

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ГЕОФИЗИКИ

*А.И. Человечков, А.Н. Ратушняк,
С.В. Байдиков, П.Ф. Астафьев*

**АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА
ПРИ ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПРОВОДЯЩИХ РУД**

ЕКАТЕРИНБУРГ, 2012

УДК 550.832
ББК 550.834.14+553.1-5
А 99

Ответственный редактор доктор технических наук **Сенин Л.Н.**
Рецензенты Директор ФГУП Филиал ВСЕГЕИ **Лазарев Ф.Д.**
Главный геофизик ЗАО ГНПП Аэрогеофизика **Бабаянц П.С.**

Человечков А.И., Ратушняк А.Н., Байдилов С.В., Астафьев П.Ф.
**А 99 Аэроразведка при поисках месторождений проводящих
руд.** -Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2012. 78 стр.

ISBN 978-5-7691-2306-01

Описан аэроразведочный комплекс АММЗ-2 и технология его применения методами заряда и незаземленной петли, позволяющая осуществлять оперативные поиски месторождений проводящих руд и прослеживать проводящие рудоконтролирующие структуры. Рассмотрены вопросы расчетов нормальных и аномальных магнитных полей в воздухе от различных источников поля и локальных проводящих тел. Приведены сведения о методике проведения воздушных наблюдений, программном обеспечении для обработки и интерпретации получаемых материалов, при выделении аномалий электропроводности, связанных с проводящими геологическими объектами. Даны примеры применения аэроразведки на ряде месторождений медно-колчеданных руд Урала.

Изложенные материалы предназначены для лиц, изучающих и применяющих электроразведку при поисках месторождений проводящих руд.

Ил. 15. Библиогр. 48 назв.

УДК 550.832
ББК 550.834.14+553.1-5

ISBN 978-5-7691-2306-01

© Человечков А.И., Ратушняк А.Н.,
Байдилов С.В., Астафьев П.Ф. 2012 г.
© УрО РАН, 2012 г.

Посвящается
памяти профессора
Кормильцева Валерия Викторовича

ВВЕДЕНИЕ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДАХ АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

Электроразведочные геофизические методы являются одними из важнейших для поисков многих типов проводящих рудных месторождений и изучения геоэлектрического строения земли. В их числе аэроэлектромагнитные методы, благодаря высокой детальности и производительности работ, приобретают все большее значение на этапе оперативного геоэлектрического изучения и поисков месторождений в горнорудных районах.

В аэроэлектроразведке наиболее широко применяются методы, которые основываются на принципе индуцирования вихревых токов переменным магнитным полем стороннего источника тока. Если вмещающие породы содержат проводящие объекты, то происходит заметное перераспределение поля внутри и вблизи проводников. Возникновение аномального поля является основой для применения электроразведочных методов.

Современные аэроэлектроразведочные комплексы снабжены устройствами для цифровой регистрации измеряемых в полёте параметров электромагнитного поля. Это обеспечивает возможность быстрой компьютерной обработки результатов измерений.

Первая вертолетная аэроэлектромагнитная система была применена в Канаде Х. Лундбергом (Icarus, 2000) в 1946 г. Датой рождения аэроэлектроразведки считается 1948 г., когда в Канаде (North Bay) компанией Stanmac McPhar были проведены испытания самолетной

одночастотной электроразведочной системы, которая затем получила распространение в Канаде и США (Fontain, 1998). К концу XX века был разработан ряд методов аэроэлектроразведки (Электроразведка, 1980, Шауб, 1971):

1. Метод индуктивного профилирования. Источником электромагнитного поля служит питаемая гармоническим током генераторная рамка, установленная на самолете или вертолете вместе с измерительной аппаратурой.

2. Метод переходных процессов. Электромагнитное поле создается импульсами тока, протекающего по генераторной рамке. Мгновенные значения напряженности поля измеряются через некоторый промежуток времени после выключения тока в генераторной рамке. Генераторная и измерительная аппаратура располагаются в одном самолете или вертолете.

3. Метод вращающегося магнитного поля (ВМП). Используется вращающееся магнитное поле, создаваемое с помощью двух взаимно перпендикулярных рамок, которые питаются переменными токами, одинаковыми по силе, но сдвинутыми между собой по фазе на 90° . В методе используются два самолета: на одном устанавливаются генераторные рамки, на втором, летящем за первым по одному с ним курсу, располагается измерительная аппаратура.

4. Метод Радиокип (радиокомпарирования и пеленгации СДВР). Источником электромагнитного поля являются длинноволновые или средневолновые широкоэмиттерные радиостанции. С помощью аппаратуры, установленной на самолете или вертолете, измеряются величины составляющих электромагнитного поля.

5. Метод бесконечно длинного кабеля (БДК). Электромагнитное поле создается протекающим по заземленному на концах прямолинейному кабелю длиной 20-30 км переменным током низкой звуковой частоты, вырабатываемым генераторной установкой. Измерительная

аппаратура устанавливается на вертолете. Измерения производятся по профилям длиной 15-30 км, идущим вкrest направления кабеля.

6. Метод заряда. Электромагнитное поле создается гармоническим током низкой частоты, протекающим по кабелю, заземленному на устье и в проводящее рудное подсечение скважины. Фазочувствительные измерения составляющих магнитного поля производятся по серии параллельных профилей с помощью аппаратуры, установленной на вертолете.

В начале 1970-х годов в ГНПП «Аэрогеофизика» был разработан самолетный вариант метода дипольного индуктивного профилирования ДИП-А. В настоящее время этот метод широко применяется с вертолетной и самолетной четырехчастотной аэросистемой ЕМ-4Н (Волковицкий и др., 2010б). Последними отечественными разработками вертолетных импульсных аэроэлектроразведочных систем являются «Импульс», разработки СНИИГГИМС (Тригубович и др., 2006) и вертолетные платформы серии «Экватор», разработки ЗАО «Гео-технологии» (Волковицкий и др., 2010а).

Применяемые самолетные и вертолетные аэросистемы с размещаемым на борту летательного средства измерительным устройством реализуют две группы методов электроразведки (Приходько, 2005, Электроразведка, 1980):

- индуктивное профилирование, с перемещаемыми одновременно измерителем и источником электромагнитного поля в виде контура с током;
- зондирование, с наземным (фиксированным) источником поля.

При этом в каждой группе методов различают системы с временным или частотным способами возбуждения и регистрации поля (Fountain, 1998, Smith, 2003, Won, 2003).

Во второй группе методов в качестве излучателя электромагнитного поля используют ток от мощных генераторных устройств в ли-

нии, заземленной на поверхности земли - метод длинного кабеля ДК-А (Электроразведка, 1980), в скважине - метод заряда МЗМП-А (Кормильцев и др., 1985) или в незаземленном контуре - метод НП-А (Человечков и др., 2005, Байдилов и др., 2005).

Основное достоинство методов индуктивного профилирования заключается в высокой мобильности, что обуславливает их широкое применение на стадии изучения геоэлектрического строения и при поисках месторождений проводящих руд в масштабах 1 : 25 000, 1 : 50 000.

Методы зондирования с наземными источниками поля обладают более высокими глубинностью и детальностью работ в масштабах от 1 : 2 500 до 1 : 10 000, их недостаток – меньшая производительность, связанная с обустройством питающих линий или контуров, но в тоже время они обладают наибольшей эффективностью при выделении локальных проводящих объектов, определении их проекции на дневную поверхность и оценке глубины залегания (Кормильцев и др., 1985, Медведев, 1990, Астафьев и др., 1992, Человечков и др., 2000).

В представленной работе описаны вертолетный электроразведочный комплекс АММЗ-2 и технология его применения, разработанные в Институте геофизики УрО РАН под руководством Кормильцева В.В. Приведены сведения о методике проведения воздушных наблюдений, программном обеспечении для обработки и интерпретации получаемых материалов. Особое внимание уделено вопросу изучения рассеяния гармонического электромагнитного поля стороннего источника на трехмерных проводящих объектах, применяемому для проведения математического моделирования и интерпретации результатов измерений методами индуктивной электроразведки в наземном и аэровариантах. Даны примеры применения аэроэлектроразведки с наземными источниками поля методами заряда и незаземленной петли на ряде месторождений проводящих руд Урала.

1.1 НОРМАЛЬНЫЕ ПОЛЯ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Одной из задач анализа результатов измерений магнитного поля в воздухе, создаваемого гармоническим источником тока, является выделение из измеренных значений аномальной части, появление которой связано с перераспределением поля внутри и вне проводящих объектов. Для этого из результатов измерений необходимо вычесть нормальное поле, создаваемое источником переменного поля в однородном проводящем полупространстве. Наличие дневной поверхности приводит к искажению структуры и характера первичного поля источника (под первичным полем понимается поле источника в однородном безграничном пространстве). Причинами искажения является большее поглощение электромагнитного поля в проводящем полупространстве, по сравнению с непроводящим воздухом, что приводит к нарушению симметрии поля.

Рассмотрим нормальные поля различных источников, применяемые в электроразведке переменным током, создаваемые в верхнем (воздух) полупространстве: электрическим диполем, заземленным на концах кабелем, а также незаземленной петлей.

Магнитное поле тока электрического диполя. Поместим электрический диполь с моментом Idl , направленным по оси OX , под гра-

ницу раздела сред $z = 0$ с электропроводностями σ_0 и σ_1 на глубину $\zeta < 0$. Определение поля в верхнем полупространстве выполняется с помощью электрического вектор-потенциала $\mathbf{A}$, удовлетворяющего волновому уравнению Гельмгольца (Бурсиан, 1972, Краев, 1965). Для учета различных электрических свойств двух полупространств должны соблюдаться граничные условия. Кроме того, должно соблюдаться условие поведения поля в бесконечности (Заборовский, 1960). Выражения для составляющих вектор-потенциала $\mathbf{A}$ горизонтального электрического диполя, ориентированного по оси OX для частного случая, когда верхнее полупространство $z > 0$ является изолятором (воздух) для точек, расположенных в верхнем непроводящем полупространстве ($z \geq 0$) имеют вид (Ваньян, 1965, Краев, 1965)

$$A_x = \frac{Idl}{2\pi} \int_0^\infty \lambda \gamma J_0(\lambda \rho) d\lambda; \quad A_z = \frac{Idl}{4\pi} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^\infty \gamma J_0(\lambda \rho) d\lambda; \quad (1)$$

где: $\gamma = \frac{e^{-\lambda z + m\zeta}}{m + \lambda}$, $m = \sqrt{\lambda^2 + k^2}$; J_0 – функция Бесселя первого рода.

Составляющие напряженности магнитного поля можно получить, используя формулу связи $\mathbf{H} = \text{rot } \mathbf{A}$

$$\begin{cases} H_x = \frac{Idl}{2\pi} \int_0^\infty \gamma \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} J_0(\lambda \rho) d\lambda; \\ H_y = -\frac{Idl}{2\pi} \int_0^\infty \lambda^2 \gamma J_0(\lambda \rho) d\lambda - \frac{Idl}{2\pi} \int_0^\infty \gamma \frac{\partial^2}{\partial x^2} J_0(\lambda \rho) d\lambda; \\ H_z = -\frac{Idl}{2\pi} \int_0^\infty \lambda \gamma \frac{\partial}{\partial y} J_0(\lambda \rho) d\lambda. \end{cases} \quad (2)$$

Магнитное поле тока горизонтальной заземленной линии.

Источник поля в виде горизонтальной заземленной линии применяется в аэроварианте метода бесконечно длинного кабеля. В верхнем полупространстве $z \geq 0$ магнитное поле тока заземленной на границе «земля-воздух» $\zeta = 0$ линии определяется интегрированием по длине

стороны от элементарного электрического диполя, момент которого направлен вдоль линии по оси OX и имеет вид

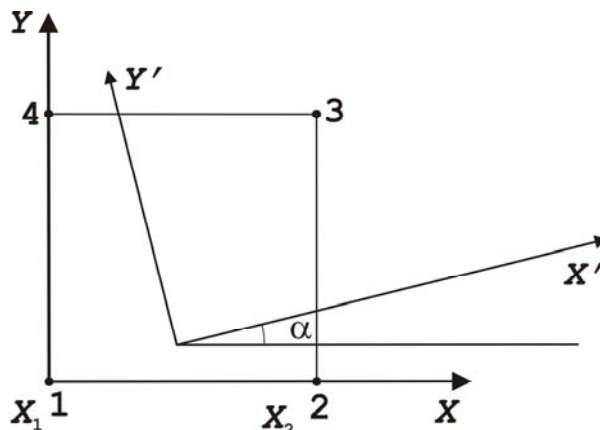
$$H_x = \int_{x_A}^{x_B} dH_x, \quad H_y = \int_{x_A}^{x_B} dH_y, \quad H_z = \int_{x_A}^{x_B} dH_z, \quad (3)$$

где составляющие поля диполя определены формулами (2).

Магнитное поле тока незаземленного контура. Источник поля в виде незаземленной петли находит широкое применение в различных индуктивных методах электроразведки переменным током, в том числе в аэроварианте метода НП. Магнитное поле незаземленного контура, (обычно представляющего собой прямоугольник), является суперпозицией полей токов N -прямолинейных отрезков – сторон контура.

В свою очередь, поле тока каждого незаземленного отрезка определяется интегрированием по длине стороны от элементарного электрического диполя, момент которого направлен вдоль отрезка.

Рис.1.1 Положение незаземленной петли относительно системы координат в точках измерений $X'Y'$



Направляя оси X' и Y' поворотом и переносом системы координат последовательно вдоль каждой стороны контура (рис. 1.1), ЭМ поле будет определяться с помощью поля

одного электрического диполя, ориентированного вдоль оси OX .

Для электрического диполя с незаземлёнными концами отличной от нуля является только составляющая вектор – потенциала, направленная по току A_x , поскольку составляющая A_z отражает влияние за-

земленных концов диполя.

Выполняя дифференцирование по координатам, получим выражения для расчета составляющих напряженности магнитного поля замкнутого незаземленного контура с током в системе координат XU для произвольной точки измерений в воздухе на высоте $z \geq 0$ (Астафьев и др., 1989):

$$\begin{cases} H_x = \frac{I}{2\pi} \sum_{l=1}^N \sin \alpha_l \int_0^{x'_B} \int_0^{\infty} \gamma J_0(\lambda r) d\lambda d\xi, \\ H_y = -\frac{I}{2\pi} \sum_{l=1}^N \cos \alpha_l \int_0^{x'_B} \int_0^{\infty} \gamma J_0(\lambda r) d\lambda d\xi, \\ H_z = \frac{I}{2\pi} \sum_{l=1}^N \int_0^{x'_B} \frac{y'}{r} \int_0^{\infty} \gamma J_1(\lambda r) d\lambda d\xi, \end{cases} \quad (4)$$

где: $\gamma = \frac{\lambda^2 e^{-\lambda z}}{\lambda + m_1}$, $r = \sqrt{(x' - \xi)^2 + y'^2}$, α_l – угол поворота системы координат вдоль каждого отрезка стороны петли.

Магнитное поле тока линии, заземленной в наклонной скважине. Определение магнитного поля в воздухе, создаваемого током в линии, заземленной в наклонной скважине, используются для расчетов нормального поля в аэроварианте метода заряда (Кормильцев, Семенов, 1987, Медведев, 1990).

Поле определяется суперпозицией магнитных полей от элементарных горизонтальных электрических диполей вдоль линии N прямолинейных отрезков кабеля, поскольку вертикальные электрические диполи не создают магнитного поля в воздухе. Координаты прямолинейных отрезков кабеля определяют по данным инклинометрии скважин.

Составляющие напряженности магнитного поля горизонтального диполя определяется через одну составляющую вектор-потенциала

A_x по формуле связи $\mathbf{H} = \text{rot } \mathbf{A}$

$$\left\{ \begin{aligned} H_y &= -\frac{I}{2\pi} \sum_{i=1}^N \cos \alpha_i \int_{-h_i/2}^{h_i/2} \int_0^{\infty} \frac{\lambda^2 e^{-\lambda z + m(h_i + l_i \xi \sin \alpha_i)}}{m + \lambda} J_0(\lambda \rho_i) d\lambda d\xi, \\ H_z &= \frac{I}{2\pi} \sum_{i=1}^N \cos \alpha_i \int_{-h_i/2}^{h_i/2} \frac{y}{\rho} \int_0^{\infty} \frac{\lambda^2 e^{-\lambda z + m(h_i + l_i \xi \sin \alpha_i)}}{m + \lambda} J_1(\lambda \rho_i) d\lambda d\xi, \end{aligned} \right. \quad (5)$$

где: α_i – угол наклона отрезка к оси OX , h_i – расстояние до середины i -го отрезка от поверхности земли, l_i – длина отрезка, x_{oi} – расстояние до середины i -го отрезка, $\rho_i = \sqrt{y^2 + (x - x_{oi} + l_i \xi \cos \alpha_i)^2}$.

Представленные выражения (3 – 5) используются для расчетов нормальных магнитных полей с помощью ЭВМ.

1.2 АНОМАЛЬНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СТАЦИОНАРНОГО ИСТОЧНИКА ТОКА В АЭРОВАРИАНТЕ МЕТОДА ЗАРЯДА

Аномальное магнитное поле в наземном варианте метода заряда достаточно хорошо изучено с помощью физического и математического моделирования. Полученные выводы и рекомендации могут быть использованы в аэроварианте, так как подъем плоскости измерений в воздух можно рассматривать как увеличение глубины до источника аномалии, которое приводит к уменьшению амплитуды магнитного поля и увеличению расстояния между экстремумами (Кормильцев, Семенов, 1987, Медведев, 1990).

Объектами поисков в МЗМП являются глубокозалегающие (500 ÷ 1000 м) крупные проводящие объекты – рудные залежи. Поэтому аномальное поле таких объектов невелико и при измерениях на земной поверхности часто искажается влиянием приповерхностных аномалий-помех геологической и техногенной природы. Источниками таких

аномалий могут быть локальные участки повышенной мощности и электропроводности рыхлых отложений – «карманы» наносов, линии электропередач, железные дороги, различные коммуникации. При подъеме в воздух расстояние до приповерхностных объектов увеличивается относительно сильнее, чем до глубинных, поэтому аномалии-помехи уменьшаются с высотой относительно быстрее, что обеспечивает лучшее отношение сигнал/помеха.

Для поисково-разведочных задач, решаемых методом МЗМП-А, основным инструментом для моделирования и интерпретации является численное математическое моделирование на ЭВМ по программам, реализующим алгоритмы вычисления аномального магнитного поля постоянного тока от трехмерных проводящих тел, расположенных в однородном полупространстве. Для математического моделирования созданы два пакета программ 3D-CONS и 3D-CONV.

Пакет 3D-CONS рассчитывает аномальное магнитное поле однородного 3D-объекта с удельной электропроводностью σ как поле двойного электрического слоя зарядов, распределенных с плотностью μ на поверхности тела S (Франк, Мизес, 1937, Воскобойников, 1973):

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{H}^0(\mathbf{r}) + \frac{1}{4\pi} \oint_S \mu(\mathbf{r}') \frac{[\mathbf{Rn}]}{R^3} dS. \quad (6)$$

где $\mathbf{H}^0$ – напряженность магнитного поля стороннего источника тока в однородной среде, $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$. Величина плотности μ двойного слоя определяется из решения интегрального уравнения Фредгольма

$$\begin{aligned} \mu(\mathbf{r}) - \frac{\lambda}{2\pi} \oint_S \left\{ \frac{(\mathbf{Rn})}{R^3} - \frac{1}{S} \oint_S \frac{(\mathbf{Rn})}{R^3} dS \right\} \mu(\mathbf{r}') dS = \\ = -\frac{\lambda}{2\pi} \left\{ U^0(\mathbf{r}) - \frac{1}{S} \oint_S U^0(\mathbf{r}') dS \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

где U^o – потенциал, создаваемый сторонним источником тока в точках $\mathbf{r}' \in S$ в однородной среде с удельной электропроводностью σ_o ; $\lambda = (\sigma - \sigma_o) / (\sigma + \sigma_o)$ – коэффициент отражения. Интегральное уравнение решается методом итераций при любом соотношении сопротивлений однородного 3D тела и вмещающей среды (Воскобойников, 1973, Мартышко, 1996). Еще одним вариантом расчетов является сведение скалярного интегрального уравнения к системе линейных алгебраических уравнений $A * X = B$, решаемой методом исключения Гаусса. По найденной плотности зарядов вычисляется аномальное магнитное поле.

