

**ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ ФИКТИВНОГО МАГНИТНОГО ТОКА
ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ
РАДИОГОЛОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ***

В. А. Любчик

ФГБНУ Полярный геофизический институт

Аннотация

Радиоголографический метод — перспективный инструмент для решения задач рудной геофизики. Использование индукционных магнитометров с точной привязкой измеряемых сигналов к мировому времени при помощи спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS позволяет эффективно организовать площадные измерения амплитудно-фазовых характеристик магнитных компонент электромагнитного поля от контролируемого источника на поверхности Земли, по результатам которых возможно произвести голографическую реконструкцию распределения в земной коре аномальных зон с повышенной электропроводностью, ассоциируемых с локальными рудными телами. Статья посвящена исследованию амплитудно-фазовых характеристик горизонтальных составляющих функции источников аномальных полей — распределения плотности фиктивного магнитного тока. По результатам модельных вычислений и экспериментальных работ в рудных районах Мурманской обл. было показано, что для корректной интерпретации полученной картины распределения неоднородностей в земной коре необходимо совместное использование амплитудных и фазовых характеристик реконструированной функции источников аномальных полей.

Ключевые слова:

радиоголографический метод, магнитное поле, индукционный магнитометр, рудная зона, контролируемый источник электромагнитного поля, сульфидная медно-никелевая минерализация.

**THE INVESTIGATION OF AMPLITUDE-PHASE CHARACTERISTICS OF HORIZONTAL COMPONENTS
OF THE FICTITIOUS MAGNETIC CURRENT IN THE PROCESS OF GEOPHYSICAL EXPLORATIONS
BY USING THE RADIOHOLOGRAPHIC METHOD**

Vladimir A. Ljubchich

Polar Geophysical Institute

Abstract

The radioholographic method is the promising tool for solving problems of ore geophysics. Application of the induction magnetometers with precise GLONASS/GPS timing allows to effectively perform areal measurements of amplitude-phase characteristics of magnetic components of electromagnetic field from a controlled source on the earth's surface. The holographic reconstruction of distribution of anomalous zones with high electrical conductivity in the earth's crust is produced by using these areal surface observations. Such anomalous areas can be associated with local ore bodies. The article is devoted to the study of amplitude-phase characteristics of horizontal components of the function of anomalous field sources. This function is the distribution of density of fictitious magnetic current. According to results of model calculations and experimental works in ore regions of the Kola Peninsula, it was shown that a joint interpretation of amplitude and phase characteristics of the function of anomalous field sources is required for the correct reconstruction of the distribution of heterogeneities in the earth's crust.

Keywords:

radioholographic method, magnetic field, induction magnetometer, ore zone, controlled source of electromagnetic field, copper-nickel sulfide mineralization.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ и Правительства Мурманской обл. (проект № 17-45-510956 p_a).



Введение

Целью данной работы является исследование возможностей радиоголографического подхода к поиску и разведке рудных месторождений. Решение задач в рудной геофизике часто заключается в визуализации местоположения геоэлектрических неоднородностей, обладающих повышенной электропроводностью и перспективных на обнаружение рудных зон по результатам поверхностных наблюдений геофизических полей. Существуют различные способы решения данной проблемы. Примером может служить метод электромагнитной миграции, основные принципы которого изложены в работах М. С. Жданова [1, 2]. Изображения, полученные в результате электромагнитной миграции, принимаются за начальный этап в процедуре электромагнитной инверсии, основанной на минимизации потока электромагнитной энергии остаточного поля через поверхность наблюдений. Поток энергии рассматривается как функционал от распределения проводимости в среде. Остаточные поля представляют собой разность между модельными значениями и реально измеренными величинами. В процессе итерационной электромагнитной миграции происходит пошаговое уточнение модели распределения проводимости в среде, которое приводит к точному решению электромагнитной обратной задачи. Недостатками этого метода являются некоторая громоздкость вычислений и необходимость одновременного измерения электрических и магнитных компонент электромагнитного поля.

В тех случаях, когда достаточно выявить лишь местоположение аномально проводящих зон в среде, целесообразным подходом для визуализации картины распределения неоднородностей является радиоголографический метод. Теоретический метод решения обратных задач рассеяния и результаты модельных расчетов по томографии и голографии трехмерных неоднородностей проводимости в среде представлены в работе К. П. Гайковича и А. И. Смирнова [3]. Вопросы применения радиоголографического метода для исследования неоднородностей в ионосфере подробно изложены в монографии Е. Д. Терещенко [4]. Общие принципы радиоголографического метода вполне подходят и для изучения земной коры. Действительно, измерив по площади исследуемого участка распределение амплитудно-фазовых характеристик электромагнитного поля, излученного контролируемым источником и рассеянного на неоднородностях земной коры, можно определить местоположение данных неоднородностей в среде. Определенным преимуществом метода является то обстоятельство, что для выполнения голографической реконструкции достаточно измерять амплитудно-фазовые характеристики только магнитных компонент электромагнитного поля. Вследствие этого значительно повышается эффективность проведения площадных геофизических съемок.

Радиоголографический метод, основанный на принципах частотного зондирования земной коры, обладает определенными преимуществами по сравнению с широко применяемыми в практике геофизических работ импульсными методами электроразведки, например, такими как, метод становления поля в ближней зоне (ЗСБ) [5, 6]. Так, при проведении экспериментальных работ методом ЗСБ в сложных геологических условиях рудных районов Мурманской обл., характеризующихся наличием многочисленных разномасштабных рудоконтролирующих тектонических нарушений, а также крутым, практически субвертикальным, падением горных пород на флангах интрузивных массивов, измеряемые кривые становления электромагнитного поля являются зачастую некондиционными, осложненными «отрицательными» выбросами, что связано с эффектами вызванной поляризации, и плохо поддающимися интерпретации. Радиоголографический метод лишен таких недостатков.

Использование радиоголографического метода для реконструкции местоположения геоэлектрических неоднородностей в земной коре, обладающих повышенной электропроводностью и ассоциируемых с рудными зонами, является новым подходом в развитии

электромагнитных методов разведки и поисков месторождений полезных ископаемых. Предлагаемый подход к визуализации неоднородностей в земной коре до настоящего времени не применялся, поэтому исследование возможностей радиоголографического подхода позволит внести значимый вклад в теорию и практику геофизических исследований Земли.

Данная статья посвящена исследованию амплитудно-фазовых характеристик, горизонтальных составляющих плотности магнитного тока. Распределение плотности фиктивного магнитного тока, получаемое в результате голографической реконструкции, отражает картину распределения в земной коре аномальных зон с повышенной электропроводностью, являющихся источниками аномального электромагнитного поля. Амплитудно-фазовые характеристики вертикальной составляющей плотности магнитного тока проанализированы в работе [7].

