

ДВУХЧАСТОТНЫЙ РАДИОГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ В ЗЕМНОЙ КОРЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ, АССОЦИИРУЕМЫХ С ЛОКАЛЬНЫМИ РУДНЫМИ ТЕЛАМИ (НА ПРИМЕРЕ МОНЧЕГОРСКОГО РУДНОГО РАЙОНА, КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)

В. А. Любич, В. Ф. Григорьев, А. Е. Сидоренко
ФГБНУ Полярный геофизический институт (Мурманск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 20 июля 2018 г.

Радиоголографический метод является перспективным инструментом для решения задач рудной геофизики. Он позволяет по площадным поверхностным измерениям электромагнитного поля эффективно локализовать в земной коре аномальные области с повышенной электропроводностью, ассоциируемые с локальными рудными телами. Рассмотрены результаты полевых экспериментальных работ в Мончегорском рудном районе. Показано, что применение радиоголографического метода в двухчастотном варианте значительно повышает надежность интерпретации полученных результатов. Сравнение результатов голографической реконструкции распределения геоэлектрических неоднородностей в земной коре на разных частотах позволяет отбраковать «ложные» аномалии и выделить те аномальные зоны, которые можно ассоциировать с рудными телами.

Ключевые слова: радиоголографический метод, поверхностный интеграл Кирхгофа, магнитное поле, индукционный магнитометр, контролируемый источник электромагнитного поля, рудная зона, сульфидная медно-никелевая минерализация.

Введение

Выработка стратегии рационального природопользования, восстановление минерально-сырьевой базы являются актуальными задачами развития арктических регионов, в частности Мурманской области. Разработка эффективного и экономически дешевого метода геофизических площадных съемок, позволяющего быстро локализовать в земной коре аномальные зоны с повышенной электропроводностью, ассоциируемые с рудными телами, — практически важная задача, решение которой будет способствовать восстановлению минерально-сырьевой базы экономики области.

Решение задач в рудной геофизике часто заключается в визуализации геологических неоднород-

ностей в земной коре по результатам поверхностных наблюдений геофизических полей. Существуют различные способы решения этой проблемы, представленные, в частности, в монографиях [1; 2]. Примером может служить метод электромагнитной миграции, основные принципы которого изложены в работах М. С. Жданова [3—6]. 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 наблюдаемыми величинами. В процессе итерационной электромагнитной миграции про-

Новые технологии освоения Арктики

исходит пошаговое уточнение модели распределения проводимости в среде, которое приводит к точному решению электромагнитной обратной задачи [6]. 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 определения 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 [7]. Принципы применения радиоголографического метода для исследования неоднородностей в ионосфере подробно изложены в монографии Е. Д. Терещенко [8]. Голографическая реконструкция восстанавливает значения компонент полей электромагнитных волн в области расположения источников аномального поля с использованием обращенной формулы Кирхгофа. Однако в общем случае знания голографической реконструкции поля недостаточно для визуализации в пространстве неоднородностей источников аномального поля. Только в коротковолновом пределе голографическая реконструкция поля повторяет функцию источника [9]. В более общем случае для выявления распределения геоэлектрических неоднородностей в среде необходимо решать интегральное уравнение относительно неизвестной функции источников аномального поля.

Радиоголографический метод применим также для визуализации геоэлектрических неоднородностей в земной коре, что является новым подходом в развитии электромагнитных методов разведки и поисков рудных месторождений. Определенное преимущество метода состоит в том, что для выполнения голографической реконструкции достаточно измерять амплитудно-фазовые характеристики только магнитных компонент электромагнитного поля. Вследствие этого значительно повышается эффективность проведения площадных геофизических съемок. Однако модельные вычисления и предшествующие экспериментальные работы по исследованию возможностей радиоголографического метода [10] выявили возможность появления «ложных» аномалий при голографической реконструкции распределения неоднородностей. В качестве одного из способов отбраковки таких аномалий было предложено проводить наблюдения на нескольких частотах. Данная статья как раз посвящена экспериментальному исследованию возможностей применения радиоголографического метода в двухчастотном варианте с целью повышения надежности интерпретации полученных результатов.

В первом разделе статьи приведены теоретические основы радиоголографического метода. Во втором разделе дана краткая геологическая характеристика участка Лойпишюн Мончегорского рудного района, в пределах которого проводились экспериментальные работы. Третий и четвертый разделы посвящены описанию проведенного эксперимента и обсуждению результатов.

Мончегорский рудный район характеризуется наличием многочисленных разномасштабных тектонических нарушений, являющихся рудоконтролирующими структурами, а также крутым, практически субвертикальным падением горных пород на флангах интрузивных массивов. Вследствие этих факторов радиоголографический метод, основанный на принципах частотного зондирования земной коры, обладает определенными преимуществами по сравнению с часто применяемыми импульсными методами электроразведки, такими как, например, метод становления поля в ближней зоне (ЗСБ); в англоязычной литературе этот метод обозначается как TEM-FAST [11]. При проведении экспериментальных работ методом ЗСБ в сложных геологических условиях Мончегорского рудного района измеряемые кривые становления электромагнитного поля являются зачастую некондиционными, осложненными «отрицательными» выбросами, что связано с эффектами вызванной поляризации, и плохо поддающимися интерпретации.

Следует отметить, что при 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, 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

В [8] радиоголографическая реконструкция распределения неоднородностей в среде рассматривалась 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 вторичных полей, рассеянных на геоэлектрических неоднородностях среды и являющихся аналогами предметных волн. Таким образом, выполнив измерения электромагнитного поля по площади исследуемого участка, с помощью радиоголографического метода можно визуализировать картину распределения геоэлектрических неоднородностей в земной коре.

В общем случае электромагнитное поле в произвольной точке пространства можно рассматривать как сумму первичного (нормального) поля, опре-

деляемого контролируемым источником при отсутствии геоэлектрических неоднородностей в среде, и вторичных (аномальных) полей, обусловленных токами, индуцированными в аномально проводящих зонах пространства:

$$E(r) = E_0(r) + \int_V dr' G(r, r') j(r'), \quad (1)$$

где E — напряженность полного электрического поля; E_0 — напряженность нормального электрического поля; G — функция Грина для выбранной модели среды; j — плотность индуцированных токов; интегрирование ведется по области расположения аномальных источников V .

Распределение плотности индуцированных токов $j(r')$ можно рассматривать как искомую функцию источников аномального поля.

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

$$E_H(r) = \oint_S dS' [E(r') \nabla G^*(r, r') - G^*(r, r') \nabla E(r')], \quad (2)$$

где G^* — комплексно сопряженная функция Грина; интегрирование ведется по поверхности S , ограничивающей область аномальных источников.

Формула (2) является математическим определением для голографически восстановленного поля E_H .

После некоторых преобразований, приведенных в [8], из уравнений (1) и (2) можно получить интегральное уравнение, связывающее голографическую реконструкцию поля E_H с искомой функцией источников аномального поля $j(r')$:

$$E_H(r) = E_0(r) + 2i \int_V dr' j(r') \text{Im} G(r, r'), \quad (3)$$

где $\text{Im} G$ — мнимая часть функции Грина; i — мнимая единица.