Пакет 3D-CONV рассчитывает магнитное поле проводящего неоднородного 3D-объекта объемом V как поле вторичных дипольных электрических источников, распределенных внутри тела (Пеккер, 1969):

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{H}^o(\mathbf{r}) + \frac{1}{4\pi} \text{rot} \int_V \frac{(\sigma - \sigma_o) \mathbf{E}}{R} dV, \quad (8)$$

где $\mathbf{E}$ – напряженность электрического поля в точках $\mathbf{r}' \in V$. Величины $\mathbf{E}$ определяются из решения объемного векторного интегрального уравнения Фредгольма второго рода (Кормильцев В.В. 2000)

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}^o(\mathbf{r}) - \frac{1}{4\pi\sigma_o} \text{grad} \int_V (\sigma - \sigma_o) \mathbf{E} \text{grad}' \frac{1}{R} dV, \quad (9)$$

где $\mathbf{E}^o$ – напряженность электрического поля в однородной среде.

Полученное интегральное уравнение сведено к системе линейных алгебраических уравнений вида $A * X = B$, решаемой методами исключения Гаусса, итераций Зейделя и сопряженных градиентов при произвольном задании сопротивления элементов неоднородного 3D тела.

1.3 АНОМАЛЬНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ТОКА В АЭРОВАРИАНТЕ МЕТОДА НЕЗАЗЕМЛЕННОЙ ПЕТЛИ

Физико-математической основой применения геофизических методов индуктивной электроразведки, используемой при поисках и разведке месторождений проводящих руд и определении геоэлектрического строения земли, является изучение рассеяния переменного электромагнитного поля на локальных объектах.

Сторонний источник квазистационарного гармонического тока плотностью $\mathbf{i}^C$ создает в проводящей немагнитной среде электрическое поле и токи двух видов: – электрическое поле и токи растекания (проводимости) $\mathbf{i}^t$; – индукционное электрическое поле и токи индукции $\mathbf{i}^i$. Второй вид электрического поля и токов возникают за счет индукции магнитного поля, создаваемого источником. Магнитное поле в среде также имеет два слагаемых: синфазную с током источника часть, называемую магнитным полем токов $\mathbf{H}^t$, и индуцируемую часть поля $\mathbf{H}^i$, возникающую за счет индукционных токов в среде (Стрэттон, 1948, Тамм, 1954).

В однородной среде с удельной электропроводностью σ_o для определения величин напряженностей электромагнитного поля достаточно знать только характеристики стороннего источника тока. В этом помогает использование формализма комплексных амплитуд, а именно - представление режима изменения тока источника по закону $\exp(j\omega t)$. Введение комплексных амплитуд для напряженностей электромагнитного поля позволяет сразу учесть токовые и индукционные части полей (Бурсиан, 1972, Заборовский, 1960).

Если однородная среда содержит локальный неоднородный объем V с электропроводностью $\sigma(\mathbf{r}) = \sigma_o + \Delta\sigma(\mathbf{r})$, электромагнитное по-

ле представляют в виде двух слагаемых $\mathbf{E} = \mathbf{E}^o + \mathbf{E}^a$ и $\mathbf{H} = \mathbf{H}^o + \mathbf{H}^a$, где $\mathbf{E}^o$ и $\mathbf{H}^o$ – нормальное поле источника в однородной среде, $\mathbf{E}^a$ и $\mathbf{H}^a$ – аномальное электромагнитное поле, рассеиваемое локальной неоднородностью. Такое представление напряженностей поля означает введение дополнительных (вторичных) источников плотности тока. Используя принцип суперпозиции электромагнитного поля относительно источников, волновые уравнения для аномальных частей напряженностей поля в неоднородной среде запишем в виде

$$\{\text{rot rot} + k_o^2\}\mathbf{E}^a = -j\omega\mu_o(\mathbf{i}^{at} + \mathbf{i}^{ai}); \quad \{\Delta - k_o^2\}\mathbf{H}^{at} = -\text{rot}(\mathbf{i}^{at} + \mathbf{i}^{ai}), \quad (10)$$

где $k_o = \sqrt{j\omega\mu_o\sigma_o}$ – волновое число среды.

В полученных уравнениях источниками аномального поля являются $\mathbf{i}^{at}$ – аномальная плотность токов проводимости, связанная с перераспределением токов проводимости внутри локального объема и $\mathbf{i}^{ai}$ – аномальная плотность токов индукции, возникающая внутри объема согласно закону индукции Фарадея. Следовательно, напряженности аномального поля, в свою очередь, можно рассматривать как суперпозицию аномальных полей $\mathbf{E}^a = \mathbf{E}^{at} + \mathbf{E}^{ai}$ и $\mathbf{H}^a = \mathbf{H}^{at} + \mathbf{H}^{ai}$, обусловленных электрическим (токи проводимости) и магнитным (токи индукции) возбуждением локального объема V .

Решения волновых уравнений (10) для аномальных частей напряженностей электромагнитного поля $\mathbf{E}^{at}$ и $\mathbf{H}^{at}$, обусловленных аномальными токами проводимости $\mathbf{i}^{at} = \Delta\sigma\mathbf{E}$ (электрическое возбуждение) имеют вид интегралов свертки

$$\mathbf{E}^{at}(\mathbf{r}) = \int_V \hat{G}^E \Delta\sigma(\mathbf{r}')\mathbf{E}(\mathbf{r}')dV, \quad \mathbf{H}^{at}(\mathbf{r}) = \int_V \hat{G}^H \Delta\sigma(\mathbf{r}')\mathbf{E}(\mathbf{r}')dV. \quad (11)$$

Для определения напряженности электрического поля внутри объема для точек $\mathbf{r} \in V$, добавляя поле стороннего источника в одно-

родной среде (нормальное поле $\mathbf{E}^o$), можно записать векторное интегральное уравнение (Дмитриев, Захаров, 2008, Таборовский, 1975, Hohmann, 1975, Raihe, 1974, Weidelt, 1975):

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}^o(\mathbf{r}) + \int_V \hat{G}^E \Delta \sigma(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') dV, \quad (12)$$

которое используется при изучении рассеяния гармонического электромагнитного поля на локальных объектах.

Раскрывая тензорные функции Грина электрического $\hat{G}^E$ и магнитного $\hat{G}^H$ типа, формулы (11) могут быть представлены суперпозицией полей от элементарных объемов dV , выражаемых с помощью формул связи (Бурсиан, 1972, Заборовский, 1960):

$$d\mathbf{E}^{at} = \frac{1}{\sigma_o} \left\{ \text{grad div} - k_o^2 \right\} d\mathbf{A}, \quad d\mathbf{H}^{at} = \text{rot } d\mathbf{A} \quad (13)$$

через вектор-потенциал электрического типа в виде

$$d\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \Delta \sigma(\mathbf{r}') \frac{\mathbf{E}(\mathbf{r}') \exp(-k_o R)}{4\pi R} dV = \frac{J^a d\mathbf{l} \exp(-k_o R)}{4\pi R} = \frac{\mathbf{P}_E \exp(-k_o R)}{4\pi R}, \quad (14)$$

где: $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$; $\mathbf{P}_E = \Delta \sigma \mathbf{E} dV = \mathbf{i}^{at} dV = J^a d\mathbf{l}$ – аномальный момент элементарного линейного токового электрического диполя или вектор поляризации электрического типа для элементарного объема.

Из полученных соотношений видно, что аномальное электромагнитное поле при электрическом возбуждении локального тела эквивалентно полю совокупности вторичных электрических диполей, находящихся в центрах элементарных объемов (Hvozda, 1983, Weidelt, 1975).

Выражениями (11) в общем случае не исчерпывается описание рассеяния переменного электромагнитного поля на проводящей неоднородности. Они отражают одну сторону явления – поляризацию локального проводника аномальными токами проводимости (электрическое возбуждение), что справедливо на низкой частоте, в случае рез-

кого преобладания электрического возбуждения над магнитным (например, при заряде в неоднородность), в случае, когда неоднородность представлена слабоконтрастным проводником или плохо проводящим объектом. Явление индукции переменного магнитного поля учитывается лишь в среде, окружающей 3D объем, на что указывает введение в формулу (14) экспоненты $\exp(-k_o R)$ с показателем в виде произведения волнового числа вмещающей среды k_o на расстояние R .

Для хороших проводников следует учитывать также поляризацию локального проводника аномальными токами индукции (магнитное возбуждение), создаваемыми, в соответствии с законом Фарадея переменным магнитным полем. Более того, для локального проводника, находящегося в непроводящей среде (например, в воздухе $\sigma_o = 0$), уравнения (11) неприменимы, поскольку в этом случае токов проводимости нет и электрическая поляризация тела отсутствует.

Физико-математической основой изучения рассеяния гармонического электромагнитного поля на локальном проводящем объекте является задача Ми о дифракции плоской волны на проводящем шаре (Франк, Мизес, 1937, Борн, Вольф, 1970). Исследования Ми показали, что решение задачи рассеяния поля для шара представляет собой векторную сумму двух линейно независимых электромагнитных полей, соответствующих двум модам. Первая мода с нулевым радиальным магнитным полем называется электрической волной. Вторая мода с нулевым радиальным электрическим полем – магнитной волной. Каждая из волн удовлетворяет соответствующему скалярному потенциалу (потенциалу Дебая). В случае, когда длина волны во вмещающей среде превышает размеры шара, первая мода связана с электрическим диполем, помещенным в центре шара, причем момент диполя параллелен вектору напряженности первичного электрического поля и пропорционален ему. Вторая мода связана с магнитным диполем, момент

которого пропорционален вектору напряженности первичного магнитного поля (Дивильковский, 1939, Смайт, 1954). Аномальные электромагнитные поля двух мод соответствует электрическому и магнитному возбуждению проводящего шара, т.е. поляризации шара аномальными токами проводимости и индукции.

Проблема учета магнитного возбуждения локального объекта состоит в том, что вклад в аномальную часть поля, создаваемую токами индукции $\mathbf{i}^{ai} = \Delta\sigma\mathbf{E}^i$, не может быть определен с использованием традиционного математического аппарата решения дифференциальных уравнений.

В отличие от напряженности электрического поля, создаваемого зарядами или токами проводимости, индукционная напряженность электрического поля $\mathbf{E}^i$ не имеет явного вида описания через изменение магнитного поля, а только дифференциальную и интегральную формы, поскольку ЭДС индукции возникает только в замкнутом контуре.

Аномальное электромагнитное поле при магнитном возбуждении локального объема токами индукции представим в виде суперпозиции полей от элементарных объемов с помощью вектор–потенциала электрического типа (14), выполнив интегрирование по замкнутой системе аномального тока в виде элементарного витка малого радиуса – магнитного диполя. Примечательно, что в безграничной среде для замкнутого контура в виде комбинации линейных отрезков с током, вектор-потенциал всегда имеет лишь одну составляющую, совпадающую с направлением тока в элементарном отрезке. Для элементарного витка в виде магнитного диполя вектор-потенциал электрического типа будет иметь лишь азимутальную составляющую dA_φ (Бурсиан, 1972, Заборовский, 1960). Для квазистационарного случая будем учитывать изменение фазы поля на расстоянии R от точки наблюдений до центра

витка ввиду его малости. Интегрирование выражения (14) в системе координат с началом в центре витка показывает, что вектор-потенциал электрического типа для магнитного диполя можно выразить через еще более простой вектор $d\mathbf{A}^*$

$$d\mathbf{A} = -\frac{1}{j\omega\mu_0} \text{rot } d\mathbf{A}^*,$$

называемый вектор-потенциалом магнитного типа для переменного магнитного диполя:

$$d\mathbf{A}^* = -j\omega\mu_0 \frac{J^a S \mathbf{n} \exp(-k_o R)}{4\pi R} = -j\omega\mu_0 \frac{\mathbf{P}_M \exp(-k_o R)}{4\pi R}, \quad (15)$$

где $S = \pi a^2$ – площадь элементарного витка.

Аномальный момент магнитного диполя $\mathbf{P}_M = J^a S \mathbf{n}$ или вектор поляризации магнитного типа направлен по нормали $\mathbf{n}$ к плоскости элементарного витка S и связан с направлением индукционной аномальной силы тока правилом правого винта.

Формулы связи (13) для напряженностей электромагнитного поля индукционных токов с вектор-потенциалом магнитного типа примут вид

$$d\mathbf{H}^{ai} = -\frac{1}{j\omega\mu_0} \text{rot rot } d\mathbf{A}^*, \quad d\mathbf{E}^{ai} = \text{rot } d\mathbf{A}^*. \quad (16)$$

Из последнего выражения видно, что электрическое поле магнитного диполя имеет чисто индукционный характер происхождения, поскольку создается только за счет изменения магнитного поля и удовлетворяет уравнению непрерывности

$$\text{div } d\mathbf{E}^{ai} = \text{div rot } d\mathbf{A}^* = 0.$$

Для определения напряженностей аномального электромагнитного поля индукционных токов необходимо момент вектор-потенциала магнитного типа $\mathbf{P}_M$ выразить через величину изменения магнитного поля. Для кольцевого замкнутого тока величина магнитного момента

элементарного объема dV определяется как (Стрэттон, 1948, Тамм, 1954):

$$\mathbf{P}_M = J^a S \mathbf{n} = \frac{1}{2} \int_V [\mathbf{r}, \mathbf{i}^a] dV. \quad (17)$$

Воспользовавшись интегральной формой закона Фарадея, величину индукционной напряженности электрического поля, имеющую в замкнутом контуре только азимутальное направление, определим как электродвижущую силу индукции $\mathcal{E}$, отнесенную к длине элементарного замкнутого контура. Выражая напряженность электрического поля как изменение магнитного поля через замкнутый контур радиуса r , получим для азимутальной составляющей аномальной плотности тока

$$i_{\phi}^{ai} = \Delta \sigma E_{\phi}^i = -j\omega\mu_o \Delta \sigma H_n \frac{\int dS}{\oint dl} = -\Delta k^2 H_n \frac{r}{2},$$

где: $\Delta k^2 = k^2 - k_o^2 = j\omega\mu_o \Delta \sigma$. Выполняя интегрирование по объему малого элемента (17), получим для магнитного момента выражение вида

$$\mathbf{P}_M = J^a dS \mathbf{n} = -\Delta k^2 \Phi dV, \quad (18)$$

где с помощью вектора $\Phi = c(\xi \cdot H \quad \xi S \quad \xi + \quad \eta H \quad \eta S \quad \eta + \quad \zeta H \quad S)$ обозначен вектор потока напряженности магнитного поля через сечения S малого объема dV в ортогональных направлениях, $c - const$. В отличие от используемой величины скалярного потока магнитной индукции через площадь $\Phi = \int B_n dS$ введенное обозначение потока вектора напряженности позволяет учитывать направление вектора напряженности магнитного поля и, таким образом, ориентировку элементарной площади, пересекаемую магнитным полем, и плоскость, в которой

развивается вихрь индукционного тока. Постоянная c зависит от используемой геометрии элементарного объема и для малого объема в виде цилиндра равна $c=1/8\pi$, для объема в виде шара $c=1/10\pi$, для объема в виде прямоугольного параллелепипеда $c=1/32$.

Подставляя выражение аномального магнитного момента (18) в формулу для вектора–потенциала магнитного типа (15), получим

$$d\mathbf{A}^* = \frac{j\omega\mu_o}{4\pi} \Delta k^2 \Phi \frac{\exp(-k_o R)}{R} dV. \quad (19)$$

Отсюда следует, что вектор-потенциал магнитного типа пропорционален ЭДС индукции, возникающей в локальном объеме за счет изменения магнитного поля.

Используя формулы связи (16), перейдем к величинам напряженностей электромагнитного поля при индукционном возбуждении, создаваемых локальным объемом V , путем суммирования по всем элементарным объемам $V = \sum_{n=1}^N dV_n$. Интегральный вид формул можно

получить при предельном переходе $N \rightarrow \infty$ при условии малой, но конечной величины $dV_n \rightarrow 0$, в виде интегральных сумм

$$\mathbf{E}^{ai}(\mathbf{r}) = \lim_{dV_n \rightarrow 0} \sum_{n=1}^N d\mathbf{E}^{ai}(\mathbf{r}_n) = \frac{j\omega\mu_o}{4\pi} \text{rot} \int_V \frac{\exp(-k_o R)}{R} \Delta k^2(\mathbf{r}') \Phi(\mathbf{r}') dV, \quad (20)$$

$$\mathbf{H}^{ai}(\mathbf{r}) = \lim_{dV \rightarrow 0} \sum_{n=1}^N d\mathbf{H}^{ai}(\mathbf{r}_n) = -\frac{1}{4\pi} \text{rot} \text{rot} \int_V \frac{\exp(-k_o R)}{R} \Delta k^2(\mathbf{r}') \Phi(\mathbf{r}') dV. \quad (21)$$

Интегральная формула (20) описывает индуктивную часть напряженности электрического поля, создаваемую по закону Фарадея под действием переменного магнитного поля, а (21) отражает взаимоиндукцию элементов объема.

Объединяя интегральные формулы для аномальных полей при электрическом (11) и магнитном (20), (21) возбуждении, получим для суммарного электромагнитного поля уравнение рассеяния электромагнитного поля стороннего гармонического источника на локальном объекте

$$\begin{cases} \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}^o(\mathbf{r}) + \frac{1}{4\pi\sigma_o} (\text{grad div} - k_o^2) \int_V g \Delta \sigma(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') dV + \frac{j\omega\mu_b}{4\pi} \text{rot} \int_V g \Delta k^2(\mathbf{r}') \Phi(\mathbf{r}') dV, \\ \mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{H}^o(\mathbf{r}) + \frac{1}{4\pi} \text{rot} \int_V g \Delta \sigma(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') dV - \frac{1}{4\pi} \text{rot rot} \int_V g \Delta k^2(\mathbf{r}') \Phi(\mathbf{r}') dV, \end{cases} \quad (22)$$

где для сокращения записи использовано обозначение для скалярной функции $g = \exp(-k_o R) / R$.

Для точек $\mathbf{r} \notin V$ уравнения системы (22) представляют собой две интегральные формулы для расчета напряженностей электрического и магнитного поля. Для точек $\mathbf{r} \in V$ полученная шестикомпонентная система является интегральным соотношением, поскольку в аномальных слагаемых напряженность магнитного поля выражена через изменение потока напряженности магнитного поля.

Проверка показывает, что система интегральных соотношений (22) удовлетворяет уравнениям системы Максвелла и уравнениям непрерывности плотности полного тока и магнитного поля.

Частные случаи уравнения (22) имеют самостоятельное значение. При стационарном режиме поля $\omega = 0$ в системе (22) отсутствуют вторые аномальные слагаемые поля, соответствующие возбуждению 3D-объема токами индукции, и она распадается для точек $\mathbf{r} \notin V$ на две интегральные формулы для расчета напряженностей электрического и магнитного поля:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}^o(\mathbf{r}) + \frac{1}{4\pi\sigma_o} \text{grad div} \int_V \Delta\sigma(\mathbf{r}') \frac{\mathbf{E}(\mathbf{r}')}{R} dV, \quad (23)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{H}^o(\mathbf{r}) + \frac{1}{4\pi} \text{rot} \int_V \Delta\sigma(\mathbf{r}') \frac{\mathbf{E}(\mathbf{r}')}{R} dV. \quad (24)$$

Для точек $\mathbf{r} \in V$ первое уравнение является объемным векторным интегральным уравнением для напряженности электрического поля стационарного стороннего источника тока в среде, содержащей локальный объем (Дмитриев, Захаров, 1973, Кормильцев, Ратушняк, 2000).

В случае непроводящей среды $\sigma_o = 0$ в системе (22) отсутствуют первые аномальные слагаемые поля, соответствующие возбуждению 3D-объема токами проводимости. Система (22) распадается для точек $\mathbf{r} \notin V$ на две интегральные формулы для расчета напряженностей электрического и магнитного поля:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}^o(\mathbf{r}) + \frac{j\omega\mu_o}{4\pi} \text{rot} \int_V k^2(\mathbf{r}') \frac{\Phi(\mathbf{r}')}{R} dV, \quad (25)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{H}^o(\mathbf{r}) - \frac{1}{4\pi} \text{rotrot} \int_V k^2(\mathbf{r}') \frac{\Phi(\mathbf{r}')}{R} dV. \quad (26)$$

Для точек $\mathbf{r} \in V$ уравнение (26) является системой интегральных соотношений для напряженности магнитного поля, описывающее возбуждение проводящего 3D-тела переменным магнитным полем стороннего источника (магнитное возбуждение).

Для приведения уравнения (22) к системе линейных алгебраических уравнений аномальные слагаемые объединим и перенесём в левую часть. Введем два шестикомпонентных полевых вектора напряженности поля $\mathbf{F} = \mathbf{E}, \mathbf{H}$ и $\mathbf{F}^o = \mathbf{E}^o, \mathbf{H}^o$, которые внесем под знаки интегралов, используя дельта-функцию Дирака. Заменим интегралы по объему V суммой по большому, но конечному числу элементов объема $N \rightarrow \infty$ столь малых, что электропроводность и напряженности по-

ля можно считать постоянными в пределах каждого из них $\sigma(\mathbf{r}_p) = \text{const}$, $\mathbf{E}(\mathbf{r}_p) = \text{const}$, $\mathbf{H}(\mathbf{r}_p) = \text{const}$. Интегрирование по объему каждого элемента перенесем на дельта-функции Дирака и тензорные функции Грина.