В первой части статьи представлены теоретические основы радиоголографического метода, во второй — результаты математического моделирования по визуализации в среде с помощью радиоголографического метода локальной неоднородности, обладающей повышенной электропроводностью. В заключительной части рассмотрены примеры применения описываемого метода в рудных районах Мурманской обл. Полученные результаты хорошо согласуются с геологическими данными по исследованным участкам, вследствие чего можно сделать вывод о перспективности применения радиоголографического метода при решении задач рудной геофизики.

Следует отметить, что в классическом голографическом подходе мы имеем дело с волновыми полями, а так как распространение низкочастотных электромагнитных полей в земной коре имеет диффузионную, а не волновую природу, то данный метод можно назвать радиоголографическим лишь условно — в том смысле, что методика измерений и обработки полученных результатов такая же, как и в классической голографии.

Теоретические основы радиоголографического метода

Радиоголографическую реконструкцию распределения неоднородностей в среде можно рассматривать как частный случай обратной задачи рассеяния. При проведении измерений электромагнитных полей в пунктах регистрации наблюдается суперпозиция двух полей — первичного от контролируемого источника поля, которое в терминах голографии можно обозначить как опорную волну, и вторичные поля, рассеянные на геоэлектрических неоднородностях среды, являющиеся аналогами предметных волн. Таким образом, выполнив измерения электромагнитного поля по площади исследуемого участка, с помощью радиоголографического метода можем визуализировать картину распределения геоэлектрических неоднородностей в земной коре.

В общем случае электромагнитное поле в произвольной точке пространства можно рассматривать как сумму первичного (нормального) поля, определяемого контролируемым источником в отсутствие геоэлектрических неоднородностей в среде, и вторичных (аномальных) полей, обусловленных вихревыми токами, индуцированными в аномально проводящих зонах пространства. Для магнитных компонент электромагнитного поля данное соотношение представляется в виде:

$$H(r) = H_0(r) + \int_V dr' G_m(r, r') j_m(r'), \quad (1)$$

где H — напряженность полного магнитного поля; H_0 — напряженность нормального магнитного поля; G_m — функция Грина магнитного типа для выбранной модели среды; j_m — плотность фиктивных магнитных токов, являющихся источниками аномального поля, интегрирование ведется по области расположения аномальных источников V . Плотности фиктивных магнитных токов j_m формально можно определить через распределение плотности реальных вихревых токов j с помощью выражения [8]:

$$j_m(r) = \nabla \cdot \int_V dr' G(r, r') j(r'),$$

где G — функция Грина электрического типа для заданной модели среды. Реконструкция распределения плотности магнитных токов $j_m(r')$, рассматриваемого как функция источников аномального поля, и является решением обратной задачи рассеяния.

С другой стороны, при решении обратной задачи электромагнитное поле внутри некоторого объема, где расположены источники аномальных полей, можно выразить через обращенный поверхностный интеграл Кирхгофа:

$$H_H(r) = \oint_S dS' [H(r') \nabla G_m^*(r, r') - G_m^*(r, r') \nabla H(r')], \quad (2)$$

где G_m^* — комплексно сопряженная функция Грина магнитного типа, интегрирование ведется по поверхности S , ограничивающей область аномальных источников. Формула (2) является математическим определением для голографически восстановленного поля H_H .

После некоторых преобразований, приведенных в работе [4], из выражений (1) и (2) можно получить интегральное уравнение, связывающее голографическую реконструкцию поля H_H с искомой функцией источников аномального поля $j_m(r')$:

$$H_H(r) = H_0(r) + 2i \int_V dr' \text{Im} G_m(r, r') j_m(r'), \quad (3)$$

где $\text{Im} G_m$ — мнимая часть функции Грина, i — мнимая единица. Проведя сеточное разбиение нижнего полупространства на ячейки конечного объема, можем перейти от интегрального уравнения (3) к системе линейных уравнений относительно неизвестных значений функции аномальных источников j_m в пределах отдельных ячеек. Реконструкция картины распределения в среде неоднородных областей с повышенной электропроводностью заключается, таким образом, в определении данных значений функции j_m .

Тестирование радиоголографического метода на математической модели среды с локальной аномалией электропроводности

С целью исследования амплитудно-фазовых характеристик горизонтальных составляющих фиктивных магнитных токов, возникающих в неоднородной среде при проведении работ радиоголографическим методом, было выполнено математическое моделирование. Аномальная область моделировалась прямоугольным параллелепипедом с пониженным удельным сопротивлением 10 Ом·м, погруженным на глубину 300–400 м в более высокоомное нижнее полупространство с удельным сопротивлением 1000 Ом·м. Линейные размеры проводящей вставки составляли 100×300×100 м. В условной декартовой системе координат, начальная точка которой выбрана таким образом, что объем моделирования располагался в первом квадранте нижнего полупространства, местоположение аномального объекта задавалось следующими координатами: $X = +400...+500$ м, $Y = +300...+600$ м и $Z = -400...-300$ м.

При моделировании рассматривались два типа контролируемых источников электромагнитного поля. Первым типом источника была горизонтальная незаземленная квадратная петля, длина стороны которой составляла 150 м. Центр петли имел координаты $X = 600$ м и $Y = -400$ м. Стороны петли были ориентированы параллельно горизонтальным осям. Вторым типом являлась заземленная линия длиной 1000 м, центр которой имел координаты $X = 600$ м и $Y = -1000$ м. Линия ориентировалась вдоль оси OX . Предполагалось, что в источниках генерировался гармонический переменный ток с амплитудой 1 А и частотой 34 Гц.

Для заданной модели неоднородности и типа контролируемого источника вычислялись значения магнитных компонент полного электромагнитного поля на поверхности моделируемого полупространства по квадратной сетке с шагом 100 м в диапазоне координат по осям OX и OY от 0 до 900 м. По рассчитанным таким образом в 100 точках наблюдения значениям амплитудно-

фазовых характеристик магнитных компонент поля были вычислены в нижнем полупространстве до глубины 550 м с шагом 50 м значения голографически реконструированного магнитного поля H_H по методике, изложенной в работе [9]. В этих же точках были рассчитаны значения нормального поля H_0 для заданного типа контролируемого источника, расположенного на поверхности однородного полупространства, и компоненты тензора Грина магнитного типа. После сеточной аппроксимации интегрального уравнения (3) была получена система линейных уравнений относительно неизвестных значений плотности фиктивного магнитного тока j_m в пределах отдельных ячеек. Система уравнений решалась стандартным методом Гаусса.

Результаты вычислений отображены на рис. 1, на котором приведена карта изолиний амплитудных значений горизонтальных компонент плотности магнитного тока j_m для горизонтального сечения модельной среды $Z = -350$ м. При расчетах использовались модельные данные для контролируемого источника электромагнитного поля в виде заземленной линии. Из рисунка видно, что аномальная зона с повышенной электропроводностью хорошо локализуется в нижнем полупространстве при проведении реконструкции распределения неоднородностей в среде с помощью радиоголографического метода.

