопротивления. Аномальный объект может быть либо проводящим (низкоомным), либо высокоомным. В проводящем аномальном объекте под действием переменного магнитного поля кабеля наводятся вихревые токи, порождающие, в свою очередь, вторичное магнитное поле. Высокоомные объекты токи обходят, вызывая тем самым искажения магнитного поля. Суммарное магнитное поле от проводящих аномальных объектов создаёт аномалию измеряемых значений поля в точках наблюдения, что отображается на построенных по линии профиля графиках $\rho_{\text{эф}}$, которые дают приближённое представление о распределении проводящих и высокоомных пород в разрезе.

Проведенный анализ локализации аномальных объектов основан на положении, согласно которому точки пересечения перпендикуляров к аномальным векторам напряжённости магнитного поля указывают на искомый аномальный объект [Заборовский, 1963]. В соответствии с этим положением авторами был разработан алгоритм, реализованный на языке программирования C#.

В качестве входных параметров для программы выступают значения горизонтальной H_y и вертикальной H_z составляющих магнитного поля, измеренные на пикетах разных профилей при разном положении кабеля. На выходе программы мы имеем выделенные области залегания аномальных объектов.

Алгоритм обработки и интерпретации геолого-геофизических данных

Измеряемые при полевых наблюдениях горизонтальные и вертикальные составляющие магнитного поля являются суммарными, обусловленными полем кабеля и аномальных объектов. Поэтому на первом шаге для получения аномальных значений $H_y^{\text{ан}}$ и $H_z^{\text{ан}}$ необходимо из измеренных значений H_y и H_z вычесть нормальное поле кабеля, используя следующие формулы:

$$H_y^{\text{ан}} = H_y - \frac{\sum_{i=1}^n H_y}{n}, \quad (1)$$

$$H_z^{\text{ан}} = H_z - \frac{\sum_{i=1}^n H_z}{n}, \quad (2)$$

где n – число профилей.

Для расчёта нормального поля кабеля использовался известный практический приём. Значения H_y и H_z усреднялись по одноимённым пунктам на всех отработанных профилях, в результате чего влияние аномальных участков сводилось к минимуму. После вычета нормального поля из наблюденного в точках наблюдения получались искомые аномальные значения горизонтальной и вертикальной составляющих.

Следующим шагом было построение полных векторов магнитного поля, выходящих из точек наблюдений. Координатами полного вектора $\vec{H}$ служили вычисленные на предыдущем шаге аномальные значения составляющих – $\vec{H} = (H_y^{an}; H_z^{an})$.

После этого к векторам строились нормали, опущенные из точек наблюдений. Действующая длина перпендикуляра задавалась через коэффициент пропорциональности к длине вектора, отображающего напряженность магнитного поля в данной точке наблюдения; величина коэффициента подбиралась опытным путем. Для построенных таким образом нормалей искали точки их пересечения.

Для локализации областей был выбран алгоритм кластеризации k -средних [Мюллер, 2017]. Цель данного алгоритма – разделение исходного множества наблюдений на подмножества кластеров; при этом каждое наблюдение относится к тому кластеру, к центру (центроиду) которого оно ближе всего. В качестве меры близости используется Евклидова метрика. Наблюдениями в нашем случае являются найденные на предыдущем этапе точки пересечения нормалей.

Каждое наблюдение описывается двумя признаками – координатой x и координатой y . Для двух точек A и B с координатами (x_1, y_1) и (x_2, y_2) Евклидово расстояние определяется как

$$d(A, B) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}. \quad (3)$$

Алгоритм k -средних – наиболее популярный метод кластеризации в связи с простотой его реализации и большой скоростью работы – имеет один недостаток, который связан с необходимостью априорного задания числа кластеров. Для решения этой задачи расчет коэффициента силуэта s для каждого объекта осуществляется по формуле

$$s = \frac{b - a}{\max(a, b)}, \quad (4)$$

где a – среднее расстояние от данного объекта до объектов того же кластера; b – среднее расстояние от данного объекта до объектов следующего ближайшего кластера. Коэффициент силуэта для всех объектов определяется как среднее значение коэффициентов силуэта для каждого объекта. Оптимальным будет число кластеров, при котором значение данного коэффициента максимально приближено к единице.

