

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «ГЕОТЕХНИКА»
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТОДИКИ И ТЕХНИКИ РАЗВЕДКИ

М. М. АВДЕВИЧ,
А. Ф. ФОКИН

ЭЛЕКТРОМОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

НЕДРА

М. М. АВДЕВИЧ,
А. Ф. ФОКИН

ЭЛЕКТРОМОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Под редакцией С. М. Шейнманна



ЛЕНИНГРАД
«НЕДРА»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1978

ПРЕДИСЛОВИЕ

Авдевич М. М., Фокин А. Ф. Электромоделирование потенциальных геофизических полей. Под ред. С. М. Шейнманна. Л., «Недра», 1978. 99 с. (М-во геологии СССР. Науч.-произв. объединение «Геотехника». Всесоюз. науч.-исслед. ин-т методики и техники разведки).

Изложены принципиальные основы и методика применения способа электромоделирования потенциальных геофизических полей для оперативного численного решения задач грави-, магнито-, электроразведки (методы постоянного тока, вызванной поляризации и естественного электрического поля). Способ электромоделирования основан на совместном использовании физического и математического моделирования и позволяет решать геофизические задачи с учетом реальной геолого-геофизической обстановки непосредственно в условиях полевых партий и экспедиций. Кратко рассмотрено устройство и основные технические данные моделирующей установки для решения двухмерных задач скважинной геофизики (МУСГ-1). Теоретические и методические положения иллюстрируются примерами решения контрольных и практических задач при интерпретации реальных геофизических полей на ряде месторождений магнетитовых и сульфидных руд.

Книга предназначена для специалистов-геофизиков, занимающихся вопросами интерпретации геофизических полей.

Табл. 2, ил. 26, список лит. 66 назв.

Эффективное применение геофизических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых невозможно без оперативной и достоверной интерпретации геофизических аномалий. Особенно остро этот вопрос стоит при исследованиях околодомежскважинного пространства, когда необходимо своевременно рекомендовать последовательность заложения новых скважин и корректировать находящиеся в бурении, т. е. активно управлять геологоразведочным процессом. Эта задача может быть решена лишь при надежной оперативной количественной интерпретации измеренных полей, причем проводить ее должен непосредственно в условиях полевых партий и экспедиций геофизик, хорошо знакомый с геолого-геофизическими особенностями исследуемого месторождения. Для этого интерпретатору необходимо иметь в своем распоряжении инструмент оперативного решения задач теории поля.

Сложность решения таких задач при наличии нескольких граничных поверхностей, а также высокие требования к оперативности решения затрудняют, как показывает опыт, привлечение для этой цели универсальных ЭВМ. Поэтому в настоящее время оперативная количественная интерпретация данных скважинной магниторазведки выполняется в очень небольшом объеме и в качестве инструмента расчета используется палетка Д. С. Микова; результаты же электроразведки методами постоянного тока, вызванной поляризации и естественного поля подвергаются только качественной интерпретации.

Задача оперативной количественной интерпретации потенциальных геофизических полей может быть успешно решена при совместном использовании физического и математического электромоделирования. Этот способ реализован на моделирующей установке для решения задач скважинной геофизики МУСГ-1, которая выпускается серийно и внедрена в производство.

Основные теоретические положения электромоделирования потенциальных полей, а также методические вопросы, относящиеся к конкретным геофизическим методам, рассмотрены в отдельных статьях. В настоящей монографии сделана попытка систематизировать эти материалы, дать единый принципиальный

подход к решению задач любого метода геофизики, использующего соответствующее потенциальное физическое поле. Основное внимание уделено принципиальным вопросам электромоделирования и методике решения прямых задач геофизики. Меньшее место отведено интерпретации методом подбора, которая в значительной мере является субъективной. Приведенная в книге методика решения рассматриваемых задач далеко не полностью исчерпывает возможности электромоделирования. Предполагается, что предложенного материала достаточно, чтобы интерпретатор был в состоянии решать задачи, не нашедшие отражения в монографии.

Излагая теорию и практические приемы электромоделирования, мы пользовались Международной системой единиц (СИ). Часть примеров рассмотрена также и в системе единиц СГС, поскольку эта система до сих пор широко применяется на практике.

Авторы с благодарностью примут все замечания, относящиеся к содержанию книги, которые они просят направлять по адресу: 199106, Ленинград, ул. Весельная, д. 6, ВИТР.

ВВЕДЕНИЕ

Скважинные геофизические исследования в сочетании с бурением являются эффективным средством решения поисково-разведочных задач на глубинах больше 300 м. Основная задача геофизических исследований около- и межскважинного пространства заключается в уточнении геологического строения изучаемого участка и в своевременном получении надежных рекомендаций на дальнейшее проведение геологоразведочных работ. Результатом интерпретации измеренных полей должны быть сведения о местоположении, форме, размерах и элементах залегания рудных тел, вызывающих аномалии. Однако в настоящее время геологические рекомендации выдаются с ощутимой задержкой. Для коренного улучшения положения необходимо широко внедрять вычислительную технику в практику геофизических работ, что повысит не только оперативность, но и качество интерпретации, которая станет достовернее с увеличением объема анализируемого материала.

В рудной геофизике большую роль играют методы, в которых используются искусственные и естественные потенциальные физические поля. К таким исследованиям относятся грави-, магнито-, электроразведка (методы постоянного тока, естественного поля и вызванной поляризации). Настоящая работа посвящена анализу именно потенциальных геофизических полей.

По мнению многих исследователей [35, 60, 62, 66] при интерпретации геофизических данных следует использовать как самые современные цифровые вычислительные машины, сконцентрированные в крупных центрах, так и средства малой вычислительной техники, позволяющие получать результаты непосредственно в поле с достаточной для оперативной интерпретации точностью. К таким средствам относятся малогабаритные цифровые и аналоговые вычислительные машины.

Оптимальной при оперативной интерпретации представляется система «человек — машина» [9], когда машина по заданным параметрам решает задачу; человек сравнивает результат с исходным материалом и вносит корректиды в задаваемые параметры; процесс повторяется до тех пор, пока решение не удовлетворит интерпретатора. Непременным условием, обеспечивающим высо-

кую эффективность такой системы, должно быть быстрое, практическим мгновенное решение на машине прямой задачи. Решение может выполняться либо математическим моделированием на цифровых машинах, либо физическим и математическим аналоговым моделированием.

При решении сравнительно несложных задач с малым числом геометрически простых поверхностей раздела цифровые машины обладают несомненным преимуществом перед аналоговыми. Однако при решении реальных задач приходится учитывать большое число осложняющих факторов, что резко увеличивает объем вычислительных операций и усложняет программы; возможности, заложенные в современных вычислительных машинах, оказываются недостаточными для оперативной интерпретации геофизических наблюдений, которую часто требуется проводить непосредственно в поле. При указанных условиях повышается роль аналогового моделирования.

При оперативной интерпретации решение задачи часто можно считать удовлетворительным, если погрешность результата не превышает 10%. В общем случае из-за недостатка геофизической информации (аномалии не имеют выхода в область нормального поля и, кроме того, измеряются по криволинейным профилям) решение обратной задачи неоднозначно. Для повышения надежности интерпретации следует привлекать дополнительные геолого-геофизические сведения. В этих условиях интерпретацию целесообразно проводить методом подбора: на основе имеющейся геолого-геофизической информации составляют гипотезу о строении исследуемого месторождения, которую проверяют решением прямой задачи; рассчитанное поле сравнивают с наблюденным, в случае их несовпадения в исходную модель вносят соответствующие корректиры и снова решают прямую задачу.

Приведенные выше положения определяют требования к вычислительной технике для оперативной интерпретации геофизических полей.

1. Малые габаритные размеры и простота обслуживания.
2. Возможность быстро и просто изменять параметры задачи и легко переходить от одного геофизического метода к другому.

3. Относительно невысокая стоимость.

Из-за сложности геолого-геофизической обстановки (неоднородность физических свойств вмещающей среды, неправильная форма рудных тел, многочисленные сложные границы нарушения однородности среды и т. д.) рассматриваемая задача аналитическими методами практически неразрешима. Использование приближенных численных методов требует в этих условиях мощных ЭЦВМ, которые, как правило, удалены от места проведения геологоразведочных работ. Разработка аналоговых способов интерпретации и технических средств для ее осуществления широко ведется как в СССР, так и за рубежом.

Моделирование может быть физическим и математическим. При физическом моделировании изучаются поля, подобные реальным, при этом сохраняется физическое и геометрическое подобие натуры и модели. При математическом аналоговом моделировании на модели возбуждаются и изучаются процессы другой, чем в натуре, физической природы, при условии, что те и другие описываются одними и теми же уравнениями.

Вопросы использования математического подобия потенциальных физических полей для интерпретации геофизических данных рассматривались многими исследователями. А. А. Непомнящих разработал «метод сравнения» и предложил универсальные палетки для интерпретации любого геофизического потенциального поля [34]. В основе «метода сравнения» лежит общность формализованного описания потенциальных полей. Из-за сложности учета влияния граничных условий палетки А. А. Непомнящих не нашли широкого применения. Г. Е. Яковлев рассчитал палетки для интерпретации данных метода срединного градиента на основании закономерностей аномального магнитного поля тел простой формы [59]. Такой способ интерпретации возможен только при условии однородного первичного электрического поля в однородной изотропной вмещающей среде.

С. Са-а (S. Saha) предложил электромагнитный аналоговый метод и моделирующее устройство для расчета гравитационных и магнитных аномалий двухмерных тел, которые представляются совокупностью линейных проводов с током. В процессе моделирования измеряется магнитное поле проводов, подобное магнитному или гравитационному полю исследуемых тел [64]. Еще раньше (в 1959 г.) на возможность такого способа моделирования магнитного и гравитационного полей указывал А. А. Логачев. Аналогичный метод, но с использованием переменного электромагнитного поля, предложил Д. Зидаров [66]. Коллективом кафедры радиофизики Саратовского университета под руководством Г. М. Герштейна разработаны метод и аппаратура для аналогового моделирования потенциальных полей с помощью электростатической индукции [14].

Несмотря на очевидные достоинства аналогового математического моделирования, до сих пор ни в СССР, ни за рубежом не существовало портативной установки, позволяющей оперативно моделировать и измерять поля, близкие к реальным. Имеющиеся установки, предназначенные для решения геофизических задач, либо чрезвычайно громоздки [35], либо пригодны для решения только частных задач [64], либо малсопротивны [66]. Использование магнитного или электромагнитного поля затрудняет воспроизведение в математической модели граничных условий. Привлекая электростатическую индукцию, можно изучать практически любое потенциальное поле, но и здесь при учете граничных условий резко снижается оперативность решения задач.

Большей части затруднений можно избежать, если в качестве математической модели применить электрическое поле постоянного тока в проводящей среде — математическое электромоделирование. Поле может быть и не стационарным, но оно должно подчиняться уравнению Лапласа. На базе электромоделирования можно создать портативную, удобную в работе установку для решения задач практических всех методов рудной геофизики, в которых используются потенциальные физические поля. Лучше всего задача может быть решена (с достаточной для практики точностью) при совместном использовании физического и математического (аналогового) моделирования. На основе математического подобия полей устанавливаются коэффициенты, связывающие соответствующие поля в натуре и на модели. Физическое моделирование служит для обеспечения на модели требуемых граничных условий.

Теоретические основы электромоделирования рассмотрены для общности в векторной форме с использованием системы единиц СИ. В этой же системе приведено и решение контрольных задач, параллельно некоторые результаты решения показаны в системе СГС.

ГЛАВА I

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

§ 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Возможность математического моделирования геофизических полей основана на том, что все потенциальные поля в точках без источников описываются уравнением Лапласа

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

и, следовательно, являются подобными, если обеспечено подобие граничных условий.

Для разработки методики математического электромоделирования необходимо найти коэффициенты подобия, устанавливающие связь между параметрами электрического поля постоянного тока и параметрами исследуемых потенциальных полей, показать возможность определения векторов поляризации тел и возможность обеспечения требуемых граничных условий.

Из уравнения (1) могут быть получены формулы для расчета потенциала U и напряженности \vec{E} поля однополярных и дипольных точечных источников:

$$U_{\text{од}} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{Q}{R}; \quad (2)$$

$$\vec{E}_{\text{од}} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{QR}{R^3}; \quad (3)$$

$$U_d = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\vec{d} \cdot \vec{R}}{R^3}; \quad (4)$$

$$\vec{E}_d = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{3(\vec{d} \cdot \vec{R})\vec{R}}{R^5} - \frac{\vec{d}}{R^3} \right], \quad (5)$$

где Q — точечный источник; $\vec{d} = Q\vec{l}$ — момент точечного диполя; l — плечо диполя; R — расстояние от источника до точки наблюдения.