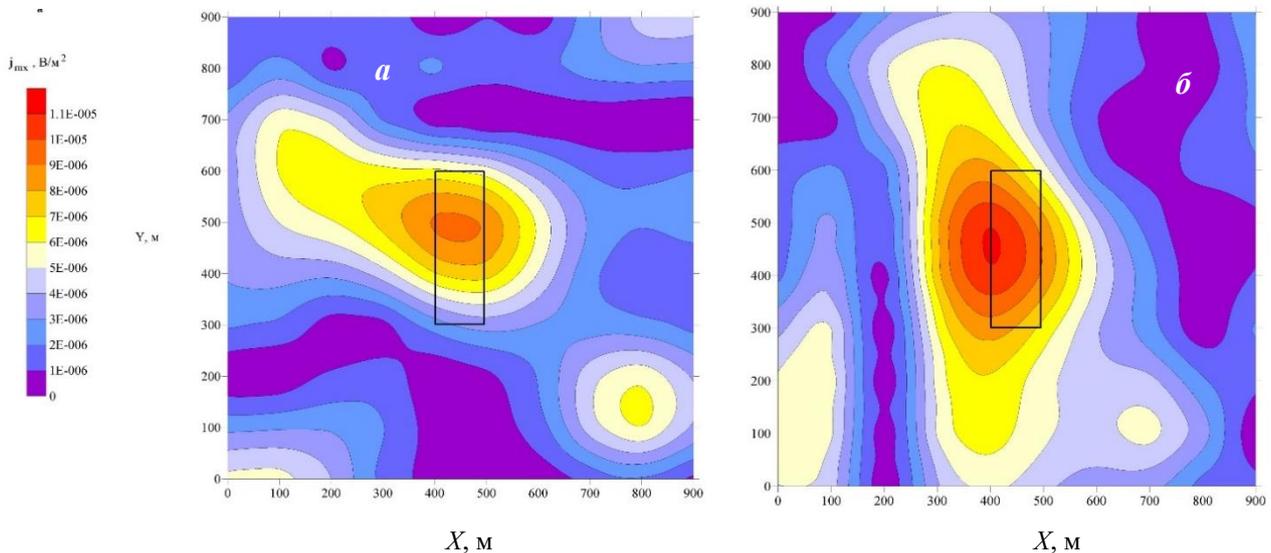


Рис. 1. Карты изолиний амплитуд горизонтальных составляющих плотности фиктивного магнитного тока j_m : a — для горизонтальной компоненты j_{mx} ; b — для горизонтальной компоненты j_{my} . Карты построены по модельным данным для горизонтального сечения среды при $Z = -350$ м. Черным прямоугольником обозначено местоположение аномальной области с повышенной электропроводностью

Fig. 1. Maps of isolines of amplitudes of horizontal components of the fictitious magnetic current density j_m : a — for the horizontal component j_{mx} ; b — for the horizontal component j_{my} . Maps are based on model data for the horizontal section of medium at $Z = -350$ m. The black rectangle indicates the location of the anomalous area with high electrical conductivity

На рис. 2 представлены графики зависимости значений амплитудных и фазовых характеристик горизонтальной компоненты плотности магнитного тока j_{my} от глубины Z для обоих типов контролируемых источников электромагнитного поля для точки с координатами $X = 400$ м, $Y = 400$ м, расположенной над аномальной областью с повышенной электропроводностью. На графиках видно, что аномальная зона выделяется как относительным максимумом амплитуды, так и резкими скачками фазы на 180° . Для ортогональной компоненты плотности магнитного тока j_{mx} наблюдаются те же особенности графиков. Следует отметить, что амплитуды горизонтальных составляющих магнитного тока быстро убывают с глубиной, поэтому резкие изменения фазовых характеристик является важным индикатором наличия аномалии электропроводности в среде наряду с амплитудным максимумом.

При сравнении графиков для различных типов контролируемых источников электромагнитного поля можно видеть, что для заземленной линии амплитуды горизонтальной компоненты плотности магнитного тока больше соответствующих амплитуд для горизонтальной незаземленной квадратной петли. Данное обстоятельство, возможно, объясняется наличием гальванической моды электромагнитного поля, возбуждаемого заземленной линией, которая способствует увеличению горизонтальных составляющих фиктивного магнитного тока. Поведение фазовых характеристик для обоих типов источников имеет схожий характер. Вследствие этого представляется более целесообразным в практике полевых работ с применением радиоголографического метода использовать заземленную линию в качестве контролируемого источника электромагнитного поля.

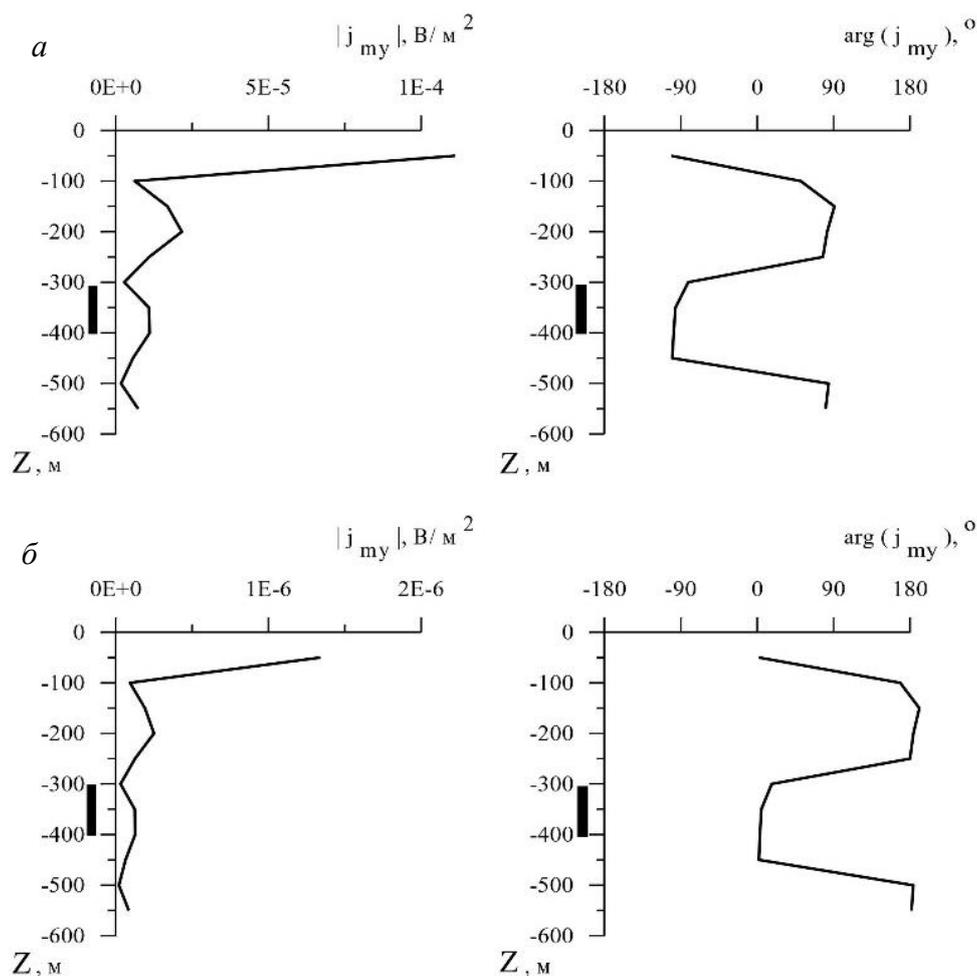


Рис. 2. Графики зависимости значений амплитудных и фазовых характеристик горизонтальной компоненты плотности магнитного тока j_{my} от глубины Z :

a — для контролируемого источника электромагнитного поля в виде заземленной горизонтальной линии; b — для контролируемого источника в виде незаземленной горизонтальной петли.

