

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.77-80

## ИЗУЧЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИКТИВНЫХ МАГНИТНЫХ ТОКОВ, ВОЗБУЖДЕННЫХ КОНТРОЛИРУЕМЫМ ИСТОЧНИКОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ТРЕХМЕРНЫХ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ, ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИОГОЛОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В.А. Любчик

ФГБНУ “Полярный геофизический институт”, г. Мурманск, Россия

**Аннотация.** Радиоголографический метод позволяет с помощью измерений магнитных компонент электромагнитного поля от контролируемого источника на поверхности исследуемого участка произвести визуализацию распределения геоэлектрических неоднородностей в среде, что можно рассматривать как частный случай обратной задачи рассеяния. При проведении измерений электромагнитных полей в пунктах регистрации наблюдается суперпозиция двух полей - первичного поля от контролируемого источника, которое в терминах голографии можно обозначить как опорную волну, и вторичные аномальные поля, которые являются аналогами предметных волн, обусловленные геоэлектрическими неоднородностями среды – зонами с повышенной электропроводностью. Применение радиоголографического метода позволяет по площадным поверхностным наблюдениям компонент электромагнитного поля восстановить местоположение данных аномальных областей. Представленная работа посвящена исследованию амплитудно-фазовых характеристик горизонтальных составляющих функции источников аномальных полей – распределения плотности фиктивного магнитного тока. По результатам экспериментальных работ в Мончегорском рудном районе показано, что области с пониженным удельным сопротивлением маркируются резкими скачками фазы, до  $180^{\circ}$ , сопряженными с относительными максимумами амплитуды горизонтальных компонент распределения плотности магнитного тока.

Визуализация зон с повышенной электропроводностью в земной коре является одной из основных задач рудной геофизики. Использование радиоголографического метода для решения подобных задач является новым подходом в развитии электромагнитных методов разведки и поисков месторождений полезных ископаемых. Действительно, при проведении электромагнитных зондирований Земли в точках наблюдений фиксируется суперпозиция двух полей, первичного от контролируемого источника гармонического электромагнитного поля, которое можно рассматривать как опорную волну, и вторичные поля, обусловленные рассеянием электромагнитных полей на геоэлектрических неоднородностях 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. В рудной геофизике, как правило, в качестве геоэлектрических неоднородностей, местоположение которых необходимо визуализировать, выступают области с повышенной электропроводностью, являющиеся источниками аномальных электромагнитных полей.

При индуктивном возбуждении электромагнитного поля в среде в качестве функции источников аномальных полей удобно использовать распределение плотности фиктивных магнитных токов  $\mathbf{j}_m$ . Для определения искомой функции  $\mathbf{j}_m$  необходимо решить интегральное уравнение [1]:

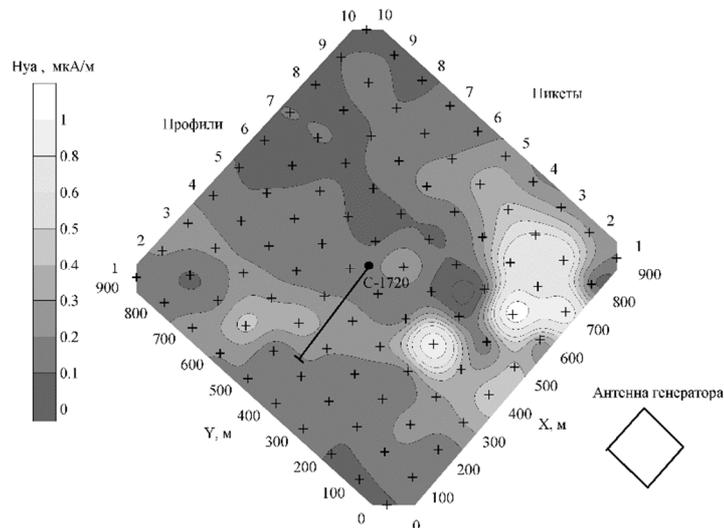
$$\mathbf{H}_H(\mathbf{r}) = \mathbf{H}_0 + 2i \int_V d\mathbf{r}' \mathbf{j}_m(\mathbf{r}') \text{Im} G_m(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \quad (1),$$

где  $\mathbf{H}_H$  - голографически реконструированное магнитное поле,  $\mathbf{H}_0$  – напряженность нормального магнитного поля, определяемая контролируемым источником электромагнитных полей в отсутствии геоэлектрических неоднородностей в среде,  $\text{Im}G_m$  – мнимая часть тензора Грина магнитного типа,  $\mathbf{j}_m$  – плотность фиктивных магнитных токов,  $i$  – мнимая единица, интегрирование ведется по области расположения аномальных источников  $V$ . Голографически реконструированное магнитное поле рассчитывается по формуле [1]:

$$H_H(\rho, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Sigma} d\rho' H(\rho', z') \frac{\partial}{\partial z} \frac{\exp(-ik\sqrt{|\rho - \rho'|^2 + (z - z')^2})}{\sqrt{|\rho - \rho'|^2 + (z - z')^2}} \quad (2),$$