Соотношение, подобное выражению (3), можно записать и для магнитных компонент электромагнитного поля:

$$H_H(r) = H_0(r) + 2i \int_V dr' j_m(r') \text{Im} G_m(r, r'), \quad (4)$$

где H_H — значения голографически восстановленного магнитного поля; H_0 — напряженность нормального магнитного поля; $\text{Im} G_m$ — мнимая часть функции Грина магнитного типа; j_m — распределение плотности фиктивных магнитных токов, являющихся источниками аномального поля.

Плотности фиктивных магнитных токов j_m формально можно определить через распределение

плотности реальных вихревых токов j с помощью выражения [12]

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

Проведя сеточное разбиение нижнего полупространства на ячейки конечного объема, можно перейти от интегрального уравнения (4) к системе линейных уравнений относительно неизвестных значений функции аномальных источников j_m в пределах отдельных ячеек. Решение данной системы линейных уравнений и является решением обратной задачи рассеяния.

Геологическое строение участка Лойпишнюн Мончегорского рудного района

Экспериментальное тестирование радиологического метода было проведено на участке Лойпишнюн Мончегорского рудного района. Схематическая геологическая карта центральной части рудного района [13] представлена на рис. 1. Участок Лойпишнюн находится на юго-восточном склоне Мончетундровского массива, расположенного в центральной части Печенгско-Варзугской рифтогенной структуры, пересекающей Кольский полуостров с северо-запада на юго-восток. Для Печенгско-Варзугской рифтогенной структуры характерно широкое распространение тектонических разломов различных масштаба и направления, контролирующими размещение многочисленных интрузивных массивов основных и ультраосновных пород, к которым и приурочены рудопроявления и месторождения медно-никелевых, хромовых, титано-магнетитовых руд и металлов платиноидной группы.

Мончетундровский массив дифференцирован от дунитов до лейкогаббро и имеет лополитоподобную форму. Вертикальная мощность массива по данным глубокого структурного бурения составляет около 2 км, в разрезе массива выделяются следующие зоны: верхняя — габбровая, габброноритовая, нижняя — ультрамафитовая, которая подразделяется на подзоны пироксенитов — гарцбургитов и дунитов. В северо-восточной части Мончетундровского массива, в пределах так называемого Дунитового блока, расположено Сопчеозерское хромитовое месторождение. Отличительной особенностью строения массива является то, что в восточном борту массива выделяется краевая норит-габброноритовая зона мощностью в среднем до 200 м. Данная зона имеет форму клина, основание клиновидного блока выходит на поверхность с субвертикальным залеганием, а с глубиной эта зона постепенно сужается и подворачивается, так что на глубинах 1000 м и более она принимает положение, близкое к горизонтальному. Породы краевой зоны содержат вкрапленную сульфидную минерализацию. На рис. 2 представлена принципиальная схема строения Мончетундровского массива и развития в нем суль-

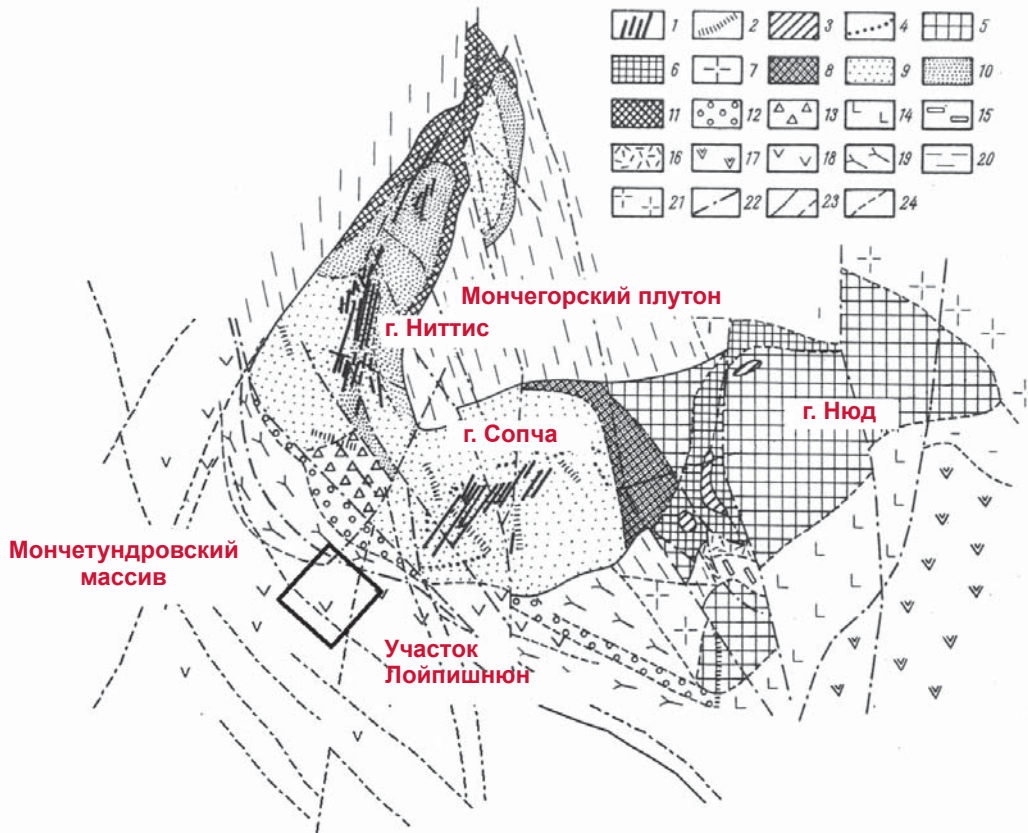


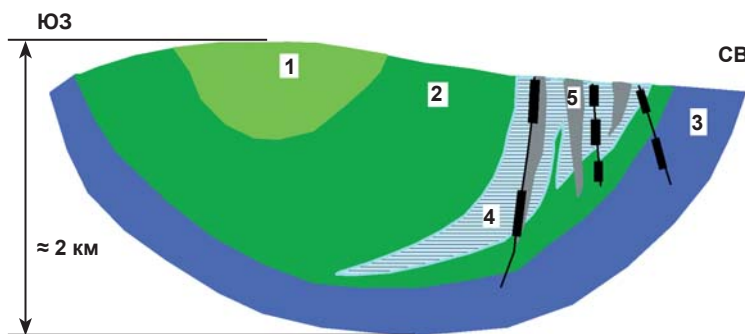
Рис. 1. Схематическая геологическая карта центральной части Мончегорского рудного района: 1 – сульфидные медно-никелевые жилы массивов Ниттис-Кумужья-Травяная и Сопчи, 2 – дайки диабазов и лампрофиров, 3 – породы «критического горизонта» массива Нюд, 4 – рудные пласты Сопчи, 5 – лейко-мезократовые нориты, 6 – меланократовые нориты, 7 – оливиновые нориты, 8 – плагиоклазовые пироксениты, 9 – пироксениты (бронзититы), 10 – зона чередования пироксенитов, оливиновых пироксенитов и перидотитов, 11 – перидотиты (гарцбургиты), 12 – зона чередования пироксенитов, перидотитов, норитов, рассеченная многочисленными жилами основных и кислых пород, 13 – оливиниты, 14 – метаморфизованные нориты и габбро-нориты предгорий Выручайвенч, 15 – кварцевые габбро и диориты, 16 – андезиты, дациты и их туфы, 17 – метадиабазы и метамандельштейны серии Имандра-Варзуга, 18 – массивные габбро-нориты и габбро Главного хребта (Мончетундровского массива), 19 – те же породы, но метаморфизованные и рассланцованные, 20 – гнейсы кольско-беломорского комплекса, 21 – диориты, гранодиориты, 22 – разрывные нарушения, 23 – контакты массивов, 24 – границы распространения пород