После выполнения кластеризации мы получаем наборы кластеров, соответствующие искомым аномальным областям. Для более наглядного представления было решено выделять границы областей путем соединения крайних точек, для чего использовался один из алгоритмов построения выпуклых оболочек¹ – алгоритм Джарвиса [Препарата, Шеймос, 1989].

Экспериментальные исследования

С помощью разработанного геофизического программного обеспечения были проанализированы материалы полевых работ, проведенных на участке поисково-разведочных работ “Баробинский” в Северном Казахстане (рудопоявление золота) методом длинного кабеля с использованием аппаратуры КАН-ЭММ.

Электроразведочные работы проводились при длине кабеля 3 км с перекладкой через 1 км; съёмка при каждом положении кабеля выполнялась по ортогональным профилям длиной 1 км. Через кабель пропусклся переменный ток с частотой 312 Гц. В точках наблюдения измерялись горизонтальная и вертикальная составляющие

¹ Выпуклая оболочка – наименьший выпуклый многоугольник, содержащий данные точки.

электромагнитного поля. На схеме, приводимой на рис. 4, вертикальными линиями изображены четыре варианта размещения кабеля, горизонтальными – соответствующие им профили наблюдения.

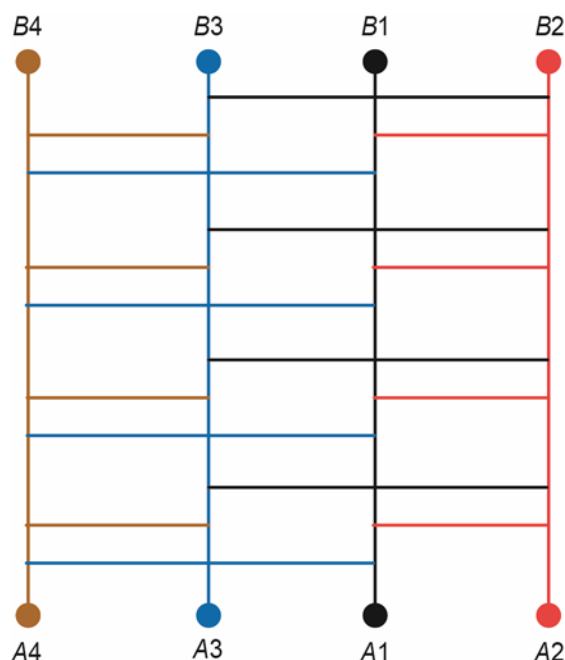


Рис. 4. Схема вариантов размещения кабеля и соответствующих им профилей наблюдения составляющих магнитного поля. Вертикальные линии $A1B1$, $A2B2$, $A3B3$, $A4B4$ – кабели; горизонтальные линии – профили; залитые кружки – заземленные электроды

Fig. 4. Plot of cable arrangement options and corresponding observation line of magnetic field components. Vertical lines $A1B1$, $A2B2$, $A3B3$, $A4B4$ – cables; horizontal lines – profiles; filled circles – grounded electrodes

Наблюдения были выполнены по одиннадцати профилям. Ниже на рис. 5–8 приводятся результаты обработки полевых электроразведочных материалов по четырем из них в виде графиков эффективного электрического сопротивления, построенных для четырех разных положений кабеля, и геоэлектрических разрезов с выделенными аномальными зонами.

На профилях 1 (см. рис. 5), 7 (см. рис. 7), 11 (см. рис. 8) было выделено шесть аномальных зон, на профиле 3 (см. рис. 6) – пять. Выделенные зоны достаточно хорошо согласуются с графиками $\rho_{эф}$, коррелируются между профилями, образуя низкоомные и высокоомные области. Проводящие области могут быть обусловлены выходящими на поверхность синими глинами, а расположенные между ними высокоомные – вмещающими породами с включением кварцевых жил, о чём свидетельствуют обломки кварца на поверхности. Низкоомная (проводящая) зона, проходящая по пикетам 2200–3000 всех профилей, совпадает с наблюдаемым на поверхности солончаком; не исключено, что в этом месте на глубине проявляется сульфидная минерализация.