Используя соотношения $\text{rot rot} = \text{grad div} - \Delta$, $\Delta g = k_o^2 g - 4\pi\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$ и вынося вектор $\mathbf{F}$ в качестве общего множителя с помощью символа Кронекера, получим СЛАУ вида $A \cdot F = F^0$, где вектор-столбцы F^0 и F имеют размерность $6 \cdot N$: $F_j^0 = [E_1^0, E_2^0, E_3^0, H_1^0, H_2^0, H_3^0]$; $F_j = [E_1, E_2, E_3, H_1, H_2, H_3]$; а четырехблочная матрица Грина A имеет размерность $6N \cdot 6N$ с элементами

$$A_{ij}(r_g/r_p) = \left[\begin{array}{c|c} \delta_{mn}\delta_{gp} - \frac{\Delta\alpha(r_p)}{4\pi\epsilon_0} \hat{G}_{mn} & -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \Delta k^2(r_p) \hat{W}_{mn} \frac{V(r_p)}{32d_n(r_p)} \\ \hline -\frac{\Delta\alpha(r_p)}{4\pi} \hat{W}_{mn} & \delta_{mn}\delta_{gp} + \frac{\Delta k^2(r_p)}{4\pi} \hat{G}_{mn} \frac{V(r_p)}{32d_n(r_p)} \end{array} \right], \quad (27)$$

где: $i, j = 1, 2, \dots, 6$; $m, n = 1, 2, 3$; $g, p = 1, \dots, N$; δ_{mn} , δ_{gp} – символы Кронекера, $d_n(r_p)$ – длина элемента r_p по оси n , $V(r_p)$ – объем элемента r_p ,

$$\hat{G}_{mn} = P \int_{V_p} G_{mn}(r_g/r_p) dV_p = P \int_{V_p} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial r_m \partial r_n} - k_o^2 \delta_{mn} \right\} \frac{\exp(-k_o R)}{R} dV_p,$$

$$\hat{W}_{mn} = \int_{V_p} W_{mn}(r_g/r_p) dV_p = \int_{V_p} \delta_{m\ell n} \frac{\partial}{\partial r_\ell} \frac{\exp(-k_o R)}{R} dV_p.$$

Выделим особенности в точках $\mathbf{r} = \mathbf{r}'$ для диагональных элементов в аномальных слагаемых $\mathbf{E}^{at}$ и $\mathbf{H}^{ai}$. В слагаемых $\mathbf{E}^{ai}$ и $\mathbf{H}^{at}$ система (22) особенностей не имеет в силу симметрии тензорной функции Грина.

Диагональные элементы матрицы $p = g$ при $m \neq n$ равны 0, при $m = n$ имеют вид: для верхней половины главной диагонали матрицы

при $i=1, 2, 3$

$$A_{ii}(r_p / r_p) = 1 + \frac{\Delta\sigma(r_p)}{3\sigma_o},$$

для нижней половины главной диагонали матрицы при $i = 4, 5, 6$

$$A_{ii}(r_p / r_p) = 1 + \frac{\Delta k^2(r_p) d_i^2(r_p)}{48}.$$

Принимая во внимание, что длина волны в элементарном объеме не должна превышать его линейный размер d , или соблюдаться условие $\text{Re}(\Delta k) \cdot d \ll 1$, последняя формула показывает условие дискретизации элементов объема

$$d \ll \frac{10}{\sqrt{\omega\mu_o\Delta\sigma}} = \frac{3.5}{\sqrt{f\Delta\sigma}} \text{ [км]}.$$

Численная реализация уравнения рассеяния (22) в виде пакетов программ D6-AERO и D6-ELECTRO используется для проведения математического моделирования при изучении рассеяния электромагнитного поля гармонических источников тока на локальных 3D неоднородностях и интерпретации результатов измерений методами индуктивной электроразведки в аэро и наземном вариантах (Ратушняк, 2006, Человечков, 2000). Основная программа пакета рассчитывает аномальное электромагнитное поле, создаваемое проводящим неоднородным 3D-объектом, находящимся в поле гармонического источника тока индукционного типа в виде незаземленного контура, расположенного на поверхности земля-воздух, или приподнятого вертикального магнитного диполя.

Полученное решение в виде уравнения рассеяния электромагнитного поля стороннего гармонического источника на локальном объекте позволяет сделать следующие выводы:

- Рассеяние переменного электромагнитного поля на 3D-теле является совокупностью действия четырех физических эффектов: элек-

трическая поляризация токами проводимости; электрическое поле, возникающее в проводящем теле по закону индукции Фарадея; магнитное поле, создаваемое токами проводимости по закону Био–Савара и взаимоиндукция элементов объема.

- Рассеяние гармонического электромагнитного поля стороннего источника на локальном объекте описывается шестикомпонентной системой интегральных соотношений для напряженностей электромагнитного поля, определяемое возбуждением 3D-тела токами проводимости (электрическое возбуждение) и переменным магнитным полем (магнитное возбуждение).
- Гармоническое электромагнитное поле, рассеиваемое 3D-объектом, эквивалентно полю совокупности вторичных электрических и магнитных диполей, моменты которых пропорциональны аномальным плотностям токов проводимости и токов индукции.
- Шестикомпонентная система интегральных соотношений для напряженностей переменного электромагнитного поля позволяет определить величины поля для 3D-объектов, включая случай полного преобладания индукционного возбуждения локального проводящего тела в плохо проводящей среде.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ АЭРО-СЪЕМКИ

2.1 Аэроэлектроразведочный комплекс АММЗ-2

В Институте геофизики УрО РАН разработаны комплексы аппаратуры для проведения аэро-, наземных и скважинных электроразведочных работ. Комплексы аппаратуры позволяют решать следующие геологические задачи: выделение и прослеживание рудоконтролирующих структур, поиски объектов повышенной электропроводности, корреляция рудных подсечений в скважинах и оконтуривание рудных тел в околоскважинном пространстве. Комплекс аппаратуры для аэроэлектроразведки АММЗ-2 предназначен для измерений низкочастотного магнитного поля на борту вертолета при проведении поисковых аэрогеофизических работ методом незаземленной петли НП–А и для поисково-разведочных работ аэровариантом методом заряда МЗМП–А. Аппаратура не имеет аналогов в мире и позволяет проводить аэроэлектроразведочную съемку для изучения строения среды и поисков месторождений проводящих руд на глубинах до 2000 м масштаба 1 : 10 000 и крупнее (Астафьев П.Ф. 1992, Кормильцев В.В. 1985).

Технические характеристики аэрокомплекса АММЗ-2

1. Рабочие частоты, Гц - 19.5; 78.1; 312.5.
2. Выходная мощность ГУ на активной нагрузке 5 Ом, кВт – 5.
3. Источник питания ГУ – генератор постоянного тока станции ЭРС-67.
4. Источник питания ИУ – борт-сеть 27 В (потребляемая мощность – 10 Вт).
5. Динамический диапазон автоматического аттенюатора, дБ – 42.
6. Динамический диапазон ручного аттенюатора, дБ – 60.
7. Чувствительность не хуже 0.3 пТл на частоте 19.5 Гц.

8. Статическая погрешность не превышает $3\% \pm 1$ знак младшего разряда.
9. Подавление помехи промышленной частоты не менее 60 дБ.
10. Рабочий диапазон температур $-10 \div +50^\circ\text{C}$.
11. Масса оборудования на борту вертолѐта и в гондоле не более 100 кг.

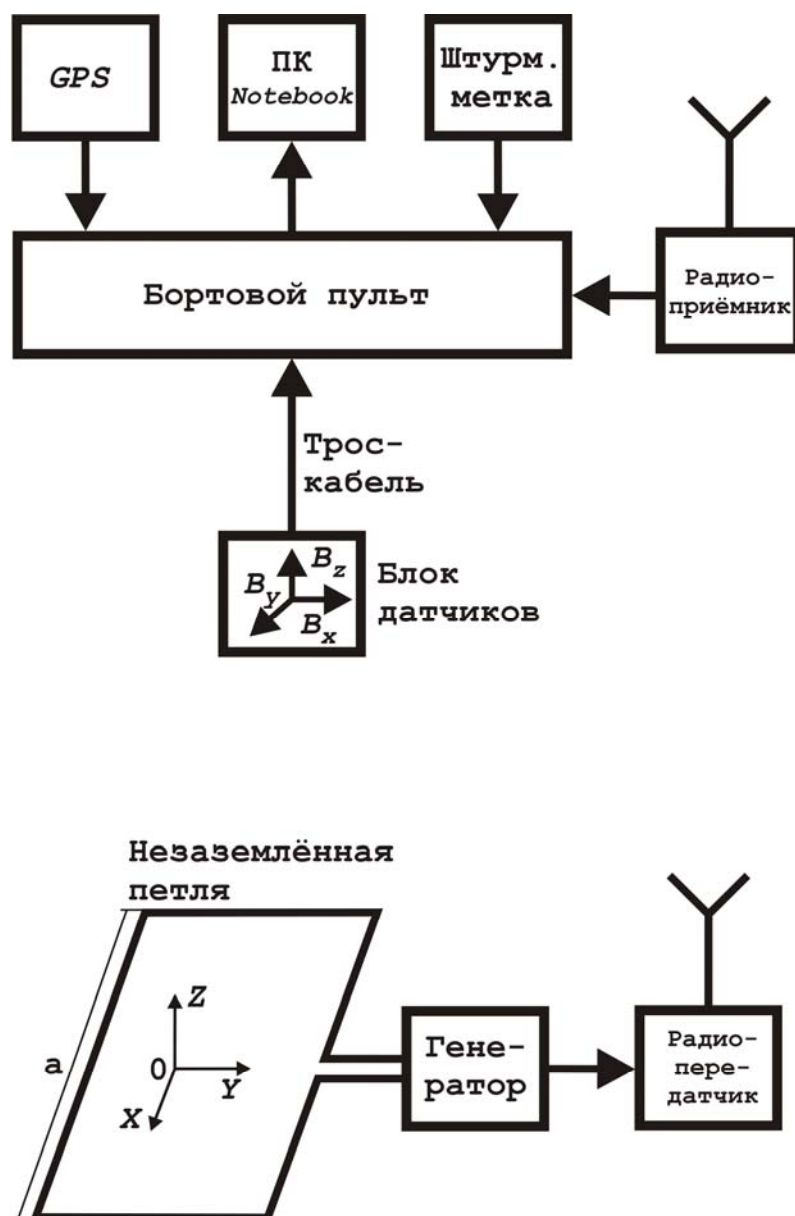


Рис.2.1 Схема измерительного (вверху) и наземного силового (внизу) блоков аппаратуры АММЗ-2 при работе с источником индукционного типа (метод НП-А).

Блок-схема аэрокомплекса АММЗ–2 представлена на рис. 2.1. В состав аэрокомплекса АММЗ-2 входят наземный блок и измерительное устройство, размещаемое на борту вертолета.

Наземный блок аппаратуры предназначен для создания переменного электромагнитного поля и состоит из силового генераторного устройства (ГУ), питающей установки в виде незаземленной квадратной петли со стороной a или линии, заземленной в рудное подсечение и на кондуктор скважины, и УКВ–радиопередатчика опорного сигнала.

В структурную схему измерительного устройства, размещаемого на борту вертолета, входят следующие узлы и блоки: выносная гондола с тремя ортогональными индукционными датчиками пространственных составляющих магнитного поля на трос–кабеле, четыре идентичных усилительных канала составляющих поля и опорного сигнала в бортовом измерительном пульте, персональный компьютер, УКВ–радиоприёмник опорного сигнала, блок штурманской метки и прибор спутниковой навигации GPS.

Аппаратура обеспечивает в течение времени полета проведение непрерывных фазочувствительных измерений и регистрацию на выбранной рабочей частоте трех составляющих вектора магнитной индукции, создаваемого наземным источником переменного электромагнитного поля.

2.2 Методика проведения аэросъемки

Привязка питающей установки в виде заземленной линии (устья скважины) или углов петли на местности осуществляется с помощью прибора спутниковой навигации GPS. Выбор длины стороны петли производится исходя из условий максимальной глубины залегания проводящих объектов и геологической цели работ. Размеры планшета измерений в воздухе определяются величиной сигнала вблизи границ планшета не менее 1 пТл.

Для создания тока в генераторной петле используется силовая электроразведочная станция ЭРС - 67 мощностью 32 КВт с задающим генератором и инвертором, входящими в комплект аппаратуры АММЗ. Аппаратура обеспечивает создание переменного тока частотами 19, 78.1 или 312.5 Гц, силой в незаземленном контуре до 50 А, в заземленной линии до 10 А.

Выбор рабочей частоты тока обуславливается двумя взаимоисключающими факторами: с одной стороны, рабочая частота должна быть как можно более низкой для уменьшения скин-эффекта и увеличения глубинности исследований. С другой стороны частота должна быть, возможно более высокой для увеличения чувствительности и помехоустойчивости индукционных датчиков поля.

Опыт применения аэроэлектроразведки с гальваническим и индукционным источниками показал, что для проводящих вмещающих пород (от 100 и более Ом·м) оптимальной является частота тока более 50 Гц, что обеспечивает достаточно высокое качество измерений переменного магнитного поля и помехоустойчивость аппаратуры.

Подготовительные работы по аппаратурной компенсации начальных фазовых сдвигов измерительных каналов ($JmB_{x,y,z} = 0$) требуют расположения датчиков вблизи провода с током. При работах методом МЗМП-А в разрыв питающей линии, идущей к погруженному электроду A , включается контур провода радиуса 20 м, в центре которого помещаются измерительные датчики и выполняется фазирование измерительных трактов.

При поисковых работах методом НП-А в сложных условиях, где посадка летательного аппарата вблизи контура невозможна, компенсация начальных фазовых сдвигов бортовой аппаратуры проводится в полете через центральный профиль, проходящий непосредственно над петлей. В процессе дальнейшей обработки измеряемый сигнал анализируется и раскладывается на квадратурные компоненты – синфазную

с током в петле (Re – реальную часть поля) и противофазную току (Jm – мнимую часть) по всем составляющим поля B_x , B_y , B_z .

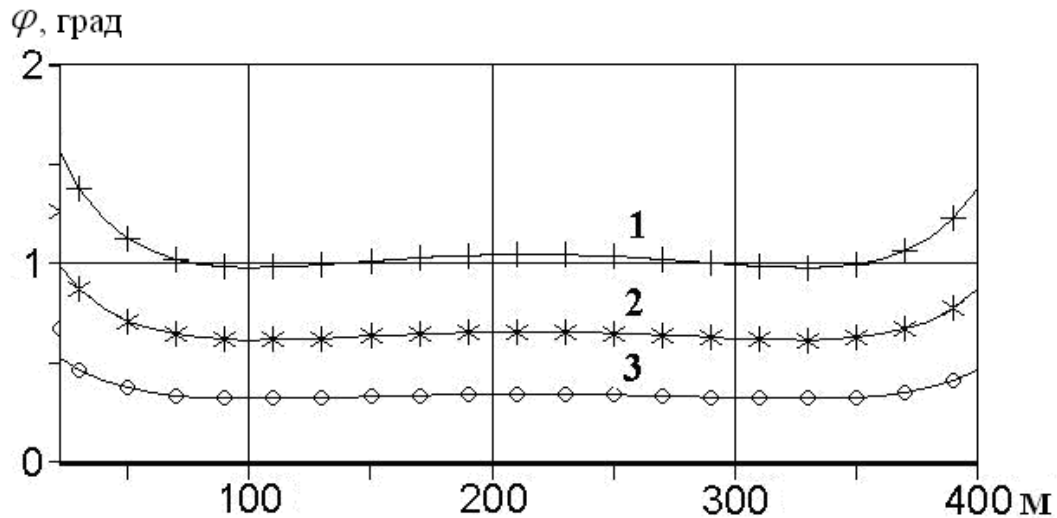


Рис. 2.2 Графики фазовых углов φ (градус) вертикальной составляющей магнитной индукции B_z на высоте $h = 100$ м над центром незаземленной петли
 $a = 400$ м, $f = 78,1$ Гц
 (шифр кривых - удельное сопротивление среды, ρ , Ом·м: 1 – 100, 2 – 300, 3 – 1000)

Расчеты фазовых углов вертикальной составляющей магнитной индукции B_z на высоте $h = 100$ метров непосредственно над петлей с размером стороны $a = 400$ м для частоты тока $f = 78,1$ Гц при различных величинах удельного сопротивления полупространства приведены на рис.2.2.

Анализ расчетов показывает, что даже при удельном электрическом сопротивлении пород 100 Ом·м максимальная величина фазового угла составляет величину порядка 1 градуса. Таким образом, измеряя квадратурные составляющие поля непосредственно над петлей и определив величину фазового угла, можно ввести поправку за начальный фазовый угол во все величины составляющих магнитного поля на всем планшете измерений.

При скорости полета 60 км/час на участке профиля, проходящем через центр петли длиной 400 метров выполняется 120 измерений сигнала составляющих поля, т.е. измерения поля над петлей являются

уверенными и позволяют достаточно точно ввести поправку за компенсацию начальных фазовых сдвигов измерительной аппаратуры.

В процессе работы производится запись синусоид всех измеряемых сигналов трёх ортогональных составляющих магнитного поля (B_x , B_y , B_z). Для синхронизации между фазой тока в петле и измеряемым сигналом синусоида сигнала тока через трансформатор тока с помощью радиоканала с использованием двух УКВ-радиостанций передается в измеритель. Синусоида опорного сигнала синхронизации так же записывается в регистрирующий прибор.

Рядовые измерения проводятся на планшетах размером от 5 х 5 км до 7 х 7 км по сериям параллельных профилей, при челночных полетах по встречным курсам с использованием вертолетов класса КА-26 или МИ-2. Точки измерений дискретно привязываются с помощью прибора спутниковой навигации GPS, обеспечивающего точность привязки не хуже 10 м. Расстояние между профилями выдерживается от 100 до 200 м. в зависимости от масштаба съемки. Высота полётов выбирается минимальной с учетом безопасности полетов и условий пересеченности рельефа, а также иных высотных объектов. Обычная высота съемки принята равной 100 м. Скорость вертолётa поддерживается постоянной и составляет 60 км/час. При времени опроса каждого канала составляющих поля с периодом 5 измерений в секунду на частоте 78,1 Гц расстояние между точками наблюдений составляет около 25 м, что обеспечивает очень высокую детальность измерений масштаба 1 : 2 500, что сопоставимо с наземными детализационными работами.

2.3. Обработка и интерпретация результатов

Измеряемые величины трех составляющих магнитного поля по измерительным каналам автоматически записываются в бортовую ЭВМ и воспроизводится на экране монитора в виде графиков поступающих сигналов во времени.

Программное обеспечение для обработки данных аэроэлектро-разведки состоит из четырех программных модулей:

1. обработка топографических данных координат точек измерений и источника поля (заземленной линии или незаземленного контура);
2. обработка измеренных данных вектора магнитной индукции;
3. расчет нормального магнитного поля источника поля;
4. расчет аномального магнитного поля и его характеристик.

Топографические данные, выведенные с прибора спутниковой навигации в ЭВМ, обрабатываются для привязки измеренных значений электромагнитного поля по профилям к местности, с учетом траектории облета планшета по сериям параллельных профилей. Топографические данные пересчитываются из системы WGS-84 в систему координат Гаусса-Крюгера. Поскольку количество точек измерений магнитного поля не совпадает с количеством точек измерений координат, промежуточные точки измерений заполняются при обработке данных с помощью интерполяционного многочлена Лагранжа

$$L(x) = \frac{x - x_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} y_i + \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i} y_{i+1},$$

где x изменяется от x_0 до x_k при равноотстоящих промежутках $\overrightarrow{\Delta r}$. То есть при $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ или $x_i \geq x \geq x_{i+1}$ (в случае прямого направления полета с запада на восток или обратного направления с востока на запад), где $i = 0, 1, \dots, k$, k – количество координат точек текущего профиля.

В результате при обработке создаются файлы с измеренными данными магнитного поля, в которых пронумерованы номера профилей и точек измерений, приведены координаты, реальные Re и мнимые Im квадратуры составляющих магнитного поля B_z, B_x, B_y .

Для последующей обработки полученных данных создан комплекс графоаналитических программ, выполняющий следующие зада-

чи:

- ввод данных о параметрах источника и расчет составляющих нормального магнитного поля питающей установки по координатам точек наблюдений;
- программа корректировки знаков составляющих поля при полете по встречным курсам;
- программа корректировки координат точек измерений за счет курсового смещения при конечной скорости регистрации поля;
- программа корректировки коэффициентов чувствительности измерительных каналов;
- программа вычислений фазовых углов;
- программа корректировки фазовых углов в точках измерений поля;
- программа вычислений составляющих аномального поля и фазовых углов.