Графики рассчитаны по модельным данным для точки с координатами $X = 400$ м, $Y = 400$ м.

Черным прямоугольником показано местоположение аномальной области с повышенной электропроводностью

Fig. 2. Graphs of amplitude and phase of the horizontal component of the magnetic current density j_{my} depending on the depth Z :

a — for the grounded line as the controlled source of electromagnetic fields; b — for the ungrounded horizontal loop.

Graphs are calculated from model data for the point with coordinates $X = 400$ m, $Y = 400$ m. The black rectangle indicates the location of the anomalous area with high electrical conductivity

Аппаратура и описание экспериментов по применению радиоголографического метода

В 2017–2018 гг. сотрудниками Полярного геофизического института проводились экспериментальные работы по исследованию возможностей радиоголографического метода при поиске локальных рудных тел на участке Лойпишнюн в Мончегорском рудном районе и на участке Соукер в Печенгском рудном районе.

Участок Лойпишнюн находится на юго-восточном склоне Мончетундровского интрузивного массива, представляющего собой первично-расслоенный от дунитов до лейкогаббро стратифицированный лополит мощностью около 2 км. В разрезе массива сверху вниз выделяются следующие зоны: габбровая, габбро-норитовая, пироксенитовая и дунитовая. Массив расположен в центральной части Печенгско-Варзугской рифтогенной структуры, пересекающей Кольский п-ов с северо-запада на юго-восток. Для Печенгско-Варзугской рифтогенной структуры характерно широкое распространение тектонических разломов различного масштаба и направления, контролирующих размещение многочисленных интрузивных массивов основных и ультраосновных пород, к которым и приурочены рудопроявления и месторождения медно-никелевых, хромовых, титаномагнетитовых руд и металлов платиноидной группы [10].

В интрузивных массивах Печенгско-Варзугской рифтогенной структуры присутствуют два типа сульфидного медно-никелевого оруденения: магматический (сингенетический) и метаморфогенный (эпигенетический). На участке Лойпишнюн буровыми работами были выявлены оба типа сульфидного оруденения. Магматический тип оруденения широко представлен в норит-габбро-норитовых породах Мончетундровского массива. Они содержат, как правило, бедно вкрапленную сульфидную минерализацию в количестве 1–3 %, однако буровыми скважинами на участке были вскрыты также тела массивных сульфидных руд, относящиеся к метаморфогенному типу оруденения. Поскольку метаморфогенное оруденение развивается путем переотложения первичного магматического рудного вещества, оно приурочено в основном к зонам тектонических нарушений. Рудные тела этого типа обладают более густой вкрапленностью сульфидов до 50–60 %, обычно сочетающихся с гнездовым оруденением и развитием рудных прожилков. Мощность рудных зон составляет от нескольких метров до первых десятков метров.

Участок Соукер находится в центральной части Печенгского рудного района, расположенного в северо-западной части Печенгско-Варзугской рифтогенной структуры. Почти все известные медно-никелевые месторождения Печенгского рудного района, в том числе и Соукер, приурочены к так называемой «продуктивной» туфогенно-осадочной толще, сложенной филлитами, песчаниками, алевролитами, туффитами, туфами. Локализация никеленосных массивов основных и ультраосновных пород в продуктивной толще контролируется сложноразветвленной системой разномасштабных тектонических нарушений, среди которых особенно выделяются разломы северо-западного и северо-восточного направлений, а также продольные межпластовые тектонические зоны, проходящие через все рудное поле. Интрузивные массивы основных и ультраосновных пород сложены в основном серпентинитами и серпентинизированными перидотитами. Мощность массива Соукер составляет 280 м.

Для интрузивных массивов центральной части Печенгского рудного района характерно вкрапленное и прожилково-вкрапленное оруденение, которое приурочено к нижним частям массивов, причем сгущение вкрапленности наблюдается в прогибах подошвы массивов. Распределение сульфидной вкрапленности в них неравномерно. Рудные тела массива Соукер имеют пластообразную форму с пологим залеганием. Среднее содержание сульфидных минералов в рудных телах составляет 20 %.

На участке Лойпишнюн Мончегорского рудного района измерения проводились по десяти профилям длиной 900 м, шаг наблюдений и расстояние между профилями составляли 100 м. Таким образом была получена равномерная прямоугольная сетка пунктов наблюдений, включающая в себя 100 экспериментальных точек. Ориентация сетки в пространстве была выбрана так, чтобы одна из сторон планшета была перпендикулярна простиранию горных пород. Вследствие чего профили были проложены с юго-востока на северо-запад по азимуту 312°. В пунктах наблюдения производилась регистрация магнитных составляющих электромагнитного поля,

генерируемого контролируемым источником. В качестве приемной аппаратуры использовался трехкомпонентный индукционный магнитометр с цифровой системой регистрации и сбора информации, с точной привязкой к мировому времени по сигналам спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS [11]. В качестве контролируемого источника электромагнитного поля использовалась квадратная незаземленная петля с длиной стороны 150 м. Центр петли располагался в 400 м от края планшета на профиле 7. Стороны петли были ориентированы вдоль и поперек направления профилей. В петле генерировались гармонические сигналы частотой 34 Гц, сила тока в среднем составляла 4–8 А.