При переходе к геофизическим полям точечный источник Q следует рассматривать как заряд (избыточную массу), а момент \vec{d} точечного диполя — как дипольный момент (магнитный, электрический, вызванной поляризации и т. д.) тела, расположенного в однородной проводящей среде, геометрические размеры которого малы по сравнению с расстоянием до точки наблюдения.

Формулы для расчета потенциала и напряженности поля однополярных и дипольных источников постоянного тока, расположенных в проводящей среде с удельным сопротивлением ρ , имеют вид

$$U_{\text{од}} = \frac{\rho}{4\pi} \cdot \frac{i}{R}; \quad (6)$$

$$\vec{E}_{\text{од}} = \frac{\rho}{4\pi} \cdot \frac{i\vec{R}}{R^3}; \quad (7)$$

$$U_{\text{д}} = \frac{\rho}{4\pi} \cdot \frac{\vec{d}_{\text{д}} \cdot \vec{R}}{R^3}; \quad (8)$$

$$\vec{E}_{\text{д}} = \frac{\rho}{4\pi} \left[\frac{3(\vec{d}_{\text{д}} \cdot \vec{R}) \vec{R}}{R^5} - \frac{\vec{d}_{\text{д}}}{R^3} \right], \quad (9)$$

где i — сила тока точечного источника.

Из анализа систем (2)–(5) и (6)–(9) видно, что соответствующие формулы совпадают с точностью до постоянного коэффициента. Отсюда следует, что при математическом электромоделировании точечный источник Q исследуемого поля можно заменить точечным источником постоянного тока силой i , а объект, обладающий дипольным моментом \vec{d} , — дипольным источником тока с моментом $\vec{d}_{\text{д}}$.

Структура электрического поля постоянного тока обусловливается стационарными зарядами, которые непрерывно сменяют друг друга, но тем не менее остаются локализованными в одном и том же месте и не меняются по величине. Электрическое поле постоянных токов можно было бы свести к полю зарядов, при этом его сопоставление с исследуемыми потенциальными полями было бы нагляднее. Однако, как правило, ни местоположение, ни величина стационарных зарядов не известны, поэтому электрическое поле постоянного тока удобнее представлять системой уравнений (6)–(9).

При моделировании полей, вызванных телами конечных размеров с неравномерно распределенной избыточной массой или неравномерно поляризованных, отмеченного выше подобия систем уравнений оказывается недостаточно. В этом случае рассматриваемый объект должен быть разбит на элементарные объемы, которые можно было бы считать точечными. Поле в пункте наблюдения при этом находится как сумма полей элементарных источников. В пределе, при бесконечном увеличении числа элементарных объемов, суммирование полей в точке наблюдения переходит в интегрирование по объему тела и система уравнений (2)–(5) принимает вид

$$U_{\text{од}} = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\delta}{R} dV; \quad (10)$$

$$\vec{E}_{\text{од}} = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\delta \vec{R}}{R^3} dV; \quad (11)$$

$$U_{\text{д}} = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\vec{d} \cdot \vec{R}}{R^3} dV; \quad (12)$$

$$\vec{E}_{\text{д}} = \frac{1}{4\pi} \int_V \left[\frac{3(\vec{d} \cdot \vec{R}) \vec{R}}{R^5} - \frac{\vec{d}}{R^3} \right] dV, \quad (13)$$

где $\delta = Q/dV$ — объемная плотность источников (избыточных масс, зарядов и т. д.); $\vec{d} = \vec{d}/dV$ — вектор поляризации — дипольный момент, отнесенный к единице объема тела (вектор намагниченностя, электрической или вызванной поляризации и т. д.).

При электромоделировании каждый элемент объема рассматриваемого тела должен быть заменен однополярным или дипольным источником тока. Чем детальнее разделено тело на элементарные объемы, тем большее число независимых источников тока следует использовать при моделировании, в пределе вся модель должна быть заполнена ими непрерывно. В этом случае система уравнений (6)–(9) может быть переписана в виде

$$U_{\text{од}} = \frac{\rho}{4\pi} \int_V \frac{j_V}{R} dV; \quad (14)$$

$$\vec{E}_{\text{од}} = \frac{\rho}{4\pi} \int_V \frac{j_V \vec{R}}{R^3} dV; \quad (15)$$

$$U_{\text{д}} = \frac{\rho}{4\pi} \int_V \frac{\vec{p}_{\text{д}} \cdot \vec{R}}{R^3} dV; \quad (16)$$

$$\vec{E}_{\text{д}} = \frac{\rho}{4\pi} \int_V \left[\frac{3(\vec{p}_{\text{д}} \cdot \vec{R}) \vec{R}}{R^5} - \frac{\vec{p}_{\text{д}}}{R^3} \right] dV, \quad (17)$$

где $j_V = i/dV$ — объемная плотность однополярных источников тока на модели — аналог объемной плотности избыточных масс; $p_{\text{д}} = \vec{d}/dV$ — объемная плотность дипольных источников тока на модели — аналог дипольного момента единицы объема поляризованного тела.

Обычно при анализе геофизических полей имеющаяся информация о физических свойствах исследуемых объектов невелика, поэтому нет необходимости вводить в модель распределенные источники тока с непрерывной плотностью. Объект произвольной формы всегда может быть аппроксимирован совокупностью геометрически правильных тел, например шаров, в пределах каждого из которых распределение избыточной массы или поляризации

ция принимаются однородными. В этом случае шар сводится к точке и заменяется при моделировании однополярным или дипольным источником тока.

Таким образом, тело произвольной формы и с произвольным распределением физических свойств при электромоделировании представляется совокупностью конечного, часто небольшого числа независимых однополярных или дипольных точечных источников тока, интенсивность которых пропорциональна избыточной массе или дипольному моменту заменяемых ими элементов. При этом получаем модельное электрическое поле, которое подобно реальным исследуемым полям. Аналогом объемной плотности δ источников исследуемого поля является величина j_V , а аналогом самого источника Q — сила тока, определяемая из формулы $i = j_V V$. Соответственно аналогом вектора поляризации ξ при моделировании служит величина $p_{\text{э.д.}} = j_V \vec{l}$, а аналогом дипольного момента $d = \xi V$ поляризованного тела — момент дипольного источника постоянного тока $d_{\text{э.д.}} = p_{\text{э.д.}} V = j_V \vec{l} V = i \vec{l}$. Для удобства дальнейшего изложения целесообразно присвоить формулам (10)–(13) индекс «н» (нatura), а уравнениям (14)–(17) — индекс «м» (модель).

Коэффициент подобия, устанавливающий связь между параметрами электрического поля модели и исследуемого поля, может быть найден из совместного решения соответствующих уравнений:

$$K = \frac{U_{\text{од.н}}}{U_{\text{э.од.м}}}; \quad K' = \frac{E_{\text{од.н}}}{E_{\text{э.од.м}}} = \frac{U_{\text{д.н}}}{U_{\text{э.д.м}}}; \quad K'' = \frac{E_{\text{д.н}}}{E_{\text{э.д.м}}}, \quad (18)$$

где K , K' и K'' — коэффициенты подобия при моделировании соответственно потенциала поля однополярного источника; потенциала поля дипольного источника или напряженности поля однополярного источника (первой производной потенциала); напряженности поля дипольного источника (второй производной потенциала).

Из соотношения (18) получаем

$$K = \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{\delta_n}{j_V} K_d; \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} K' &= \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{\delta_n}{j_V} K_d; \\ K'' &= \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{\xi}{p_{\text{э.д.}}} K_d; \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

$$K'' = \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{\xi}{p_{\text{э.д.}}}, \quad (21)$$

где ρ_m — удельное электрическое сопротивление среды модели, в которой расположены источники постоянного тока; K_d — мас-

штабный коэффициент, равный отношению линейных размеров в натуре и на модели, т. е. масштаб моделирования.

Коэффициенты подобия при моделировании полей высших производных потенциала могут быть найдены по тому же принципу. В частности, для третьей производной потенциала

$$K''' = \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{\xi}{j_V} \cdot \frac{1}{K_d}. \quad (22)$$

Формулы (10)–(13) охватывают практически все модификации геофизических методов, использующих потенциальные поля. Так, величина δ представляет собой плотность избыточных масс, вызывающих гравитационную аномалию. Вектор поляризации ξ может рассматриваться как вектор намагниченности \vec{J} , момент вызванной поляризации единицы объема $\vec{p}_{\text{вп}}$, вектор электрической поляризации \vec{p}_e для соответствующих полей: магнитного, вызванной поляризации, постоянного тока. Необходимо дать некоторые пояснения, касающиеся математического моделирования электрического поля постоянного тока. Известно [7], что любая электрическая неоднородность в поле постоянного тока поляризуется и может быть охарактеризована вектором поляризации \vec{p}_e . При моделировании ему следует сопоставить величину $p_{\text{э.д.}} = j_V \vec{l}$. Отсюда очевидно, что при электромоделировании в данном случае можно не учитывать единства природы поля в натуре и на модели и для всех исследуемых потенциальных полей разрабатывать единую методику моделирования.

Из анализа принципиальной возможности электромоделирования потенциальных геофизических полей следует, что для любого из них коэффициент подобия может быть найден из формул (20) или (21). Следовательно, подход к математическому электромоделированию любого потенциального геофизического поля совершенно одинаков, если известны либо объемная плотность однополярных источников моделируемого поля (избыточная плотность тела), либо вектор поляризации каждого тела, поляризованного соответствующим физическим полем (магнитным, электрическим и т. д.).

Для источников гравитационного поля характерно отсутствие взаимного влияния, они являются функцией только распределения избыточной массы в пространстве, т. е. полностью определяются физическими свойствами среды. Вектор поляризации тела, находящегося в том или ином силовом поле, зависит от физических свойств среды, структуры и интенсивности первичного поля, размеров и формы поляризуемого тела и от взаимного влияния источников вторичного поля. Аналитический расчет вектора поляризации крайне труден, поэтому его также целесообразно определять с помощью электромоделирования. Известно,

ТАБЛИЦА 1

Связь между потенциальными геофизическими полями в натуре

Поле	Физическая характеристика среды	Плотность источников δ	Восприимчивость к поляризации K_B	Интенсивность поляризации (поляризованность)
Гравитационное		Объемная плотность избыточной массы σ , кг/м ³		
Магнитное	Абсолютная магнитная проницаемость μ , Г/м		Магнитная χ	Намагниченность \vec{J} , А/м
Электрическое	Удельная электрическая проводимость γ , См/м	Объемная плотность электрического заряда, Кл/м ³	Электрическая c_3	Дипольный момент электрической поляризации единицы объема p_3 , В·м
Вызванной поляризации	Поляризуемость η . Удельная электрическая проводимость γ , См/м		Поляризационная $c_{\text{ВП}}$	Дипольный момент вызванной поляризации единицы объема $\vec{p}_{\text{ВП}}$, В·м
Электрическое поле постоянного тока на модели		Удельная электрическая проводимость γ , См/м	Объемная плотность однополярных источников тока j_V , А/м ³	Объемная плотность дипольных источников тока $j_V l$, А/м ²

и электрическим полем постоянного тока на модели

Первичное поле	Поляризующее (внутреннее) поле	Избыточная масса M (заряд Q) элемента объема	Дипольный момент элемента объема поляризованного тела	Связь между параметрами
		dM , кг		$dM = \sigma dV$
Магнитное \vec{T}_0 , А/м	Магнитное $\vec{T}_{\text{вн}}$, А/м		Магнитный d_m , А·м ²	$\chi = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1};$ $\vec{J} = \chi \vec{T}_{\text{вн}};$ $\vec{T}_{\text{вн}} = \frac{\vec{T}_0}{1 + N\chi};$ $d\vec{d}_m = \vec{J} dV$
Электрическое $\vec{E}_{3,0}$, В/м	Электрическое $\vec{E}_{3,\text{вн}}$, В/м	dQ , Кл	Электрический \vec{d}_3 , В·м ²	$c_3 = \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{\gamma_1};$ $\vec{p}_3 = c_3 \vec{E}_{3,\text{вн}};$ $\vec{E}_{3,\text{вн}} = \frac{\vec{E}_{3,0}}{1 + Nc_3};$ $dQ = \delta dV;$ $d\vec{d}_3 = \vec{p}_3 dV$
Электрическое $\vec{E}_{3,0}$, В/м	Электрическое с учетом поля вызванной поляризации $\vec{E}^*_{3,\text{вн}}$		Вызванной поляризации $\vec{d}_{\text{ВП}}$, В·м ²	$c_{\text{ВП}} = \frac{\gamma_2 \cdot (\gamma_1 - \gamma_2)}{\gamma_1 (1 - \gamma_1)};$ $\vec{p}_{\text{ВП}} = c_{\text{ВП}} \vec{E}^*_{3,\text{вн}};$ $\vec{E}^*_{3,\text{вн}} = \frac{\vec{E}_{3,0}}{1 + Nc^*_3};$ $d\vec{d}_{\text{ВП}} = \vec{p}_{\text{ВП}} dV$
Электрическое $\vec{E}_{3,0\text{м}}$, В/м	Электрическое $\vec{E}_{3,\text{вн},\text{м}}$, В/м	Интенсивность однополярного точечного источника тока, заменяющего элемент объема, di , А	Интенсивность дипольного точечного источника тока, заменяющего элемент объема, $d\vec{d}_{3,\text{д}}$, А·м	$di = j_V dV;$ $d\vec{d}_{3,\text{д}} = j_V \vec{l} dV = di \vec{l}$

что вектор поляризации в любой точке тела может быть найден из соотношения [7, 48]:

$$\vec{\xi} = K_b \vec{E}_{\text{вн}}, \quad (23)$$

где K_b — коэффициент восприимчивости; $\vec{E}_{\text{вн}}$ — поле внутри тела, связанное с первичным полем \vec{E}_0 соотношением

$$\vec{E}_{\text{вн}} = \frac{\vec{E}_0}{1 + NK_b}; \quad (24)$$

N — коэффициент формы тела.