При интерпретации результатов измерений переменного аномального магнитного поля, создаваемого источником индукционного типа, следует учитывать, что измеряемое поле является совокупностью аномальных полей двух типов. Первый тип обусловлен перераспределением в массивных проводниках индукционного электрического поля источника и появлением связанного с ним магнитного поля. Этот тип аномального магнитного поля называют аномалиями электрического (или гальванического) типа. Второй тип обусловлен появлением вихревого электрического поля, возбуждаемого в массивных проводниках переменным магнитным полем. Это вихревое электрическое поле так же создает аномальное магнитное поле. Второй тип аномального магнитного поля называют аномалиями магнитного типа. Выделяемое из результатов измерений аномальное поле есть совокупность аномалий обоих типов. Соотношение между интенсивностями аномалий зависит от расстояния между источником поля и про-

водящего объекта, от величин электропроводностей вмещающих пород и рудных тел, а так же частоты тока источника.

Основой для интерпретации результатов измерений являются экспериментальное и теоретическое изучение распределения магнитного поля стороннего тока источника в неоднородных средах: многослойные среды с различной мощностью и электропроводностью, а так же локальные проводящие объекты в однородной среде (Гуревич Ю.М. 1980, Кормильцев В.В. 1987, 2000, Медведев А.Н. 1990).

Полуколичественная интерпретация в МЗМП-А состоит в выделении аномальных токовых осей на планах ReB_z , аномальных зон и оценке глубины до оси концентрации токов в проводнике. Необходимо различать случаи заряженного и незаряженного проводников. В случае заряженного проводника или при расположении точки заряда вблизи выклинка проводника, аномальная ось проходит через проекцию точки заряда на дневную поверхность либо вблизи от нее. Если приповерхностный проводник заряжен верхним, приближенным к дневной поверхности заземлением, то аномальная ось, как правило, проходит через точку заряда. Если глубинный проводник заряжен нижним электродом, то аномальная ось направлена от устья зарядной скважины. Для заряженных проводников характерно наличие линии минимумов вертикальной составляющей B_z , проходящей через осевую часть его проекции, с которой практически совпадает линия смены знака B_z . Для проводника, заряженного нижним электродом, линии минимумов B_z и смены знака B_z совпадают лишь на некотором отрезке. При выклинивании поверхностного проводника эти линии также могут расходиться. Выделение аномальной оси от заряженного проводника следует проводить по планам изолиний $Re B_z$, что обеспечивает обнаружение аномальных осей, направленных как по простиранию пород (для проводников, заряженных вблизи боковой кромки), так и аномальных осей, направленных вкрест простирания (для про-

водников, заряженных вблизи середины нижней или верхней кромок). В случае незаряженных проводников минимумов B_z может не наблюдаться, они, как правило, не сопровождаются сменой знака B_z . Выделение аномальных осей проводится на графиках B_z по зонам максимальных градиентов между соседними относительными экстремумами. Длина аномальной оси соотносится с положением экстремумов B_z по обе стороны от оси и ограничивается областью, в которой линии экстремумов B_z параллельны линиям минимума или зонам максимального градиента B_z . Если такой области нет, то проводник считается диполем, расположенным на оси минимума между экстремумами. Следует заметить, что фактическое положение проводника определяется с некоторой вероятностью. Перспективной на обнаружение проводника является вся область между экстремумами B_z или прямолинейными отрезками линий экстремумов в виде круга или эллипса, причем на отрезке аномальной оси тока внутри указанной области наиболее вероятно встретить осевую часть проводника.

Выделенным осям присваивается направление токов, концентрирующихся в проводнике, по правилу буравчика, исходя из знаков экстремумов B_z . С глубинным проводником обычно связаны оси, имеющие направление токов концентрации от зарядной скважины, т.е. токов, стекающих с глубинного заземления A . Глубина до оси концентрации в проводнике определяется по расстоянию между экстремумами B_z . Для приповерхностных проводников, аномалия от которых может быть уподоблена горизонтальному линейному току. Для глубокозалегающих проводников определение глубины производят, исходя из предположения, что их аномальное магнитное поле подобно полю погруженного горизонтального электрического диполя.

Полуколичественная интерпретация в НП-А состоит в выделении аномальных участков на графиках и планах $Im B_z$, определении аномальных зон и оценке глубины до оси концентрации токов в провод-

36

нике. При этом аномалии магнитного поля имеют более сложный вид, чем в методе МЗМП-А, поскольку вторичное (аномальное) поле является совокупностью электрического и магнитного типа возбуждения проводника гальваническими и индукционными токами. Преобладающим является электрический тип возбуждения проводников и аномалии на графиках $Jm B_z$ имеют знакопеременный вид. Магнитный тип возбуждения проводника, создает однополярную аномалию на графиках JmB_z . Совместное возбуждение проводника приводит к тому, что аномалии JmB_z на графиках имеют асимметричный вид.

Более четкое выделение аномальных проводящих объектов наблюдается на планах фазового угла B_z составляющей, поскольку вблизи источника и на периферии планшета измерений угол равен нулю. Вид изолиний фазового угла B_z составляющей для однородного проводящего полупространства близок к окружностям, зависит от частоты и удельного сопротивления вмещающих пород.

Для расчета аномалий магнитного поля от трехмерных проводящих объектов в поле гармонического тока незаземленной петли (метод НП-А) создано специализированное программное обеспечение – пакет D6-AERO, которое позволяет выполнять математическое моделирование на ЭВМ. В пакете реализовано численное решение уравнения рассеяния (22) и выполняется расчет магнитного поля в воздухе с учетом электрического и магнитного возбуждения локального проводника (Ратушняк А.Н. 2006).

ГЛАВА 3

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

Аэроэлектроразведочные работы с наземным источником электромагнитного поля методами заряда (МЗМП-А) и незаземленной петли (НП-А) с применением аэрокомплекса АММЗ-2 проводились на рудных медно-колчеданных месторождениях Урала с 1985 года.

3.1 Аэровариант метода заряда с измерением магнитного поля Месторождение «Юбилейное» (Башкирия).

Юбилейное медно-колчеданное месторождение приурочено к Петропавловскому рудному полю, которое представляет собой центральную часть и северо-восточное крыло пологого антиклинального поднятия, называемого Петропавловской антиклиналью. Рудное поле находится в пределах Акъяр-Бурибаевской структурно-формационной подзоны западного крыла Магнитогорского мегасинклинория, сложенной вулканогенными толщами контрастnodифференцированной базальтовой формации и частично Ирендыкской структурно-формационной зоны, которая в северо-восточной части рудного поля представлена образованиями слабодифференцированной андезито-базальтовой формации.

В пределах рудного поля развиты также интрузивные и субвулканические комплексы:

- габбро-диабазы, диабазы, андезито-дацитовые, дацитовые и липарито-дацитовые порфириты $\mu S_2 - D_1$ в западной части рудного поля;
- дацитовые порфириты и диорито-порфиры $pS_2 - D_1$ – в восточной части.

Общее пологое залегание вулканогенных пород (падение преимущественно на северо-восток под углами $10 - 15^\circ$) осложнено вул-

каническими постройками и разрывными нарушениями северо-западного, северо-восточного и субмеридиального простирания, разбившими Петропавловское рудное поле на блоки.

Структурный блок, в котором расположены рудные тела Юбилейного месторождения, характеризуется наличием мощных накопленных спилитов и вариолитов, образующих локальную вулканическую постройку. Региональный Макан-Петропавловский разлом в пределах этой постройки фиксируется зоной раздробленных и гидротермально измененных пород, обогащенных сульфидной минерализацией. К зоне метасоматитов мощностью до 350 м приурочены рудные тела, которые залегают на различных уровнях третьей толщи баймакбурибаевской свиты, а также на ее контакте со спилитовой толщей.

Всего на месторождении выявлено шесть рудных залежей, сложенных массивными и вкрапленными медно-колчеданными рудами. Форма залежей линзообразная, сложной конфигурации, глубина залегания колеблется от 60 до 600 м и более, длина по простиранию 250 – 650 м, ширина до 400 м, мощность от 0.3 – до 140 м. Падение залежей северо-восточное под углом от 20 до 60°.

Основные комплексы пород, слагающие рудное поле месторождения, характеризуются следующими электрическими сопротивлениями:

- мезокайнозойские отложения (наносы) – $5 \div 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$,
- слабоизмененные палеозойские породы – $(2 \div 15) 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$,
- метасоматиты без вкрапленных сульфидов – $500 \div 700 \text{ Ом}\cdot\text{м}$,
- метасоматиты с вкрапленностью сульфидов – $200 \div 300 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Удельное электрическое сопротивление массивных колчеданных руд $0.1 \div 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, вкрапленных руд – $10 \div 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Зоны метасоматитов, вмещающие рудные залежи и рудные тела, будут отмечены как зоны низкого сопротивления.

Таким образом, геоэлектрическая модель месторождения в общем виде может быть представлена разрезом, включающим в себя (сверху – вниз): рыхлые покровные отложения пониженного сопротивления, неизменные палеозойские породы высокого сопротивления, метасоматиты пониженного сопротивления, медно-колчеданные рудные тела низкого сопротивления.

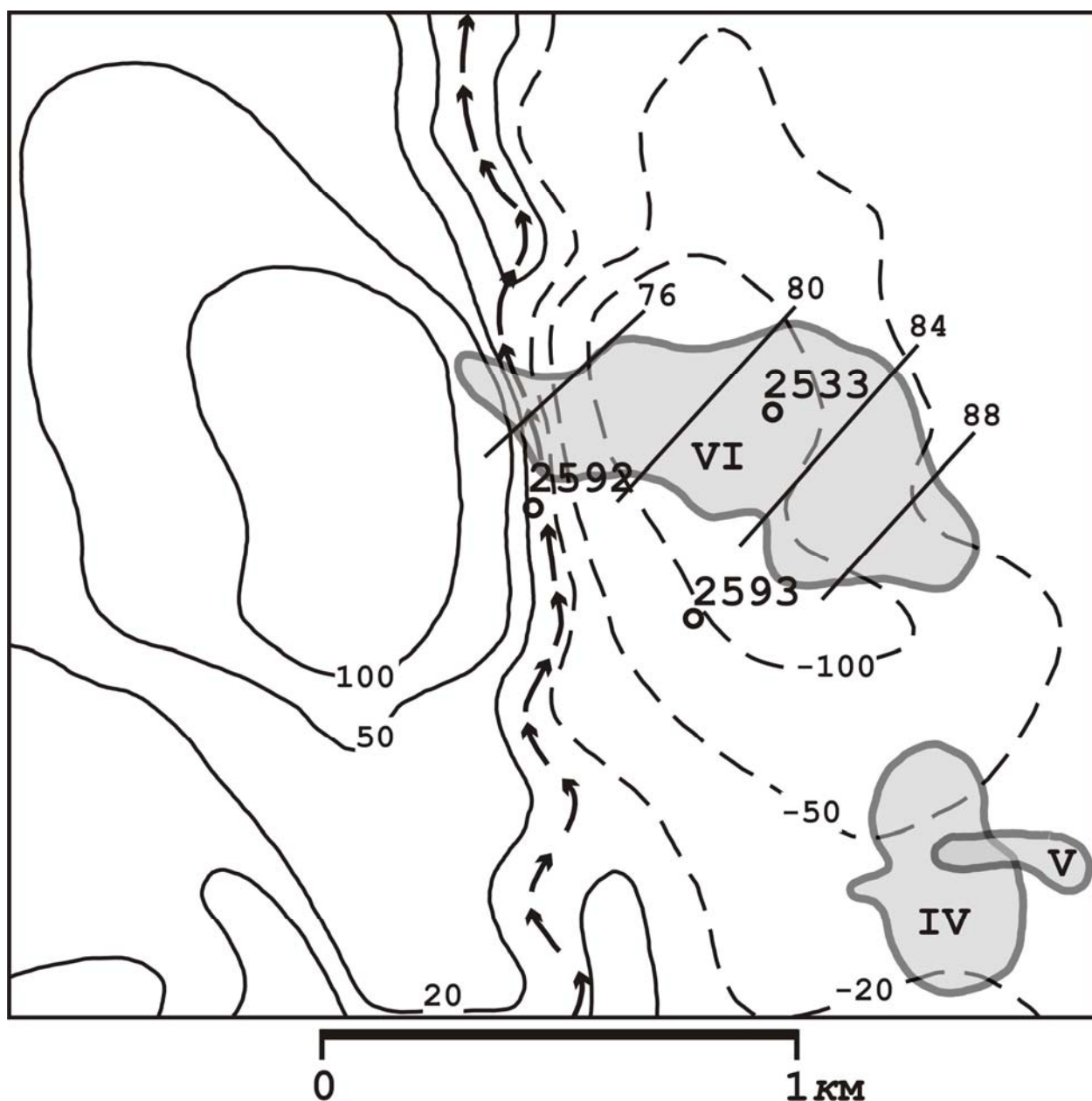


Рис. 3.1. План изолиний и нулевой линии ReB_z по результатам работ аэровариантом МЗМП-А при заряде в скважине № 2592, $h_A=741$ м, $h_B=0$ м, $J=8$ А, частота $f=78$ гц, высота плоскости измерений 100 м., полученных по результатам работ на Юбилейном месторождении (Башкирия)

На рис. 3.1 приведен фрагмент планшета измерений вертикальной составляющей магнитного поля аэровариантом метода заряда по результатам работ на VI залежи Юбилейного месторождения (Кормильцев В.В., 1985, 2). Для создания электромагнитного поля применялась двухэлектродная установка при заряде в вертикальной скважине №2592 $h_A=741$ м, $h_B=0$ м, сила тока $J=8$ А, частота $f=78$ гц.

Опытно-методические работы аэровариантом метода заряда, проведенные на Юбилейном месторождении, имели целью испытания аэроэлектроразведочной аппаратуры и отработку методики воздушных измерений. Для изучения влияния переноса плоскости измерений с дневной поверхности на высоту, была выполнена наземная съемка магнитного поля с той же питающей установкой заряда на всем изучаемом участке.

Результаты работ показали, что с удалением от дневной поверхности на высоту 100 м существенно убывают аномалии-помехи, вызванные проводящими неоднородностями в верхней части разреза, а также исчезают интенсивные наводки от многочисленных силовых линий, соединяющих буровые агрегаты. При этом аномалия магнитного поля, вызванная глубинным проводящим рудным телом, убывает с высотой гораздо в меньшей степени.

Важнейшим выводом проведенных наземных и воздушных полевых исследований является то обстоятельство, что перенос плоскости наблюдений в воздух помимо выигрыша в производительности измерений позволяет уменьшить влияние приповерхностных проводников нерудной природы.

На рис.3.2 вверху показана трехмерная модель проводящего объекта, соответствующая строению VI залежи месторождения по геологическим разрезам рудного тела, составленным на основе бурения, а также вертикальные сечения модели по разведочным линиям 72 - 88.

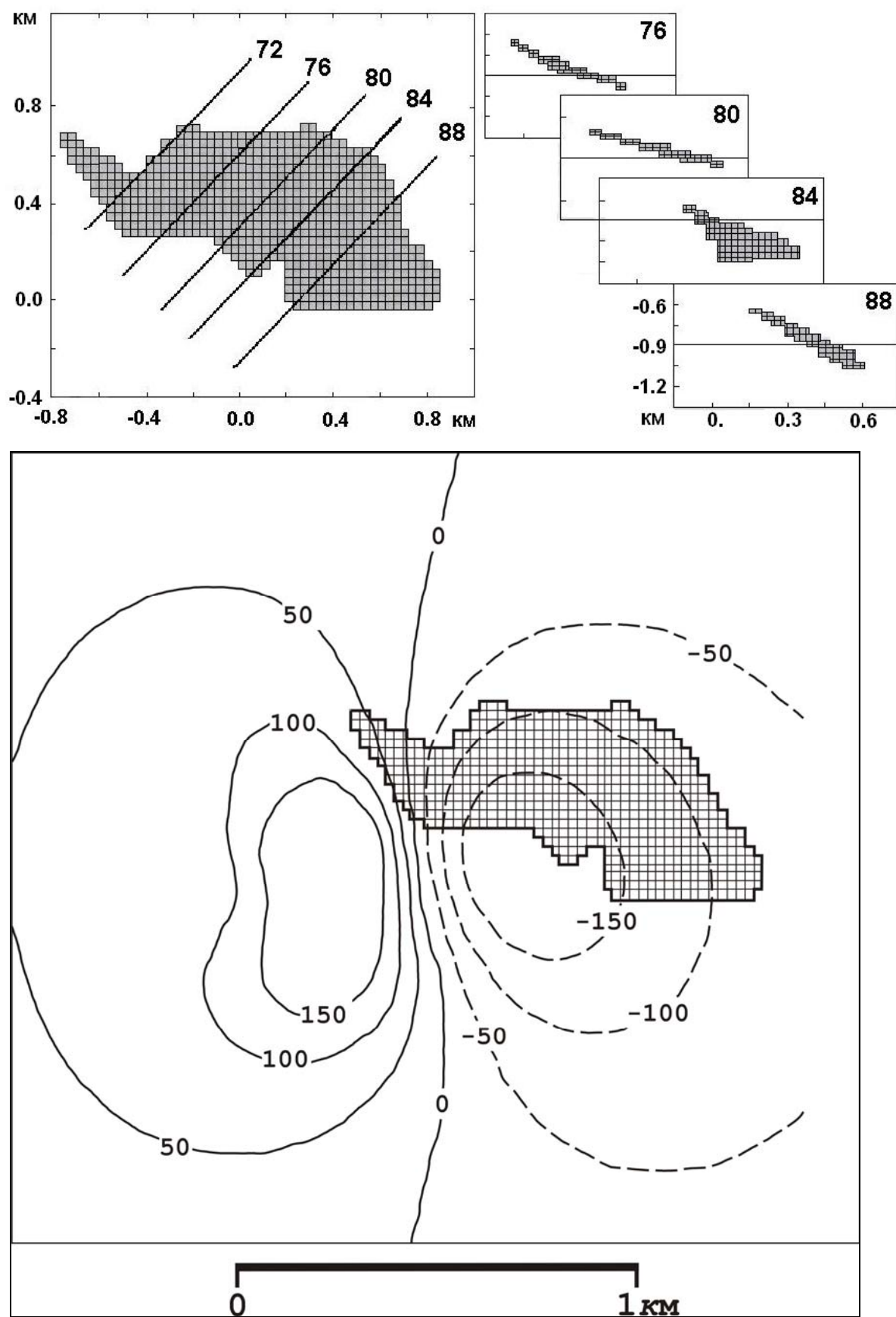


Рис. 3.2. 3D модель проводящего тела в плане и по разведочным линиям (вверху) и план изолиний ReB_z (нТл) по расчетам с помощью пакета D3_ELECTRO (внизу)

На рис.3.2 внизу представлен план изолиний $Re B_z$ составляющей магнитной индукции (pTl) на высоте 100 м., соответствующей высоте съемки магнитного поля, полученный по результатам расчетов с помощью пакета программ D3_ELECTRO, а также проекция проводящего тела на дневную поверхность с его разбиением на дискретные элементы.

Морфология изолиний рассчитанного поля, положение экстремумов вертикальной составляющей магнитной индукции $Re B_z$ и расстояние между ними в целом соответствует аномалии от рудного тела, полученной по результатам измерений.

Общие выводы по результатам работ на месторождении «Юбилейное»:

- сопоставление данных аэросъемки с наземными результатами, полученными с аналогичной питающей установкой, указывает на их различия за счет уменьшения влияния приповерхностных неоднородностей при увеличении плоскости наблюдений с дневной поверхности на высоту;
- увеличение высоты наблюдений приводит к уменьшению до уровня фоновой помехи интенсивные локальные аномалии от многочисленных силовых линий, соединяющих буровые агрегаты;
- сопоставление изменения аномалий магнитного поля по интенсивности и по ширине между экстремумами по наземной и воздушной съемке позволяет более достоверно классифицировать их происхождение и уточнить глубину проводящего объекта.

Участок Межозерный (Челябинская область).

Участок работ площадью 16 км² расположен в северной части Верхнеуральского района Челябинской области западнее поселка Межозерный. Более одной трети площади участка занято промышленными отвалами, карьером и озером Гнилое и недоступно для на-

земных наблюдений.

