

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.50-53

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ В ЗЕМНОЙ КОРЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ С ПОВЫШЕННОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬЮ С ПОМОЩЬЮ ДВУХЧАСТОТНОГО РАДИОГОЛОГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА

В.А. Любич, А.Е. Сидоренко

ФГБНУ “Полярный геофизический институт”, г. Мурманск, Россия  
e-mail: lubchich@yandex.ru

**Аннотация.** В рудной геофизике часто возникают задачи по визуализации в земной коре местоположения областей с повышенной электропроводностью, перспективных на обнаружение рудных тел. Радиоголографический метод является удобным инструментом для решения подобных задач. Проведя площадные измерения магнитных компонент электромагнитного поля от контролируемого источника на изучаемом геологическом участке, с помощью радиоголографического метода можно эффективно локализовать в пространстве аномальные зоны с повышенной электропроводностью. Однако, при анализе результатов предшествующих работ была отмечена возможность появления «ложных» аномалий при голографической реконструкции распределения неоднородностей. Поэтому в 2017 году были проведены расширенные полевые исследования на участке Лойпишнюн Мончегорского рудного района по применению радиоголографического метода в двухчастотном варианте. Результаты измерений показали, что голографическая реконструкция распределения неоднородностей для разных частот электромагнитного поля позволяет отбраковать «ложные» аномалии и выделять те аномальные зоны, которые можно ассоциировать с рудными телами.

Проблема визуализации геоэлектрических неоднородностей в исследуемой среде часто возникает при решении различных геофизических задач, например, при поиске рудных тел в рудной геофизике. В тех случаях, когда достаточно выявить лишь местоположение аномально проводящих зон в земной коре, представляется целесообразным использовать радиоголографический метод как наиболее оперативный способ выявления картины распределения неоднородностей. Известно, что при проведении электромагнитных зондирований Земли в точках наблюдений фиксируется суперпозиция двух полей, первичного от контролируемого источника поля, которое можно рассматривать как опорную волну, и вторичные поля, обусловленные геоэлектрическими неоднородностями среды, которые в терминах голографии можно назвать предметными волнами. Таким образом, имея результаты измерений электромагнитного поля по площади исследуемого участка, можно восстановить картину распределения геоэлектрических неоднородностей в земной коре.

Использование радиоголографического метода для реконструкции местоположения источников аномальных полей в земной коре является новым подходом в развитии электромагнитных методов разведки и поисков месторождений полезных ископаемых. В монографии Е.Д. Терещенко [1] отмечалось, что радиоголографическую реконструкцию можно рассматривать как частный случай обратной задачи рассеяния, так как с ее помощью по измеренным электромагнитным полям, рассеянным на геоэлектрических неоднородностях, восстанавливается местоположение этих аномальных объектов. Геоэлектрические неоднородности в задачах рудной геофизики представляют собой, как правило, области с повышенной электропроводностью, являющиеся источниками аномальных электромагнитных полей.

Существует интегральное уравнение, связывающее голографически реконструированное магнитное поле  $H_H$  с искомой функцией источников аномальных электромагнитных полей  $j_m$  [2]:

$$H_H(r) = H_0(r) + 2i \int_V dr' j_m(r') \operatorname{Im} G_m(r, r') \quad (1),$$

где  $H_0$  – напряженность нормального магнитного поля, определяемая контролируемым источником электромагнитных полей в отсутствие геоэлектрических неоднородностей в среде,  $\operatorname{Im} G_m$  – мнимая часть тензора Грина магнитного типа,  $j_m$  – плотность фиктивных магнитных токов,  $i$  – мнимая единица, интегрирование ведется по области расположения аномальных источников  $V$ . Плотность фиктивных магнитных токов  $j_m$  формально можно определить через распределение плотности реальных вихревых токов  $j$  выражением [3]:

$$\mathbf{j}_m(\mathbf{r}) = \nabla \times \int_V d\mathbf{r}' \mathbf{j}(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$$

Сеточная аппроксимация уравнения (1), когда нижнее полупространство разбивается на ячейки конечного объема, позволяет перейти к системе линейных уравнений относительно неизвестных значений функции аномальных источников  $\mathbf{j}_m$ , определение которых и является решением обратной задачи рассеяния.