Fig. 1. Schematic geological map of the central part of the Monchegorsk ore region: 1 – sulfide copper-nickel veins of the Nittis-Kumuzhja-Travjanaja and Sopcha massifs, 2 – dikes of diabases and lamprophyres, 3 – the “critical horizon” rocks of the Njud massif, 4 – ore beds of the Sopcha massif, 5 – leiko-mesocratic norites, 6 – melanocratic norites, 7 – olivine norites, 8 – plagioclase pyroxenites, 9 – pyroxenites (bronzitites), 10 – the zone of alternation of pyroxenites, olivine pyroxenites and peridotites, 11 – peridotites (harzburgites), 12 – the zone of alternation of pyroxenites, peridotites, norites, dissected by numerous veins of basic and acidic rocks, 13 – olivinities, 14 – metamorphosed norites and gabbro-norites of the Vyruchuajvench foothills, 15 – quartz gabbro and diorites, 16 – andesites, dacites and their tuffs, 17 – metadiabases of the Imandra-Varzuga series, 18 – massive gabbro-norites and gabbro of the Main Range (the Monchetundra massif), 19 – metamorphosed and exfoliated massive gabbro-norites and gabbro, 20 – gneisses of the Kola-Belomorskiy complex, 21 – diorites, granodiorites, 22 – tectonic faults, 23 – contacts of massifs, 24 – distribution limits of rocks

фидного медно-никелевого оруденения. В результате геолого-разведочных работ в восточном борту Мончетундровского массива были выявлены четыре рудные зоны различной металлогенической специализации. Участок Лойпишнюн расположен в пределах второй рудной зоны, где буровыми скважинами было установлено медно-никелевое, хромитовое и платинометалльное оруденения [14].

Для интрузивных массивов Печенгско-Варзугской рифтогенной структуры характерны два типа сульфидного медно-никелевого оруденения: магматический (сингенетический) и метаморфогенный (эпигенетический). На участке Лойпишнюн буро-

выми работами были выявлены оба типа сульфидного оруденения. Магматический тип оруденения широко представлен в породах краевой норит-габбро-норитовой зоны Мончетундровского массива. Эти породы 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.



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ




-  вкрапленная магматическая сульфидная минерализация
-  прожилковое сульфидное оруденение метаморфогенного типа
-  зоны тектонических нарушений

Рис. 2. Принципиальная схема строения Мончетундровского массива и развития в нем сульфидного медно-никелевого оруденения:

- 1 – габбровая зона,
- 2 – габброноритовая зона,
- 3 – ультрамафитовая зона,
- 4 – краевая сульфидоносная норит-габброноритовая зона,
- 5 – прослойки титаномагнетитсодержащих метагаббро, феррогаббро, лейкогабброидов и лабрадоритов

Fig. 2. The simplified scheme of the structure of the Monchetundra massifs and the occurrences of the sulfide copper-nickel ore mineralization:

- 1 – the gabbro zone,
- 2 – the gabbro-norite zone,
- 3 – the ultramafic zone,
- 4 – the marginal sulfide-bearing norite and gabbro-norite zone,
- 5 – interlayers of metagabbro with titanomagnetite mineralization, ferrogabbro, leucogabbro and labradorites

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. Характерной особенностью структуры рудных зон метаморфогенного типа на участке Лойпишнюн является своеобразная многоэтажность. Разведочными буровыми скважинами зоны сульфидного медно-никелевого оруденения вскрывались как в приповерхностных горизонтах земной коры до 100 м (скважина С-1716), так и на более глубоких уровнях 200—400 м (скважина С-1720). Кроме того, в этом районе расположена структурная геологическая скважина С-753, длина ствола которой составляет 1274 м, и данная скважина вскрыла медно-никелевые рудные зоны на глубинах 800—1000 м.

Описание эксперимента

В 2012 г. на участке Лойпишнюн были проведены тестовые работы по исследованию возможностей радиологического метода в одночастотном варианте [10]. При интерпретации полученных результатов и проведении математического моделирования была отмечена возможность появления при голографической реконструкции распределения неоднородностей дополнительных максимумов функции источников аномального поля j_m , или, другими словами, «ложных» аномалий, обусловленных дискретностью точек измерения электромагнитного поля и ограниченностью площади планшета съемки. В качестве одного из способов отбраковки таких аномалий было предложено проводить наблюдения на нескольких частотах. Поэтому в 2017 г. на участке Лойпишнюн были организованы расширенные полевые исследования по применению радиологического метода в двухчастотном варианте.

Измерения проводились по десяти профилям длиной 900 м, шаг наблюдений и расстояние между профилями составляли 100 м. Таким образом, была получена равномерная квадратная сетка пунктов наблюдений, включающая 100 экспериментальных точек. Ориентация сетки в пространстве была выбрана так, чтобы одна из сторон планшета была перпендикулярна простиранию горных пород. Вследствие этого профили были проложены с юго-востока на северо-запад по азимуту 312°.

В качестве контролируемого источника электромагнитного поля использовалась квадратная незаземленная петля с длиной стороны 150 м. Центр петли располагался в 400 м к юго-востоку от края планшета на профиле 7. Стороны петли были ориентированы вдоль и поперек направления профилей. В петле генерировались гармонические сигналы частотой 34 и 136 Гц. Ток в рамке определялся с помощью измерителя на основе датчика Холла, сила тока в среднем составляла 4—8 А. Для получения фазовых характеристик первичного тока сигнал снимался с маленького участка петли длиной 1 м и записывался в систему регистрации и сбора информации с точной привязкой к мировому времени с помощью спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS [15]. Схема расположения генераторной петли и точек измерения электромагнитного поля приведена на рис. 3.

В пунктах наблюдения измерялись магнитные составляющие поля, в качестве приемной аппаратуры использовался трехкомпонентный индукционный магнитометр с цифровой системой регистрации и сбора информации, аналогичной комплекту из генераторной группы. Магнитные датчики ориентировались взаимно ортогонально, ось Y была направлена вдоль профилей. Благодаря точной привязке измеряемых сигналов к мировому времени использованный комплекс передающей и приемной аппа-