где  $H$  - напряженность измеренного полного магнитного поля,  $k = \sqrt{i\omega\mu\sigma}$  – волновое число для нижнего полупространства,  $\omega$  – круговая частота поля,  $\mu$  – магнитная проницаемость,  $\sigma$  – электропроводность земной коры,  $\rho$  – горизонтальная проекция радиус-вектора. Интегрирование ведется по поверхности  $\Sigma$ , на которой проводились измерения магнитных компонент электромагнитного поля. Определение значений функции аномальных источников  $j_m$  и является решением обратной задачи рассеяния.

В 2017 году на участке Лойпишнюн в Мончегорском рудном районе проводились экспериментальные работы по исследованию возможностей радиоголографического метода. Мончетундровский интрузивный массив, в пределах которого расположен участок Лойпишнюн, характеризуется наличием двух типов сульфидного медно-никелевого оруденения. Наиболее широко распространен магматический тип, представленный породами с бедно вкрапленной сульфидной минерализацией в количестве 1-3 %. Но присутствуют также локальные тела массивных сульфидных руд, относящиеся к метаморфогенному типу оруденения и приуроченные, как правило, к зонам тектонических нарушений. Рудные тела этого типа имеют прожилково-вкрапленную текстуру минерализации и обладают более густой вкрапленностью сульфидов до 50-60 %. Мощность рудных зон составляет от нескольких метров до первых десятков метров [2].



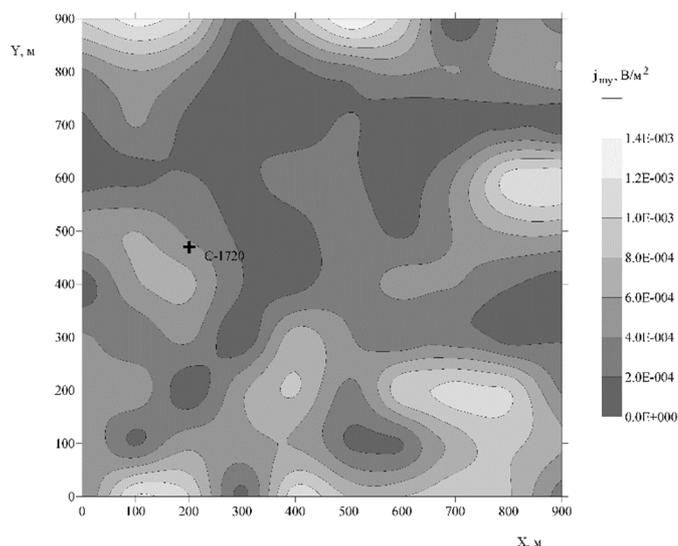
**Рисунок 1.** Карта изолиний напряженности горизонтальной составляющей аномального магнитного поля  $H_{ya}$  и схема расположения пунктов измерения электромагнитного поля и антенны генератора. Черной линией обозначена проекция ствола буровой скважины С-1720 на земную поверхность.

Экспериментальные измерения магнитных компонент электромагнитного поля проводились по квадратной сетке с шагом наблюдений 100 метров. Всего сетка пунктов наблюдений включала в себя 100 экспериментальных точек. Ориентация сетки в пространстве была выбрана так, чтобы одна из сторон планшета была перпендикулярна простиранию горных пород. 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. В петле генерировались гармонические сигналы частотой 34 и 136 Гц, сила тока в среднем составляла 4 - 8 А. В пунктах наблюдения производились измерения магнитных составляющих поля с помощью трехкомпонентного индукционного магнитометра. Для получения фазовых характеристик распределения измеряемого магнитного поля в комплексе передающей и приемной аппаратуры использовалась цифровая система регистрации и сбора информации с точной привязкой регистрируемых сигналов к мировому времени с помощью спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS [3], что позволяло 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. Схема расположения генераторной петли и точек измерения электромагнитного поля приведена на рис. 1, также на рисунке для примера представлена карта

изолиний амплитуд горизонтальной магнитной компоненты  $H_{ya}$  аномального электромагнитного поля на площади планшета съемки. Из рисунка 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-никелевого оруденения метаморфогенного типа.