Коэффициент K_b в зависимости от поля представляет собой магнитную, электрическую или поляризационную восприимчивость (табл. 1).

При анализе возможности определения вектора поляризации с помощью математического электромоделирования использовался изоморфизм уравнений, описывающих разные по своей природе поля. Подобие граничных условий при этом предполагалось выполненным.

Остановимся теперь несколько подробнее на обеспечении этого подобия. Как известно, под граничными условиями понимаются условия на границе исследуемой области, которые определяют однозначность потенциального поля внутри и вне этой области. Появление в рассматриваемой области каких-либо неоднородностей, приводящее к искажению существовавшего ранее поля, также может быть описано граничными условиями. Методика задания граничных условий при решении задач теории потенциала с помощью математического электромоделирования довольно подробно освещена в литературе [11, 12, 14, 20].

Подход к аналоговому электромоделированию, использованный в настоящей работе, не требует знания граничных условий и принудительного их задания. Для решения рассматриваемых задач достаточно обеспечить подобие граничных условий в натуре и на модели. Так, при электромоделировании магнитного и гравитационного аномальных полей, для которых характерны непрерывность во всем однородном пространстве и равенство нулю в бесконечности, на модели необходимо обеспечить однородность и безграничность проводящей среды и равенство нулю в бесконечности потенциала электрического поля постоянного тока. Наличие в магнитном поле какого-либо объекта с магнитной восприимчивостью κ искажит первичное магнитное поле подобно тому, как искажит электрическое поле электрическая неоднородность, геометрически подобная намагниченному объекту и имеющая восприимчивость c_0 , численно равную κ . Именно на этом основана принципиальная возможность определения вектора поляризации с помощью математического электромоделирования.

При решении задач электроразведки методами постоянного тока, вызванной поляризации, естественного поля необходимо

обеспечить подобие граничных условий на границе земля — воздух, на различных электрических неоднородностях и т. д. На модели это подобие достигается использованием проводящего полу-пространства, верхняя граница которого повторяет в масштабе моделирования реальный рельеф, и созданием электрических неоднородностей, отвечающих условиям физического моделирования поля. Таким образом обеспечивается подобие граничных условий при моделировании любого потенциального поля, при этом электрическое поле постоянного тока на модели полностью подобно исследуемому полю.

Каждое геофизическое поле имеет свою определенную специфику, и поэтому рекомендации по их электромоделированию целесообразно рассмотреть раздельно. Для удобства дальнейшего изложения присвоим полям соответствующие индексы: электрическому полю постоянного тока в проводящей среде (без учета составляющей поля, вызванной электрохимическими процессами) — индекс «э», электрическому полю вызванной поляризации — «ВП», естественному электрическому полю — «ЕП», магнитному — «м», гравитационному — «г».

§ 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Электрическое поле, изучаемое при геофизических исследованиях методом постоянного тока, представляет собой сумму двух полей — первичного, созданного питающими электродами в однородной безграничной изотропной проводящей среде, и аномального, вызванного поляризованными электрическими неоднородностями, находящимися в первичном поле. Первичное и аномальное поля в любой точке пространства вне поляризованной неоднородности складываются по принципу суперпозиции. Потенциал и напряженность суммарного поля при этом записываются так:

$$U_0 = U_{00} + U_{\text{а. а.}}; \quad (25)$$

$$\vec{E}_0 = \vec{E}_{00} + \vec{E}_{\text{а. а.}}. \quad (26)$$

Если изучаемый объект находится в безграничной однородной изотропной среде, формулы потенциала и напряженности поля точечного источника тока (первичное поле) имеют вид

$$U_{00} = \frac{\rho}{4\pi} \cdot \frac{I}{R}; \quad (27)$$

$$\vec{E}_{00} = \frac{\rho}{4\pi} \cdot \frac{IR}{R^3}, \quad (28)$$

где ρ — сопротивление вмещающей среды; I — сила тока питающего электрода.

Формулы потенциала и напряженности аномального поля записываются аналогично выражениям (12) и (13):

$$U_{\vartheta,a} = \int_V \frac{\vec{p}_\vartheta \cdot \vec{R}}{R^3} dV; \quad (29)$$

$$\vec{E}_{\vartheta,a} = \frac{1}{4\pi} \int_V \left[\frac{3(\vec{p}_\vartheta \cdot \vec{R})\vec{R}}{R^5} - \frac{\vec{p}_\vartheta}{R^3} \right] dV, \quad (30)$$

где \vec{p}_ϑ — электрический дипольный момент единицы объема поляризованной неоднородности (вектор электрической поляризации), связанный с первичным полем соотношением, аналогичным зависимости (23) [7]:

$$\vec{p}_\vartheta = c_\vartheta \vec{E}_{\vartheta,n} = \frac{c_\vartheta}{1 + Nc_\vartheta} \vec{E}_{\vartheta,0}. \quad (31)$$

В реальных условиях при наличии различных искажающих факторов (проводящие наносы переменной мощности, криволинейная поверхность раздела земля — воздух, анизотропия, проводящие зоны, не являющиеся объектами поисков, и т. д.) электрические поля сильно усложняются и рассчитывать их аналитически становится крайне трудно. В то же время, если при моделировании обеспечить подобие граничных условий, то поле, первичное по отношению к исследуемому объекту, и аномальное поле на модели и в натуре окажутся подобными. При электромоделировании электрического поля постоянного тока используется физическое подобие граничных условий в натуре и на модели. Первичное поле на модели может быть создано также только на основе физического моделирования. Для изучения аномального электрического поля пригодно как физическое моделирование, так и математическое, при котором поляризованный объект заменяется дипольным источником постоянного тока. Поле этих источников связано с исследуемым полем через коэффициент подобия, определяемый соотношениями (19) — (21).

Физическое моделирование

При физическом моделировании изучается, как и в натуре, суммарное поле, определяемое соотношениями (25) и (26). Равенство или пропорциональность суммарных полей в натуре и на модели возможно только в том случае, если коэффициент подобия соответственно равен единице или имеет одно и то же значение как для первичных, так и для аномальных полей. Из методических соображений коэффициент подобия целесообразно выбирать равным единице.

Исходя из формулы (28) получаем выражения для напряженности поля точечного источника в натуре и на модели:

$$\vec{E}_{\vartheta,n} = \frac{\rho_n}{4\pi} \cdot \frac{I_n \vec{R}_n}{R^3_n};$$

$$\vec{E}_{\vartheta,m} = \frac{\rho_m}{4\pi} \cdot \frac{I_m \vec{R}_m}{R^3_m}.$$

Равенство полей $\vec{E}_{\vartheta,0}$ в натуре и на модели достигается при токе на модели

$$I_m = I_n \frac{\rho_n}{\rho_m} \cdot \frac{R^2_m}{R^2_n}. \quad (32)$$

Эту формулу для общности целесообразно переписать в виде

$$I_m = I_n \frac{\rho_n}{\rho_m} \cdot \frac{R^2_m}{R^2_m K_l^2} = I_n \frac{\rho_n}{\rho_m} \cdot \frac{1}{K_l^2}. \quad (33)$$

Ток I_m , рассчитанный по формуле (33), обеспечивает равенство напряженностей электрического поля в натуре и на модели. В реальных условиях измеряется разность потенциалов между измерительными электродами. Очевидно, что при равенстве напряженностей разность потенциалов на модели окажется в K_l раз меньше. Чтобы обеспечить равенство разности потенциалов, в значение силы тока I_m , рассчитываемое по формуле (33), необходимо ввести коэффициент K_l . В результате формула для расчета тока на модели примет вид

$$I_m = I_n \frac{\rho_n}{\rho_m} \cdot \frac{1}{K_l}. \quad (34)$$

При этом вектор электрической поляризации \vec{p}_ϑ (31) оказывается на модели в K_l раз больше, чем в натуре, т. е.

$$\vec{p}_{\vartheta,m} = K_l \vec{p}_{\vartheta,n}.$$

Напряженность аномального поля в натуре и на модели определяется выражением (30), откуда следует, что коэффициент подобия между рассматриваемыми полями при физическом моделировании

$$K''_{\vartheta,\Phi} = \frac{E_{\vartheta,a,n}}{E_{\vartheta,a,m}} = \frac{\rho_{\vartheta,n}}{\rho_{\vartheta,m}} = \frac{1}{K_l}, \quad (35)$$

т. е. напряженность аномального электрического поля на модели при рассматриваемых условиях в K_l раз больше, чем в натуре. Но разность потенциалов между измерительными электродами на модели при этом равна соответствующей величине в натуре, так как база измерительных электродов на модели в K_l раз меньше, чем в натуре.

Таким образом, при токе питающего электрода на модели, рассчитанном по формуле (34), разности потенциалов первичного, аномального и, следовательно, суммарного полей между приемными электродами в натуре и на модели соответственно равны (при обязательном соблюдении геометрического подобия натуры и модели).

Выражения для потенциала первичного поля точечного источника в натуре и на модели имеют вид (27):

$$U_{n,0} = \frac{\rho_n I_n}{4\pi} \cdot \frac{1}{R_n};$$

$$U_{m,0} = \frac{\rho_m I_m}{4\pi} \cdot \frac{1}{R_m}.$$

Ток питающих электродов при моделировании находится из равенства потенциалов в натуре и на модели:

$$I_m = I_n \frac{\rho_n}{\rho_m} \cdot \frac{1}{K_l}, \quad (36)$$

это выражение удовлетворяет формуле (34).

Коэффициент подобия между аномальным потенциалом в натуре и на модели может быть найден из совместного решения уравнений (29), записанных соответственно для натуры и модели:

$$K'_{a,\phi} = \frac{U_{\phi,a,n}}{U_{\phi,a,m}} = \frac{p_{\phi,n} R_n}{p_{\phi,m} R_m}. \quad (37)$$

Но из формулы (35) следует, что $p_{\phi,n}/p_{\phi,m} = 1/K_l$, а из геометрического подобия натуры и модели $R_n/R_m = K_l$, отсюда

$$K_\phi = 1, \quad (38)$$

т. е. значения потенциала аномального поля в натуре и на модели равны.

Таким образом, при физическом моделировании электрического поля ток питающего электрода на модели должен рассчитываться по формуле (34). При этом потенциал и разность потенциалов суммарного поля в натуре равны соответствующим величинам на модели.

Математическое моделирование

Возможность математического моделирования аномального электрического поля следует из сопоставления уравнений (12) и (13) соответственно с (16) и (17), которое показывает, что выражения для потенциала и напряженности аномального электрического поля и поля системы независимых дипольных источников постоянного тока подобны. Вектору поляризации \vec{p}_ϕ можно

сопоставить момент дипольного источника постоянного тока, отнесенный к единице объема, которым при моделировании аппроксимируется электрическая неоднородность:

$$\vec{p}_{\phi,d} = j_V l,$$

где l — плечо диполя.

Коэффициенты подобия между соответствующими компонентами поля при математическом электромоделировании определяются соотношениями

$$K'_\phi = \frac{U_{\phi,a,n}}{U_{\phi,d}} = \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{p_\phi}{j_V l} K_l; \quad (39)$$

$$K''_\phi = \frac{E_{\phi,a,n}}{E_{\phi,d}} = \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{p_\phi}{j_V l}. \quad (40)$$

Так как математическое моделирование аномального поля следует увязать с физическим моделированием первичного поля, коэффициенты подобия K'_ϕ и K''_ϕ должны быть равны единице. Отсюда формулы (39) и (40) могут быть использованы для определения величины $j_V l$ при математическом моделировании аномального потенциала и аномальной напряженности поля:

$$j_V l = \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{p_\phi}{K'_\phi} K_l \quad (K'_\phi = 1);$$

$$j_V l = \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{p_\phi}{K''_\phi} \quad (K''_\phi = 1).$$

Величину p_ϕ находят из соотношения (31)

$$\vec{p}_\phi = c_\phi \vec{E}_{\phi,vi}$$

где $\vec{E}_{\phi,vi}$ — напряженность поля, измеряемая в любой точке тела на модели при значении тока питающего электрода, рассчитанном по формуле (34); c_ϕ — электрическая восприимчивость поляризованного тела.