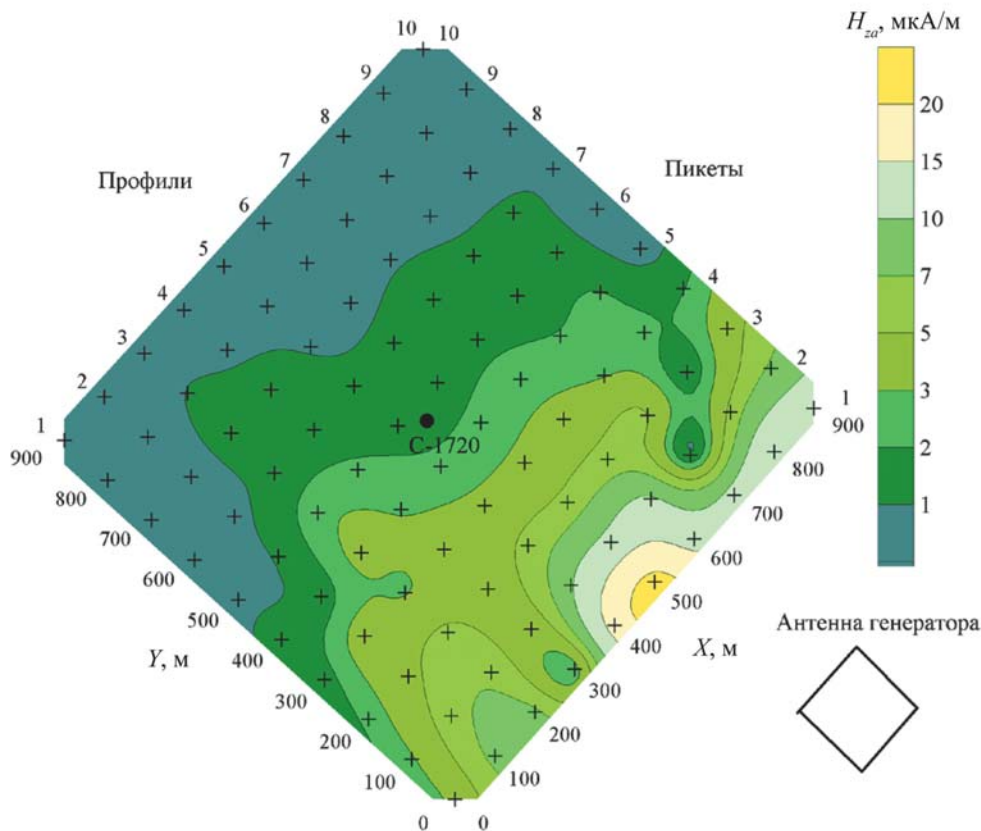


Рис. 3. Карта изолиний напряженности вертикальной составляющей аномального магнитного поля H_{za} для частоты 34 Гц и схема расположения пунктов измерения электромагнитного поля и антенны генератора
 Fig. 3. The map of isolines of the vertical component of anomalous magnetic field H_{za} for the frequency of 34 Hz and the layout of the electromagnetic field measurement points and the transmitter loop

ратуры позволял определять абсолютную разность фаз между компонентами магнитного 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 голографической реконструкции распределения геоэлектрических неоднородностей в земной коре. На рис. 3 в качестве примера приведена карта изолиний напряженности вертикальной составляющей аномального магнитного поля $H_{za} = H_z - H_{z0}$ для частоты 34 Гц, полученной вычитанием из измеренных величин теоретически рассчитанных значений нормального поля. На карте отчетливо выделяется область повышенных значений аномального поля вдоль профилей 3 и 4 в районе пикетов 5 и 6, а также в окрестностях пикетов 3 и 4 на профиле 8, что может свидетельствовать о наличии аномально электропроводящих объектов в этих зонах.

Обсуждение результатов эксперимента

По измеренным на площади планшета значениям амплитудно-фазовых характеристик компонент магнитного поля в нижнем полупространстве до глубины

ны 1100 м с шагом 100 м были вычислены значения голографически реконструированного магнитного поля H_H по методике, изложенной в [10]. В этих же точках были рассчитаны значения нормального поля H_0 для квадратной незаземленной петли, расположенной на поверхности однородного полупространства. При этом удельное сопротивление нижнего полупространства принималось равным 1000 Ом·м — такой порядок величины сопротивления был установлен по результатам ранее проводившихся на участке Лойпишнюн электроразведочных работ методом ВП-СГ (электропрофилирование методом срединного градиента с измерением вызванной поляризации). Также для этих точек были определены компоненты тензора Грина магнитного типа, алгоритм вычисления которых представлен в [12]. После сеточной аппроксимации интегрального уравнения (4) — линейный размер кубических ячеек при этом составлял 100 м — была получена система линейных уравнений относительно неизвестных значений плотности фиктивного магнитного тока j_m в пределах отдельных ячеек сетки. Система уравнений решалась стандартным методом Гаусса.

Для горизонтальной незаземленной петли возбуждение токов в земной коре носит индукционный

характер, т. е. вихревые токи текут преимущественно субгоризонтально. Вследствие этого для фиктивных магнитных токов наиболее информативной является вертикальная составляющая j_{mz} . На рис. 4 представлены карты изолиний амплитуды вертикальной компоненты плотности магнитного тока j_{mz} для вертикального разреза земной коры XZ при $Y = 400$ м на частотах 34 и 136 Гц соответственно. Из рис. 4а видно, что для частоты 34 Гц выделяются четыре аномальные области: две интенсивные аномалии в пределах координат $X = 50—250$ м, $Z = 300—450$ м и $X = 600—850$ м, $Z = 300—530$ м и еще две аномалии на более глубоких горизонтах в пределах координат $X = 100—230$ м, $Z = 750—830$ м и $X = 630—750$ м, $Z = 800—900$ м. На частоте 136 Гц для этого сечения, как видно из рис. 4б, наблюдаются только две аномальные зоны в пределах координат $X = 100—300$ м, $Z = 250—350$ м и $X = 150—330$ м, $Z = 580—650$ м.

Первая аномальная область с повышенной электропроводностью имеет геологическое объяснение. В данном районе пробурена глубокая скважина С-1720, длина ствола которой составляет 502,7 м. На рис. 5 представлен фрагмент геологического разреза вдоль бурового профиля в районе скважины. Она расположена в пределах краевой сульфидной норит-габброноритовой зоны Мончетундровского массива и пробурена вкрест простирания горных пород. Скважиной были вскрыты как породы с магматическим, бедно вкрапленным сульфидным оруденением, так и рудные зоны метаморфогенного типа с богатым содержанием сульфидов. Прослой с переотложившим медно-никелевым сульфидным оруденением были встречены в интервалах глубин 218—219, 265—270, 360—365 м и приурочены, как правило, к зонам тектонических разломов. Интервалы глубин отсчитываются вдоль ствола скважины. Если сопоставить эти данные с результатами