Рис. 5–8. Вверху: графики $\rho_{эф}$, построенные для четырех положений кабеля. Цвет кривых соответствует схеме, приведенной на рис. 4. Кружки разного цвета на горизонтальной оси – четыре положения кабеля; ПК – пикеты; $\rho_{эф}$ – эффективное сопротивление. Внизу: геоэлектрический разрез по профилю с выделенными аномальными зонами. 1 – точки пересечения нормалей; 2 – нормали к векторам магнитного поля; 3 – аномальные области

Fig. 5–8. On the top: graphs $\rho_{эф}$ plotted for four cable positions. The color of the curves corresponds to the circuit shown in Fig. 4. Circles on the horizontal axis of different colors – cable positions; ПК – pickets; $\rho_{эф}$ – effective resistance. On the bottom: geoelectric section of the profile with the selected anomalous areas. 1 – points of intersection of normals; 2 – normals to the magnetic field vectors; 3 – anomalous areas

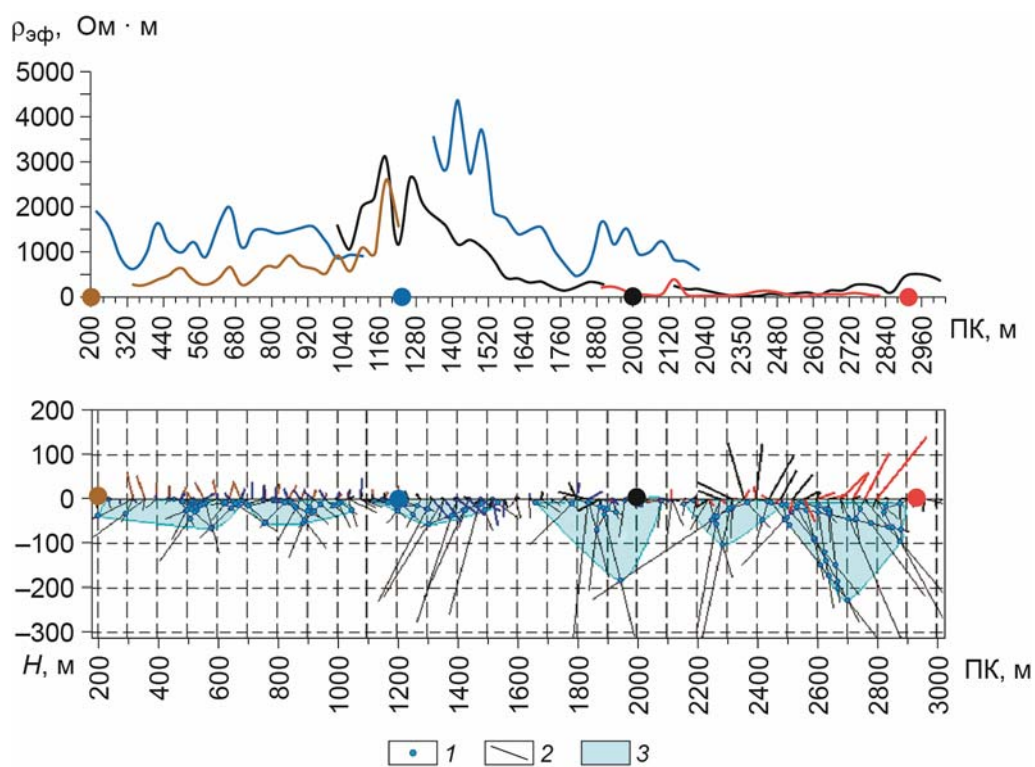


Рис. 5. Профиль 1

Fig. 5. Profile 1

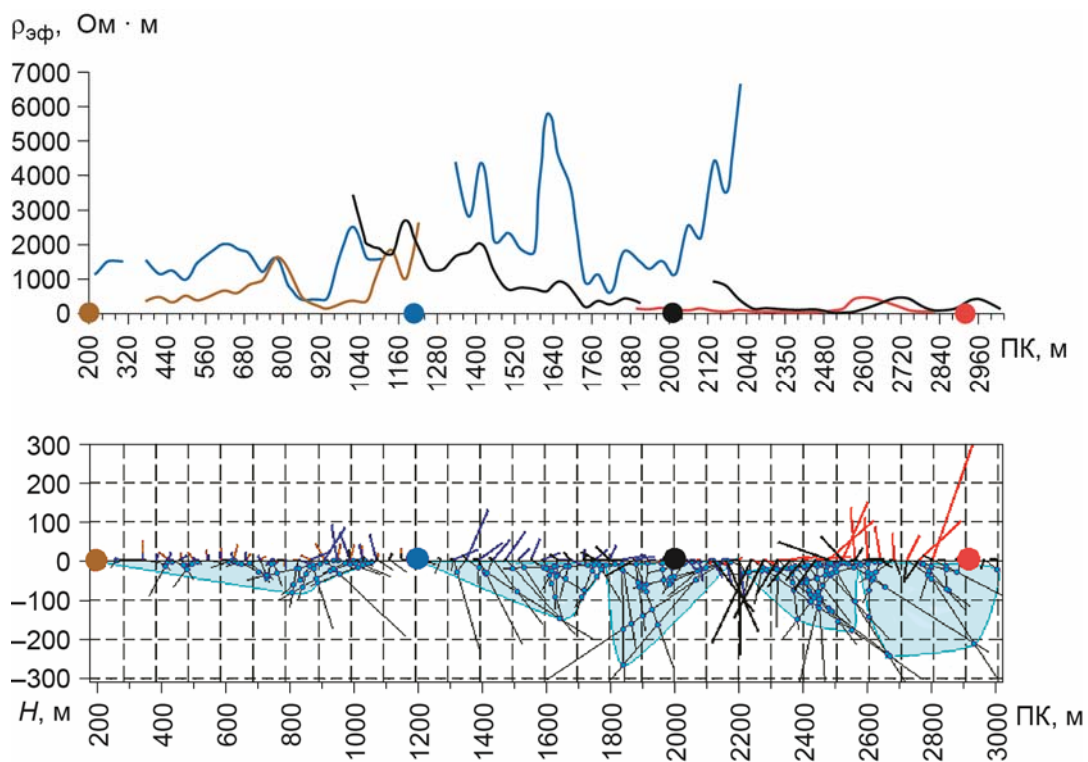


Рис. 6. Профиль 3

Fig. 6. Profile 3

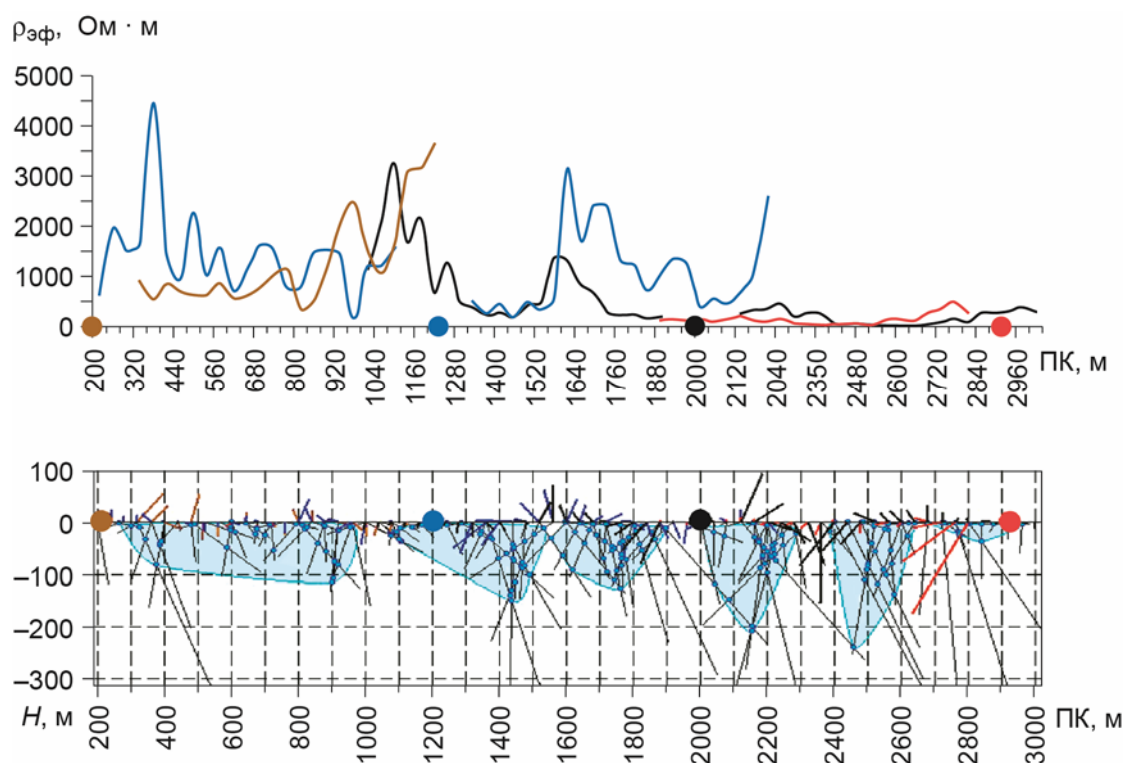


Рис. 7. Профиль 7

Fig. 7. Profile 7

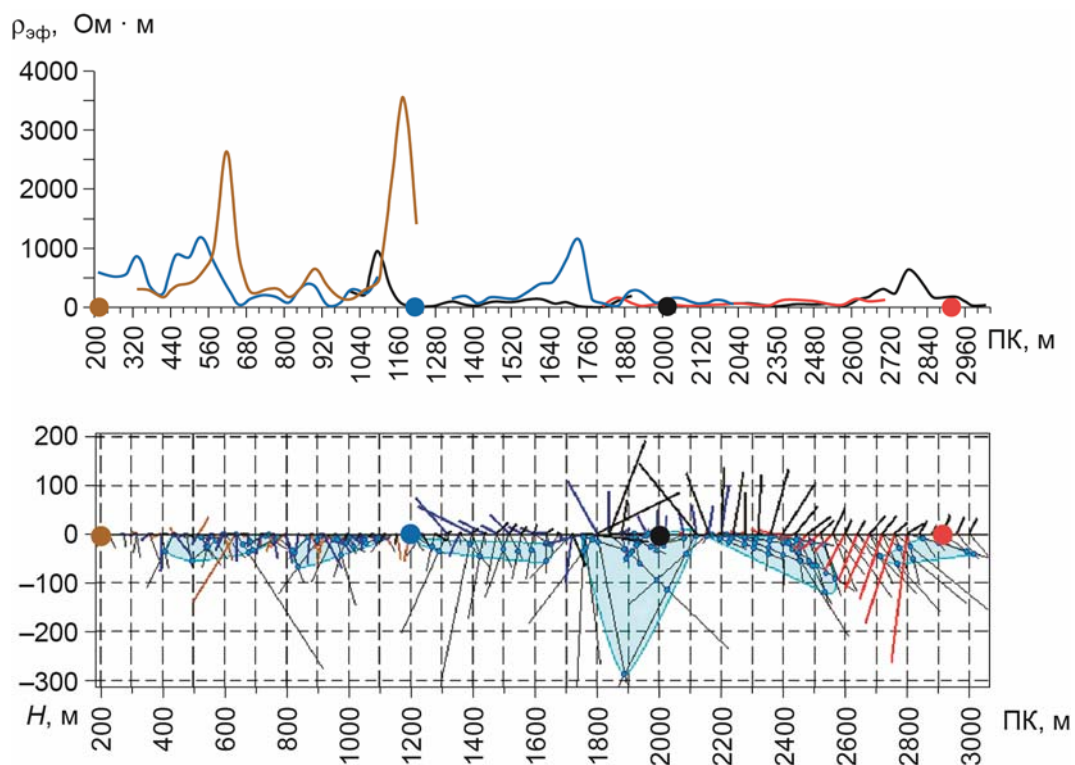


Рис. 8. Профиль 11

Fig. 8. Profile 11

Полученный геолого-геофизический материал лег в основу рекомендаций по проведению целенаправленного заверочного бурения на исследуемой территории.