Эти величины определяются соотношениями

$$c_\phi = \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{\gamma_1}; \quad (41)$$

$$\vec{E}_{\phi,vi} = \frac{\vec{E}_{\phi,0}}{1 + c_\phi N}, \quad (42)$$

где γ_1 и γ_2 — удельная электрическая проводимость соответственно вмещающей среды и исследуемого объекта.

При выполнении указанных условий значение \vec{p}_ϕ , вычисленное по формуле (31), оказывается завышенным в K_l раз. Это обстоятельство не оказывает влияния на измеряемую на модели разность потенциалов, ибо увеличение в K_l раз величины \vec{p}_ϕ компенсируется уменьшением в то же число раз расстояния между

измерительными электродами. Следовательно, разности потенциалов на модели и в натуре оказываются равными.

При моделировании потенциала величина $j_V l$, рассчитанная по формуле (39), завышается в K_l раз. Для приведения потенциала на модели к натурному в эту формулу следует ввести коэффициент $1/K_l$. Отсюда формула для расчета величины $j_V l$ при математическом моделировании потенциала и напряженности аномального электрического поля оказывается одной и той же:

$$j_V l = \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{p_e}{K},$$

где $K = K' = K'' = 1$; p_e — электрическая поляризация неоднородностей под действием внешнего электрического поля постоянного тока в проводящей среде [определенна по формуле (31) в результате физического моделирования первичного поля].

Таким образом, специфика математического моделирования электрического поля постоянного тока заключается в замене поляризованной неоднородности dV_m дипольными источниками тока силой

$$il = j_V l dV_m. \quad (43)$$

Что касается обеспечения подобия граничных условий, расчетов поляризующего тока и других операций, то здесь сохраняются все положения, приведенные в основах физического моделирования электрического поля.

С точки зрения методики моделирования может оказаться неудобным измерять на модели внутреннее поле $\vec{E}_{e,vn}$ и по нему определять вектор поляризации \vec{p}_e . В частности, при решении обратной задачи, когда ищут форму тела, каждой модели присущее свое поле $\vec{E}_{e,vn}$. В этом случае надо иметь в виду следующее. Результат получится один и тот же, если согласно изложенным принципам математического моделирования сначала измерить поле $\vec{E}_{e,vn}$, рассчитать вектор \vec{p}_e , затем найти величины $j_V l$ и il и, наконец, расположить на вмещающей среде модели источники постоянного тока, заменяющие поляризованные неоднородности, или сначала измерить поле $\vec{E}_{e,0}$ в области расположения объекта, аномальное поле которого подлежит моделированию, но в его отсутствие, затем по формуле

$$\vec{p}_{e,0} = c_e \vec{E}_{e,0} \quad (44)$$

рассчитать фиктивный вектор $\vec{p}_{e,0}$ электрической поляризации в точке наблюдения $\vec{E}_{e,0}$ (при $N=0$), далее вычислить

$$j_V l_0 = \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{\vec{p}_{e,0}}{K''_e} (K''_e = 1); \quad (45)$$

$$il_0 = j_V l_0 dV_m \quad (46)$$

и, наконец, поместить источники тока внутри объекта. В обоих случаях поле $\vec{E}_{e,a}$ вне поляризованного объекта окажется одним и тем же. Таким образом, для получения искомого аномального электрического поля равноценно, заменяют ли тело источники постоянного тока с моментами $j_V l$, расположенные во вмещающей среде, или источники $j_V l_0$, расположенные на модели рудного тела. При этом коэффициент N как функция формы поляризованного тела учитывается автоматически.

§ 3. МАГНИТНОЕ И ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЯ

Напряженность аномального магнитного поля, создаваемого намагниченным телом, и напряженность аномального электрического поля, создаваемого поляризованной неоднородностью, согласно формуле (13) имеют вид

$$\vec{T}_a = \frac{1}{4\pi} \int_V \left[\frac{3(\vec{J} \cdot \vec{R}) \vec{R}}{R^5} - \frac{\vec{J}}{R^3} \right] dV; \quad (47)$$

$$\vec{E}_{e,a} = \frac{1}{4\pi} \int_V \left[\frac{3(\vec{p}_e \cdot \vec{R}) \vec{R}}{R^5} - \frac{\vec{p}_e}{R^3} \right] dV, \quad (48)$$

где \vec{J} и \vec{p}_e — соответственно векторы намагниченности и электрической поляризации исследуемого тела.

Напряженность поля совокупности дипольных источников постоянного тока, которыми при моделировании заменяется исследуемое тело, определяется зависимостью (17). Из сопоставления формул (47), (48) и (17) видно, что величинами-аналогами в рассматриваемых полях являются \vec{J} , \vec{p}_e и $\vec{p}_{e,d}$. Подобие уравнений (47) и (48), описывающих магнитное и электрическое поля, может быть использовано для определения наведенной намагниченности в любой точке тела. Подобие уравнений (48) и (17) позволяет найти напряженность аномального магнитного поля в любой точке пространства.

Вектор наведенной намагниченности является функцией напряженности намагничивающего поля, магнитной восприимчивости χ тела и его формы:

$$\vec{J}_i = \chi \vec{T}_{vn}. \quad (49)$$

Магнитная восприимчивость поляризуемого тела связана с магнитной проницаемостью тела (μ_2) и среды (μ_1):

$$\chi = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1}. \quad (50)$$

Первичное поле \vec{T}_0 в пределах исследуемого участка может быть принято однородным. Вектор наведенной намагниченности пропорционален полю внутри тела $\vec{T}_{\text{вн}}$, которое связано с полем \vec{T}_0 соотношением

$$\vec{T}_{\text{вн}} = \frac{\vec{T}_0}{1+N\xi}, \quad (51)$$

т. е. является функцией коэффициента формы тела N , составляющие которого по разным направлениям могут отличаться друг от друга.

Как известно [48], аналогом магнитной проницаемости μ в электрическом поле является удельная электрическая проводимость γ , а математическим аналогом магнитной восприимчивости ξ — величина c_ϑ , определяемая по формуле (41). Вектор электрической поляризации \vec{p}_ϑ находится по формуле (31), а напряженность поля $\vec{E}_{\vartheta, \text{вн}}$ — по формуле (42).

Из сопоставления уравнений (49), (50) и (51) и (31), (41) и (42) очевидно, что математическими аналогами напряженности первичного \vec{T}_0 и внутреннего $\vec{T}_{\text{вн}}$ магнитного поля, а также интенсивности намагничения \vec{J} в электрическом поле являются соответственно величины $\vec{E}_{\vartheta, 0}$, $\vec{E}_{\vartheta, \text{вн}}$ и \vec{p}_ϑ . Эти величины связаны между собой простой зависимостью

$$K_m = \frac{T_0}{E_{\vartheta, 0}} = \frac{T_{\text{вн}}}{E_{\vartheta, \text{вн}}} = \frac{J}{p_\vartheta} \quad (52)$$

при условии, что соблюдено подобие граничных условий и коэффициенты ξ и c_ϑ , от которых зависит восприимчивость магнитной и электрической неоднородностей к соответствующим полям, равны. Подобие граничных условий достигается при геометрическом подобии неоднородностей в натуре и на модели и при безграничности проводящей среды [2, 35, 42, 54].

Поскольку в формулах для внутреннего поля (42) и (51) отсутствует член, характеризующий размеры поляризованного объекта, моделирование можно проводить в любом масштабе без учета масштабных коэффициентов (при обязательном сохранении геометрического подобия натуры и модели). Поле внутри неоднородности при этом не изменится.

При выполнении отмеченных условий в любой точке тела может быть определена величина \vec{p}_ϑ по формуле (31) и найден вектор наведенной намагниченности по формуле (52):

$$\vec{J}_i = K_m \vec{p}_\vartheta.$$

Суммарная намагниченность внутри тела при известном векторе остаточной намагниченности \vec{J}_r выражается формулой

$$\vec{J} = \vec{J}_i + \vec{J}_r. \quad (53)$$

Суммарное магнитное поле в любой точке пространства при выполнении указанных условий (и при $\vec{J}_r = 0$) может быть определено по формуле

$$\vec{T} = \vec{T}_0 + \vec{T}_a = K_m \vec{E}_\vartheta = K_m (\vec{E}_{\vartheta, 0} + \vec{E}_{\vartheta, a}) \quad (54)$$

или измерено на модели при $K_m = 1$.

Напряженности аномального поля \vec{T}_a и \vec{E}_a создаются поляризованными неоднородностями, соответственно магнитными в натуре и электрическими на модели.

При измерении на модели внутреннего поля $\vec{E}_{\vartheta, \text{вн}}$ коэффициент формы тела N , в общем случае не известный, учитывается автоматически и при расчетах не используется. Однако его можно легко определить практически для любой формы тела из формулы

$$N = \frac{\vec{E}_{\vartheta, 0} - \vec{E}_{\vartheta, \text{вн}}}{\vec{E}_{\vartheta, \text{вн}} c_\vartheta}, \quad (55)$$

значения $\vec{E}_{\vartheta, 0}$ и $\vec{E}_{\vartheta, \text{вн}}$ измеряются на модели, а c_ϑ рассчитывается по формуле (41).

Как уже отмечалось, при математическом электромоделировании магнитного поля вектору интенсивности намагничения необходимо сопоставить момент дипольного источника постоянного тока, отнесенный к единице объема, которым аппроксимируется намагниченное тело:

$$\vec{p}_{\vartheta, d} = \frac{\vec{d}_{\vartheta, d}}{V} = j_V \vec{l}.$$

Коэффициент подобия между магнитным полем в натуре и электрическим полем постоянного тока на модели запишется согласно уравнению (21) в виде

$$K''_{\text{маг}} = \frac{T_a}{E_{\vartheta, d}} = \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{J}{j_V l}, \quad (56)$$

откуда

$$\vec{T}_a = K''_{\text{маг}} \vec{E}_{\vartheta, d}.$$

Таким образом, при электромоделировании магнитного поля необходимо в безграничной проводящей среде расположить совокупность дипольных источников постоянного тока, которыми заменяется намагниченное тело. Сила тока каждого источника может быть найдена как произведение $j_V l$ на объем, заменяемый

данным источником тока; величина j_{Vl} определяется по формуле (56).

При решении задач гравиразведки избыточная плотность исследуемых тел задается и задача сводится только к математическому моделированию, которое по своей методике аналогично моделированию магнитного поля, если представить, что объекты намагничены вертикально. На модели измеряется потенциал (при моделировании поля силы тяжести) или вертикальная и горизонтальная составляющие напряженности электрического поля (при моделировании вторых производных гравитационного потенциала).

§ 4. ПОЛЕ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Напряженность аномального поля вызванной поляризации может быть записана в виде

$$\vec{E}_{\text{ВП}} = \frac{1}{4\pi} \int_V \left[\frac{3(\vec{p}_{\text{ВП}} \cdot \vec{R}) \vec{R}}{R^5} - \frac{\vec{p}_{\text{ВП}}}{R^3} \right] dV, \quad (57)$$

где $\vec{p}_{\text{ВП}}$ — электрохимическая поляризация электрической неоднородности под действием внешнего электрического поля постоянного тока в проводящей среде (вызванная поляризация).

По аналогии с теоретическими основами моделирования магнитного поля из сопоставления уравнений (57), (48) и (17) видно, что величинами-аналогами в поле вызванной поляризации и в электрическом являются дипольный момент вызванной поляризации единицы объема $\vec{p}_{\text{ВП}}$ (вектор вызванной поляризации), вектор электрической поляризации \vec{p}_a и момент дипольного источника постоянного тока $p_{a,l}$, отнесенный к единице объема, заменяемого данным источником при моделировании. Подобие уравнений (57) и (48), описывающих поля вызванной поляризации и электрическое, может быть использовано для определения значения и направления вектора вызванной поляризации $\vec{p}_{\text{ВП}}$, а подобие уравнений (57) и (17) позволяет найти напряженность аномального поля вызванной поляризации в любой точке проводящего пространства.