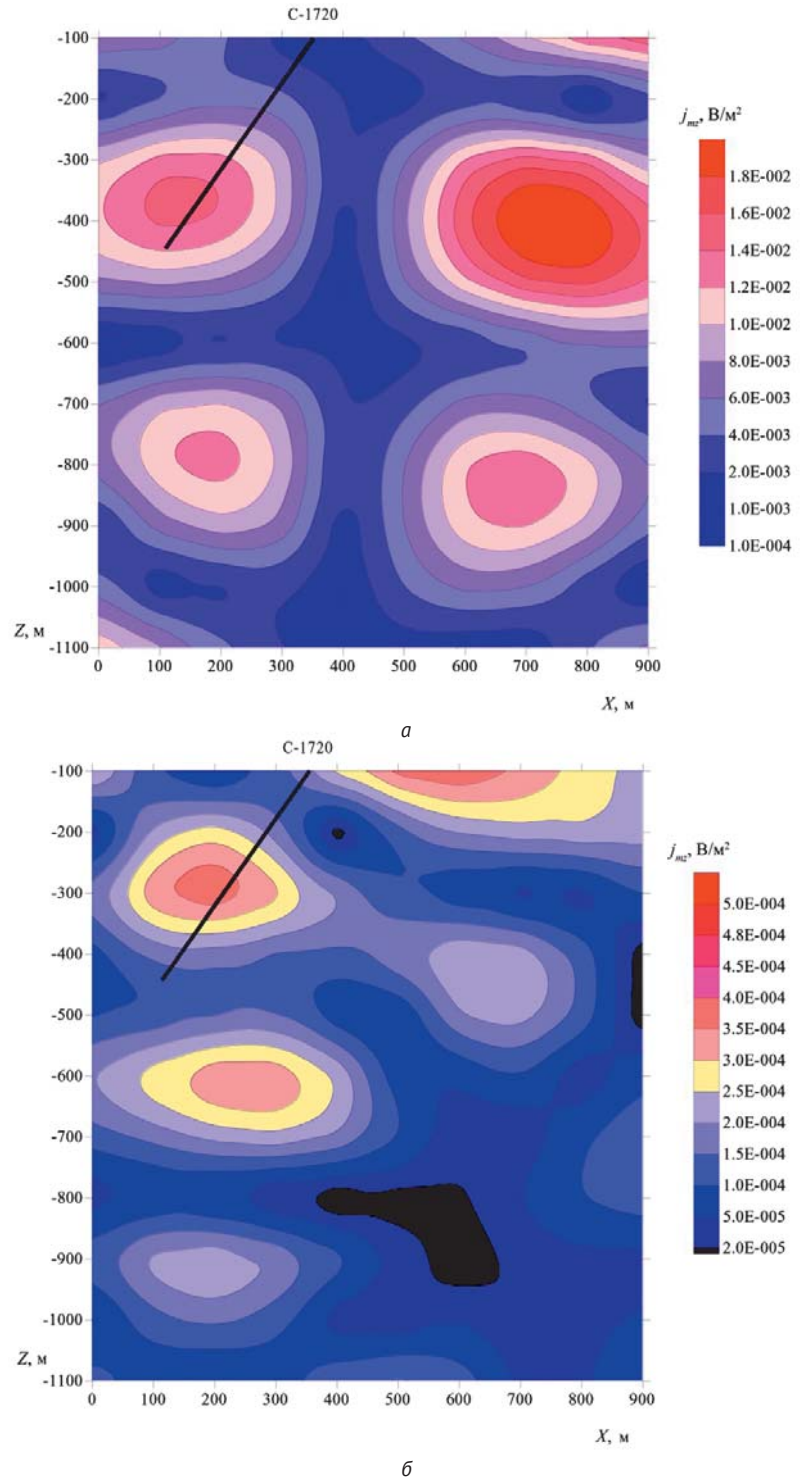


Рис. 4. Карта изолиний амплитуд вертикальной составляющей плотности фиктивного магнитного тока j_{mz} , полученная в результате голографической реконструкции распределения геоэлектрических неоднородностей в среде по экспериментальным данным для вертикального сечения земной коры при $Y = 400$ м: а — на частоте 34 Гц, б — на частоте 136 Гц. Черной линией показана проекция ствола буровой скважины С-1720

Fig. 4. The map of the amplitude isolines of the vertical component of the fictitious magnetic current density j_{mz} , obtained as a result of the holographic reconstruction of the geoelectric heterogeneities distribution in the medium from experimental data for the vertical section of the earth's crust at $Y = 400$ m: а — at the frequency of 34 Hz, б — at the frequency of 136 Hz. The black line shows the projection of the borehole S-1720

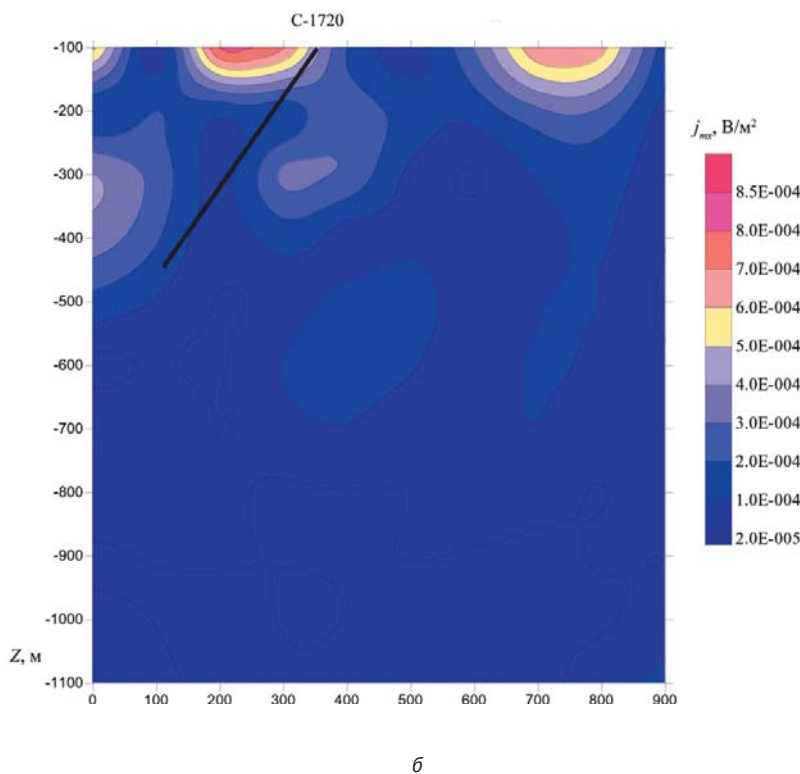
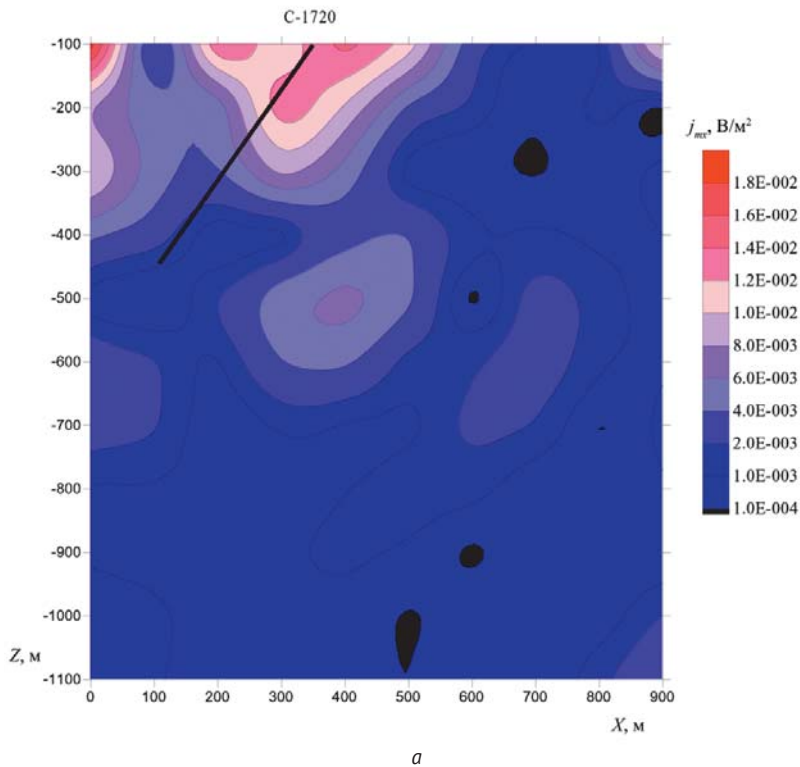
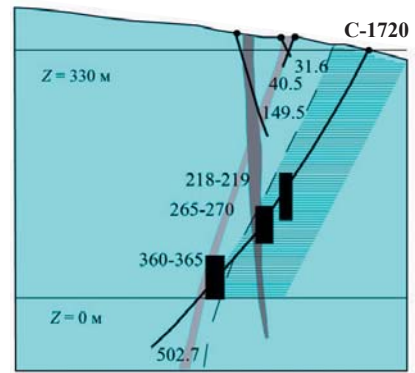