В геолого-структурном отношении участок приурочен к восточному крылу северной части Магнитогорского мегасинклинория и расположен в пределах Учалинской рудоносной зоны, включающей в себя ряд известных медноколчеданных месторождений (Астафьев П.Ф., 1992, Кормильцев В.В., 1985, 2). Геологический разрез участка состоят следующие породы (сверху-вниз): а) основные эффузивы базальтового состава, б) кислая рудовмещающая толща, состоящая из пород субвулканической серии, в) карбонатная толща – рифогенные известняки, г) туфогенные (терригенно – кремнистые) отложения, д) вулканогенная толща андезитовых порфиритов, е) покровные отложения (кора выветривания и глины). Подрудная толща основных эффузивов изучена слабо, поскольку бурением вскрыта только ее кровля. В пределах участка толща залегает на глубинах от 150 до 750 м, минимальная глубина ее кровли отмечается на западе (200 м) и востоке (100 м) участка. В меридиональном направлении в районе Узельгинского месторождения эффузивы базальтового состава образуют вал, воздымающийся к северу. Мощность толщи около 1300 м.

В юго-западной части участка расположен Александровский вулканокупол липаритового состава, выходящий на поверхность. Купол распространяется к западу и северу на 1,5 км и к востоку – на 1 км и имеет форму воронки. На периферии структуры подошва купола залегает на глубинах от 200 до 700 м, погружаясь в центральной части в районе проводящего канала на глубину более 1000 м. Северовосточнее Александровского купола расположена Узельгинская субвулканическая постройка андезито-дацитового состава, перекрытая мощным слоем брекчий и рифогенных известняков. В контактовой зоне Александровского и Узельгинского куполов кислых пород располагается ряд рудных тел Узельгинского месторождения. С востока Узельгинский купол граничит с Талганским куполом. В северной час-

ти участка также формируется небольшая купольная структура мелкокварцевых дацитов. Купол залегает в верхней части разреза на глубинах 80 – 370 м. Субвулканические породы кислой толщи (кластолавы) имеют большое значение, поскольку все проявления рудной минерализации и рудные тела тяготеют к ним.

Выше рудовмещающей толщи залегает карбонатная толща рифогенных известняков, приуроченных к крыльям вулкано – купольных структур, облекая их. Мощность известняков достигает 300 м на юге участка, постепенно уменьшаясь к северу до полной выклинки. Выше отложений карбонатной толщи на западе и севере участка залегают отдельные прослои терригенно-кремнистых отложений мощностью до 300 м.

Разрез завершается вулканогенной толщей андезито – базальтового состава субгоризонтального залегания, перекрытой покровными отложениями, представленными корой выветривания и глинами мощностью от 5 до 70 м.

В формировании колчеданных руд важнейшее значение имеют внутривулканические разломы, являющиеся рудоподводящими каналами. Все месторождения располагаются или над выводящими каналами, или в непосредственной близости от них. Главные рудоподводящие направления совпадают или близки к осям базальтовых хребтов и унаследуют разломы базальтового вулканизма или магмопроводящие разломы кислого вулканизма. Базальтовые хребты и межгрядовые депрессии имеют северо–северо–западное простирание, что обусловило северо–западное направление рудопроводящих разломов.

Рудные тела известных месторождений образуют в основном пологопадающие пласто– и линзообразные залежи. Контакты рудных тел с вмещающими породами всяческого бока обычно резкие. В лежащем боку наблюдается постепенный переход сплошных руд во вкрапленные. Мощность ореола вкрапленности достигает 70 м. Состав руд

пирит–халькопирит–сфалеритовый.

Сведения об электропроводности горных пород и руд участка получены по результатам электрокаротажа скважин. Условно выделено пять групп пород по величине кажущегося удельного электрического сопротивления ρ_k :

1 – рудные тела и зоны сульфидной минерализации - $1 \div 400$ Ом·м; 2 – зона сильноизмененных пород с вкрапленностью сульфидов – $400 \div 800$ Ом·м; 3 – зона среднеизмененных пород (серицитизация, хлоритизация) - $800 \div 2000$ Ом·м; 4 – зона слабоизмененных пород (окварцевание, гематизация) - $2000 \div 6000$ Ом·м; 5 – неизменные породы - более 6000 Ом·м. Покровные рыхлые отложения имеют сопротивление порядка $50 \div 100$ Ом·м. Таким образом, имеются благоприятные условия для концентрации токов проводимости в рудных телах, областях сульфидной минерализации и зонах сильно измененных пород, а также в «карманах» рыхлых отложений – наносов.

Для проведения измерений в качестве зарядной была использована скв.5725 глубиной 1204 м, пробуренная в 700 м от северной выклинки рудного тела Подотвального месторождения в пределах полосы пород, включающей Узельгинское и Западно–Озерное месторождения. Скважина вскрыла разрез, характеризующийся высокими значениями кажущегося удельного электрического сопротивления $5 \div 10$ тыс. Ом·м. На глубинах от 566 до 571,5 м встречена зона, обогащенная сульфидами, имеющая пониженное сопротивление (менее 100 Ом·м). С глубины порядка 900 м скважина вошла в мощную толщу метасоматически измененных пород – окварцованных и хлоритизированных туфов – с редкой прожилковой сульфидной минерализацией и была остановлена в ней на глубине 1204 м. По каротажу методом КС толща характеризуется чередованием очень низких значений сопротивления с отдельными узкими пропластками высокого сопротивления до $4 \div 8$

тыс. Ом·м.

Высокая производительность аэроэлектроразведочных работ дала возможность в короткий срок провести многовариантные измерения – отработать планшет несколько раз с различными условиями возбуждения поля (Кормильцев В.В., 1985, 2). Использовались две питающие установки: глубинная – питающий электрод B расположен на глубине 570 м в зоне сульфидной минерализации, поверхностная – электрод B заземлен на обсадную трубу. Электрод A в обоих случаях располагается на глубине 1060 м в мощной зоне повышенной проводимости. С глубинной установкой измерения проведены на частотах 39 и 78 Гц, с поверхностной на частоте 78 Гц. Высота плоскости наблюдений 100 м.

Зарядная скважина имеет горизонтальное проложение порядка 100 м и создает на поверхности земли нормальное поле, которое было рассчитано по соответствующей программе (Медведев А.Н., 1990) для значения волнового параметра среды $p = \omega\mu_o\sigma R^2 = 0.6$. Величина параметра оценена по формуле, полученной в (Краев А.П., 1965). Амплитуда нормального поля не превышает 8 – 11 пТл вблизи скважины и быстро убывает с удалением от нее, в то время, как измеренные значения ReB_z равны 100-300 пТл, а ImB_z порядка 50-70 пТл. Учет нормального поля практически не изменяет морфологию изолиний, поэтому для интерпретации использовались измеренные значения.

По результатам измерений были построены планы изолиний ReB_z и ImB_z и на каждом из них выделены аномальные оси, соответствующие линиям концентрации токов проводимости в заряженных и незаряженных объектах. Пример плана изолиний ReB_z и аномальных осей с установкой $h_A = 1060$ м, $h_B = 0$ м на частоте $f = 78$ Гц, приведен на рис.3.3.

Использование различных условий возбуждения приводит к пе-

перасределиению токов и изменению характера затухания аномально-го поля, в результате чего уверенно выделяемые аномальные оси на одних планах проявляются недостаточно четко, либо совсем не про-являются на других.

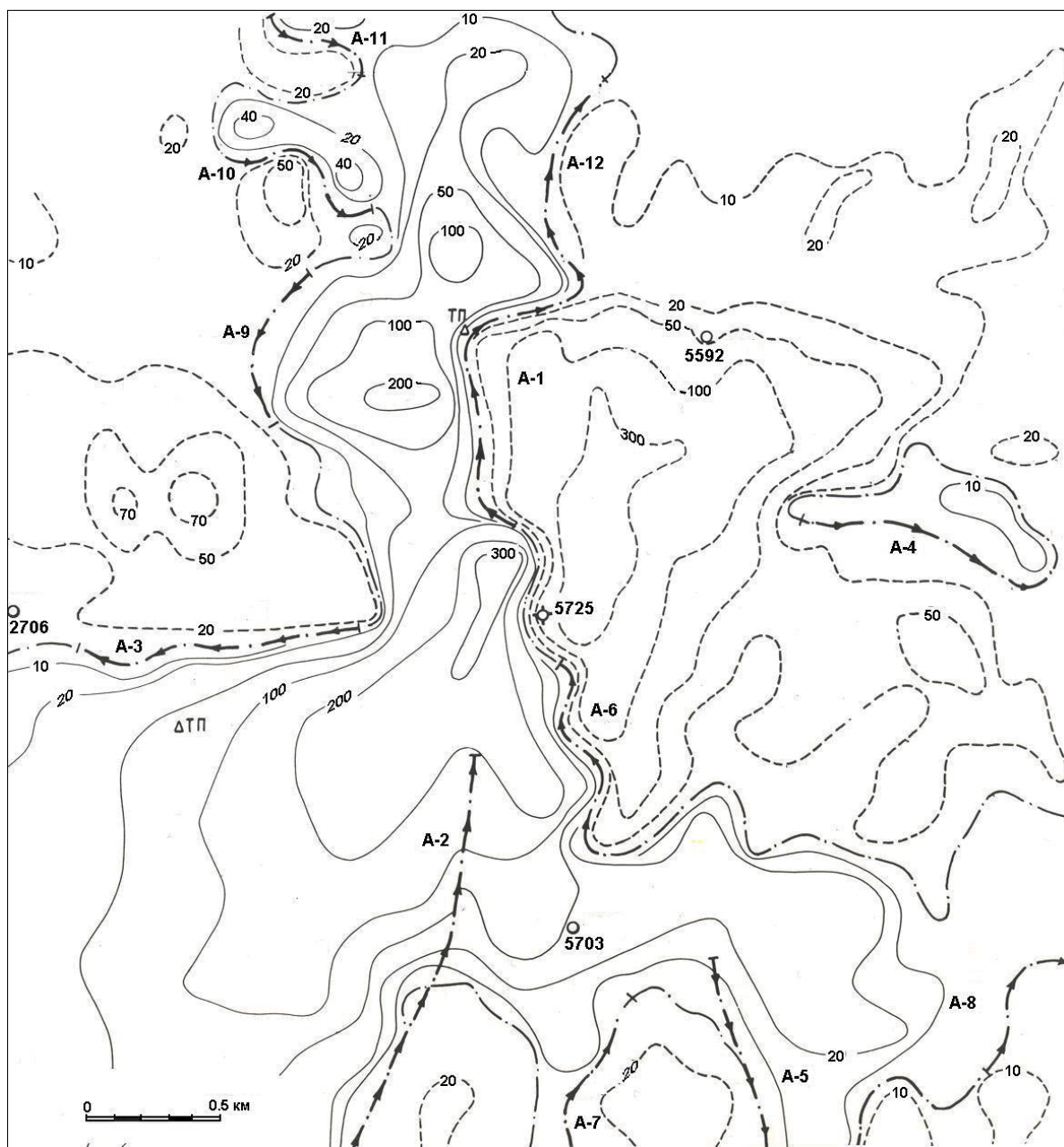


Рис 3.3. План изолиний ReB_z [нТл] и аномальных осей по результатам работ на участке Межозерный (Челябинская обл.) аэровариантом МЗМП-А. Сква-жина № 5725, $h_A = 1060$ м, $h_B = 0$ м, частота $f = 78$ Гц, высота плоскости измере-ний 100 м.

Аномальные оси, полученные по каждому из планов, сведены на общий план (рис. 3.4), который показал, что оси группируются поблизости друг от друга со смещением в пределах 150 – 200 м.

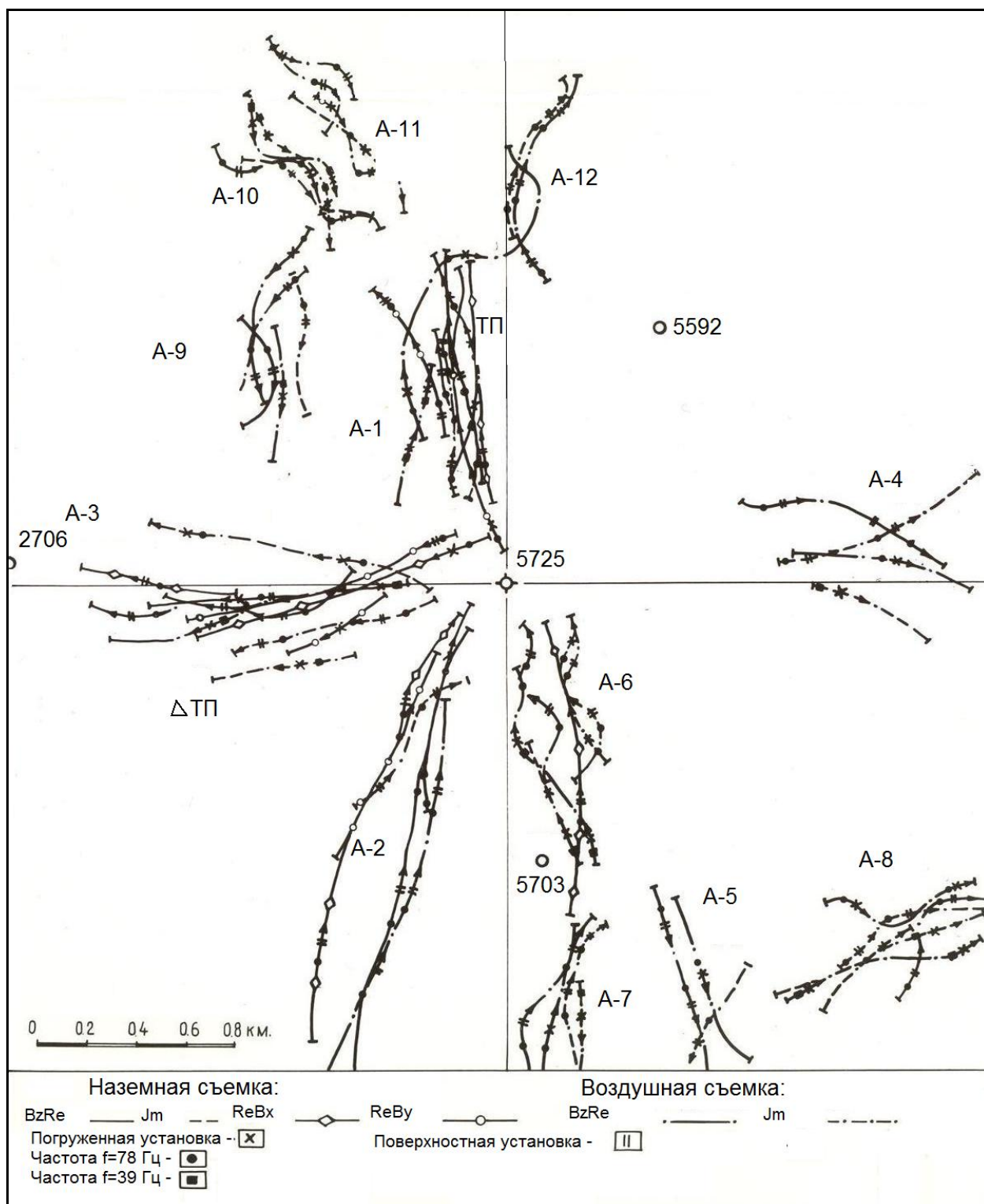


Рис 3.4. Сводный план аномальных осей по результатам наземных и аэро-работ на участке Межозерный (Челябинская обл.) методом МЗМП при зареде в скважине №5725, $h_A = 1060$ м, частоты $f=39$ и 78 Гц.

По группам осей выделены аномальные зоны (рис.3.5), в пределах которых наиболее вероятно обнаружение проводников.

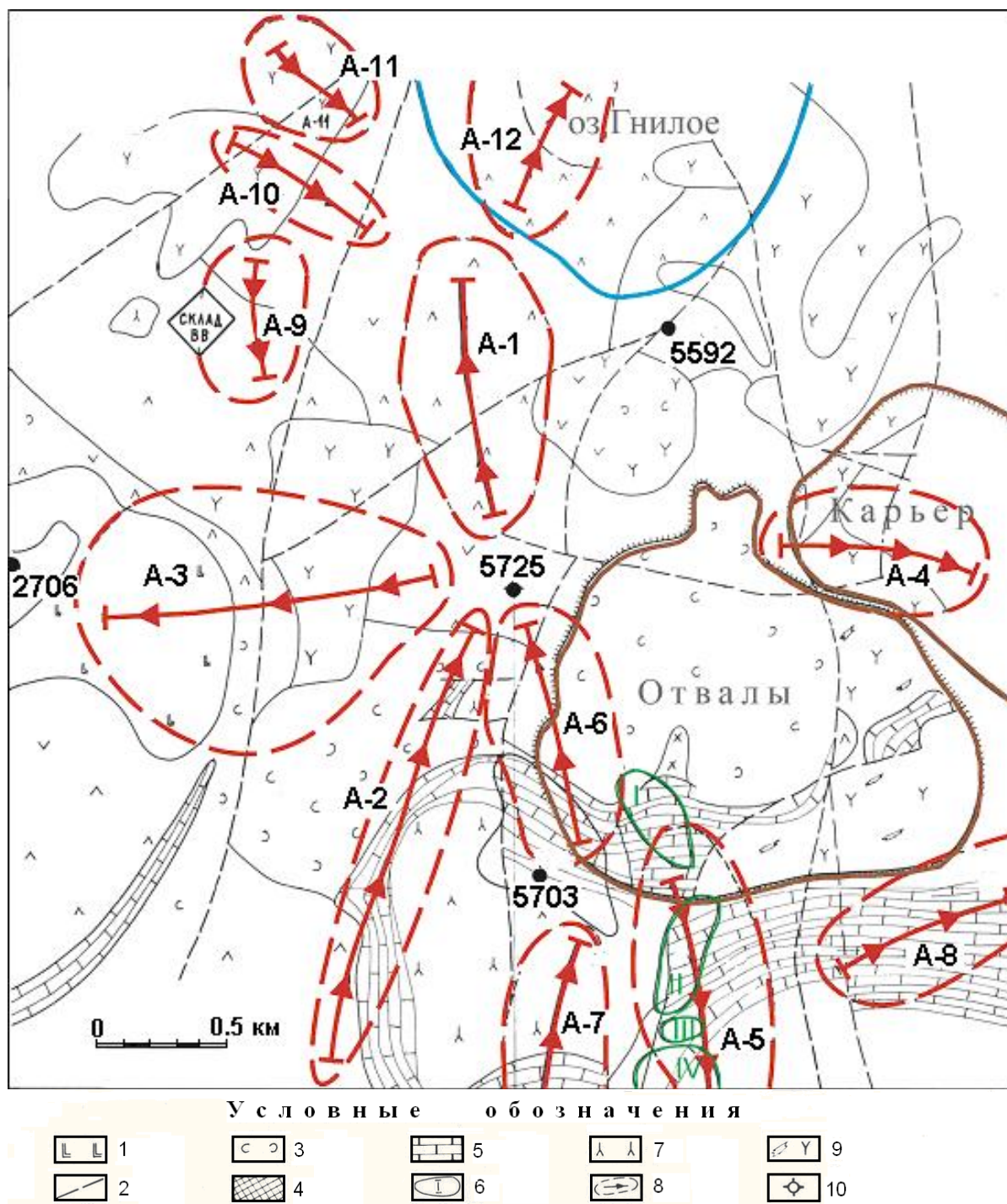


Рис 3.5. Сводный план аномальных осей и зон (выделены красным цветом) на участке Межозерный (Челябинская обл.).

Условные обозначения: 1 – андезитовые порфириты; 2 – тектонические нарушения; 3 - туфогенные отложения; 4 – рудные тела; 5 - рифогенные известняки; 6 - аномальные зоны; 7 - эффузивы базальтового состава; 8 – аномальные оси; 9 – кислая рудовмещающая толща; 10 – скважины

Сопоставление отдельных планов показало, что характер изменения реальной и мнимой части B_Z при изменении условий возбуждения поля аналогичен имеющему место при наземной съемке МЗМП. Так, изменение частоты питающего тока от 39 до 78 Гц, приводит к уменьшению примерно на 25% реальной части поля и соответствующему увеличению мнимой части. Основные элементы поля уверенно выделяются на обеих частотах, но наблюдаются некоторые отличия в положении и форме осей, особенно в краевых частях планшета.

Перемещение питающего электрода B с обсадной трубы в проводящее подсечение на глубине приводит к существенному ослаблению аномальных эффектов от приповерхностных проводников и упрощению морфологии поля как реальной, так и мнимой части B_Z . Однако, уменьшение длины питающего кабеля почти наполовину приводит к общему снижению уровня поля и на краях планшета наблюдаются малые значения, соизмеримые с погрешностью измерений, что затрудняет выделение аномальных осей.

Наилучшие результаты с точки зрения выделения аномальных осей получены с приповерхностной установкой на частоте 78 Гц.