Для поля вызванной поляризации привлекаются одновременно оба вида моделирования: физическое — для учета влияния граничных условий и математическое — для изучения аномального поля. Специфика электромоделирования аномального поля заключается в том, что источники этого поля являются функцией не только избыточной поляризуемости η_i тела, но и его электропроводимости. Кроме того, различие в удельном сопротивлении поляризованного тела и вмещающей среды непосредственно влияет на величину и характер аномального поля вызванной по-

ляризации, так как его источники «нагружены» истинным сопротивлением тела. Таким образом, объект, отличающийся от вмещающей среды по электропроводимости и поляризуемости, может быть охарактеризован двумя векторами поляризации — электрической \vec{p}_a и вызванной $\vec{p}_{\text{ВП}}$. При моделировании должны учитываться оба вида поляризации.

В основу математического моделирования аномального поля вызванной поляризации может быть положено формальное подобие между поляризуемостью среды и повышением ее удельного сопротивления [22], выраженное соотношением

$$\gamma^* = \gamma(1-\eta), \quad (58)$$

где γ — проводимость; η — поляризуемость; γ^* — проводимость среды с учетом поляризуемости.

Следовательно, поляризуемость среды может быть учтена при моделировании заменой действительной проводимости γ на фиктивную γ^* . Рассмотрим теоретические основы трех способов электромоделирования поля вызванной поляризации, основанные на указанном подобии. Первичное поле создается по аналогии с моделированием электрического поля, ток питающих электродов на модели рассчитывается по формуле (34).

Первый способ

На математической основе моделируется только аномальное поле вызванной поляризации, а влияние электропроводимости тела учитывается путем физического моделирования. Вектор вызванной поляризации

$$\vec{p}_{\text{ВП}} = c_{\text{ВП}} \vec{E}_{\text{п}}, \quad (59)$$

где $\vec{E}_{\text{п}}$ — напряженность поля внутри тела с учетом его поляризуемости.

При моделировании поляризуемость учитывается повышением удельного электрического сопротивления тела, которое рассчитывается по формуле (58). В этом случае напряженность $\vec{E}_{\text{п}}$ численно равна \vec{E}_a^* и может быть непосредственно измерена на модели в принципе в любой точке тела.

Поляризационная восприимчивость $c_{\text{ВП}}$ в работе [22] определена для частного случая $\gamma_1 = \gamma_2$ и $\eta_1 \ll \eta_2$ как избыточная поляризуемость — η_i . Там же отмечено, что математическим аналогом восприимчивости $c_{\text{ВП}}$ в поле постоянного тока является величина $(\gamma_2 - \gamma_1)/\gamma_1$, где γ_1 и γ_2 — проводимости однородной вмещающей среды и какой-либо неоднородности. Поскольку интенсивность поля вызванной поляризации может быть связана с фиктивным повышением сопротивления поляризованной неоднород-

ности, величину $c_{\text{вп}}$ можно рассматривать как разность электрических восприимчивостей сред с проводимостями γ^* и γ :

$$c_{\text{вп}} = c^* - c_\gamma = \frac{\gamma_2^* - \gamma_1^*}{\gamma_1^*} - \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{\gamma_1} = \frac{\gamma_2(1 - \gamma_2) - \gamma_1(1 - \gamma_1)}{\gamma_1(1 - \gamma_1)} - \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{\gamma_1} = \frac{\gamma_2(\gamma_1 - \gamma_2)}{\gamma_1(1 - \gamma_1)} = -\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \cdot \frac{\gamma_1}{1 - \gamma_1}. \quad (60)$$

При $\gamma_2 \gg \gamma_1 \approx 0$ выражение (60) принимает вид

$$c_{\text{вп}} = -\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \gamma_{\text{и}}. \quad (61)$$

Если при этом вмещающая среда и неоднородность с избыточной поляризуемостью не различаются по проводимости, т. е. $\gamma_2 = \gamma_1$, то

$$c_{\text{вп}} = -\gamma_{\text{и}}.$$

Это выражение совпадает с приведенным в работе [22] для того же частного случая.

Таким образом, по заданным параметрам γ_1 и γ_2 , η_1 и η_2 определяется величина $c_{\text{вп}}$, а по формуле (59) находится вектор $\vec{r}_{\text{вп}}$ для любой точки тела.

Из сопоставления уравнений (57) и (17) определяется коэффициент подобия между полем вызванной поляризации в натуре и электрическим полем дипольных источников постоянного тока на модели. Он аналогичен соответствующим коэффициентам при математическом электромоделировании магнитного и электрического полей:

$$K''_{\text{вп}} = \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{p_{\text{вп}}}{j_V l}. \quad (62)$$

В связи с тем что повышение сопротивления поляризованной неоднородности является чисто методическим приемом и не отражает природу поля вызванной поляризации, помещать источники постоянного тока с элементарными моментами $j_V \vec{l}$, пропорциональными $\vec{r}_{\text{вп}}$, следует внутри модели исследуемого тела с истинным сопротивлением ρ , а по направлению моменты дипольных источников должны совпадать с полем $\vec{E}_{\text{вп}}$, измеренным внутри тела с фиктивным сопротивлением ρ^* . В формуле (62) величина ρ_m представляет собой сопротивление вмещающей среды модели.

Поле $\vec{E}_{\text{вп}}$ в любой точке пространства может быть определено по измеренному на модели электрическому полю через коэффициент $K_{\text{вп}}$:

$$\vec{E}_{\text{вп}} = K''_{\text{вп}} \vec{E}_\alpha. \quad (63)$$

Так как при моделировании величина $\vec{r}_{\text{вп}}$ оказывается завышенной в K_l раз [при расчете тока питающих электродов по формуле (34)], выражение (63) правильнее записать в виде

$$\Delta U_{\text{вп}} = K''_{\text{вп}} \Delta U_\alpha. \quad (64)$$

В остальном основы моделирования поля вызванной поляризации по первому способу аналогичны основам моделирования магнитного поля.

Второй способ

Поле вызванной поляризации в любой точке пространства вне тела может быть записано в виде

$$\vec{E}_{\text{вп}} = \vec{E}_\alpha^* - \vec{E}_\alpha, \quad (65)$$

где \vec{E}_α^* — напряженность поляризующего поля, являющаяся векторной суммой напряженности поля вызванной поляризации $\vec{E}_{\text{вп}}$ и напряженности электрического (токового) поля \vec{E}_α [22].

Суммарное поле \vec{E}_α^* может быть измерено на модели в присутствии неоднородности с проводимостью γ^* , а поле \vec{E}_α — в присутствии неоднородности с истинной проводимостью γ . Если провести моделирование электрического поля дважды — при поляризации неоднородности с проводимостями γ^* и γ , то по формуле (65) можно найти поле вызванной поляризации в любой точке проводящего пространства. Основным недостатком этого способа является то, что поле вызванной поляризации, а следовательно, и разность полей \vec{E}_α^* и \vec{E}_α малы; при небольшой избыточной поляризуемости тела (10–20%) эта разность оказывается соизмеримой с погрешностью моделирования.

В этом способе по сути реализуется физическое моделирование электрических полей. Для повышения точности моделирования может быть использован третий способ, основанный на математическом моделировании одновременно электрического поля и поля вызванной поляризации.

Третий способ

Предыдущий способ моделирования может быть реализован на базе математического моделирования, если поляризованные электрические неоднородности с проводимостями γ^* и γ заменить совокупностью дипольных источников тока с элементарными моментами $(j_V \vec{l})^*$ и $j_V \vec{l}$, пропорциональными векторам \vec{p}_α^* и \vec{p}_α .

Поле вызванной поляризации, определяемое по формуле (65), создается источниками с моментами

$$\vec{p}_{\text{в.вн}} = \vec{p}_9^* - \vec{p}_9, \quad (66)$$

где $\vec{p}_{\text{в.вн}}$ — дипольный момент суммарной (вызванной и электрической) поляризации единицы объема; \vec{p}_9^* и \vec{p}_9 — векторы электрической поляризации неоднородности с проводимостями соответственно γ^* и γ .

Аналитическое решение уравнения (66) может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{aligned} \vec{p}_{\text{в.вн}} &= \vec{p}_9^* - \vec{p}_9 = c_9^* \vec{E}_{9,\text{вн}}^* - c_9 \vec{E}_{9,\text{вн}} = i \frac{c_9^* E_{9,0x}}{1 + N_x c_9^*} + \\ &+ j \frac{c_9^* E_{9,0y}}{1 + N_y c_9^*} + k \frac{c_9^* E_{9,0z}}{1 + N_z c_9^*} - i \frac{c_9 E_{9,0x}}{1 + N_x c_9} - j \frac{c_9 E_{9,0y}}{1 + N_y c_9} - \\ &- k \frac{c_9 E_{9,0z}}{1 + N_z c_9} = i \left(\frac{c_9^*}{1 + N_x c_9^*} - \frac{c_9}{1 + N_x c_9} \right) E_{9,0x} + \\ &+ j \left(\frac{c_9^*}{1 + N_y c_9^*} - \frac{c_9}{1 + N_y c_9} \right) E_{9,0y} + \\ &+ k \left(\frac{c_9^*}{1 + N_z c_9^*} - \frac{c_9}{1 + N_z c_9} \right) E_{9,0z}, \end{aligned} \quad (67)$$

где $E_{9,0x}$, $E_{9,0y}$ и $E_{9,0z}$ — проекции вектора напряженности первичного электрического поля на оси координат; N_x , N_y и N_z — коэффициенты формы тела по соответствующим осям координат; i , j и k — орты прямоугольной системы координат.

Использование уравнения (67) позволяет теоретически рассчитать векторы $\vec{p}_{\text{в.вн}}$, в то время как другие способы моделирования предполагают двойное измерение поля на модели (при γ^* и γ). Однако при обращении к уравнению (67) необходимо знать коэффициент формы тела N , который, как правило, неизвестен. Наиболее простой путь определения вектора $\vec{p}_{\text{в.вн}}$ — графическое решение уравнения (66).

Вектор $\vec{p}_{\text{в.вн}}$ характеризует источник, момент которого равен векторной сумме электрической и вызванной поляризации. Поэтому любую поляризованную неоднородность, обладающую избыточной проводимостью и поляризуемостью, можно рассматривать как совокупность находящихся во вмещающей среде источников с моментами $\vec{p}_{\text{в.вн}}$. В этом случае поле вызванной поляризации в любой точке проводящего пространства определяется уравнением

$$\vec{E}_{9,\text{вн}} = \frac{1}{4\pi} \int_V \left[\frac{3(\vec{p}_{\text{в.вн}} \cdot \vec{R}) \vec{R}}{R^5} - \frac{\vec{p}_{\text{в.вн}}}{R^3} \right] dV. \quad (68)$$

Из сопоставления уравнений (68) и (17) находится коэффициент пропорциональности $K''_{\text{в.вн}}$ между полем вызванной поляризации в натуре и электрическим полем постоянного тока на модели, источники которого с дипольными моментами $j_V l$, пропорциональными величине $\vec{p}_{\text{в.вн}}$, располагаются во вмещающей среде с удельным сопротивлением ρ_m :

$$K''_{\text{в.вн}} = \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{\vec{p}_{\text{в.вн}}}{j_V l}. \quad (69)$$

В остальном основы моделирования поля вызванной поляризации по третьему способу такие же, как и магнитного поля.

§ 5. ЕСТЕСТВЕННОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Принципиальная возможность выполнить математическое моделирование электрического поля естественно поляризованных проводников следует из формальной аналогии между полем дипольного источника постоянного тока, определяемого формулой (4), и полем равномерно поляризованного шара [46]:

$$U_{\text{ЕП}} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\vec{r} \cdot \vec{d}_{\text{ЕП}}}{r^3}, \quad (70)$$

где $|d_{\text{ЕП}}| = \Delta U_0 a^2 [\gamma_2 / (2\gamma_1 + \gamma_2)]$ — дипольный момент шара; r — расстояние от центра шара до точки наблюдения; a — радиус шара; ΔU_0 — максимальный скачок потенциала на границе шара и вмещающей среды; γ_2 и γ_1 — удельная электропроводимость соответственно шара и вмещающей среды.

Коэффициент подобия между полем электрического диполя и полем естественно поляризованного шара может быть найден из совместного решения уравнений (70) и (8):

$$K_{\text{ЕП}} = \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{\gamma_2}{2\gamma_1 + \gamma_2} \cdot \frac{\Delta U_0 r_{0,m}^2}{(il)_m}. \quad (71)$$

Определив по формуле (71) ток питающего диполя и расположив диполь соответствующим образом в модели, можно в любой точке проводящего пространства определить потенциал, который связан с соответствующим потенциалом в натуре соотношением

$$U_n = K_{\text{ЕП}} U_m.$$

В принципе таким образом можно моделировать естественное электрическое поле поляризованных объектов и произвольной формы, для чего исследуемый объект следует аппроксимировать совокупностью шаров, которые при моделировании заменяются дипольными источниками тока.