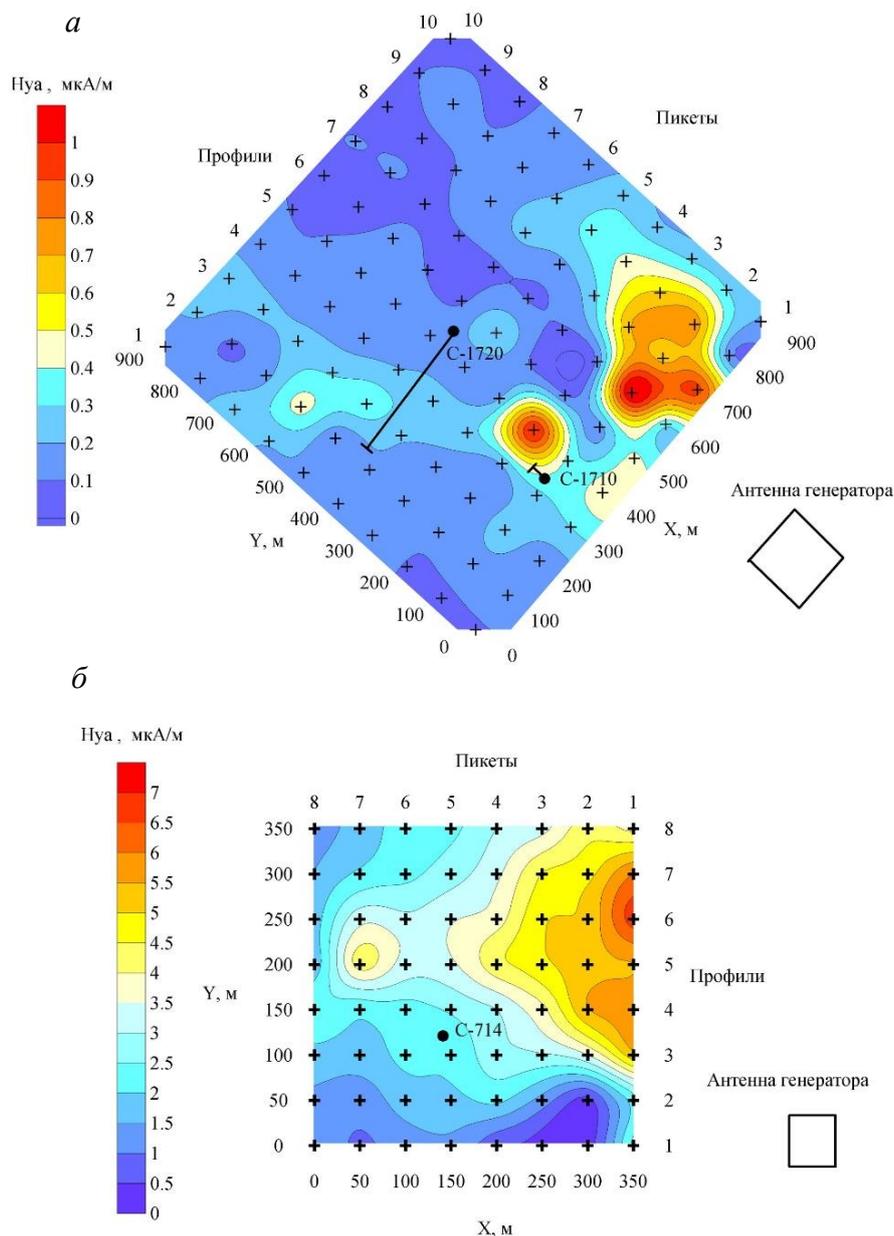


Рис. 3. Карта изолиний напряженности горизонтальной составляющей аномального магнитного поля H_{ya} и схема расположения пунктов измерения электромагнитного поля и антенны генератора: *a* — для участка Лойпишнжун Мончегорского рудного района; *б* — для участка Соукер Печенгского рудного района. Черными кружками обозначено местоположение буровых скважин. Черными линиями показаны проекции стволов буровых скважин на земную поверхность

Fig. 3. The map of isolines of amplitudes of the horizontal component of anomalous magnetic field H_{ya} and the plan of location of electromagnetic field measurement points and location of transmitter antenna: *a* — on the Loypishnjun site in the Monchegorsk ore region; *б* — on the Souker site in the Pechenga ore region. Black circles indicate the location of wells. Black lines show projections of wells on the earth's surface

Для получения фазовых характеристик первичного тока сигнал снимался с маленького участка петли, длиной 1 м и записывался в цифровую систему регистрации и сбора информации, аналогичную той, что использовалась в индукционном магнитометре. Благодаря точной привязке к мировому времени измеряемых сигналов использованный комплекс передающей и приемной аппаратуры позволял определять абсолютную разность фаз между магнитными компонентами электромагнитного поля и током в передающей антенне. Таким образом, кроме значений амплитуд были получены и распределения фазовых характеристик магнитных компонент поля по площади планшета, что является необходимым условием для проведения голографической реконструкции картины распределения геоэлектрических неоднородностей в земной коре. Схема расположения генераторной петли и точек измерения электромагнитного поля приведена на рис. 3, а.

В 2018 г. на участке Соукер в Печенгском рудном районе вследствие относительно небольших размеров массива Соукер измерения магнитных компонент электромагнитного поля проводились по восьми профилям длиной 350 м, при этом шаг наблюдений и расстояние между профилями составляли 50 м. Всего равномерная квадратная сетка пунктов наблюдений включала в себя 64 экспериментальные точки. Профили были проложены с востока на запад. Центр генераторной квадратной незаземленной петли с длиной стороны 50 м располагался в 200 м от края планшета на профиле 1. В петле генерировались гармонические сигналы частотой 17 Гц. Количество витков в петле равнялось трем, сила тока в петле в среднем составляла 5–7 А. Схема расположения генераторной петли и точек измерения электромагнитного поля на участке Соукер приведена на рис. 3, б. Также на рис. 3 представлены для примера карты изолиний амплитуд горизонтальной магнитной компоненты H_{ya} аномального электромагнитного поля, определенных на площади планшетов съемки. Из рис. 3, а, видно, что на участке Лойпишнюн в аномальном поле отчетливо выделяются зоны тектонических нарушений, простирающиеся вдоль профилей 3–4 и 8–9. Данные зоны являются рудоконтролирующими структурами для медно-никелевых месторождений метаморфогенного типа в Мончегорском рудном районе. На участке Соукер (рис. 3, б) вытянутая аномальная область в районе профилей 5–6 соответствует выходу на земную поверхность рудных зон медно-никелевого месторождения Соукер Печенгского рудного района.

Результаты и их обсуждение

По измеренным значениям полного магнитного поля на площади планшета были вычислены значения голографически реконструированного магнитного поля H_H в нижнем полупространстве, в этих же точках были рассчитаны значения нормального поля H_0 для квадратной незаземленной петли, расположенной на поверхности однородного полупространства, и компоненты тензора Грина магнитного типа. Для участка Лойпишнюн указанные значения рассчитывались до глубины 550 м с шагом 50 м, для участка Соукер — до глубины 450 м с шагом 25 м. При этом удельное сопротивление нижнего полупространства принималось равным 1000 Ом·м для участка Лойпишнюн и 10 Ом·м для участка Соукер. Такой порядок величины сопротивления вмещающих пород был установлен по результатам ранее проводившихся на этих участках электроразведочных работ. После сеточной аппроксимации интегрального уравнения (3) была получена система линейных уравнений относительно неизвестных значений плотности магнитного тока j_m в пределах отдельных ячеек. Система уравнений решалась стандартным методом Гаусса.