Всего в пределах планшета съемки было выделено 12 аномальных зон, (рис.3.5) имеющих различные перспективы на медноколчеданное оруденение. Аномальная ось А-1 субмеридионального простирания вызвана током, стекающим с электрода A и концентрирующимся на глубине порядка 500 м. Она, по-видимому, приурочена к выделяемой здесь по геологическим данным зоне Александровского разлома. Ось находится на площади, достаточно хорошо изученной поверхностными и скважинными геофизическими исследованиями. В пределах аномальной зоны А1 получены локальные аномалии силы тяжести и вызванной поляризации, а по данным электрокаротажа скважин здесь выделен проводящий горизонт на глубинах 300-600 м, перспективный на колчеданное оруденение. На этих же глубинах по

геохимическим данным наблюдаются околорудные ореолы. В целом аномальная ось A_1 является перспективной и требует проверки бурением.

Аномальная зона A_2 отмечает полосу развития незаряженного проводника, залегающего на глубине порядка 250-300 м и концентрирующий ток, натекающий на поверхностный электрод B . По геологическим данным этим проводником может быть зона контакта карбонатной толщи с кислыми породами ядра Александровского купола. На плане JmB_z оси A_2 соответствует нулевая линия, тогда как на ReB_z она частично выделена по градиенту поля. По-видимому, аномалиеобразующий объект не имеет непосредственной электрической связи с проводящими горизонтами, вскрытыми зарядной скважиной и в создании аномалии большую роль играет индуктивное возбуждение. В то же время, аномальные зоны A_3 и A_6 выделяются более мощными аномалиями в реальной части поля, и соответствующие им положительные экстремумы, накладываясь в юго-западном направлении от скв.5725 друг на друга, создают высокий положительный фон и приводят к отсутствию нулевой линии в северной части оси A_2 . Большая протяженность оси A_2 в субмеридиональном направлении и имеющиеся геологические и геофизические данные подтверждают предположение о том, что этим объектом, вероятнее всего, является тектоническая зона, приуроченная к контакту рифогенных известняков с породами Александровского купола. В связи с этим имеются определенные перспективы оси A_2 на обнаружение руды.

Большой интерес представляет аномальная зона A_3 , отмечающаяся четкими нулевыми линиями на планах реальной и мнимой части B_z . Она имеет субширотное простирание, что нетипично для медноколчеданных месторождений Урала, где рудные тела располагаются, обычно, в субмеридиональном направлении. Ось A_3 обусловлена током, стекающим с глубинного электрода A и концентрирующимся в

проводящем объекте на глубине 600-650 м, что подтверждают данные МПП зондирований, проведенных здесь ранее, которые говорят о возможном наличии здесь зоны пониженного сопротивления, не выходящей на дневную поверхность. По геологическим данным зарядная скважина пересекла на глубине 600 м маломощный пропласток кластолав, залегающий среди туффитов базальтового состава и имеющий повышенное относительно фонового содержание вкрапленности пирита (12-15%), который можно рассматривать как восточную выклинку проводящего объекта, отмечающегося осью АЗ. Однако более вероятным представляется предположение о том, что ток, стекающий с глубинного электрода А, концентрируется в толще пород пониженного сопротивления, залегающий на глубинах от 900 м и ниже и полого восстающий на запад от скв.5725. Толща практически не изучена бурением, так как на участке имеются лишь единичные скважины глубиной более 500 м. Правомерность этого предположения подтверждается результатами математического моделирования – расчета аномального магнитного поля пластины пониженного сопротивления, расположенной в однородном полупространстве.

Глубина оси концентрации тока может быть определена также по результатам аэронаблюдений. Расстояние между экстремумами ReB_z на высоте 100 м составляет $R = 1150$ м. Получим $Z_C = -R/1.7 = -675$ м. Таким образом, ось АЗ может быть названа концентрацией тока в толще метасоматитов, восстающей на запад от скв.5725 и залегающей в центральной части оси на глубинах 600- 700 м. Имеющаяся в толще вкрапленность сульфидов говорит о возможности локализации в ней рудных тел и обуславливает перспективы оси АЗ.

Область аномальной зоны АЗ и площадь южнее нее рассматривается как перспективная и отмечается возможность наличия здесь медноколчеданного оруденения на глубинах 400 – 600 м, что не противоречит результатам вертолетной съемки.

На характеристике остальных аномальных осей остановимся менее подробно, так как они отмечают либо уже достаточно хорошо изученные рудные объекты, либо являются малоперспективными вследствие небольшой глубины залегания и известной геологической обстановки.

Аномальная зона А4 пространственно совпадает с отработанным карьером месторождения имени XIX партсъезда и связана с зоной метасоматически измененных вмещающих пород и, возможно, с остатками рудных тел. Глубина оси концентрации тока составляет 250 м, что примерно соответствует дну карьера. Карьер представляет собой непроводящую полость (воздух) среди окружающих пород, поэтому он сам создает слабую аномалию обратного знака по отношению к аномалии от проводника. Это приводит к тому, что ось А4 выделяется на плане ReB_z экстремумами небольшой амплитуды, а на ImB_z нулевая линия вообще отсутствует и объект выделяется как незаряженный проводник.

Аномальная ось А5 пространственно совпадает с полосой пород, вмещающей рудные тела Узельгинского месторождения, которые залегают на глубинах от 130 до 380 м. Глубина оси концентрации тока по аэро съемке составляет 250 – 300 м, что соответствует средней части рудоносного горизонта. Ось А5 отмечается нулевыми линиями на планах и реальной и мнимой части B_z , но по мнимой части она выделяется хуже ввиду малости поля.

Аномальная зона А6 отмечается четкими нулевыми линиями на планах B_z (рис. 3.3). Она расположена на западной границе отвалов карьера месторождения имени XIX партсъезда в пределах Узельгинского грабена. Глубина оси концентрации токов составляет порядка 250 м, что соответствует глубине залегания подошвы известняков. Проводящим объектом является зона развития пород с сульфидной минерализацией, вмещающей Подотвальное рудное тело, которое

встречено скв.5703 на глубине 470 м. К северу от скв.5703 зона минерализованных пород восстает и в средней части оси А6 она залегает на глубинах 250-300 м, что подтверждает данные аэроварианта заряда.

Аномальная ось А7 с глубиной оси концентрации тока порядка 150 м контролирует полосу развития метасоматически измененных пород, вскрытых бурением на глубинах 167-173 м. Сведений о перспективности зоны А7 на медноколчеданное оруденение по результатам работ прошлых лет нет.

По-видимому, малоперспективной является аномальная ось А8. С одной стороны она слабо выделяется из-за низких значений измеренного поля, особенно по реальной составляющей, а с другой – неблагоприятно ее геологическое положение над однородной толщей известняков.

Аномальная ось А9 приурочена к контакту туфопесчаников с дацитовыми порфиритами, кровля которых приближена здесь к дневной поверхности. Глубина оси концентрации тока составляет порядка 200 м. Пространственно аномальная зона А9 расположена в пределах полученных ранее аномалий вызванной поляризации и электрического заряда, что позволяет говорить о возможной ее перспективности. Малые расстояния между экстремумами и значительные градиенты поля свидетельствуют о неглубоком залегании (менее 100 м) проводников, соответствующих осям А10, А11. Вероятно, эти оси отмечают понижения в рельефе коренных пород, заполненные проводящими рыхлыми отложениями.

Аномальная ось А12 является продолжением выделенных ранее наземным методом магнитного заряда осей и, по-видимому, контролирует контакт основных и кислых пород под акваторией озера Гнилого. Ось может иметь определенные перспективы, так как кислые породы являются рудовмещающими в районе работ.

В дальнейшем на исследуемой площади практически не проводи-

лось никаких работ, за исключением того, что была пробурена скважина 5760 глубиной 585 м в пятистах метрах к западу–юго–западу от скв.5725, примерно посередине между осями А3 и А2. По всему стволу скважины сульфидная минерализация практически отсутствует, сопротивление пород по электрокаротажу – высокое (от 18 до 46 тыс. Ом·м). Сква.5760 не объяснила природы аномалий заряда, что, вероятно, обусловлено ее неудачным расположением.

Обобщая сказанное выше, можно отметить, что аэровариантом метода заряда выявлены все крупные аномалии проводимости, полученные ранее на этой площади различными геофизическими методами и подтвержденные данными бурения. Поэтому можно говорить о высокой эффективности метода и возможности использования его на поисковой стадии для оперативного изучения окрестностей глубоких скважин с целью выявления аномалий для дальнейшего изучения наземными детализационными методами и проверки бурением.

Следует также отметить, что вертолетной съемкой выделяются не только отдельные проводящие тела, но и вмещающие их минерализованные зоны, как это видно на примере Узельгинского и Подотвального месторождений, то есть рудные поля в целом. Единое субмеридиональное простирание аномальных осей А5, А6, А1 говорит о том, что они расположены в пределах одной полосы рудовмещающих пород. Но имеющееся смещение осей в плане относительно друг друга (рис. 3.4) и характерные изгибы соответствующих им нулевых линий в концевых частях осей указывают на то, что аномалиеобразующие объекты ограничены по простиранию и, вероятно, электрически не связаны между собой. Поэтому можно предположить, что осями А5, А6 и А1 отмечается так называемое многокорневое рудное поле, включающее в себя рудные тела Узельгинского и Подотвального месторождений и, возможно, неизвестные рудные тела, соответствующие оси А1. Таким образом, можно сделать вывод, что аэровариант

56

метода заряда позволяет обнаружить как локальные проводящие объекты рудной и нерудной природы, так и рудные поля месторождений проводящих руд в целом, и, кроме того, дает некоторые сведения о взаимосвязи их отдельных частей.

Общие выводы по результатам работ на участке Межозерный:

- выявлены все крупные аномалии проводимости, полученные ранее на этой площади различными геофизическими методами и позднее подтвержденные бурением;
- аэросъемкой выделяются не только отдельные проводящие тела, но и вмещающие их минерализованные зоны на примере Узельгинского и Подотвального месторождений, то есть рудные поля в целом;
- высокая эффективность метода дает возможность использовать его на поисковой стадии для оперативного изучения окрестностей глубоких скважин с целью выявления аномалий от проводящих объектов с дальнейшим изучением наземными детализационными методами и проверки бурением.

3.2 Аэровариант метода незаземленной петли

Месторождение «Сафьяновское» (Свердловская область)

Аэровариант метода незаземленной петли НП-А опробован на медно-колчеданном месторождении «Сафьяновское» (Свердловская обл.). Целью опытных работ являлось изучение возможности применения поискового варианта аэроэлектроразведки для обнаружения крупных месторождений электропроводных руд.

Район Сафьяновского месторождения расположен в западной части Восточно-Уральской мегазоны Урала. В металлогеническом плане район приурочен к Каменскому палеовулканическому поясу Урало-Тобольской субпровинции (Шереметьев Ю. С. 2000). Сафьяновское рудное поле находится в южной части Режевской структурно-

фациальной зоны (СФЗ), примыкающей с востока непосредственно к Главному гранитному поясу Урала, представленному на этой широте Мурзинским и Адуйским гранитными массивами. Восточной границей Режевской СФЗ является Февральский надвиг.

В Режевской СФЗ вулканогенно-осадочные породы слагают шесть пространственно разобщенных тектонических пластин. Непосредственно рудное поле приурочено к южной части Бороухинской пластины, находящейся в зоне субширотного Соколовского глубинного разлома.

Сафьяновское рудное поле сложено вулканогенно-осадочными образованиями кремнекислого и среднего состава нижнего-среднего девона (Шереметьев Ю. С., 2000). Границами рудного поля являются: на западе Кондихинский, на юго-востоке - Заболотский надвиги западного падения, на севере - Верхне-Сычевский надвиг северо-западного падения. С Ю-ЮЗ Бороухинская пластина перекрыта Режевским гипербазитовым массивом (рис. 3.6).

Южная часть Бороухинского блока Сафьяновским и Восточно-Сафьяновским надвигами западного падения разбита на три пластины второго порядка: Сафьяновскую, Восточно-Сафьяновскую и Заболотскую. Сафьяновская пластина, слагающая собственно рудное поле, представляет собой фрагмент палеовулканической постройки сложно-го внутреннего строения.

Геолого-структурная модель Сафьяновского рудного поля отнесена к условиям залегания и внутреннему строению рудовмещающего кремнекислого комплекса. Что касается непосредственно медно-цинкового оруденения, то оно является полигенным: массивные колчеданные руды имеют гидротермально-осадочный генезис, а прожилково-вкрапленные – гидротермально-метасоматический.

В составе рудовмещающего кремнекислого комплекса выделены андезиты, дациты, риолиты и их промежуточные разности. Эти вулка-

ниты чередуются и фациально сменяются в разрезе и по латерали. В целом, среди массивных пород кремнекислого комплекса выделяется эффузивная, экструзивная и субвулканическая фации. Эффузивная фация в пределах рудного поля преобладает и представлена разно-масштабными потоками лав андезитодацитов, дацитов и риолитов, чередующихся с прослоями пирокластических, вулканогенно-осадочных и осадочных пород. Мощность отдельных лавовых потоков колеблется до нескольких десятков м. Экструзивная фация представлена куполами, сложенными риолитами массивной текстуры. К субвулканической фации отнесены крупнопорфировые риолиты, образующие силловые залежи протяженностью до 100-150 м.

На рис. 3.6 приведена схема положения питающей незаземленной петли, профилей наблюдений и проекция рудного тела на дневную поверхность. Измерения переменного магнитного поля проведены на высоте 100 м по серии параллельных профилей длиной около 5 км. Сила тока $J = 9\text{ А}$, сторона незаземленной квадратной петли 400 м.

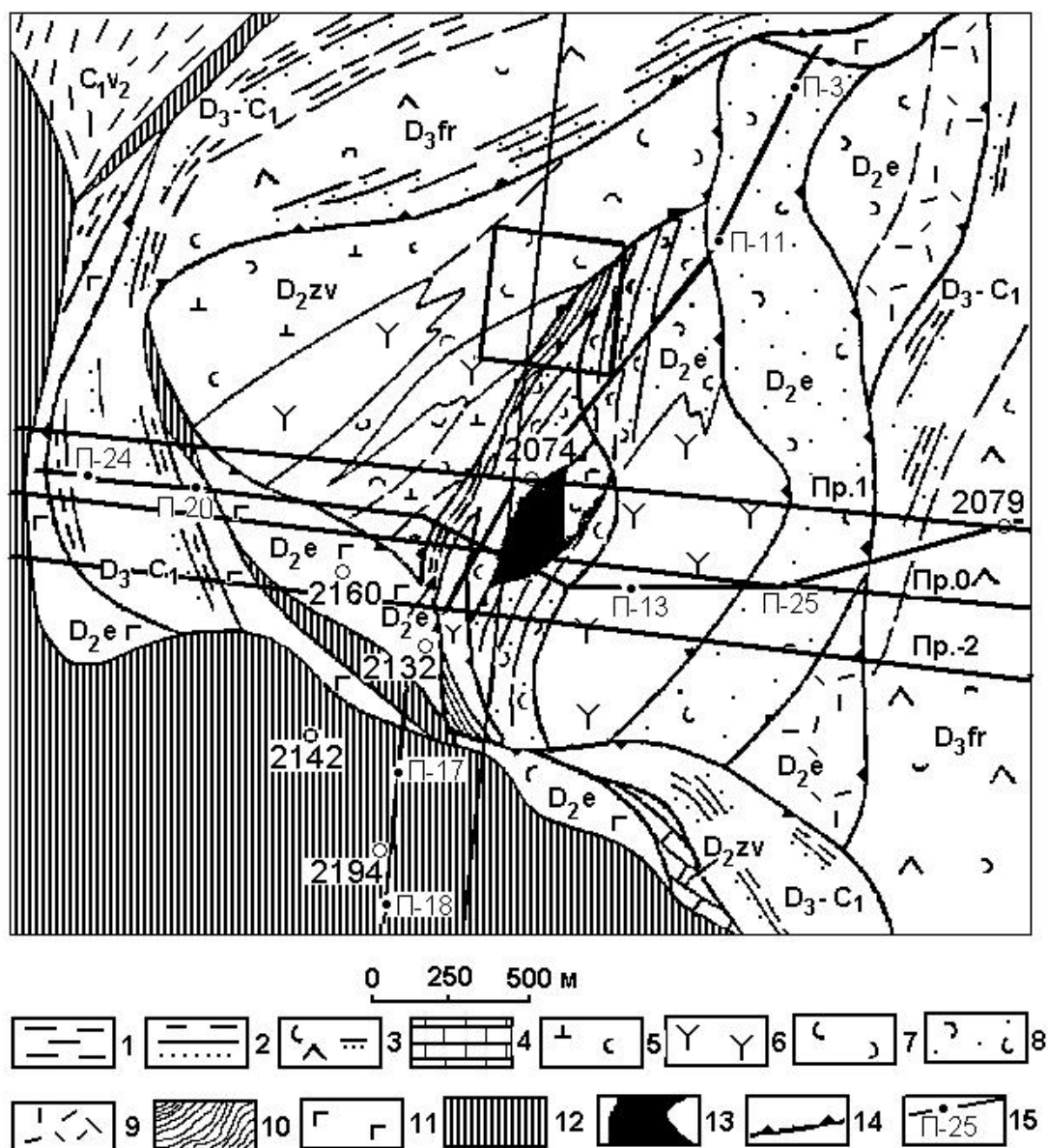


Рис 3.6. Геологическая схема месторождения «Сафьяновское» (Шереметьев Ю. С., 2000), положение незаземленной петли (квадрат) и профилей наблюдений при работах аэровариантом НП-А. Сторона петли 400 м, частота $f = 78$ Гц, высота плоскости измерений 100 м.

1 - кремнистые и углисто-глинистые сланцы ; 2 - грауваккоидные флишоиды, туфы трахибазальтов; 3 - туфы базальтоидов; 4 - известняки; 5. - туфы андезитов; 6 - субвулканические мегафировые риолиты; 7 - туфы, кластолавы мелкопорфировых риолитов, эйфель; 8 - слоистые кремнекислые тефроиды; 9 - кластолавы, туфы дацитов; 10 - кремнистые туффиты, туфопесчаники риолитовые; 11 - спилиты, толеитовые андезиты, магнезиальные базальтоиды; 12 - гипербазиты и габбро режевского массива; 13 - сплошные медно-цинковые руды; 14 - тектонические нарушения; 15 - скважины

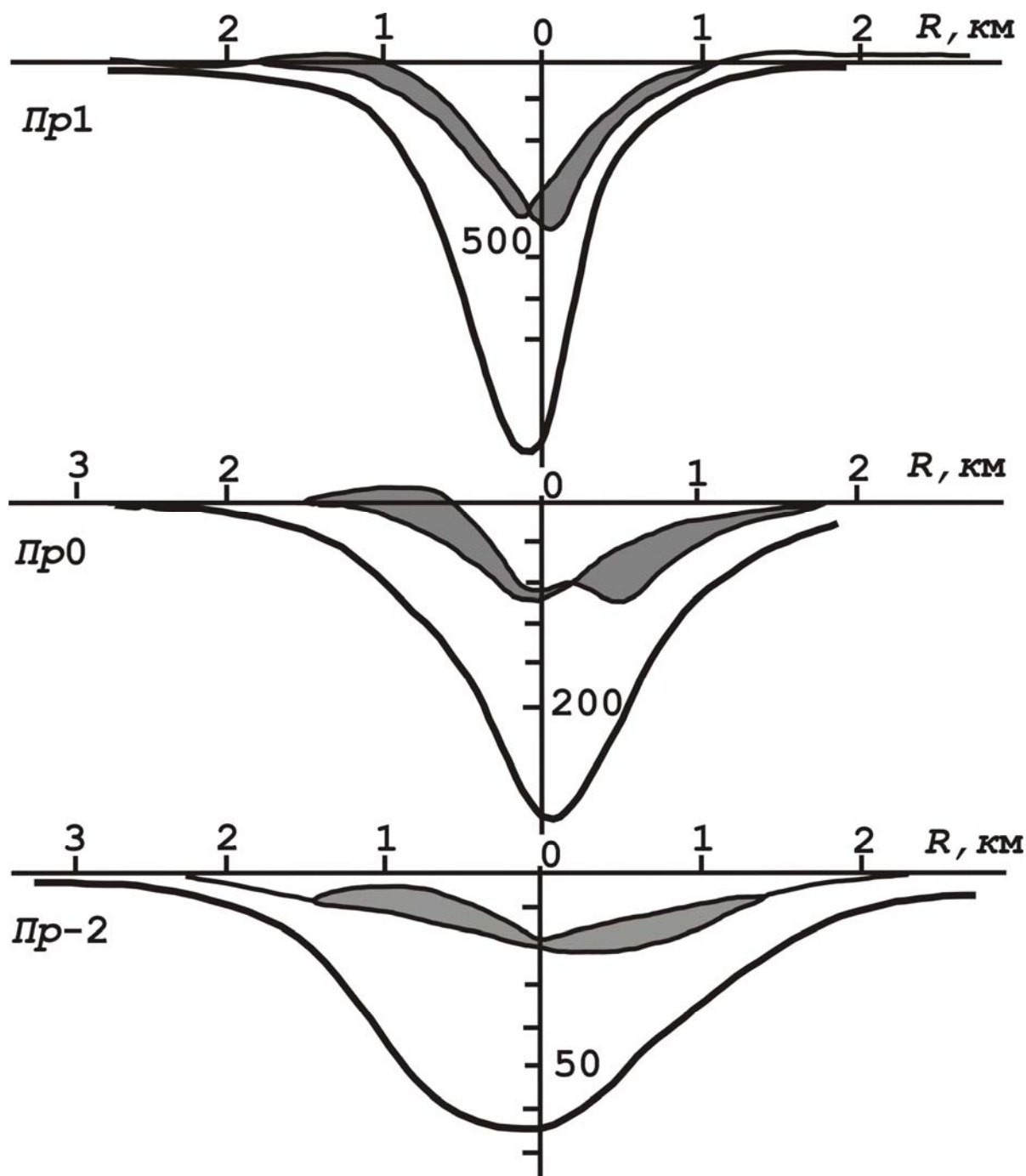


Рис 3.7. Кривые квадратур вертикальной составляющей ReB_z и JmB_z по профилям наблюдений на высоте 100 м над рудным телом по результатам геофизических работ аэровариантом НП-А на месторождении «Сафьяновское». Левая шкала - JmB_z , правая шкала - ReB_z (нТл). Затемнены аномальные участки между кривыми измеренного и нормального поля по составляющей JmB_z .