Надо отметить, что строгая аналогия между полем поляризованного шара и полем диполя возможна лишь при условии однородной поляризации шара, залегающего в однородной изотроп-

ной проводящей среде. Следовательно, рассмотренная возможность моделирования естественного электрического поля справедлива лишь при этих условиях. В самом деле, появление вблизи рассматриваемого объекта каких-либо электрических неоднородностей или дополнительных поляризованных тел приведет к возникновению в окружающей среде, в том числе и внутри данного объекта, электрических токов, которые будут для него сторонними, т. е. не связанными с его естественной поляризацией. При этом через рассматриваемый объект будет протекать суммарный ток, однако электродный потенциал тела в грубом приближении останется неизменным до тех пор, пока не будет достигнута предельная сила тока реакции, проходящей на границе тела с вмещающей средой [41]. Поэтому можно считать, что при протекании через естественное поляризованное тело сторонних токов электродный потенциал тела остается неизменным. Но сторонние токи обязательно вызовут появление дополнительных зарядов на границе тела. Изменение же поверхностной плотности зарядов равносильно изменению дипольного момента тела, который может быть записан в виде [36]

$$|p| = \int_S \sigma dS,$$

где σ — поверхностная плотность зарядов; S — поверхность поляризованного тела.

Отсюда становится понятно, что при моделировании естественного поля по рассмотренной методике нельзя воспользоваться формулой (70) для расчета дипольного момента шара, так как для произвольных геоэлектрических условий дипольный момент не является стабильной величиной. При аналитических расчетах фактическое изменение дипольного момента учитывается в виде взаимного влияния проводников, однако этот учет сложен и выполним только при расчете полей для тел простой формы [49]. При электромоделировании можно изучать естественное электрическое поле поляризованных проводников, имеющих произвольную форму, при наличии в разрезе любых электрических неоднородностей. Можно предложить два способа моделирования.

Первый способ

На модели в масштабе моделирования набирается геоэлектрическая ситуация, подобная реальной. На границе исследуемого тела задается распределение скачка потенциала. Затем на модели тела измеряется внутреннее электрическое поле $\vec{E}_{\text{вн}}$, которое связано с вектором поляризации $p_{\text{еп}}$ соотношением

$$\vec{p}_{\text{еп}} = c_0 \vec{E}_{\text{вн}}, \quad (72)$$

где c_0 — восприимчивость данного тела к поляризующему электрическому полю, определяемая по формуле (41).

Таким образом могут быть найдены значение и направление вектора поляризации практически в любой точке исследуемого тела. Методически удобнее аппроксимировать тело совокупностью шаров, в пределах которых поляризацию можно считать однородной. Измерив внутреннее поле в центрах шаров, можно рассчитать в них вектор поляризации по формуле (72). Произведение вектора поляризации на объем соответствующего шара дает его дипольный момент, значение и направление которого являются уже функцией всей реальной геоэлектрической обстановки, учтенной при отображении ее на модели.

Поле шара с найденным таким образом вектором дипольного момента моделируется по методике, описанной в начале параграфа. Очевидно, что в силу принципа суперпозиции поле совокупности аппроксимирующих тела шаров совпадает с его полем. Рассмотренный способ моделирования наиболее эффективен в случае, когда сопротивление поляризованного объекта мало отличается от сопротивления вмещающих пород. В этих условиях можно уверенно измерить на модели внутреннее поле, знание которого необходимо для расчета вектора поляризации $p_{\text{еп}}$.

Второй способ

Этот способ целесообразнее применять при изучении поля поляризованного объекта, удельное сопротивление которого много меньше сопротивления вмещающей среды. Такая ситуация встречается на практике наиболее часто. В данном случае довольно сложно измерить внутреннее поле поляризованного объекта, которое очень мало, хотя вектор поляризации остается конечной величиной. Вследствие малого удельного сопротивления объекта нельзя ожидать заметного падения потенциала при протекании через него сторонних токов. В силу стабильности электродных потенциалов должна оставаться стабильной и э. д. с. природного гальванического элемента, в то время как момент тела является функцией всей геоэлектрической обстановки.

Пользуясь электротехнической аналогией, представим такой элемент в виде стабилизатора напряжения, внутреннее сопротивление которого, как известно, равно нулю. Следовательно, для моделирования поля естественно поляризованного объекта надо заменить его двумя заземлениями, между которыми включен стабилизированный источник напряжения с заданным значением э. д. с. Условия физического моделирования поля должны быть при этом выполнены. Таким образом может быть промоделировано поле совокупности естественно поляризованных проводников при наличии в разрезе произвольных электрических неоднородностей.

§ 6. ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛОСКИХ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ

Поле называется плоским, если линии вектора напряженности лежат в параллельных плоскостях, а напряженность и потенциал поля зависят только от двух координат [36]. Такие поля существуют вблизи вытянутых по простиранию тел, плотность источников или вектор поляризации которых не меняется в направлении наибольшего линейного размера. В этом случае тело с произвольной формой сечения может быть аппроксимировано совокупностью бесконечно тонких стержней. Каждый стержень, обладающий избыточной плотностью, заменяется при моделировании однополярной нитью полюсов (однополярным линейным источником), а поляризованный стержень — дипольной нитью полюсов (дипольным линейным источником или плоским диполем).

Формулы для расчета потенциала и напряженности поля совокупности плоских однополярных и дипольных источников, аналогичных соответствующим объемным источникам (10)–(13), записываются в следующем виде [36]:

$$U_{\text{од}} = \frac{1}{2\pi} \int_S \delta \ln \frac{1}{R} dS; \quad (73)$$

$$\vec{E}_{\text{од}} = \frac{1}{2\pi} \int_S \frac{\delta \vec{R}}{R^2} dS; \quad (74)$$

$$U_{\text{д}} = \frac{1}{2\pi} \int_S \frac{\xi \cdot \vec{R}}{R^2} dS; \quad (75)$$

$$\vec{E}_{\text{д}} = \frac{1}{2\pi} \int_S \left[\frac{2(\xi \cdot \vec{R}) \vec{R}}{R^4} - \frac{\vec{\xi}}{R^2} \right] dS. \quad (76)$$

В формулах (73)–(76) величины δdS и ξdS представляют собой соответственно избыточную плотность и момент единицы длины линейного источника. Вектор поляризации $\vec{\xi}$ может быть определен по формуле (23).

Формулы для потенциала и напряженности поля совокупности плоских однополярных и дипольных источников постоянного тока имеют вид

$$U_{\text{9.од}} = \frac{\rho}{2\pi} \int_S j_V \ln \frac{1}{R} dS; \quad (77)$$

$$\vec{E}_{\text{9.од}} = \frac{\rho}{2\pi} \int_S \frac{j_V \vec{R}}{R^2} dS; \quad (78)$$

$$U_{\text{9.д}} = \frac{\rho}{2\pi} \int_S \frac{\vec{p}_{\text{9.д}} \cdot \vec{R}}{R^2} dS; \quad (79)$$

$$\vec{E}_{\text{9.д}} = \frac{\rho}{2\pi} \int_S \left[\frac{2(\vec{p}_{\text{9.д}} \cdot \vec{R}) \vec{R}}{R^4} - \frac{\vec{p}_{\text{9.д}}}{R^2} \right] dS. \quad (80)$$

Из анализа уравнений (73)–(76) и (77)–(80) следует, что коэффициенты подобия между плоским потенциальным полем в натуре и плоским полем электрического постоянного тока на модели, определяемые соотношением (18), совпадают с соответствующими коэффициентами при моделировании объемного поля (19)–(21). Таким образом, теоретические основы математического электромоделирования плоского и объемного потенциальных полей одни и те же. Для определения коэффициентов подобия при физическом моделировании плоского электрического поля могут быть повторены все соображения, относящиеся к объемному полю.

Формулы потенциала и напряженности поля линейного источника постоянного тока имеют вид

$$U_0 = \frac{\rho (I/L)}{2\pi} \ln \frac{R_0}{R}; \quad (81)$$

$$\vec{E}_0 = \frac{\rho (I/L)}{2\pi} \cdot \frac{\vec{R}}{R^2}, \quad (82)$$

где I/L — ток, стекающий с единицы длины линейного электрода; R_0 — расстояние между питающим электродом и электродом сравнения.

Для аномального поля, создаваемого поляризованной неоднородностью бесконечного простирания, имеем

$$U_a = \frac{1}{2\pi} \int_S \frac{\vec{p}_a \cdot \vec{R}}{R^2} dS; \quad (83)$$

$$\vec{E}_a = \frac{1}{2\pi} \int_S \left[\frac{2(\vec{p}_a \cdot \vec{R}) \vec{R}}{R^4} - \frac{\vec{p}_a}{R^2} \right] dS. \quad (84)$$

Переписав уравнения (81)–(84) для натуры и модели и выполнив их анализ, аналогичный приведенному в § 2, найдем, что равенство потенциалов и разности потенциалов в натуре и на

модели обеспечивается, если ток питающего электрода на модели рассчитывать по формуле

$$I_m = \frac{I_n}{L_n} \cdot \frac{\rho_n}{\rho_m}. \quad (85)$$

Отсюда следует, что принципиального различия при моделировании плоского и объемного поля нет и теория моделирования, рассмотренная для общего случая объемного поля, применима и для плоского поля при условии, что первичное поле является плоскопараллельным. Этому условию отвечают в первом приближении нормальное магнитное поле Земли, поле линейных питающих электродов и поле заряженных вытянутых по простиранию хорошо проводящих объектов.

ГЛАВА II

МОДЕЛИРУЮЩАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СКВАЖИННОЙ ГЕОФИЗИКИ МУСГ-1

§ 1. КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ

Принципиальную возможность электрического моделирования геофизических потенциальных полей реализует разработанная ВИТР моделирующая установка для решения двухмерных задач геофизики МУСГ-1 [31]. В качестве вмещающей среды используется электропроводная бумага-основа типа ЭТБ-1, -2 и -3, серийно выпускаемая отечественной промышленностью. Установка МУСГ-1 позволяет моделировать плоские потенциальные поля и предназначена для оперативного решения прямых и обратных задач рудной геофизики. Исследуемое рудное тело (группа тел) может иметь произвольные физические свойства в сечении, любую форму, неоднородную поляризацию. Измерения потенциала или производной потенциала могут проводиться по профилям произвольной формы.

При решении задач электроразведки предусмотрена возможность моделирования негоризонтальной, в общем случае неплоской границы земля — воздух и различных электрических неоднородностей, таких как проводящие наносы переменной мощности, зоны трещиноватости, контакты пород разного сопротивления и т. д. Измерения могут проводиться в нижнем полупространстве, на дневной поверхности, а для магнитного и гравитационного полей и в верхнем полупространстве.

Конструктивно установка выполнена в виде трех блоков (рис. 1): планшета, электронного блока и осциллографа, соединяемых между собой с помощью кабелей. На планшете (рис. 2)

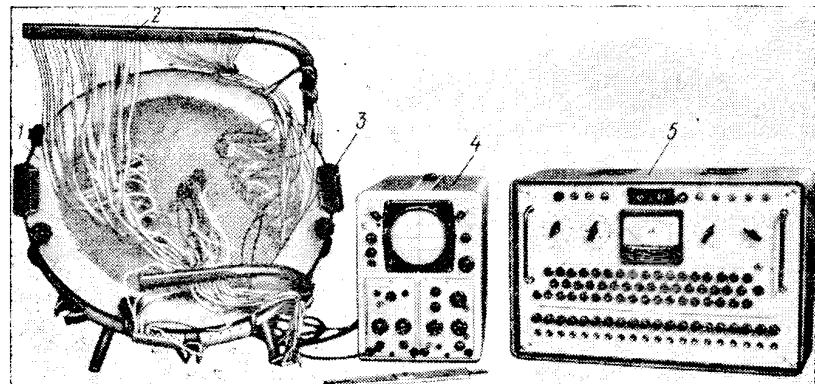


Рис. 1. Общий вид установки МУСГ-1.
1 — планшет; 2 — измерительные профили; 3 — токоподвод источников; 4 — осциллограф; 5 — электронный блок.