Проведя анализ амплитудно-фазовых характеристик, горизонтальных составляющих плотности магнитного тока, можем отметить, что вскрытые буровыми скважинами рудные зоны на исследуемых участках отмечаются резкими скачками фазы горизонтальных компонент и относительно небольшими максимумами их амплитуд. Так, на рис. 4 представлены графики зависимости значений амплитудных и фазовых характеристик горизонтальных компонент плотности магнитного тока j_m от глубины Z для точки с координатами $X = 200$ м, $Y = 500$ м на участке Лойпишнюн Мончегорского рудного района. В данном районе скважиной С-1720, длина ствола которой составляет 502,7 м, были вскрыты рудные зоны с богатым содержанием сульфидов. Прослои с переотложенным медно-никелевым сульфидным оруденением были встречены в интервалах глубин 218–219 м, 265–270 м, 360–365 м и приурочены, как правило, к зонам

тектонических разломов. Из рис. 4 видно, что на глубинах порядка 300–350 м наблюдаются резкие скачки фаз горизонтальных компонент — до 180° , сопряженные с небольшими максимумами амплитуд.

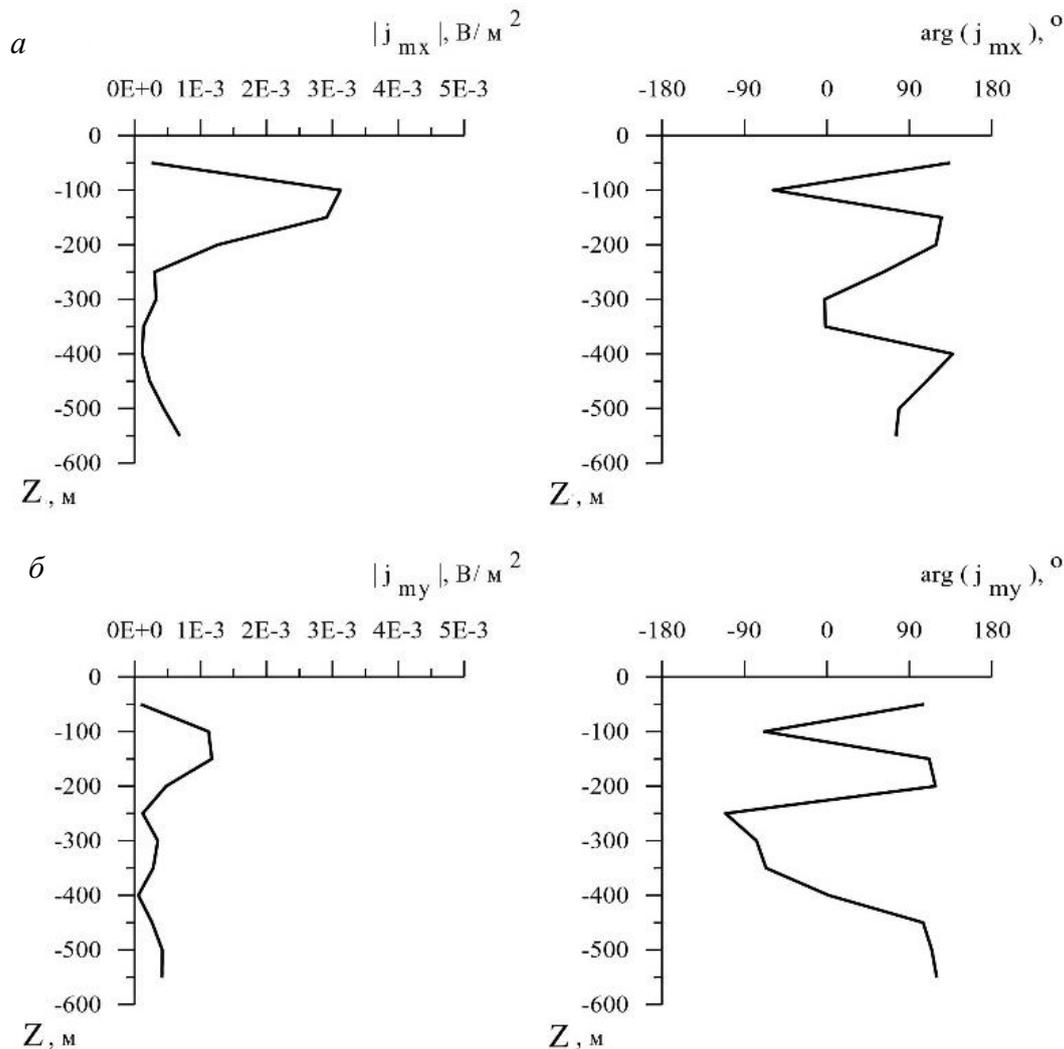


Рис. 4. Графики зависимости значений амплитудных и фазовых характеристик горизонтальных компонент плотности магнитного тока j_m от глубины Z :
 а — для горизонтальной компоненты j_{mx} ; б — для горизонтальной компоненты j_{my} . Графики рассчитаны по экспериментальным данным с участка Лойпишнжун Мончегорского рудного района для точки с координатами $X = 200$ м, $Y = 500$ м

Fig. 4. Graphs of amplitude and phase of horizontal components of the magnetic current density j_m depending on the depth Z :
 а — for the horizontal component j_{mx} ; б — for the horizontal component j_{my} . Graphs are calculated from experimental data from the Loypishnjun site in the Monchegorsk ore region for the point with coordinates $X = 200$ m, $Y = 500$ m

На рис. 5 показаны графики зависимости значений амплитудных и фазовых характеристик горизонтальных компонент плотности магнитного тока j_m от глубины Z для точки с координатами $X = 400$ м, $Y = 100$ м, рядом с этой точкой на карте изолиний амплитуд горизонтальной магнитной компоненты H_{ya} аномального электромагнитного поля (рис. 3, а) наблюдается интенсивная локальная аномалия. Данная аномалия имеет геологическое объяснение: в этом районе скважиной С-1710, длина ствола которой составляет 300,4 м, были вскрыты рудные зоны с богатым содержанием сульфидов в интервале глубин 147–155 м, 175–177 м. Из рис. 5 видно, что данному интервалу глубин

также соответствует максимум амплитуды и резкие скачки фазы. Причем максимум амплитуды является ярко выраженным, что может быть объяснено относительно приповерхностным характером аномалии.