Непосредственно над рудным телом на профильных кривых

(рис.3.7) JmB_z отмечается очень интенсивная по величине и большая по линейным размерам аномалия, обусловленная крупным проводящим объектом, каким является рудное тело месторождения (запасы 1,4 млн. тонн).

Общие выводы по результатам работ на месторождении «Сафьяновское»:

- использование модификации аэроэлектроразведки, близкой по физической основе к наземному методу радиальных индукционных зондирований РИЗ, позволяет обнаруживать крупные проводящие объекты, расположенные на достаточном удалении от источника поля;
- полученные материалы свидетельствуют о перспективности применения метода НП-А для поисков проводящих руд.

Бобровский участок

В 2000 г. аэровариантом метода незаземленной петли НП-А проведены работы по поискам месторождений медно-колчеданных руд на перспективных участках вблизи месторождения «Сафьяновское» (Свердловская обл.) на площади более 200 км² по хоздоговору между Институтом геофизики УрО РАН с УГМК (Человечков А.И. 2002, 2003).

Бобровский участок расположен в центральной части изучаемой площади в 10 км южнее Сафьяновского месторождения на правом берегу р. Бобровки. Участок имеет структуры, аналогичные Сафьяновскому месторождению и сходное геологическое строение. На рис.3.8 приведены графики измеренной и нормальной вертикальной составляющей магнитного поля JmB_z по одному из профилей длиной около 6 км на участке «Бобровский». На графике выделяется чёткая аномалия (затемненный участок). Подобная аномалия меньшей интенсивности прослеживается на соседних профилях.

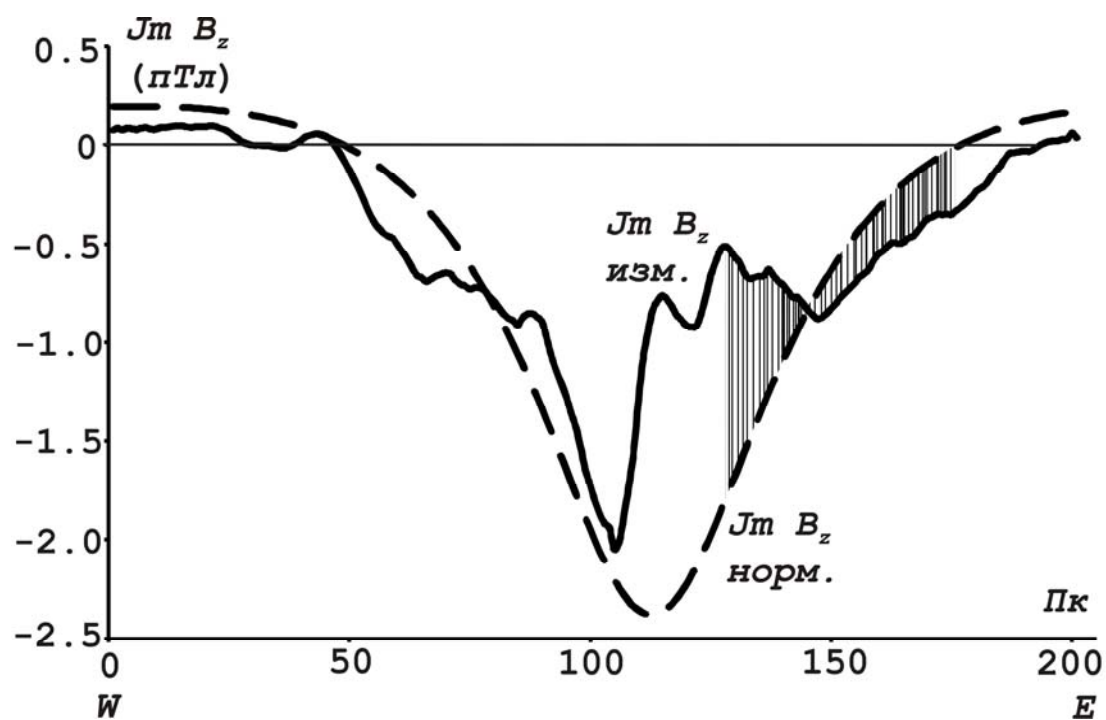


Рис 3.8. Составляющие $Jm B_z$ (нТл) измеренная (сплошная) и нормальная (штриховая) на высоте 100 м по профилю 4 длиной 6 км на участке «Бобровский».

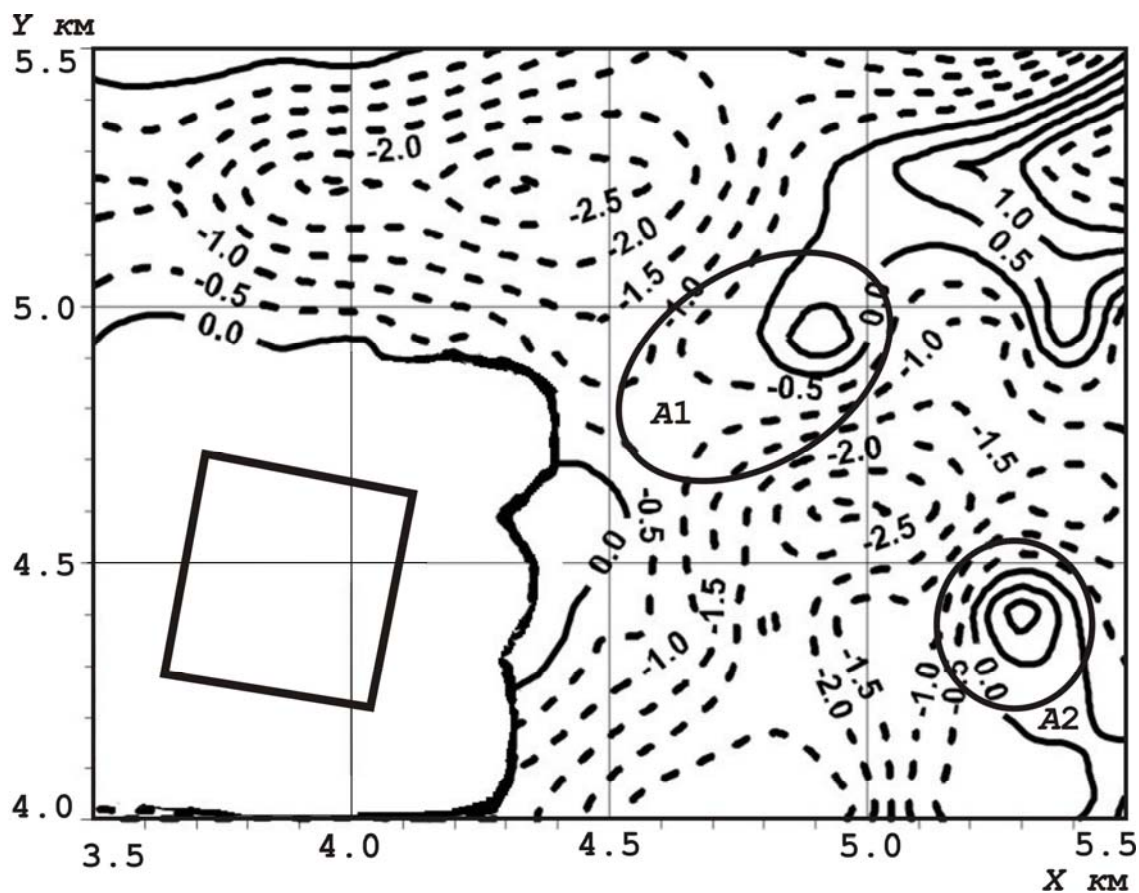


Рис. 3.9. План изолиний фазового угла (град.) составляющей B_z по результатам измерений аэровариантом метода НП-А на участке «Бобровский».

На рис.3.9 показан план изолиний аномального фазового угла вертикальной составляющей B_z . В северо-восточной и восточной части относительно питающего контура отмечается две локальные аномалии электропроводности A1 и A2, обведенные черным контуром. По геофизическим данным прошедших лет на этом участке зафиксированы гравитационная аномалия, а так же аномалии проводимости по данным электроразведки методом МПП и поляризуемости по методу ВП (Шереметьев Ю. С. 2000).

Для проведения математического моделирования и интерпретации результатов индуктивной электроразведки создан пакет программ D6_AERO (Ратушняк А.Н. 2006). Основной частью пакета является программа расчета составляющих магнитного поля, создаваемого стационарным источником гармонического тока, в присутствии проводящих трехмерных тел. Программа расчета поля поддерживается вспомогательными программами для трехмерного ввода геометрии модели и исходных данных, а так же для обработки и визуализации результатов расчетов. Расчет ЭМ поля базируется на численном решении шестикомпонентной системы объемных векторных интегральных соотношений для напряженностей электрического и магнитного поля (10).

Результаты математического моделирования с использованием пакета D6_AERO приведены на рис.3.10 в виде плана изолиний фазового угла φ вертикальной составляющей магнитной индукции B_z и проекции двух проводящих 3D тел V1 и V2, создающих аномалию фазового угла с морфологией, подобной морфологии изолиний фазового угла вертикальной составляющей магнитной индукции рис.3.9. Проводящие объекты в виде прямоугольных параллелепипедов имеют размеры: V1 – 125x225x50 м и V2 – 50x200x100 м, глубина центров тел $h = 100$ м. Удельное сопротивление вмещающей среды принято $\rho_0 = 800$ Ом*м, проводящих объектов $\rho = 1$ Ом*м. Проекция 3D тел на

дневную поверхность изображены черными прямоугольниками и затемнены. Положение незаземленной квадратной петли размером 400 x 400 м изображено квадратом.

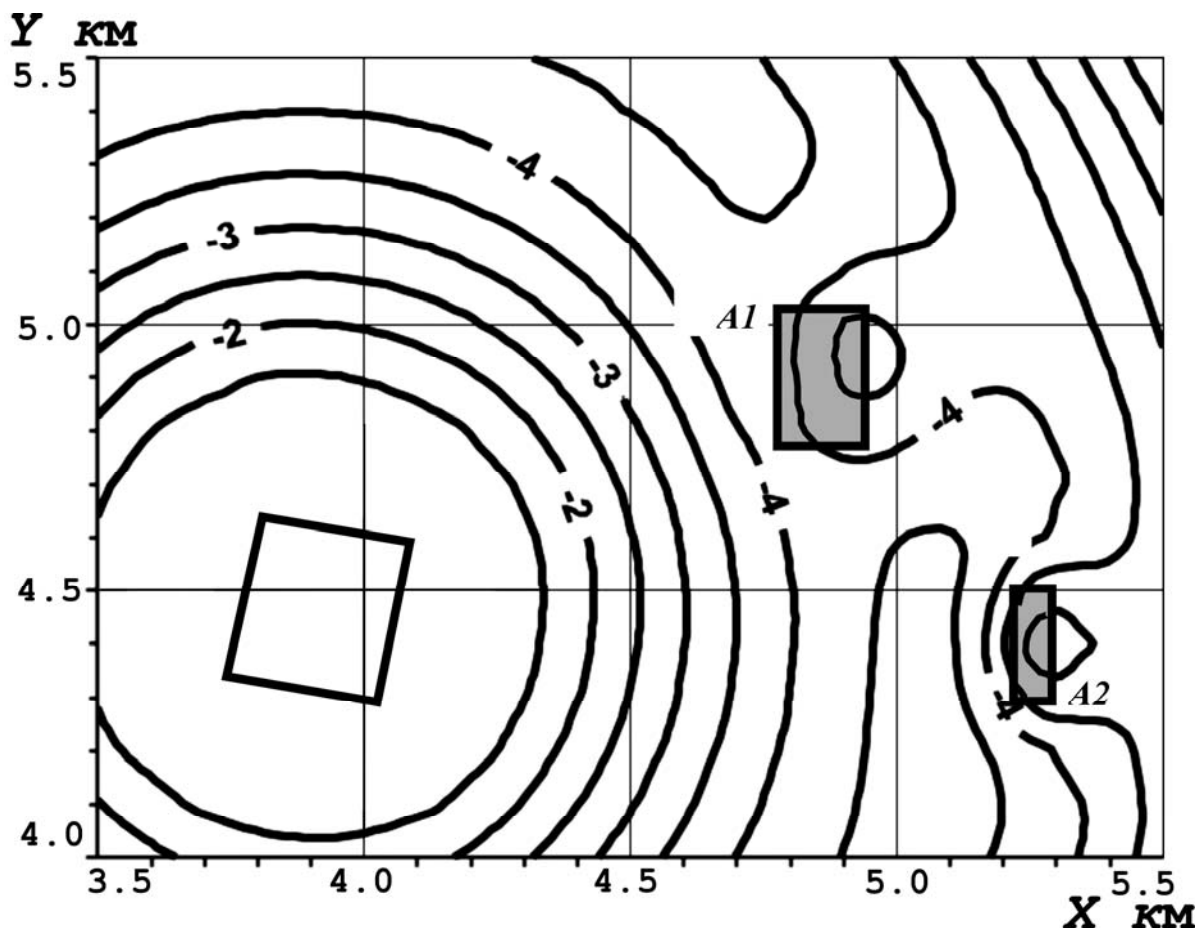


Рис 3.10. План фазового угла B_z математической модели с двумя проводящими 3D объёмами (затемнены проекции тел, положение петли отмечено квадратом).

Для подтверждения аномалии электропроводности A1, полученной по результатам интерпретации материалов аэроэлектроразведочных работ методом НП-А и уточнения ее пространственного положения проведены полевые детализационные работы методами наземной электроразведки.

Электроразведочные работы проводились с помощью аппаратуры МЧЗ-12, разработанной в Институте геофизики УрО РАН. На рис.

3.11 приведены графики кажущегося сопротивления по данным измерений осей эллипса поляризации магнитного поля на 6 частотах методом индуктивного профилирования с незаземлённой петлёй размером 50x50 м с разном R = 75 м. Пространственное положение профиля соответствует участку профиля аэроэлектроразведочных измерений через эпицентр аномалии A1.

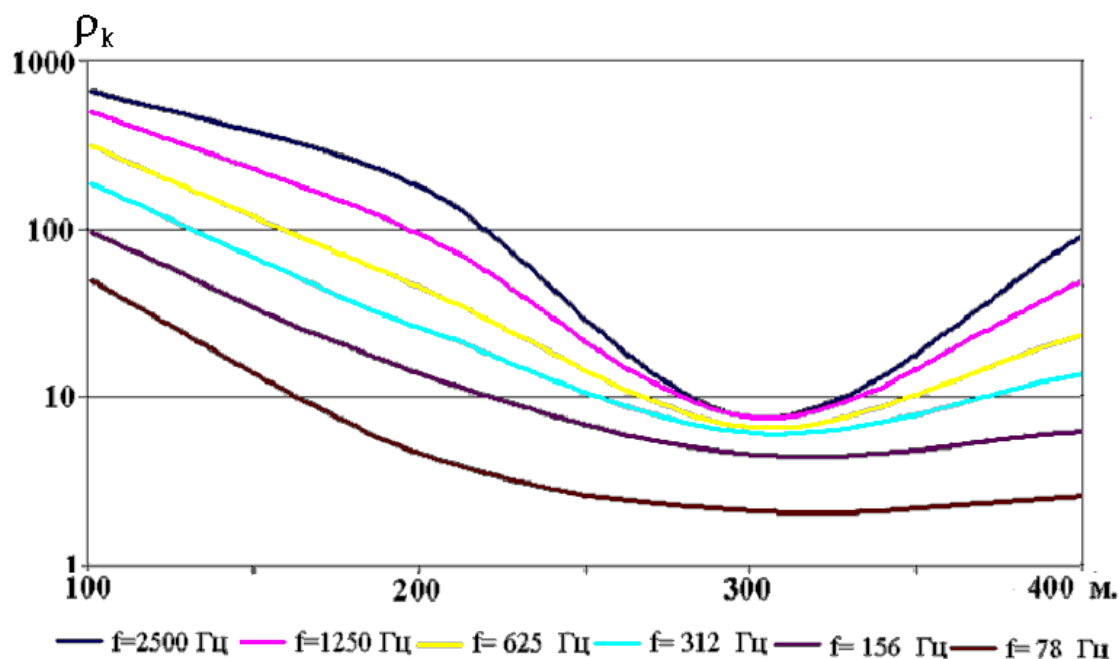


Рис. 3.11. Графики кажущегося сопротивления ρ_k (Ом·м) по результатам измерений методом индуктивного профилирования с петлёй 50x50 м с разном R=75 м. по профилю через эпицентр аномалии A1.

Выполненные измерения подтверждают наличие в разрезе проводящего объекта, пространственно совпадающего с аномалией A1 по материалам интерпретации данных аэросъемки.

Для уточнения размеров аномальной зоны выполнены площадные измерения методом незаземлённой петли на 6 частотах с положением питающей петли размером 200x200 м, приближенной к аномальному участку.

На рис. 3.12 приведён план кажущегося удельного сопротивле-

ния, полученный по результатам интерпретации измерений осей эллипса поляризации магнитного поля методом незаземлённой петли по семи профилям 0 ÷ 600 м на частоте 78 Гц.

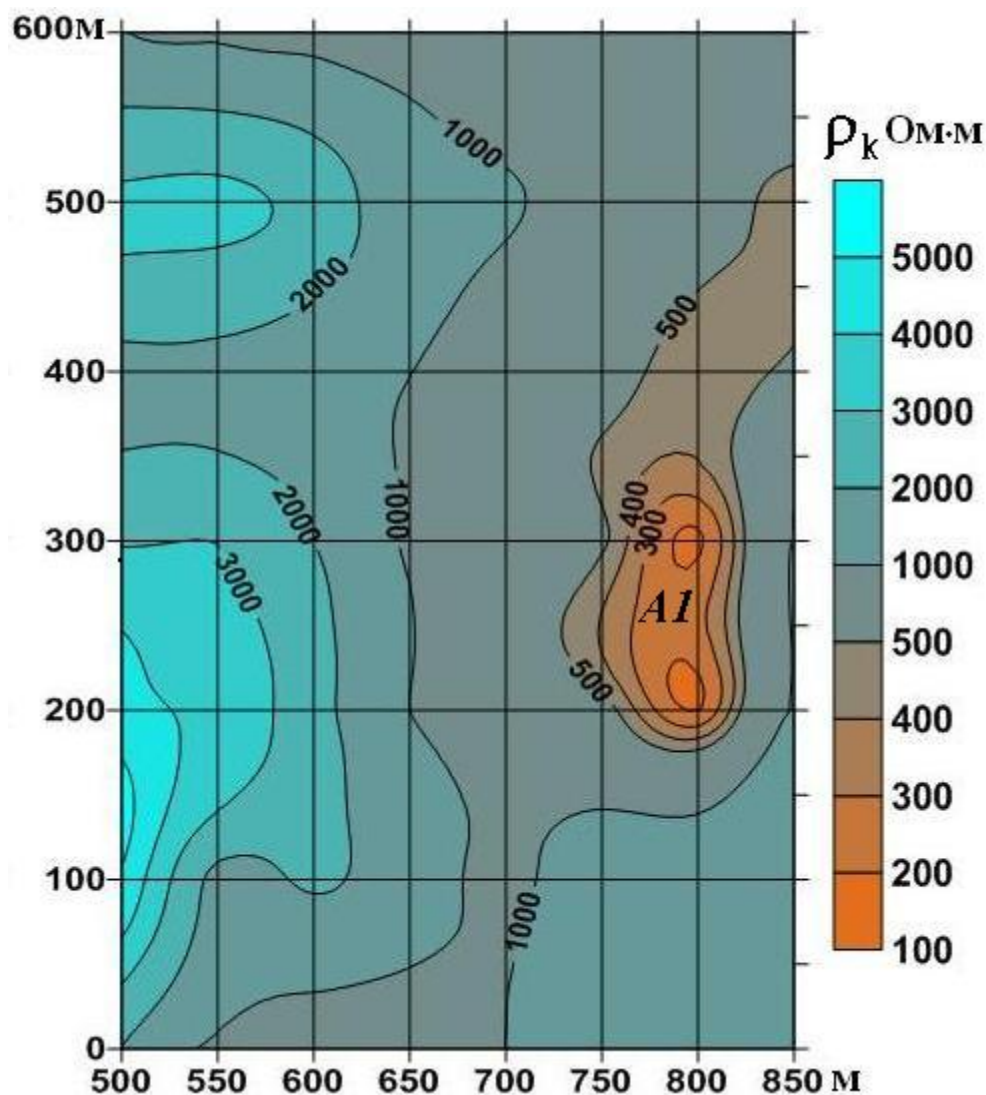


Рис. 3.12. План изолиний кажущегося сопротивления на аномалии А1 по результатам измерений эллипса поляризации магнитного поля методом НП-Н на частоте 78 Гц

Эпицентр аномального участка с пониженным удельным сопротивлением размером 100 x 200 м расположен между профилями 200 и 400 м и находится в непосредственной близости от профиля воздушных наблюдений.