Возможности радиоголографического метода были экспериментально проверены на участке Лойпишнюн Мончегорского рудного района. Участок Лойпишнюн находится на юго-восточном склоне Мончетундровского массива, расположенного в центральной части Печенгско-Варзугской рифтогенной структуры. Печенгско-Варзугская рифтогенная структура, пересекающая Кольский полуостров с северо-запада на юго-восток, представлена многочисленными интрузивными массивами основных и ультраосновных пород, к которым и приурочены рудопроявления и месторождения медно-никелевых, хромовых, титано-магнетитовых руд и металлов платиноидной группы.

В геологическом плане Мончетундровский массив представляет собой первично-расслоенный от дунитов до лейкогаббро стратифицированный лополит [4]. Отличительной особенностью строения массива является то, что помимо главной фазы интрузии в восточном борту массива выделяется дополнительная фаза - норит-габброноритовая, мощностью, в среднем, до 200 метров. К этой дополнительной фазе и относится сложнопостроенная зона развития сульфидоносных пород, которая 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 метров и более она принимает положение близкое к горизонтальному. Тем самым проявляется значительная асимметрия в строении Мончетундровского массива, когда ассоциация сульфидоносных пород приурочена главным образом к его восточному борту.

Для интрузивных массивов Печенгско-Варзугской рифтогенной структуры характерны 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 породах дополнительной фазы интрузии: норитах, габброноритах, метагаббро. Эти породы содержат, как правило, бедно вкрапленную сульфидную минерализацию в количестве 1-3 %. 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 [5].

При анализе результатов предшествующих работ 2012 года [2] была отмечена возможность появления «ложных» аномалий при голографической реконструкции распределения неоднородностей. В качестве одного из способов по отбраковке таких «ложных» аномалий было предложено проведение наблюдений на нескольких частотах. Поэтому в 2017 году были проведены расширенные полевые исследования по применению двухчастотного радиоголографического метода для локализации в пространстве рудных зон на участке Лойпишнюн Мончегорского рудного района.

Измерения проводились по десяти профилям длиной 900 метров, шаг наблюдений и расстояние между профилями составляли 100 метров. 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  $312^0$ .

В качестве контролируемого источника электромагнитного поля использовалась квадратная незаземленная петля с длиной стороны 150 метров. Центр петли располагался в 400 метрах 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 метр, и записывался в систему регистрации и сбора информации с точной привязкой по времени с помощью спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS [6].

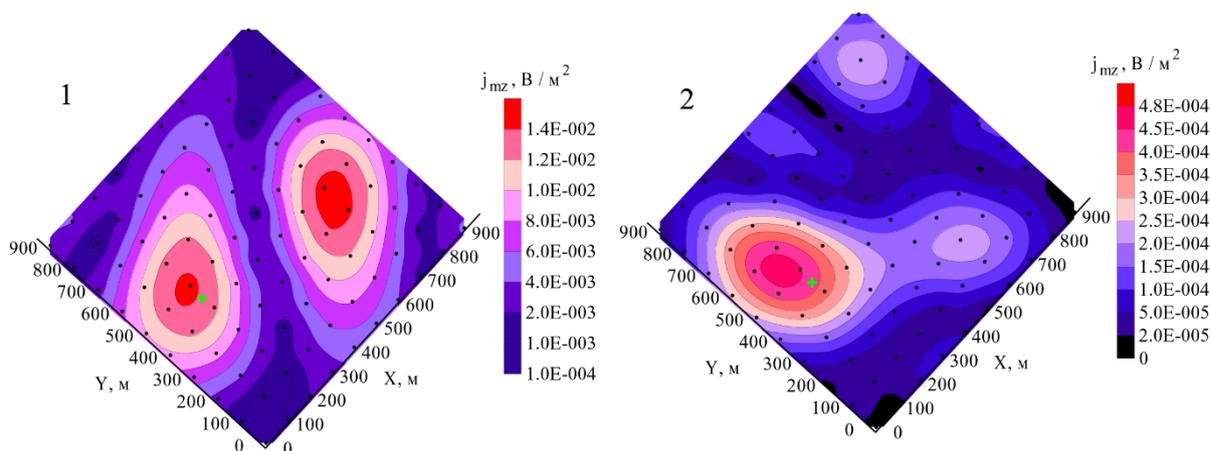
В пунктах наблюдения производились измерения магнитных составляющих поля, в качестве приемной аппаратуры использовался трехкомпонентный индукционный магнитометр с цифровой системой регистрации и сбора информации, аналогичной комплекту из генераторной группы. Магнитные датчики ориентировались взаимно ортогонально, ось  $Y$  была направлена вдоль профилей. Благодаря точной привязке ко времени измеряемых сигналов использованный комплекс передающей и приемной аппаратуры 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 проведения голографической реконструкции распределения геоэлектрических неоднородностей в земной коре.