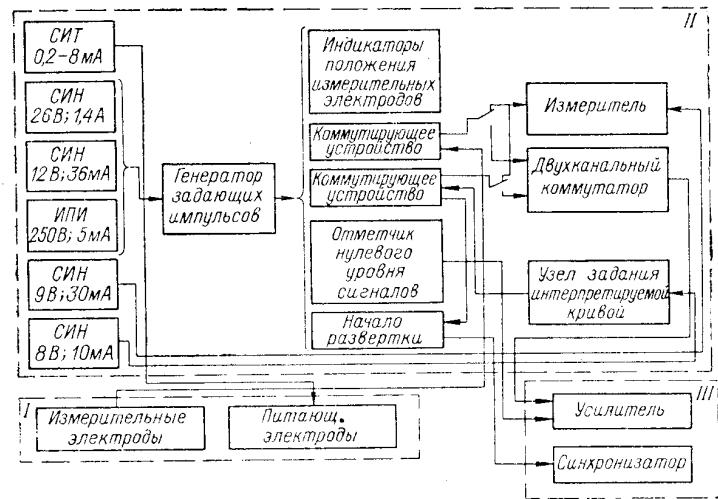


Рис. 2. Блок-схема установки МУСГ-1.
I — планшет; II — электронный блок; III — осциллограф.
СИТ — стабилизированный источник тока; СИН — стабилизированный источник напряжения; ИПИ — источник питания индикаторов.

с помощью питающих электродов создается электрическое поле, которое изучается с помощью измерительных электродов, связанных через коммутирующее устройство либо с измерителем, либо с осциллографом. Значения измеренного в скважинах поля, выраженные в милливольтах, набираются на потенциометрах узла задания интерпретируемой кривой и через соответствующее коммутирующее устройство подаются также либо на измеритель, либо на осциллограф. С помощью двухканального коммутатора на экран электроннолучевой трубы осциллографа подаются одновременно два графика: получаемый в результате моделирования и построенный по данным полевых наблюдений. Горизонтальная развертка луча синхронизирована со скоростью опроса электродов измерительного профиля и потенциометров узла задания кривой. Положение исследуемого объекта фиксируется на планшете расположением питающих электродов.

Технические и эксплуатационные данные

Приведенная относительная погрешность решения контрольных (прямых) задач, %	± 10	
Количество регулируемых стабилизованных источников тока, используемых при создании поля на модели	20	
Диапазон изменения тока в каждом источнике, мА:		
при сопротивлении нагрузки 1 кОм	0,2—8	
при сопротивлении нагрузки 15 кОм	0,2—2	
Рабочие условия:		
температура, °С	+ (10÷35)	
влажность (при 20°C), %	До 80	
Мощность, потребляемая всей установкой при питании переменным током напряжением 220 В, Вт	350	
Блок	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
Планшет	690×140	35
Электронный блок	565×385×350	27
Осциллограф С1-19	500×280×360	21

Измерение и регистрация данных моделирования визуальные — по электроннолучевой трубке осциллографа и по стрелочному прибору.

Установка может работать в полевых условиях, отличается простотой в обслуживании, наглядностью результатов и позволяет быстро интерпретировать полевые наблюдения.

Установка включает в себя следующие части:

- планшет — имитатор безграничной проводящей среды;
- электронный блок для управления процессом моделирования;
- осциллограф постоянного тока С1-19 для визуального наблюдения кривых;
- запасные инструменты и принадлежности (токоподвод источников, гибкие измерительные профили и т. д.).

Конструктивно планшет представляет собой два диска из стеклотекстолита диаметром 620 мм, между которыми помещается резиновая надуваемая воздухом подушка. Между дисками и подушкой находятся два листа электропроводной бу-

маги, соединенные между собой только по окружности (рис. 3). При таком соединении вся внешняя плоскость, находящаяся за пределами одного из них, конформно отображается на противоположный круг, в центре которого оказывается точка «бесконечность» [51, 54]. Краевое влияние при моделировании исключается, и на модели сравнительно небольшого размера можно изучать поле в безграничной плоскости.

Отображение внешней плоскости на внутренний круг происходит по закону

$$a^2 = RR',$$

где R — расстояние от центра круга, на котором проводятся исследования (лицевого), до точки, находящейся за его пределами; R' — расстояние от центра другого круга до отраженной точки, взятое по тому же направлению; a — радиус окружности, по которой соединены два листа электропроводной бумаги.

Лицевой диск планшета (рис. 4) имеет отверстия, расположенные в шахматном порядке по всей его площади на расстоянии $10 \pm 0,2$ мм в каждой строке и в каждом столбце. На другом диске отверстия расположены по диаметру через $10 \pm 0,2$ мм и оцифрованы (в сантиметрах) от центра лицевого диска. В отверстия обеих дисков вставлены латунные гнезда, оканчивающиеся со стороны электропроводной бумаги контактами диаметром 1 мм. Надежность соединения бумаги с контактами достигается плотным поджатием бумаги к дискам благодаря избыточному давлению внутри подушки, которое создается подкачкой воздуха резиновой грушей и контролируется мембранным манометром.

Гибкие измерительные профили представляют собой кронштейны, выполненные из трубы, со свободно свисающими электродами. Кронштейны крепятся к планшету с помощью зубчатой полумуфты. Держатель токоподвода источников по конструкции аналогичен измерительным профилям. Электроды токоподвода являются выходами 20 стабилизованных источников тока.

Электронный блок содержит узлы питания, управления и коммутации, задания интерпретируемого графика наблюдений.

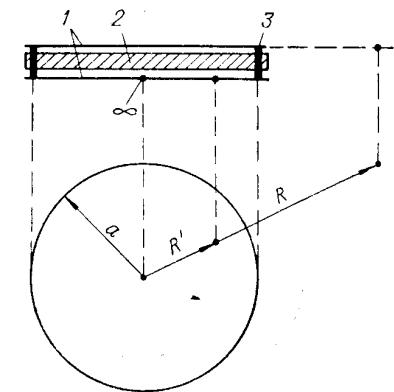


Рис. 3. Модель безграничной проводящей плоскости.

1 — электропроводная бумага; 2 — изолятор; 3 — латунные стержни (электроды неискажающей перегородки).

Для создания на модели электрического поля, подобного исследуемому, все 20 независимых источников тока могут быть включены одновременно.

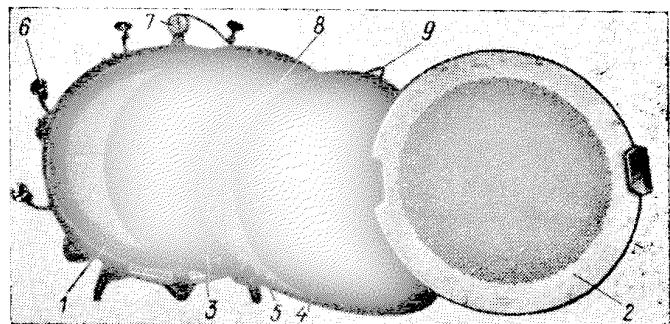


Рис. 4. Планшет.

Диск: 1 — нижний, 2 — верхний (лицевой); лист электропроводной бумаги: 3 — нижний, 4 — верхний; 5 — резиновая подушка; 6 — откидные винты; 7 — манометр; 8 — электроды неинвазионной перегородки; 9 — ниппель для нагнетания воздуха в подушку.

§ 2. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Погрешность моделирования геофизических полей на установке МУСГ-1 зависит от многих факторов, важнейшими из которых являются следующие.

1. Нестабильность источников питания и погрешность измерительного канала.

2. Замена источников аномальных полей, которые на контуре сечения тела в натуре распределены непрерывно, дискретным распределением при моделировании (замена пластов конечной мощности бесконечно тонкими пластами, точнее, линиями полюсов, расположенных в кромках пластов; питающий электрод на модели — след линейного полюса на плоскости моделирования).

3. Замена реальных питающих и измерительных диполей «диполями» с конечным расстоянием между разнополярными электродами (плечо «диполя» на установке МУСГ-1 равно 1 см).

4. Случайное изменение плеча питающих и измерительных диполей (разброс расстояний между парами электродов на планшете).

5. Неоднородность вмещающей среды.

Рассмотрим кратко погрешности, вызываемые перечисленными факторами.

Инструментальная погрешность $\delta_{\text{и}}$ рассчитывается по известным формулам (см. ГОСТ 13600—68. Средства измерений. Классы точности. Общие требования), для установки МУСГ-1 она составляет 2 %.

Погрешность $\delta_{\text{п}}$ от замены пласта с конечной мощностью $2b$ двумя линиями полюсов является функцией расстояния d от полюса до точки наблюдения, при $2b \leq 0,4d$ она не превышает 3 % [27, 35].

Погрешность $\delta_{\text{д}}$ из-за конечного размера питающего или измерительного диполя обусловлена заменой отношения дифференциалов dU/dl отношением конечных величин $\Delta U/\Delta l$. Эта погрешность зависит от структуры поля в окрестности рассматриваемой точки [15] и в общем случае является функцией расстояния от диполя до этой точки и от размера диполя. Диаграмма зависимости $\delta_{\text{д}}$ от расстояния между диполем и точкой измерения носит довольно сложный характер, однако можно принять, что на расстоянии $3l$ (l — плечо диполя) погрешность $\delta_{\text{д}}$ не превышает 5 %.

Погрешность $\delta_{\text{р}}$, вызванная случайным изменением плеча питающих и измерительных диполей, не превышает 2 %, так как расстояние между электродами диполя равно $1 \pm 0,02$ см.

Погрешность $\delta_{\text{с}}$ из-за неоднородности среды при использовании электропроводной бумаги типа ЭТБ-1, -2, -3 может достигать 40—50 %. Это вызывается сильной слоистостью бумаги, что наблюдается, как правило, на отдельных ее участках. Перед началом моделирования из рулона бумаги следует выбрать отрезок, максимальный разброс сопротивлений в котором не превышает 10 %. На практике максимальная погрешность $\delta_{\text{с}}$ составляет около 5 %.

Максимальная суммарная погрешность моделирования

$$\delta = \sqrt{\delta_{\text{и}}^2 + \delta_{\text{п}}^2 + \delta_{\text{д}}^2 + \delta_{\text{р}}^2 + \delta_{\text{с}}^2} = \sqrt{2^2 + 3^2 + 5^2 + 2^2 + 5^2} = \\ = 8,2\%.$$

Приведенная относительная погрешность

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{A - A_{\text{т}}}{A_{\text{max}}} \cdot 100\%,$$

где A , $A_{\text{т}}$ и A_{max} — соответственно измеренное, теоретическое и максимальное значение поля вдоль профиля наблюдения.

Решение контрольных задач на установке МУСГ-1 показало, что погрешность $\delta_{\text{пр}}$ не превышает 10 %.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОЛЕЙ ПО ЗАДАННЫМ ПАРАМЕТРАМ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА

§ 1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Изложенные принципы электромоделирования справедливы для общего случая объемного потенциального поля и позволяют учитывать влияние практически любых искажающих факторов. Разработанная методика моделирования позволяет в принципе сравнительно просто решать сложные геофизические задачи, возникающие при исследовании двухмерных или объемных полей. В настоящее время методика электромоделирования реализована на установке МУСГ-1, предназначенной для решения двухмерных задач.

При геофизических исследованиях около- и межскважинного пространства существует довольно широкий круг задач, которые могут быть достаточно уверенно решены на плоской модели. Такие задачи возникают при изучении электрических полей заряженных вытянутых по простианию хорошо проводящих объектов, если измерения выполняются в плоскости их главного сечения (методы электроразведки постоянного тока, вызванной поляризации, естественного поля); при изучении магнитного и гравитационного аномальных полей тел, вытянутых по простианию, и т. д. Существует много работ, посвященных установлению критерии двухмерности исследуемых объектов. Для практических целей можно рекомендовать следующий подход [35].

Если исследования проводятся в средней части вытянутого по простианию объекта на расстоянии от него, не превышающем $V\sqrt{ml}$ (m — горизонтальная мощность тела; l — размер тела по падению), и если размер тела по простианию $\geq 5V\sqrt{ml}$, то наблюденное поле отличается от двухмерного не более чем на 10%. Вполне понятно, что поле должно быть измерено в плоскости поперечного сечения, взятого в средней части объекта.

Вместе с тем имеется и сравнительно много задач, которые нельзя уверенно отнести к двухмерным. В большом количестве работ рассматривается возможность использовать сравнительно простой аппарат решения двухмерных задач для интерпретации объемных аномальных геофизических полей [10, 13, 19, 26, 35, 59, 63, 64, 65]. Исследования показывают, что задача о количественной связи полей на плоскости и в пространстве чрезвычайно трудна и в принципе не может быть решена при произвольном распределении неоднородностей в пространстве. По-

этому дать надежные рекомендации по интерпретации трехмерных полей на плоской модели невозможно. Однако при творческом подходе к решению реальных геофизических задач в некоторых частных случаях достигаются довольно полезные результаты, которые можно рассматривать как первое приближение к действительности. Рассмотреть здесь все многообразие таких частных случаев не представляется возможным, поэтому ограничимся методикой электромоделирования двухмерных потенциальных геофизических полей.