Рис. 6. Карта изолиний амплитуд горизонтальной составляющей плотности фиктивного магнитного тока j_{mx} для вертикального сечения земной коры при $Y = 400$ м: а – на частоте 34 Гц, б – на частоте 136 Гц
 Fig. 6. The map of the amplitude isolines of the horizontal component of the fictitious magnetic current density j_{mx} for the vertical section of the earth's crust at $Y = 400$ m: а – at the frequency of 34 Hz, б – at the frequency of 136 Hz





УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ
 — проекции буровых скважин
 - - зоны тектонических нарушений
 вкрапленное сульфидное оруднение магматического типа
 зоны с прожилково-вкрапленным медно-никелевым сульфидным оруднением метаморфогенного типа

Рис. 5. Фрагмент геологического разреза по буровому профилю в районе скважины С-1720
 Fig. 5. The fragment of the geological section along the drilling profile in the area of the borehole S-1720

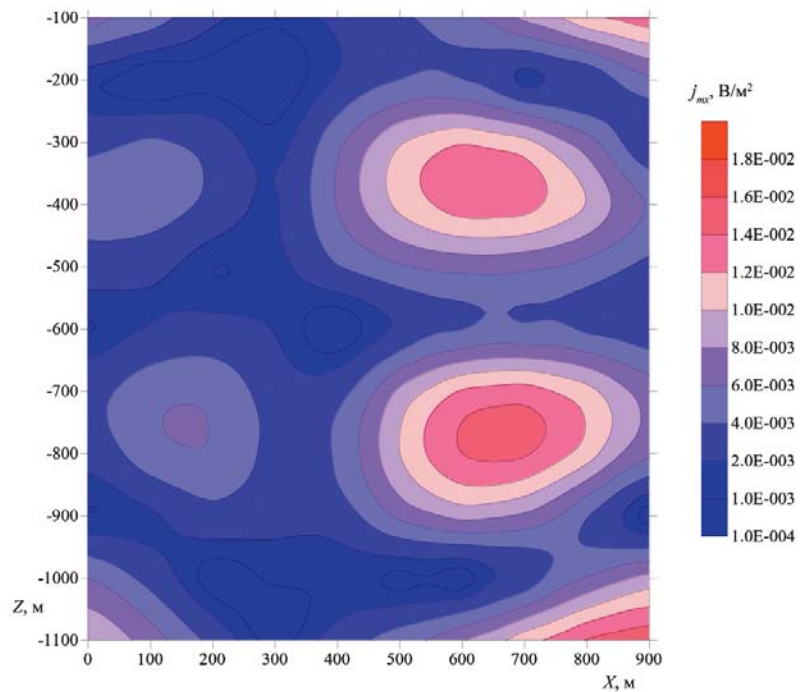
голографической реконструкции геоэлектрических неоднородностей в земной коре, то можно заметить, что данная аномальная область с повышенной электропроводностью соответствует местоположению метаморфогенных рудных зон с богатой сульфидной минерализацией. По оси Y аномалия прослеживается в пределах координат $Y = 400—600$ м.

Для сравнения на рис. 6 представлены карты изолиний амплитуды горизонтальной компоненты плотности магнитного тока j_{mx} для данного вертикального разреза земной коры на частотах 34 и 136 Гц соответственно. Из рисунков видно, что аномальные области с повышенными значениями j_{mx} имеют приповерхностный характер. Для более низкой частоты 34 Гц аномалия прослеживается до глубин порядка 300 м, для частоты 136 Гц — до глубин порядка 150 м. Таким образом, исходя из приповерхностного характера аномалий, можно предположить, что они обуслов-

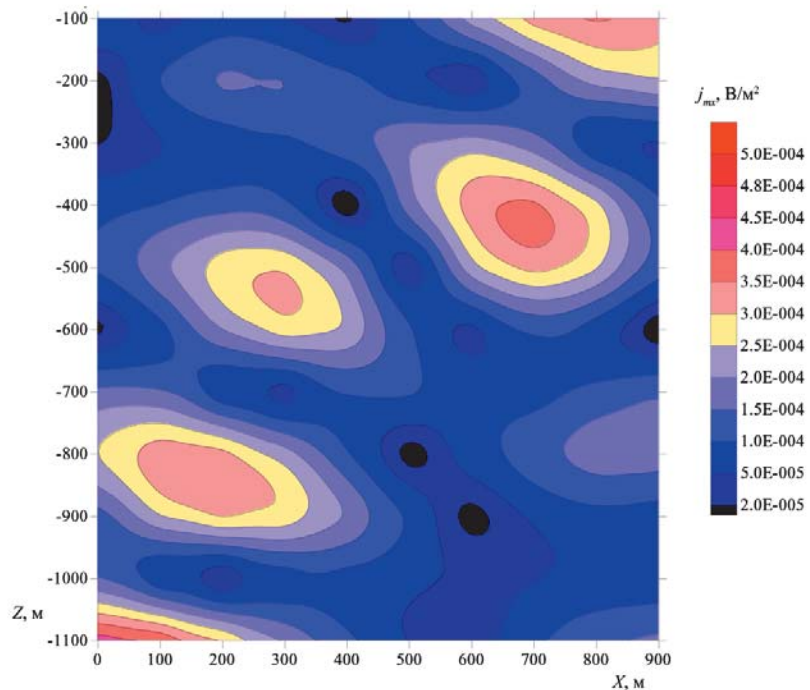
лены тектоническими разломами, имеющими чрезвычайно широкое распространение в Мончегорском рудном районе.

Рассмотрим вторую интенсивную аномальную область в пределах координат $X = 600\text{—}850$ м, $Z = 300\text{—}530$ м на частоте 34 Гц (см. рис. 4а). Из рис. 4б видно, что на частоте 136 Гц она практически не проявляется. Таким образом, эту аномалию для данного сечения земной коры можно расценивать как ложную. На самом деле сравнение результатов голографической реконструкции распределения геоэлектрических неоднородностей для разных частот позволяет уточнить местоположение аномальных объектов. Так, на рис. 7 представлены карты изолиний амплитуды вертикальной компоненты плотности магнитного тока j_{mz} для вертикального разреза земной коры XZ при $Y = 200$ м на частотах 34 и 136 Гц. На обоих рисунках выделяется аномальная зона с повышенной электропроводностью в пределах координат $X = 530\text{—}730$ м, $Z = 200\text{—}350$ м на частоте 34 Гц и $X = 550\text{—}800$ м, $Z = 250\text{—}400$ м на частоте 136 Гц. Сравнение диапазона координат аномальной области позволяет сделать вывод, что вторая аномалия, наблюдаемая на рис. 4а, в действительности локализована несколько восточнее. По оси Y аномалия прослеживается в пределах координат $Y = 200\text{—}300$ м. Данная аномальная область буровыми скважинами не заверена.