По измеренным значениям амплитудно-фазовых характеристик компонент магнитного поля на площади планшета были вычислены по формуле, аналогичной выражению (3), значения голографически реконструированного магнитного поля  $\mathbf{H}_H$  в нижнем полупространстве до глубины  $h = 1000$  метров с шагом 100 метров. При этом удельное сопротивление нижнего полупространства принималось равным  $1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , 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) [4]. 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. После сеточной аппроксимации интегрального уравнения (9), линейный размер кубических ячеек составлял соответственно 100 метров, была получена система линейных уравнений относительно неизвестных значений плотности магнитного тока  $\mathbf{j}_m$  в узлах сетки. Система уравнений решалась стандартным методом Гаусса.

Для горизонтальной незаземленной петли возбуждение токов в земной коре носит индукционный характер, то есть вихревые токи текут преимущественно субгоризонтально. Вследствие этого у фиктивных магнитных токов превалирует вертикальная составляющая  $j_{mz}$ . На рис. 1 представлены карты изолиний амплитуды вертикальной компоненты плотности магнитного тока  $j_{mz}$  для горизонтального сечения земной коры  $Z = 300$  м на частотах 34 и 136 Гц соответственно.

Из рисунка видно, что для частоты 34 Гц выделяются две интенсивные аномалии в пределах координат  $X = 100 - 300$  м,  $Y = 400 - 600$  м и  $X = 600 - 800$  м,  $Y = 200 - 500$  м. Для частоты 136 Гц первая аномальная область наблюдается практически в тех же пределах координат, разве что имеет менее расплывчатую форму. Вторая аномальная область на сечении земной коры  $Z = 300$  м не наблюдается.



**Рисунок 1.** Карта изолиний амплитуды вертикальной компоненты плотности магнитного тока  $j_{mz}$ : **1** – для горизонтального сечения земной коры  $Z = 300$  м на частоте 34 Гц; **2** – на частоте 136 Гц. Зеленым крестом обозначена точка пересечения стволом скважины С-1720 данного горизонта.

Первая аномальная область с повышенной электропроводностью имеет геологическое объяснение. В данном районе находится глубокая скважина С-1720, длина ствола которой составляет 502.7 м [5]. Скважина расположена в пределах дополнительной сульфидоносной фазы Мончетундровской интрузии 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. 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. На рисунке местоположение ствола скважины для данного горизонтального сечения земной коры обозначено зеленым крестом. Если сопоставить эти данные с результатами 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. Вторая аномальная область для горизонтального сечения  $Z = 300$  м на частоте 34 Гц может рассматриваться как «ложная», так как на частоте 136 Гц она не выделяется.

Таким образом, результаты проведенных полевых экспериментальных работ на участке Лойпишнюн позволяют сделать следующий вывод. Радиоголографический метод является перспективным инструментом для решения задач рудной геофизики. Голографическая реконструкция геоэлектрических неоднородностей в

земной коре позволяет по площадным поверхностным наблюдениям компонент электромагнитного 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.

**Благодарности.** Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ и Правительства Мурманской области (проект № 17-45-510956 p\_a).

### **Список литературы**

1. Терещенко Е.Д. Радиоголографический метод исследования ионосферных неоднородностей. Апатиты. изд-во КНЦ АН СССР. 1987. 99 с.
2. Любич В.А. Применение радиоголографического метода при поиске локальных рудных тел. // Физика Земли. 2015. №2. С.139-149
3. Дмитриев В.И. Электромагнитные поля в неоднородных средах. М. изд-во МГУ. 1969. 131 с.
4. Шолохнев В.В., Пустовойтов В.С. и др. Отчет о результатах поисков хромовых руд и других полезных ископаемых в южной части Мончегорского рудного района за 2001-2003 гг. Мончегорск. 2003.
5. Шолохнев В.В., Поляков И.В. и др. Отчет о результатах поисковых работ на сульфидные медно-никелевые руды и другие полезные ископаемые в зоне контакта Мончеплутона и Мончетундровского массива в 1994-98 гг. (объект Лойпишнюн). Мончегорск. 1998.
6. 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.