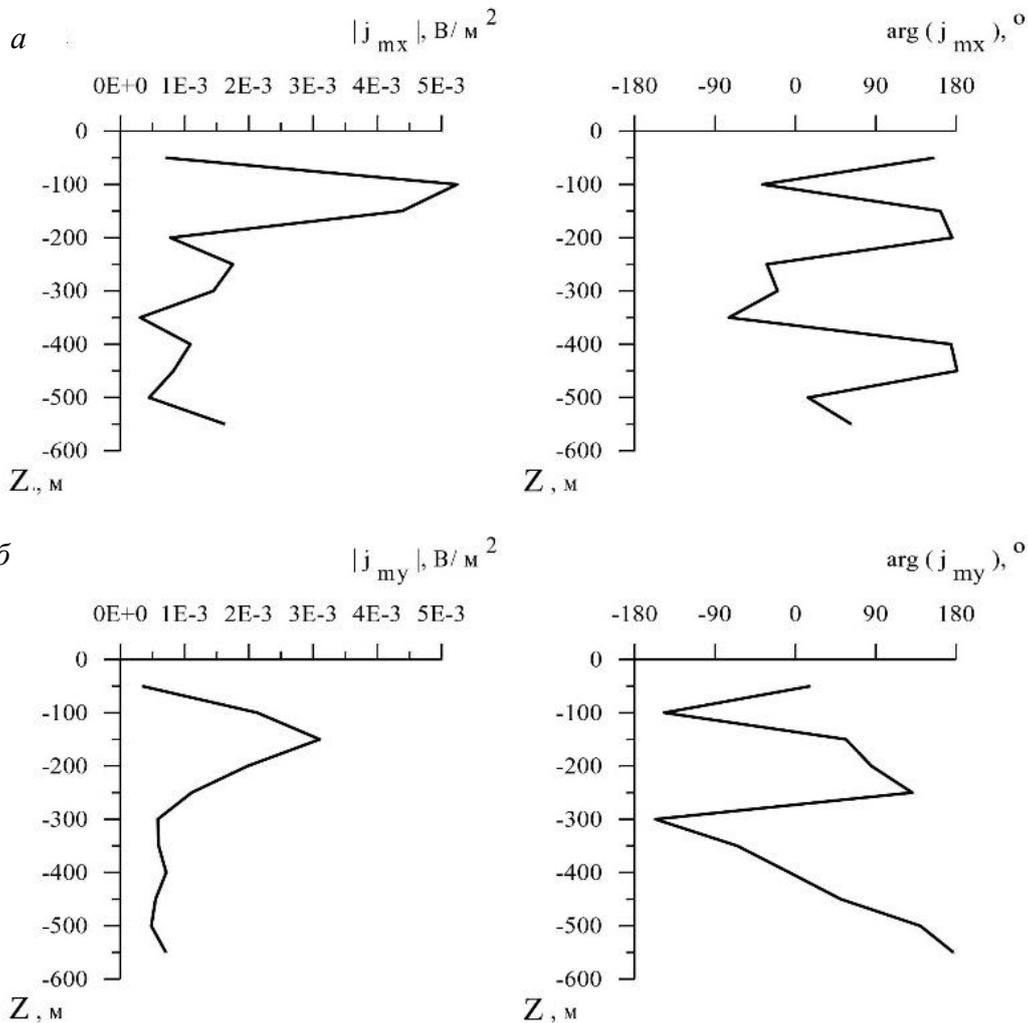


Рис. 5. Графики зависимости значений амплитудных и фазовых характеристик горизонтальных компонент плотности магнитного тока j_m от глубины Z :
 а — для горизонтальной компоненты j_{mx} ; б — для горизонтальной компоненты j_{my} .
 Графики рассчитаны по экспериментальным данным с участка Лойпишнун Мончегорского рудного района для точки с координатами $X = 400$ м, $Y = 100$ м

Fig. 5. Graphs of amplitude and phase of horizontal components of the magnetic current density j_m depending on the depth Z :
 а — for the horizontal component j_{mx} ; б — for the horizontal component j_{my} .
 Graphs are calculated from experimental data from the Loypishnjun site in the Monchegorsk ore region for the point with coordinates $X = 400$ m, $Y = 100$ m

Аналогичную картину поведения горизонтальных составляющих плотности магнитного тока можно наблюдать и на участке Соукер Печенгского рудного района. На рис. 6 представлены графики зависимости значений амплитудных и фазовых характеристик горизонтальных компонент плотности магнитного тока j_m от глубины Z для точки с координатами $X = 150$ м, $Y = 100$ м на участке Соукер. В окрестности данной точки расположена буровая скважина С-714, длина ствола которой составляет 175,3 м. Эта скважина пересекла интрузивный массив Соукер и в приподошвенной части массива вскрыла пластообразное рудное тело в интервале глубин 101–150 м. На рис. 6 видно, что в этом интервале глубин также наблюдаются резкие скачки фаз горизонтальных компонент и локальные максимумы амплитуд.

Таким образом, наличие геоэлектрических неоднородностей в земной коре, в частности тектонических разломов, имеющих обычно субвертикальное падение и являющихся рудоконтролирующими структурами, приводит к возникновению аномалий в распределении плотности горизонтальных компонент фиктивного магнитного тока j_m . Однако, амплитудные значения данных компонент быстро спадают с глубиной, поэтому для более надежной интерпретации аномалий необходимо анализировать и фазовые характеристики горизонтальных составляющих плотности магнитного тока. Зоны, перспективные на обнаружение локальных рудных тел, отмечаются резкими скачками фазы, до 180° , сопряженными с относительными максимумами амплитуды.