Относительно глубинных аномальных зон, отображенных на рис. 4а, трудно сделать определенные выводы. Многоэтажная структура распределения аномальных зон наблюдается и на рис. 4б. Но глубины порядка 700 м сравнимы с глубиной скин-слоя для частоты 136 Гц, поэтому следует относиться с осторожностью к полученным результатам голографической реконструкции распределения геоэлектрических неоднородностей для этой частоты на таких глубинах. Вполне



а



б

Рис. 7. Карта изолиний амплитуд вертикальной составляющей плотности фиктивного магнитного тока j_{mz} для вертикального сечения земной коры при $Y = 200$ м: а – на частоте 34 Гц, б – на частоте 136 Гц

Fig. 7. The map of amplitude isolines of the vertical component of the fictitious magnetic current density j_{mz} for the vertical section of the earth's crust at $Y = 200$ m: а – at the frequency of 34 Hz, б – at the frequency of 136 Hz

Новые технологии освоения Арктики

вероятно, что третья аномальная зона в пределах координат $X = 100\text{—}230$ м, $Z = 750\text{—}830$ м, представленная на рис. 4а для частоты 34 Гц, имеет рудную природу. По оси Y она прослеживается в пределах координат $Y = 500\text{—}700$ м. Как уже упоминалось, структурная скважина С-753 вскрыла медно-никелевые рудные зоны на глубинах 800—1000 м. Четвертую аномалию в пределах координат $X = 630\text{—}750$ м, $Z = 800\text{—}900$ м, изображенную на рис. 4а для частоты 34 Гц, можно оценить как ложную, так как на частоте 136 Гц она не подтверждается. Исследование возможностей радиологического метода для визуализации глубинных рудных зон требует дальнейших экспериментальных работ с применением более низких частот зондирующего электромагнитного поля.

Выводы

Результаты полевых экспериментальных работ на участке Лойпишюн позволяют сделать следующий вывод. Радиологический 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. Применение радиологического метода позволяет по площадным поверхностным наблюдениям компонент магнитного поля эффективно локализовать в пространстве аномальные области с повышенной электропроводностью, ассоциируемые с локальными рудными телами. Однако для более надежной интерпретации результатов голографической реконструкции распределения неоднородностей в земной коре исследования необходимо проводить в двухчастотном варианте. Сравнение результатов голографической реконструкции на разных частотах позволяет отбраковать «ложные» аномалии и выделить те аномальные зоны, которые можно ассоциировать с рудными телами.

Использование контролируемого источника и современного комплекса приемной и передающей аппаратуры с точной привязкой измеряемых сигналов к мировому времени при помощи спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS позволяет организовать быструю и экономически дешевую площадную съемку компонент магнитного поля на исследуемом геологическом участке, что значительно повышает эффективность геолого-разведочных работ при поиске рудных месторождений. При этом одновременно измеряются распределения и амплитудных, и фазовых характеристик составляющих магнитного поля, что является необходимым условием проведения голографической реконструкции распределения геоэлектрических неоднородностей в среде. Достоинством электромагнитных геофизических методов является экологическая безопас-

ность, что особенно важно для охраны окружающей среды в Арктике.

Авторы благодарны сотрудникам Полярного геофизического института О. Т. Саакяну, М. В. Швецу за участие в проведении экспериментальных работ.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ и Правительства Мурманской области (проект № 17-45-510956 р а).

Литература

1. Zhdanov M. Foundations of Geophysical Electromagnetic Theory and Methods. — Amsterdam; Oxford; Cambridge: Elsevier, 2018. — 788 p.
2. Richter M. Inverse problems: Basics, theory and applications in geophysics. — Basel: Springer Intern. Publ. AG, 2016. — 248 p.
3. Жданов М. С., Матусевич В. Ю., Френкель М. А. Сейсмическая и электромагнитная миграция. — М.: Наука, 1988. — 376 с.
4. Zhdanov M. S., Traynin P., Booker J. Underground imaging by frequency domain electromagnetic migration // Geophysics. — 1996. — Vol. 61, № 3. — P. 666—682.
5. Zhdanov M. S. Electromagnetic migration // Deep electromagnetic exploration. — New Delhi: Springer Verl.; Narosa Publ. House, 1999. — P. 283—298.
6. Жданов М. С. Теория обратных задач и регуляризации в геофизике. — М.: Науч. мир, 2007. — 712 с.
7. Гайнович К. П., Смирнов А. И. Обратные задачи низкочастотной диагностики земной коры // Изв. вузов. Радиофизика. — 2015. — Т. 58, № 6. — С. 476—491.
8. Терещенко Е. Д. Радиологический метод исследования ионосферных неоднородностей. — Апатиты: Изд-во КНЦ АН СССР, 1987. — 99 с.
9. Stone W. R. The inverse medium (or inhomogeneous medium remote probing) problem and a closed-form inverse scattering solution to the medium synthesis problem // Radio Science. — 1981. — Vol. 16, № 6. — P. 1029—1035.
10. Любич В. А. Применение радиологического метода при поиске локальных рудных тел // Физика Земли. — 2015. — № 2. — С. 139—149. — DOI: 10.7868/S0002333715020064.
11. Barsukov P. O., Fainberg E. B., Khabensky E. O. Shallow Investigations by TEM-FAST Technique: Methodology and Examples // Electromagnetic Sounding of the Earth's Interior: Theory, Modeling, Practice / Ed. by V. V. Spichak. — Amsterdam: Elsevier, 2015. — P. 44—77.
12. Дмитриев В. И. Электромагнитные поля в неоднородных средах. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1969. — 131 с.
13. Медно-никелевые месторождения Балтийского щита / Под ред. Г. И. Горбунова, Х. Папунен. — Л.: Наука, 1985. — 329 с.
14. Любич В. А. Изучение фрактальных свойств геологических сред методами геоэлектрики. —

Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publ. GmbH & Co, 2012. — 117 с. — ISBN 978-3-8465-9959-4.
15. Филатов М. В., Пильгаев С. В., Федоренко Ю. В. Четырехканальный 24-разрядный синхронизи-

рованный с мировым временем аналого-цифровой преобразователь // Приборы и техника эксперимента. — 2011. — № 3. — С. 73—75.

Информация об авторах

Любчик Владимир Алексеевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Полярный геофизический институт (183010, Россия, Мурманск, ул. Халтурина, д. 15), e-mail: lubchich@yandex.ru.

Григорьев Валерий Федосеевич, помощник директора, Полярный геофизический институт (183010, Россия, Мурманск, ул. Халтурина, д. 15), e-mail: valgri@pgi.ru.

Сидоренко Антон Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Полярный геофизический институт (183010, Россия, Мурманск, ул. Халтурина, д. 15), e-mail: anton@pgi.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Любчик В. А., Григорьев В. Ф., Сидоренко А. Е. Двухчастотный радиолографический метод для визуализации в земной коре местоположения геоэлектрических неоднородностей, ассоциируемых с локальными рудными телами (на примере Мончегорского рудного района, Кольский полуостров) // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 4 (32). — С. 123—134. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-123-134.