На аномальном участке повышенной проводимости, выявленном на профиле 7, в области проявления синих глин (см. рис. 7, ПК 420) было проведено бурение, показавшее наличие оруденения с присутствием золота, что согласуется с результатами геофизических исследований. На основе этих результатов на профиле 7 были намечены места заложения скважин (рис. 9), бурение которых обеспечит выявление геологической природы проводящих и высокоомных зон и, как следствие, выбор наиболее перспективных из них для рационального проектирования буровых работ на других профилях разведваемого участка.

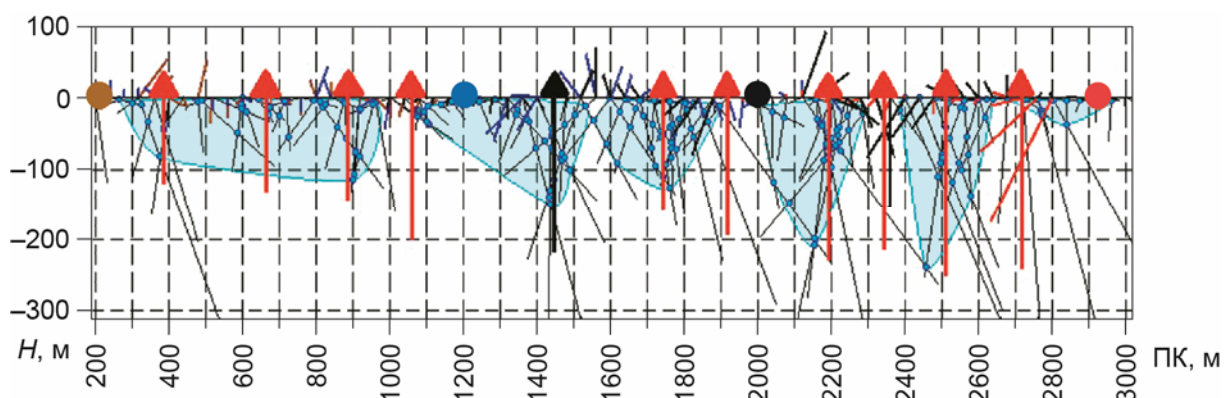


Рис. 9. Схема размещения проектируемых скважин на профиле 7. Красные треугольники – проектируемые скважины; черный треугольник – скважина, пробуренная на ПК 420. Вертикальные отрезки – глубина бурения. Остальные обозначения см. на рис. 5

Fig. 9. Layout of designed wells on the profile 7. Red triangles – designed wells; black triangle – well drilled on ПК 420. Vertical sections – drilling depth. Other designations see in Fig. 5

Как уже упоминалось выше, применение компьютерной обработки полевых геофизических материалов позволяет существенно снизить затраты на организацию и проведение разведочных работ, в том числе буровых. Так, на участке “Баробинский” благодаря использованию программного модуля “Прогноз” объем запроектированного бурения, по оценкам специалистов, может быть сокращен на 40 %.

Заключение

Разработан алгоритм для анализа и интерпретации полевых материалов электроразведки, получаемых методом длинного кабеля с использованием комплекса низкочастотной аппаратуры КАН-ЭММ.

Программный модуль “Прогноз” позволил автоматизировать процесс определения местонахождения в геологической среде аномальных объектов, отличающихся по сопротивлению от вмещающих пород.

Разработанный модуль способствует повышению надежности, достоверности и эффективности проводимых геологоразведочных работ при одновременном снижении стоимости поисково-разведочных работ и нагрузки на окружающую среду.

Литература

Вешев А.В. Электроразведка на постоянном и переменном токе. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Недра, 1980. 391 с.

Заборовский А.И. Электроразведка. М.: Гостоптехиздат, 1963. 429 с.

Иголкин В.И., Шайдунов Г.Я., Тронин О.А., Хохлов М.Ф. Методы и аппаратура электроразведки на переменном токе. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. 272 с.

Инструкция по электроразведке: наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахтно-рудничная электроразведка, аэроэлектроразведка, морская электроразведка / Мингео СССР. Л.: Недра, 1984. 352 с.