Сопоставление полученных материалов воздушной и наземной съемки показывает их хорошее соответствие, указывающее на наличие на изучаемом участке низкоомной зоны северо-северо-восточного простирания на контакте пород различного состава и наличие локальной аномальной зоны, характерной для проводящих руд данного района.

Выполненные исследования показали высокую эффективность вертолетных измерений магнитного поля в методе незаземленной петли с аэрокомплексом АММЗ-2, при которых сохраняется информативность наземного метода и появляются дополнительные возможности, обусловленные увеличением производительности работ и удалением плоскости наблюдений от поверхности земли.

Проведенные исследования являются основой для дальнейшего развития низкочастотной аэроэлектроразведки с фазочувствительными измерениями с борта вертолета при создании поля наземным индуктивным источником.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для решения задачи поисков месторождений проводящих руд одним из ведущих методов геофизики является электроразведка. Ограниченность летнего времени полевого сезона делает выгодным применение аэроэлектроразведки, позволяющей опосредованно за короткое время значительные площади и выделить перспективные на оруденение участки. Сведения об удельном электрическом сопротивлении разреза по результатам аэроэлектроразведочных работ, в комплексе с данными других геофизических методов, являются необходимой и важнейшей составляющей при комплексной интерпретации и построении объемных физико-геологических моделей строения исследуемых участков работ и месторождений проводящих руд.

Аэроэлектроразведка с наземным источником поля является информативной и высокопроизводительной геофизической технологией для поисков проводящих руд, а так же выделения и прослеживания проводящих рудоконтролирующих структур в условиях интенсивных промышленных и техногенных помех на участках со сложными условиями измерений для наземных методов (озера, карьеры, отвалы, болота и пр.). Аэрогеофизической комплекс аппаратуры для электроразведки с наземным источником АММЗ-2 обеспечивает измерения составляющих переменного магнитного поля в движении с высокой детальностью и точностью съемки.

Общим недостатком аэроэлектроразведки методами профилирований или зондирований является влияние различных видов помех на измеряемое в движении магнитное поле: механическая вибрация, электромагнитные помехи от летательного аппарата и его собственное влияние как локального проводника, пространственные колебания выносной системы датчиков за счет метеоусловий и др.

Влияния многочисленных видов помех можно избежать, если составляющие электромагнитного поля, создаваемого перемещаемым на летательном аппарате индуктивным источником гармонического тока в виде магнитного диполя, измерять на дневной поверхности в одной или нескольких фиксированных точках (Человечков А.И. 2011).

Для качественной интерпретации получаемых материалов о величинах составляющих электромагнитного поля необходимо регистрировать время и координаты точек положения летательного аппарата, а так же время измерений поля. Современные навигационные средства позволяют с высокой точностью регистрировать время и координаты. По соответствующим временам соотносят величины измеряемого поля и положения излучателя, относительно неподвижной точки измерения. Полученные значения составляющих поля следует отнести к точкам положения излучателя и пересчитать их в составляющие цилиндрической системы координат относительно координат точки измерения.

Использование цилиндрических координат обладает существенным преимуществом перед прямоугольными координатами. Поскольку излучатель в виде вертикального магнитного диполя создает на поверхности однородного полупространства только составляющие электромагнитного поля B_z , B_r и E_φ , то составляющие B_φ и E_r являются чисто аномальными, непосредственно связанными с наличием в среде проводящих объектов или зон пониженного сопротивления.

Величины измеряемого электромагнитного поля являются абсолютными. Для использования относительных величин, не требующих определения точной величины момента излучателя, возможно использование фазовых углов составляющих поля $\alpha_{E,B}$ или импедансов Z_{ij} . При этом в величинах α_{E_φ} , α_{B_r} , α_{B_z} , $Z_{\varphi r}$, $Z_{\varphi z}$ выделение аномальных участков среды с повышенной электропроводностью вы-

полняется по их отклонению от нормальных значений для однородной среды.

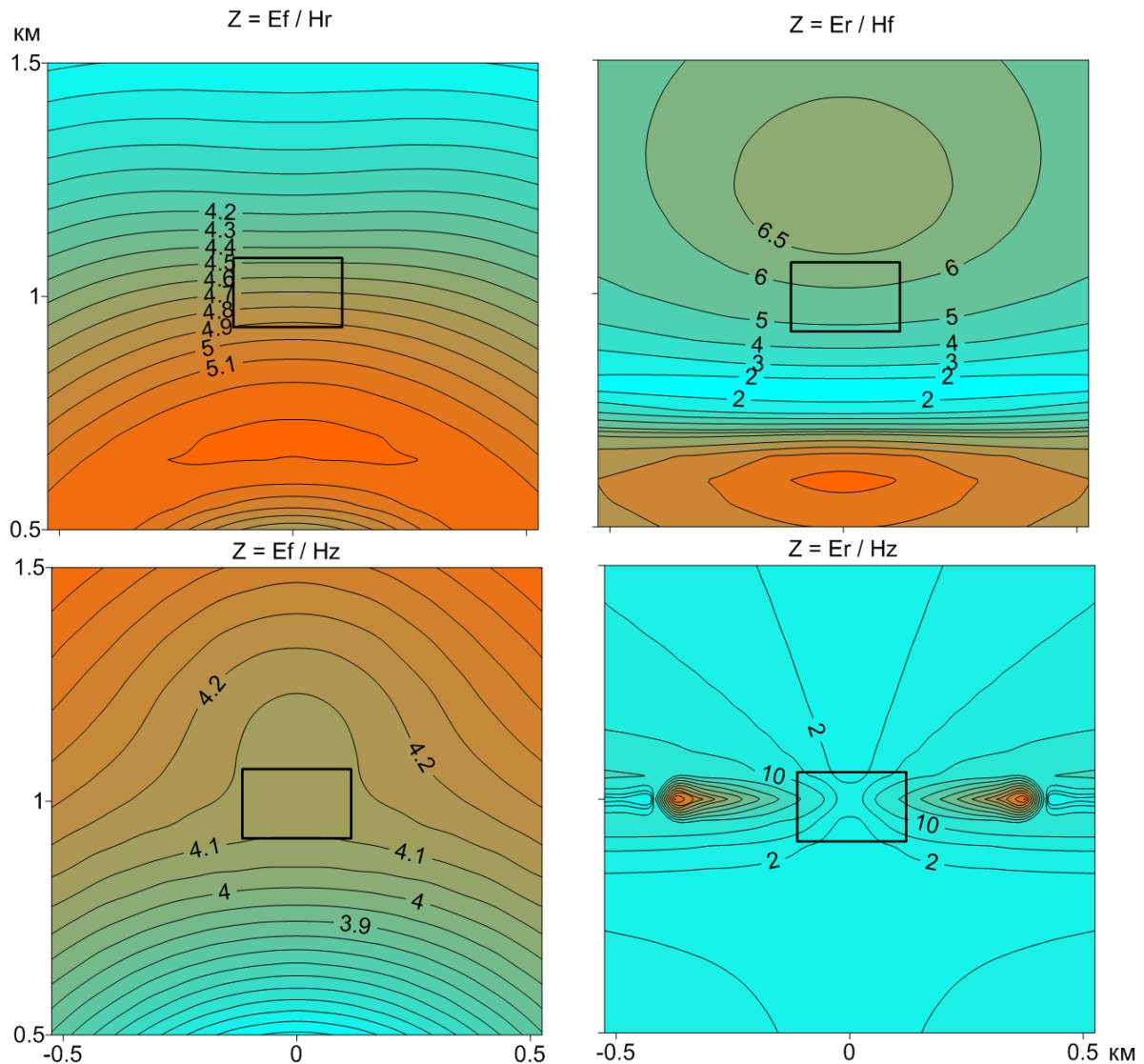


Рис. 4.1. Планы импедансов над телом размером $250 \cdot 150 \cdot 50$ м с относительной электропроводностью $\sigma_V / \sigma_0 = 1000$, $h = 100$ м, момент источника $M = 10^4$ А·м², $f = 1$ кГц

Относительные величины электромагнитного поля α_{E_r} , α_{B_φ} , $Z_{r\varphi}$, Z_{rz} являются аномальными, что позволяет сразу определить наличие в среде локальных проводящих объектов (рис.4.1).

Выполненное математическое моделирование для проводящего 3D-тела удаленного на 1 км от точки измерений показывает, что составляющие магнитного и электрического поля являются вполне измеримыми величинами для тела с минимальным размером, представ-

ляющим промышленный интерес.

Кроме относительных величин дополнительным параметром поля является вектор плотности энергии электромагнитного поля Умова – Пойнтинга $\vec{S} = \frac{1}{2} Re[\vec{E}x\vec{H}^*]$, определяющий направление переноса энергии.

Предложенный способ обладает гораздо более высокой чувствительностью и точностью по сравнению с подвижными измерительными аэросистемами за счет неподвижного положения датчиков системы регистрации. Многокомпонентные измерения составляющих электромагнитного поля позволяют более уверенно выделять локальные проводящие объекты и зоны пониженного сопротивления.

Использование мощной воздушной генераторной системы совместно с неподвижной системой регистрации, размещаемой вблизи изучаемого участка, позволяет проводить геоэлектрические исследования в труднодоступных районах со сложными условиями измерений для наземных методов электроразведки (озера, карьеры, отвалы, тайга и пр.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астафьев П.Ф., Байдилов С.В., Добронравов М.Ю.* и др. Аппаратура аэроварианта метода заряда с измерением магнитного поля АММЗ и результаты ее испытаний. Екатеринбург. Фонды ИГф УрО РАН. 1992.
- Астафьев П.Ф., Добронравов М.Ю., Кормильцев В.В., Шепелева И.М.* Магнитное поле незаземленной петли в воздухе. // Электрометрия на рудных месторождениях. 1989. Деп. в ВИНТИ № 7210–В89, с. 2-19.
- Байдилов С.В., Иванов Н.С., Ратушняк А.Н., Уткин В.И., Человечков А.И.* Способ геоэлектроразведки. Патент РФ 2 250 479, БИ. 2005. № 11.
- Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. – М.: Наука, 1970. 856 с.
- Бурсиан В.Р.* Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке. – Л.: Недра, 1972. 368 с.
- Ваньян Л.Л.* Основы электромагнитных зондирований. М.:Недра, 1965. 108 с.
- Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Мойланен Е.В.* Новая вертолетная электроразведочная система «Экватор» для метода АМПП. // Приборы и системы разведочной геофизики. № 2 (32). 2010. С. 9 – 11.
- Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Попович В.В., Трусов А.А.* Низкочастотная индуктивная аэроэлектроразведочная система ЕМ-4Н в самолетном и вертолетном вариантах. // Приборы и системы разведочной геофизики. № 2 (32). 2010. С.5 – 8.
- Воскобойников Г.М.* О вычислении стационарных электромагнитных полей в некоторых кусочно-однородных средах // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1973. № 9. С.63-76.
- Гуревич Ю.М.* Методы расчета магнитного поля токов растекания в объёмных проводниках. УНЦ АН СССР. Свердловск, 1980. 63 с.
- Дивильковский М.А.* Задача о шаре, помещенном в однородное элек-

- трическое или магнитное поле // ЖТФ. 1939. Том 9. № 5. С. 433–443.
- Дмитриев В.И., Захаров Е.В.* Метод интегральных уравнений в вычислительной электродинамике. – М.: МАКС Пресс. 2008. 316 с.
- Дмитриев В.И., Захаров Е.В.* Метод расчета поля постоянного тока в неоднородных проводящих средах // Вычислительные методы и программирование. – М.: МГУ, 1973. Вып. XX. с.175-186.
- Заборовский А.И.* Переменные электромагнитные поля в электроразведке. – М., МГУ, 1960, 186 с.
- Кауфман А.А.* Введение в теорию геофизических методов. Ч.2. Электромагнитные поля. – М.: Недра. 2000. 483 с.
- Кормильцев В.В., Ратушняк А.Н.* Моделирование геофизических полей при помощи объемных векторных интегральных уравнений. Изд.2-е. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 101 с.
- Кормильцев В.В., Семенов В.Д.* Электроразведка методом заряда. – М.: Недра, 1987. 218 с.
- Кормильцев В.В., Человечков А.И., Каменецкий Ф.М. и др.* Способ электроразведки. А.С.(СССР) № 1 277 773. G 01 v 3/18. 1985.
- Кормильцев В.В., Человечков А.И., Шепелева И.М. и др.* Отчет об опытно-методических работах по аэроварианту метода заряда с изменением магнитного поля. Свердловск. Фонды ИГф УрО РАН. 1985.
- Краев А.П.* Основы геоэлектрики. 2-е изд. – Л.: Недра. 1965. 587 с.
- Мартышко П.С.* Обратные задачи электромагнитных геофизических полей. -Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 144 с.
- Медведев А.Н.* Низкочастотная электроразведка с наземным и погруженным источниками и фазочувствительными измерениями магнитного поля с борта вертолета. Дисс. канд. техн. наук. Свердловск, 1990. 125 с.
- Пеккер И.И.* Расчет магнитных систем путем интегрирования по источникам поля. // Изв.ВУЗов. Сер. Электромеханика. 1969. № 6. С.599-606.

- Петров С.И., Новак В.Д., Тихомиров О.А.* Аэроэлектроразведка методом ДИП-А. // Разведка и охрана недр. 2006. № 5. С.38-42.
- Приходько А.Ю.* Аэроразведка: возможности, состояние и перспективы. // Разведка и охрана недр. 2005, № 12. С.73-79.
- Ратушняк А.Н.* Рассеяние гармонического ЭМ поля на 3D проводящих объектах // Известия ВУЗов. Горный журнал. Екатеринбург. 2006. №1. С.151-163.
- Смайт В.* Электростатика и электродинамика. – М.: ИЛ, 1954. 604 с.
- Стрэттон Дж. А.* Теория электромагнетизма. М.– Л., ОГИЗ, 1948. 541 с.
- Таборовский Л.А.* Применение метода интегральных уравнений в задачах геоэлектрики. Новосибирск: Наука, 1975. 140 с.
- Тамм И.Е.* Основы теории электричества. – М.: Гостеортехиздат, 1954. 620 с.
- Тригубович Г.М., Персова М.Г., Саленко С.Д.* Аэрогеофизические вертолетные платформы серии «Импульс» для поисково-оценочных исследований. // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. №2 (16). С.18-21.
- Франк Ф., Мизес Р.* Дифференциальные и интегральные уравнения математической физики. Часть 2. – М.– Л., ОНТИ. 1937. 998 с.
- Человечков А.И., Ратушняк А.Н., Байдилов С.В., Астафьев П.Ф.* Низкочастотная аэроэлектроразведка с фиксированным источником поля. // Практика приборостроения. 2003. № 2 (3). С.59-63.
- Человечков А.И., Ратушняк А.Н., Байдилов С.В., Астафьев П.Ф.* Патент RU № 2410730. Способ геоэлектроразведки. 2011 г. Бюл. № 3.
- Человечков А.И., Ратушняк А.Н., Иванов Н.С., Байдилов С.В., Астафьев П.Ф.* Оптимизация поисков крупных колчеданных месторождений Среднего Урала на основе использования новых технологий аэроэлектроразведки. Отчет по хоздоговору ИГф УрО РАН с УГМК. Екатеринбург. Фонды ИГф УрО РАН. 2000 г.

- Человечков А.И., Уткин В.И., Ратушняк А.Н.* и др. Аэроэлектроразведочный метод поиска рудных месторождений // Практика приборостроения. 2002. №1. С.29-32.
- Человечков А.И., Уткин В.И., Ратушняк А.Н.* и др. Способ геоэлектроразведки. Патент РФ, № 2 248 016, БИ. 2005. № 18.
- Шауб Ю.Б.* Методы аэроэлектроразведки. – Л., Недра, 1971.
- Шереметьев Ю. С., Лецев Н. В.* Сафьяновское медноколчеданное месторождение на Среднем Урале. Екатеринбург, 2000. 114 с.
- Электроразведка. Справочник геофизика. – М.: Недра, 1980. 518 с.
- Fontain D.* Airborne electromagnetic systems - 50 years of development. Exploration Geophysics. Vol. 29. 1998. P. 1-11.
- Hohmann G.W.* Three-dimensional induced polarization and electromagnetic modeling. // Geophysics, 1975. V. 40. P. 309 - 324.
- Hvozدارa M.* Electric and magnetic field of a stationary current in a stratified medium with a three-dimensional conductivity inhomogeneity // Stadia Geophysica et Geodaetica. 1983. № 27. V1. P. 59-84.
- Icarus.* The Newsletter of R&D for Mining Geophysics. 2000, vol. 1, № 1. Special Feature Time Domain Helicopter EM Systems. 1980 – 2000.
- Raihe A.P.* An integral equation approach to three-dimensional modelling. // Geophys. J. R.A. Soc., 1974, № 36. P.363–376.
- Smith R., Fountain D., Allard M.* The MEGATEM fixed-wing transient EM system applied to mineral exploration: a discovery case history. // First Break EAGE Stavanger 2003 report. V. 21. July 2003. P.73-77.
- Weidelt P.* Electromagnetic induction in three-dimensional structures. J. Geophys, 1975, v. 41, p. 85–109.
- Won I.J., Oren A., Funak F.* GEM-2A: A programmable broadband helicopter-towed electromagnetic sensor. Geophysics. Vol. 68, № 6, 2003. P.476–481.

Оглавление

	Стр.
Введение. Общие сведения о методах аэроэлектроразведки	3
Глава 1. Теоретические основы аэроэлектроразведки	7
1.1. Нормальные поля гармонических источников электромагнитного поля	7
1.2. Аномальное магнитное поле стационарного источника тока в аэроварианте метода заряда	11
1.3. Аномальное магнитное поле гармонического источника тока в аэроварианте метода незаземленной петли	14
Глава 2. Аппаратура и методика проведения аэросъемки	27
2.1. Аэроэлектроразведочный комплекс АММЗ -2	27
2.2. Методика проведения аэросъемки	29
2.3. Обработка и интерпретация результатов	32
Глава 3. Примеры применения аэроэлектроразведки	40
3.1 Аэровариант метода заряда с измерением магнитного поля	40
3.2. Аэровариант метода незаземлённой петли	57
Заключение	69
Список литературы	73

Научное издание

**Александр Иванович Человечков
Александр Николаевич Ратушняк
Сергей Владимирович Байдилов
Павел Федорович Астафьев**

**АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА ПРИ ПОИСКАХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРОВОДЯЩИХ РУД.**

Рекомендовано к изданию
ученым советом Института геофизики
и президиумом УрО РАН

Редактор **М.О. Тюлюкова**
Технический редактор **Е.М. Бородулина**
Корректоры **Г.Н. Старикова, Н.В. Катькова**
Компьютерная верстка **Н.С. Глушковой**

НИСО УрО РАН № 20(12)-45. Подписано в печать 18.07.12.
Формат 60×84 1/16. Бумага типографская. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 4,5. Уч.-изд. л. 4,5. Тираж 100 экз. Заказ № 90.

Оригинал-макет изготовлен в РИО УрО РАН.
620990, Екатеринбург, ул. Первомайская, 91.

Отпечатано в типографии
«Уральский центр академического обслуживания».
620990, Екатеринбург, ул. Первомайская, 91.