THE TWO-FREQUENCY RADIO-HOLOGRAPHIC METHOD TO VISUALIZE IN THE EARTH'S CRUST THE LOCATION OF GEOELECTRICAL HETEROGENEITIES ASSOCIATED WITH LOCAL ORE BODIES (ON THE EXAMPLE OF THE MONCHEGORSK ORE REGION, THE KOLA PENINSULA)

Lyubchich V. A., Grigorev V. F., Sidorenko A. E.
Polar Geophysical Institute (Murmansk, Russian Federation)

The article was received on July 20, 2018

The study is executed with the partial financial support of RFBR grant and the Government of the Murmansk Region (project No. 17-45-510956 p a).

Acknowledgements

Authors are grateful to researchers of the Polar Geophysical Institute O. T. Saakyan, M. V. Shvets for their participation in the experimental work.

Abstract

The radio-holographic method is an advanced tool for solving problems of ore geophysics. Holographic reconstruction of geoelectric heterogeneities in the earth's crust allows visualizing effectively anomalous zones with high electrical conductivity associated with local ore bodies, by using areal surface observations of magnetic components of harmonic electromagnetic field from the controlled source. The visualization of the distribution of heterogeneities in the earth's crust by using the radio-holographic method can be considered as a special case of the inverse scattering problem. When measuring electromagnetic fields at monitoring points the superposition of two fields is observed. One is the primary field from the controlled source, which, in holographic terms can be treated as a reference wave. The other ones are secondary anomalous fields caused by geoelectric heterogeneities in the earth's crust, which are analogs of object waves. The integral equation relates the holographic reconstruction of the magnetic field H_H with unknown distribution of the density of fictitious magnetic currents j_m , which are sources of anomalous fields. The system of linear equations with respect to unknown values j_m at grid nodes is obtained after grid approximation of the integral equation. The definition of these values is the solution of the inverse scattering problem. However, the analysis of previous experimental and model results demonstrated the possibility of "false" anomalies in the holographic reconstruction of the distribution of heterogeneities. It was suggested to conduct observations at several frequencies as one of the ways for rejecting such "false" anomalies. Therefore, in 2017 extensive field studies were carried out on the use of a two-frequency radio-

Новые технологии освоения Арктики

holographic method at the Loipishnjun site of the Monchegorsk ore region. As a result of field experiments it was shown that the two-frequency modification of the radio-holographic method significantly improved reliability of the holographic reconstruction of distribution of heterogeneities in the earth's crust. The comparison of results of the holographic reconstruction at different frequencies allows rejecting "false" anomalies, and identifying anomalous zones that can be associated with ore bodies.

Keywords: radio-holographic method, the Kirchhoff surface integral, magnetic field, induction magnetometer, controlled source of electromagnetic field, ore zone, copper-nickel sulfide mineralization.

References

1. Zhdanov M. Foundations of Geophysical Electromagnetic Theory and Methods. Amsterdam, Oxford, Cambridge, Elsevier, 2018, 788 p.
2. Richter M. Inverse problems: Basics, theory and applications in geophysics. Basel, Springer Intern. Publ. AG, 2016, 248 p.
3. Zhdanov M. S., Matusevich V. Yu., Frenkel' M. A. Seismicheskaya i elektromagnitnaya migratsiya. [Seismic and electromagnetic migration]. Moscow, Nauka, 1988, 376 p. (In Russian).
4. Zhdanov M. S., Traynin P., Booker J. Underground imaging by frequency domain electromagnetic migration. Geophysics, 1996, vol. 61, no. 3, pp. 666—682.
5. Zhdanov M. S. Electromagnetic migration. Deep electromagnetic exploration. New Delhi, Springer Verl., Narosa Publ. House, 1999, pp. 283—298.
6. Zhdanov M. S. Teoriya obratnykh zadach i regularizatsii v geofizike. [The theory of inverse problems and regularization in Geophysics]. Moscow, Nauch. mir, 2007, 712 p. (In Russian).
7. Gaikovich K. P., Smirnov A. I. Inverse problems of low-frequency diagnostics of the earth's crust. Radio-physics and quantum electronics, 2015, vol. 58, no. 6, pp. 428—442.
8. Tereshchenko E. D. Radiolograficheskii metod issledovaniya ionosfernykh neodnorodnostei. [Radio-holographic method for the study of ionospheric inhomogeneities]. Apatity, Izd-vo KNTs AN SSSR, 1987, 99 p. (In Russian).
9. Stone W. R. The inverse medium (or inhomogeneous medium remote probing) problem and a closed-form inverse scattering solution to the medium synthesis problem. Radio Science, 1981, vol. 16, no. 6, pp. 1029—1035.
10. Lyubchich V. A. Application of the radio holographic method in the prospecting for local ore bodies. Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 2015, vol. 51, no. 2, pp. 290—299. DOI: 10.1134/S1069351315020056.
11. Barsukov P. O., Fainberg E. B., Khabensky E. O. Shallow Investigations by TEM-FAST Technique: Methodology and Examples. Electromagnetic Sounding of the Earth's Interior: Theory, Modeling, Practice. Ed. by V. V. Spichak. Amsterdam, Elsevier, 2015, pp. 44—77.
12. Dmitriev V. I. Elektromagnitnye polya v neodnorodnykh sredakh. [Electromagnetic fields in inhomogeneous media]. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1969, 131 p. (In Russian).
13. Medno-nikelevye mestorozhdeniya Baltiiskogo shchita. [Copper-Nickel deposits of the Baltic shield]. Pod red. G. I. Gorbunova, Kh. Papunen. Leningrad, Nauka, 1985, 329 p. (In Russian).
14. Lyubchich V. A. Izuchenie fraktal'nykh svoystv geologicheskikh sred metodami geoelektriki. [Study of fractal properties of geological media by methods of geoelectrics]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publ. GmbH & Co, 2012, 117 p. ISBN 978-3-8465-9959-4. (In Russian).
15. Filatov M. V., Pil'gaev S. V., Fedorenko Yu. V. A four-channel 24-bit analog-to-digital converter with the universal-time clock. Instruments and Experimental Techniques, 2011, vol. 54, no. 3, pp. 361—363.

Information about the authors

Lyubchich Vladimir Alekseevich, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Researcher, Polar Geophysical Institute (15, Khalturina st., Murmansk, Russia, 183010), e-mail: lubchich@yandex.ru.

Grigorev Valeriy Fedoseevich, deputy director, Polar Geophysical Institute (15, Khalturina st., Murmansk, Russia, 183010), e-mail: valgri@pgi.ru.

Sidorenko Anton Evgenevich, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Researcher, Polar Geophysical Institute (15, Khalturina st., Murmansk, Russia, 183010), e-mail: anton@pgi.ru.

Bibliographic description

Lyubchich V. A., Grigorev V. F., Sidorenko A. E. The two-frequency radio-holographic method to visualize in the earth's crust the location of geoelectrical heterogeneities associated with local ore bodies (on the example of the Monchegorsk ore region, the Kola Peninsula). Arctic: ecology and economy, 2018, no. 4 (32), pp. 123—134. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-123-134. (In Russian).

© Lyubchich V. A., Grigorev V. F., Sidorenko A. E., 2018