По измеренным значениям амплитудно-фазовых характеристик компонент магнитного поля на площади планшета по формуле (2) были вычислены значения голографически реконструированного магнитного поля  $H_H$  в нижнем полупространстве до глубины  $h = 550$  метров с шагом 50 метров. При этом удельное сопротивление нижнего полупространства принималось равным  $1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . 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 (1) была получена система линейных уравнений относительно неизвестных значений распределения плотности фиктивного магнитного тока  $\mathbf{j}_m$  в пределах ячеек. Система уравнений решалась стандартным методом Гаусса. Данная работа посвящена исследованию амплитудно-фазовых характеристик горизонтальных составляющих плотности магнитного тока, так как поведение амплитудно-фазовых характеристик вертикальной составляющей проанализировано в работе [4].

На рис. 2 для примера представлена карта изолиний амплитуд горизонтальной составляющей плотности магнитного тока  $j_{my}$  на частоте 34 Гц для горизонтального сечения земной коры при  $Z = -300$  м.



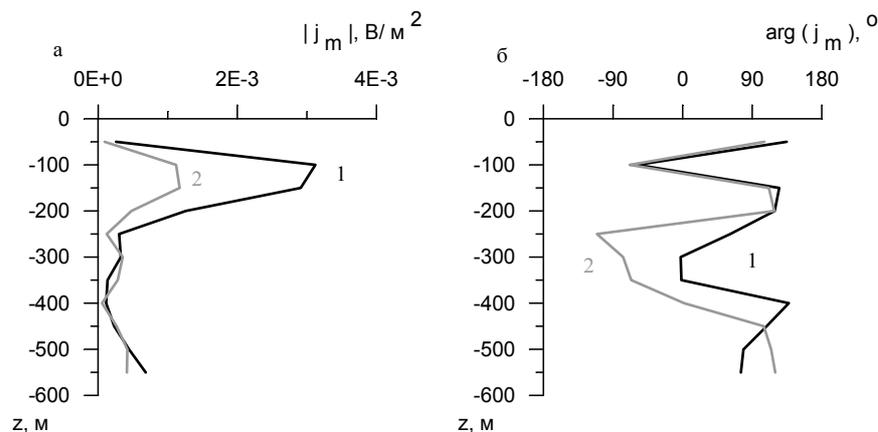
**Рисунок 2.** Карта изолиний амплитуд горизонтальной составляющей плотности фиктивного магнитного тока  $j_{my}$  для горизонтального сечения земной коры при  $Z = -300$  м на частоте 34 Гц. Крестом обозначена точка пересечения стволом скважины С-1720 данного горизонта.

Из рисунка видно, что в области подсечения скважиной С-1720 горизонтального сечения земной коры  $Z = -300$  м, в пределах координат  $X = 100-200$  м,  $Y = 350-500$  м, визуализируется аномальная область с повышенными амплитудами горизонтальной компоненты фиктивного магнитного тока  $j_{my}$ . Данная аномальная область с повышенной электропроводностью имеет геологическое объяснение. В этом районе скважиной С-1720, длина ствола которой составляет 502,7 м, были вскрыты рудные тела метаморфогенного типа с богатым содержанием сульфидов в интервалах глубин 218-219 м, 265-270 м, 360-365 м, приуроченные к зонам тектонических разломов [2].

Если рассмотреть поведение амплитудно-фазовых характеристик горизонтальных составляющих плотности магнитного тока с глубиной, то можно отметить, что местоположение вскрытых буровой скважиной рудных зон отмечается резкими скачками фазы горизонтальных компонент и относительно небольшими максимумами их амплитуд. Так на рис. 3 представлены графики зависимости значений амплитудных и фазовых характеристик горизонтальных компонент плотности магнитного тока  $\mathbf{j}_m$  от глубины  $z$  для точки с координатами  $X = 200$  м,  $Y = 500$  м.

Таким образом, по результатам выполненных на участке Лойпишнюн экспериментальных работ можно сделать следующий вывод. Рудные тела, контролируемые системой тектонических нарушений, выделяются аномальным поведением функции распределения плотности горизонтальных компонент фиктивного магнитного тока  $\mathbf{j}_m$ , а именно, резкими скачками фазы, до  $180^\circ$ , сопряженными с относительными максимумами амплитуды. Но вследствие быстрого убывания амплитудных значений с глубиной для более достоверной интерпретации картины распределения геоэлектрических неоднородностей в земной коре

необходимо комплексно анализировать амплитудные и фазовые характеристики горизонтальных составляющих плотности магнитного тока.



**Рисунок 3.** Графики зависимости значений амплитудных (*а*) и фазовых (*б*) характеристик горизонтальных компонент плотности магнитного тока  $\mathbf{j}_m$  от глубины  $z$  для точки с координатами  $X = 200$  м,  $Y = 500$  м: *1* – для горизонтальной компоненты  $j_{mx}$ ; *2* – для горизонтальной компоненты  $j_{my}$ .

**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. 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.
3. 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.
4. Терещенко Е.Д., Любич В.А. Визуализация геоэлектрических неоднородностей в земной коре радиоголографическим методом // Разведка и охрана недр. 2014. №11. С. 19-24.