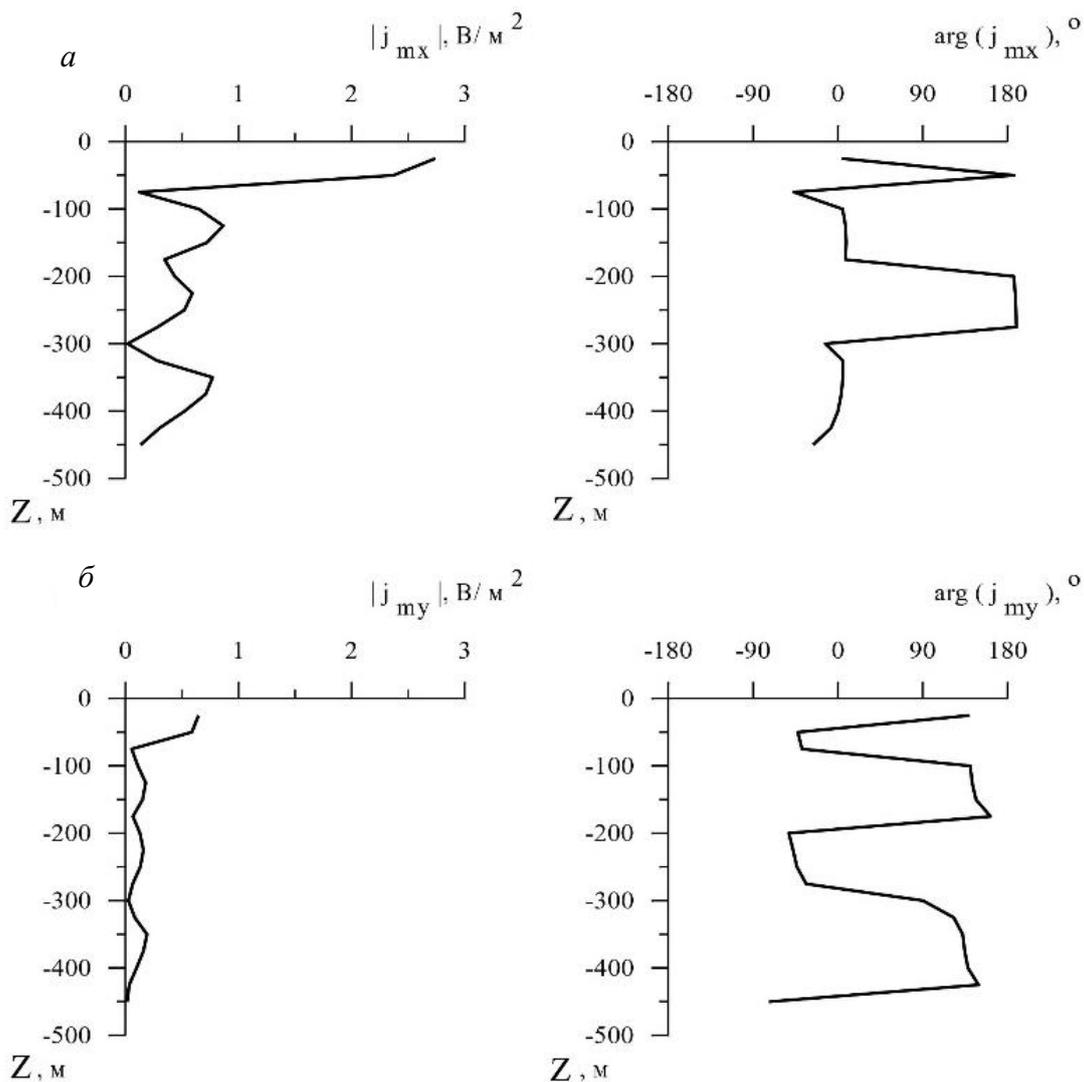


Рис. 6. Графики зависимости значений амплитудных и фазовых характеристик горизонтальных компонент плотности магнитного тока j_m от глубины Z :

a — для горизонтальной компоненты j_{mx} ; b — для горизонтальной компоненты j_{my} .

Графики рассчитаны по экспериментальным данным с участка Соукер Печенгского рудного района для точки с координатами $X = 150$ м, $Y = 100$ м

Fig. 6. Graphs of amplitude and phase of horizontal components of the magnetic current density j_m depending on the depth Z :

a — for the horizontal component j_{mx} ; b — for the horizontal component j_{my} . Graphs are calculated

from experimental data from the Souker site in the Pechenga ore region

for the point with coordinates $X = 150$ m, $Y = 100$ m

Выводы

Таким образом, по результатам проведенных работ можно сделать следующие выводы. Радиоголографический метод, основанный на принципах частотного зондирования, является перспективным инструментом для решения задач рудной геофизики по визуализации в земной коре геоэлектрических неоднородностей, особенно в сложных геологических условиях, когда возможности широко применяемых импульсных методов электроразведки ограничены. Наличие мощного контролируемого источника электромагнитного поля и современного комплекса приемной и передающей аппаратуры с точной привязкой по времени измеряемых сигналов при помощи спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS позволяет эффективно организовать быструю и экономически дешевую площадную съемку магнитных компонент электромагнитного поля от контролируемого источника на исследуемом геологическом участке. При этом измеряются не только значения амплитуд, но и распределения фазовых сдвигов компонент электромагнитного поля. Применение радиоголографического метода позволяет по площадным поверхностным наблюдениям амплитудно-фазовых характеристик составляющих магнитного поля эффективно локализовать в пространстве аномальные области с повышенной электропроводностью, ассоциируемые с локальными рудными телами.

Анализ экспериментальных исследований по применению радиоголографического метода на участках Лойпишнюн и Соукер в Мончегорском и Печенгском районах Мурманской обл. показывает, что рудные зоны, контролируемые тектоническими разломами, отмечены аномалиями в распределении плотности горизонтальных компонент фиктивного магнитного тока j_m . Но вследствие быстрого спада амплитудных значений данных компонент с глубиной для более надежной интерпретации аномалий необходимо привлекать к рассмотрению и фазовые характеристики горизонтальных составляющих плотности магнитного тока. Зоны, перспективные на обнаружение локальных рудных тел, отмечаются резкими скачками фазы — до 180° , которые сопряжены с относительными максимумами амплитуды.

Проведенные модельные вычисления позволяют сделать вывод, что в практике полевых работ с применением радиоголографического метода в качестве контролируемого источника электромагнитного поля целесообразнее использовать заземленную длинную линию. Наличие гальванической моды электромагнитного поля может приводить к росту амплитудных значений горизонтальных компонент плотности магнитного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhdanov M. S. Electromagnetic migration // Deep electromagnetic exploration. New Delhi: Springer-Verlag, Narosa Publishing House, 1999. P. 283–298.
2. Жданов М. С. Теория обратных задач и регуляризации в геофизике. М.: Науч. мир, 2007. 712 с.
3. Гайкович К. П., Смирнов А. И. Обратные задачи низкочастотной диагностики земной коры // Известия вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 6. С. 476–491.
4. Терещенко Е. Д. Радиоголографический метод исследования ионосферных неоднородностей. Апатиты: КНЦ АН СССР, 1987. 99 с.
5. Сидоров В. А. Импульсная индуктивная электроразведка. М.: Недра, 1985. 192 с.
6. Investigations by TEM-FAST Technique: Methodology and Examples / P. O. Barsukov [et al.] // Electromagnetic Sounding of the Earth's Interior: Theory, Modeling, Practice / ed. by V. V. Spichak. Amsterdam: Elsevier, 2015. Chapter 3. P. 44–77.
7. Терещенко Е. Д., Любчик В. А. Визуализация геоэлектрических неоднородностей в земной коре радиоголографическим методом // Разведка и охрана недр. 2014. № 11. С. 19–24.
8. Дмитриев В. И. Электромагнитные поля в неоднородных средах. М.: МГУ, 1969. 131 с.
9. Любчик В. А. Применение радиоголографического метода при поиске локальных рудных тел // Физика Земли. 2015. № 2. С. 139–149.
10. Медно-никелевые месторождения Балтийского щита / под ред. Г. И. Горбунова, Х. Папунен. Л.: Наука, 1985. 329 с.
11. Филатов М. В., Пильгаев С. В., Федоренко Ю. В. Четырехканальный 24-разрядный синхронизированный с мировым временем аналого-цифровой преобразователь // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 3. С. 73–75.

Сведения об авторе

Любчик Владимир Алексеевич — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Полярного геофизического института
E-mail: lubchich@yandex.ru

Author Affiliation

Vladimir A. Lyubchich — PhD (Physics & Mathematics), Researcher of the Polar Geophysical Institute
E-mail: lubchich@yandex.ru

Библиографическое описание статьи

Любчик, В. А. Исследование амплитудно-фазовых характеристик горизонтальных компонент фиктивного магнитного тока при проведении геофизических работ радиоголографическим методом / *В. А. Любчик* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 3 (11). — С. 87–100.

Reference

Ljubchich Vladimir A. The Investigation of Amplitude-Phase Characteristics of Horizontal Components of the Fictitious Magnetic Current in the Process of Geophysical Explorations by Using the Radioholographic Method. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2019, vol. 3 (11), pp. 87–100. (In Russ.).