Краев А.П. Основы геоэлектрики. 2-е изд., испр. и доп. Л.: Недра, 1965. 588 с.

Мюллер А. Введение в машинное обучение с помощью Python. Руководство для специалистов по работе с данными. М.: Альфа-книга, 2017. 487 с.

Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия: Введение. Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 478 с.

Сведения об авторах

ФЕЛЬДМАН Андрей Геннадьевич – студент, Институт космических и информационных технологий Сибирского федерального университета. 660074, Красноярск, ул. Киренского, д. 26Б. Тел.: +7(391) 249-73-81. E-mail: anrfeldman@yandex.ru

МОЛОКОВА Наталья Викторовна – кандидат технических наук, доцент, Институт космических и информационных технологий Сибирского федерального университета. 660074, Красноярск, ул. Киренского, д. 26Б. Тел.: +7(391) 249-73-81. E-mail: nat_molokova@mail.ru

ИГОЛКИН Виктор Иванович – инженер-геофизик, научно-производственное предприятие “Ар Ди Сайнс”. 660017, Красноярск, ул. Кирова, д. 19. Тел.: +7(962) 068-06-24. E-mail: viktor_igolkin@mail.ru

THE ALGORITHM OF PROCESSING AND INTERPRETATION OF DATA OBTAINED BY THE LONG CABLE METHOD AND THE RESULTS OF ITS APPLICATION FOR A SITE BABINSKY (NORTH KAZAKHSTAN)

A.G. Feldman¹, N.V. Molokova¹, V.I. Igolkin²

¹ *Institute of Space and Information Technologies of the Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*

² *R.D. Science, Krasnoyarsk, Russia*

Abstract. The paper proposes an algorithm for processing and interpretation of field materials of electrical prospecting, obtained by the long cable method using low-frequency equipment KAN-EMM is presented, which includes several stages. At the first stage, the anomalous values of the horizontal and vertical components of the magnetic field are calculated. At the second stage the full magnetic field vectors are constructed, the coordinates of which are the calculated anomalous values of the components. The next step is to construct normals to vectors and to find their intersection points. Then, the found set of points using the k-means clustering algorithm is divided into groups corresponding to the desired anomalous areas; at the final stage, the boundaries of these areas are highlighted.

This algorithm is implemented as a software module “Prognoz” developed by the authors. The developed software module allows to identify locations of anomalous objects in the geological environment, to analyze the obtained locations of low or high electrical resistance obtaining useful geophysical information.

Using the “Prognoz” module, field data obtained at the stage of prospecting for gold were processed under conditions of poor geological exploration of the studied area of the Barobinsky (Northern Kazakhstan). Based on the interpretation results, anomalous conduction zones were localized, which are of interest for exploration and are subject to further geological interpretation with the use of additional geological and geophysical

information. On the picket 1420 profile 7 was carried out calibration drilling, which showed the presence of mineralization with the presence of gold, which is consistent with the results of the study.

The developed software module provides the construction of adequate models of geoelectric sections in the conditions of incomplete geological and geophysical information based on the solution of the inverse task and allows to significantly reduce the time and material costs.

Keywords: anomalous object, geophysical data processing and interpretation algorithm, equipment KAN-EMM, geophysical software.

References

- Igolkin V.I., Shajdurov G.Y., Tronin O.A., Khokhlov M.F., *Methods and apparatus for electrical prospecting on alternating current*, Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2016, 272 p.
- Kraev A.P., *The basics of geoelectrics*, Leningrad: Nedra, 1965, 588 p.
- Min-geo of the USSR Instructions for the exploration: ground-based electromagnetics, borehole prospecting, mining mining prospecting, surveys, marine electrical prospecting, Leningrad: Nedra, 1984, 352 p.
- Muller A., *Introduction to machine learning with Python*, Moscow: Alpha-kniga, 2017, 487 p.
- Preparata F., Shamos M., *Computational geometry: an Introduction*, Moscow: Mir, 1989, 478 p.
- Veshev A.V., *Electric exploration on direct and alternating current*, Leningrad: Nedra, 1980, 391 p.
- Zaborovskij A.I., *Electrical prospecting*, Moscow: Gostoptexizdat, 1963, 429 p.