С помощью электромоделирования на установке МУСГ-1 осуществляется решение уравнения Лапласа на плоскости:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0,$$

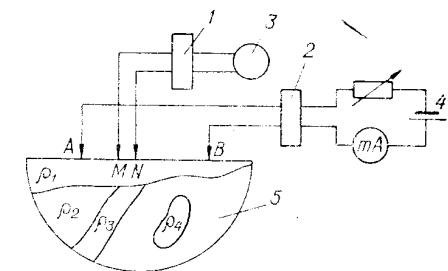
к которому сводится решение перечисленных в главе I плоских геофизических задач. Решение может проводиться на основе как физического (задачи электроразведки), так и математического моделирования.

Физическое моделирование

За основу принимается физическая аналогия в распределении электрического тока в натуре и на модели при соблюдении геометрического и физического подобия элементов раз-

Рис. 5. Принципиальная схема физического моделирования электрического поля.

Коммутатор: 1 — измерительных электродов, 2 — питающих электродов; 3 — измеритель; 4 — источник стабилизированного тока; 5 — модель.



реза. Методика физического моделирования (рис. 5) сводится к следующему. Наибольшее удельное электрическое сопротивление какой-либо неоднородности в разрезе принимается за единицу, сопротивление всех остальных элементов разреза должно быть в соответствующее число раз меньше единицы. Области пониженного сопротивления на модели выполняют в виде накладок из нескольких слоев электропроводной бумаги, которые по форме повторяют в масштабе моделирования сечение

реальных неоднородностей. Сопротивление накладок рассчитывается по формуле [42]:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{13}} + \dots, \quad (86)$$

где R_1 — электрическое сопротивление квадрата бумаги.

Эквипотенциальный проводник (тело, сопротивление которого много меньше сопротивления вмещающих пород) изготавливают из металлической фольги. Все элементы разреза, располагающиеся в пределах лицевой стороны планшета, переносятся на модель без искажения масштаба моделирования. Та часть разреза, которая в выбранном масштабе не умещается на лицевой стороне, конформно отображается на нижний круг бумаги (см. главу II).

Математическое моделирование

При математическом электромоделировании реальные неоднородности (тела) заменяют совокупностью независимых источников тока, которыми заполняют контуры сечений реальных тел. Эти источники создают на модели электрические поля, эквивалентные реальным аномальным полям в натуре. Все многообразие двухмерных тел с сечением произвольной формы можно аппроксимировать совокупностью либо вертикальных пластов, либо горизонтальных круговых цилиндров, которые при моделировании заменяются соответственно системой линейных разнополярных или дипольных источников тока.

В соответствии с установленными в главе I закономерностями и подобием поля поляризованных тел в натуре и электрического поля постоянного тока на модели может быть предложена следующая принципиальная схема математического электромоделирования для аналогий потенциал — градиент и градиент — градиент [35, 54].

Аналогия **потенциал — градиент** имеет место при измерении на модели потенциала электрического поля, аналогичного градиенту изучаемого поля. При этом на модели к измерительному прибору подключаются электроды, расположенные в точке наблюдения и в точке «бесконечность», т. е. в центре нижнего круга электропроводной бумаги. Способ задания поля серией диполей или системой разнополярных источников зависит от выбранной аппроксимации сечений рассматриваемых тел (рис. 6).

Аппроксимация пластами

Магниторазведка, электроразведка, метод вызванной поляризации. Вертикально намагниченный вертикальный пласт, ограниченный на глубину, заменяется системой из двух вертикальных диполей с плечом 1 см, расположенных на одной линии в кромках пласта; моменты

диполей направлены навстречу друг другу. Вертикальный пласт, не ограниченный на глубину, заменяется одним вертикальным диполем, помещенным в верхней кромке пласта.

Гравиразведка (Δg). Вертикальный пласт, ограниченный на глубину, заменяется двумя разнополярными источниками, помещенными на одной вертикальной линии в нижней и в верхней кромках пласта.

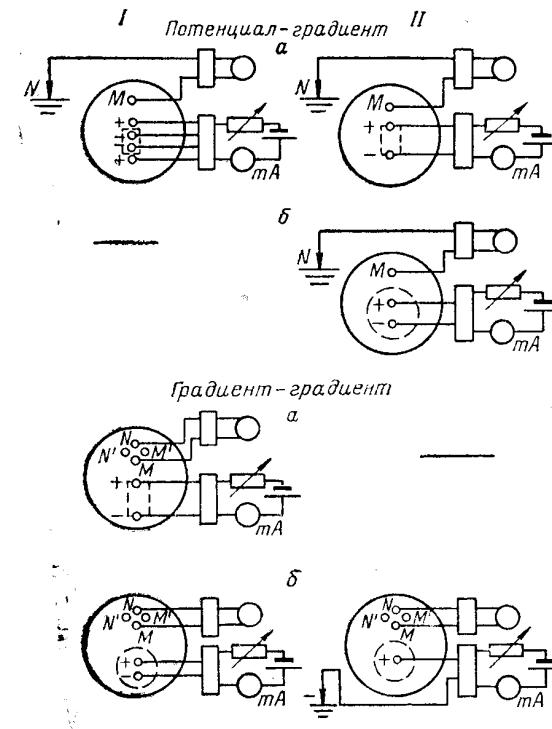


Рис. 6. Принципиальная схема математического электромоделирования потенциальных геофизических полей, создаваемых тонкими вертикальными пластами (а) или горизонтальными круговыми цилиндрами (б).
I — магниторазведка, электроразведка, метод вызванной поляризации; II — гравиразведка (Δg).

Аппроксимация цилиндрами

Магниторазведка, электроразведка, метод вызванной поляризации. Аппроксимация нецелесообразна.

Гравиразведка (Δg). Цилиндр заменяется вертикальным диполем, помещенным в его центр.

Аналогия **градиент — градиент** имеет место при измерении на модели градиента электрического поля, аналогичного градиенту изучаемого поля. На модели к измерительному прибору подключаются

чается измерительный диполь, представляющий собой пару электродов с базой 1 см. И в этом случае в зависимости от выбранной аппроксимации возможны разные способы задания поля.

Аппроксимация пластами

Магниторазведка, электроразведка, метод вызванной поляризации. Пласт, ограниченный на глубину, заменяется двумя разнополярными источниками, расположенными на одной линии в кромках пластиа. Пласт, не ограниченный на глубину, заменяется однополярным источником, расположенным в его верхней кромке.

Гравиразведка (Δg). Аппроксимация невозможна.

Аппроксимация цилиндрами

Магниторазведка, электроразведка, метод вызванной поляризации. Цилиндр заменяется помещенным в его центре диполем.

Гравиразведка (Δg). Цилиндр заменяется однополярным источником тока, расположенным в центре цилиндра.

Момент дипольного источника тока, а также прямая, на которой расположены разнополярные источники тока на модели, должны совпадать по направлению с вектором поляризации того элемента сечения тела, который заменяется данным источником тока. Расчет токов, вводимых через питающие электроды, которыми заменяются цилиндры или пластиа, проводится по формулам:

для пластов

$$il = j_V l \cdot 2b; i = j_V \cdot 2b; \quad (87)$$

для цилиндров

$$il = j_V l S; i = j_V S, \quad (88)$$

где $2b$ — мощность пластиа, см; S — площадь сечения цилиндра, заменяемого диполем, расстояние между электродами которого равно 1 см.

Мощность пластиа $2b$, который можно заменить одной парой разнополярных источников тока, определяется из соотношения [27]:

$$2b \leq 0.4d,$$

где d — расстояние от точки наблюдения до ближайшего питающего электрода.

Следовательно, при аппроксимации рудного тела пластами их мощность можно менять, соблюдая указанное правило.

Масштаб моделирования выбирается так, чтобы наиболее детально отобразить все основные элементы разреза на лицевом диске планшета; при этом учитывается дискретность контактных точек лицевого диска с вмещающей средой. При решении задач электроразведки для сохранения равенства измеряемых разностей потенциалов в натуре и на модели расстояние между измерительными электродами на модели должно быть также выдержано в масштабе моделирования.

Рассмотрим единую схему, по которой определяются векторы поляризации исследуемых объектов, и дадим некоторые практические рекомендации по решению этой задачи.

Определение вектора поляризации

Для решения этой задачи необходимо выполнить следующие операции.

1. Определить сопротивление ρ_2 накладки из электропроводной бумаги, при котором будет обеспечено требуемое значение электрической восприимчивости c_3 :

$$\rho_2 = \frac{\rho_1}{1 + c_3},$$

где ρ_1 — сопротивление вмещающей среды модели.

2. Подготовить среду с удельным электрическим сопротивлением ρ_2 , для чего следует наложить друг на друга несколько слоев электропроводной бумаги, учитывая и тот лист, который имитирует вмещающую среду. Общее сопротивление пачки бумаги определяется по формуле (86).

3. Из приготовленной пачки с сопротивлением ρ_2 (без листа, имитирующего вмещающую среду) вырезать модель сечения исследуемого тела и расположить ее в соответствующем месте вмещающей среды на планшете.

4. Обеспечить на модели геометрическое и физическое подобие остальных элементов разреза (прочих граничных условий).

5. Создать на модели электрическое поле, подобное исследуемому. При решении задач электроразведки при этом необходимо обеспечить и геометрическое подобие в расположении питающих и измерительных электродов в натуре и на модели, а силу тока питающих электродов рассчитать согласно правилам, изложенным в главе I.

При решении задач магниторазведки на модели необходимо создать однородное электрическое поле, связанное с однородным магнитным полем соотношением (52):

$$\vec{T}_0 = K_M \vec{E}_{\alpha 0}.$$

Для этого достаточно в центре нижнего диска планшета включить два ортогональных питающих диполя с разной силой тока. Тогда на лицевой стороне планшета (на верхнем круге электропроводной бумаги) создается однородное электрическое поле, направление которого относительно системы координат планшета зависит от относительного значения силы тока каждого из питающих диполей. Так, при равенстве токов поле направлено под углом 45° к горизонту. На модели нетрудно создать поле, имеющее любое заданное направление.

На модели измеряются две ортогональные составляющие поля и исследуемый вектор строится по результатам измерений. В процессе моделирования нет необходимости рассчитывать и строить векторы, а все расчеты можно проводить по любой составляющей измеренного поля.

Таким образом, на модели создано первичное поле, подобное исследуемому; обеспечено подобие граничных условий (путем обеспечения физического и геометрического подобия разреза в натуре и на модели); составлена модель исследуемого объекта, в любой точке сечения модели внутреннее электрическое поле подобно внутреннему исследуемому полю.

6. Выделить на модели сечения тела области, в пределах которых внутреннее поле меняется не более чем на 10%. Эта операция проводится непосредственным измерением составляющих поля на накладке.

7. Измерить в центре каждой выделенной области две ортогональные составляющие электрического поля и по формуле (23) вычислить векторы электрической поляризации в этих точках:

$$\begin{aligned} p_{3x} &= c_3 E_{\text{вн} \cdot x}; \\ p_{3z} &= c_3 E_{\text{вн} \cdot z}. \end{aligned}$$

Все дальнейшие операции по замене вектора поляризации источниками электрического тока при электромоделировании также целесообразно проводить относительно ортогональных составляющих вектора.

ПРЯМЫЕ ЗАДАЧИ

§ 2. ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

Для решения прямой задачи электроразведки на установке МУСГ-1 в выбранном масштабе подготавливается модель реального разреза по изложенной выше методике. Как уже отмечалось, задачи электроразведки можно решать с помощью физического или математического моделирования. При этом первичное поле удобно задавать по методике физического моделирования. Ток питающих электродов на модели следует рассчитывать по формуле (85). Моделирование аномального электрического поля можно проводить как на физической, так и на математической основе.

Исходными данными для решения рассматриваемой задачи служат: сила тока питающего электрода I , сопротивление вмещающей среды ρ_1 , сопротивление исследуемого тела ρ_2 , фор-

ма сечения тела и его положение в плоскости разреза, наличие в разрезе электрических неоднородностей, поля которых являются помехами.

Физическое моделирование

Для определения аномального электрического поля следует дважды провести измерения на модели разреза: в присутствии объекта, поле которого моделируется, и без него. Разность найденных значений и есть искомое аномальное электрическое поле. Приведем результаты физического моделирования аномального электрического поля цилиндра, поляризованного однородным электрическим полем (рис. 7).

Задача решалась для следующих условий: цилиндр радиусом 41 м находится в однородном изотропном пространстве* в поле двух линейных электродов, расстояние между которыми 470 м; сила тока, стекающего с линейных электродов, равна 5,1 мА/м; сопротивление вмещающей среды $\rho_1 = 390$ Ом·м, цилиндра $\rho_2 = 39$ Ом·м. Расстояние между измерительными электродами 10 м. Моделирование проводилось в масштабе 1 : 1000. В качестве вмещающей среды использовалась электропроводная бумага сопротивлением 390 Ом, а в качестве проводящего цилиндра — накладка сопротивлением 39 Ом. Ток питающих электродов на модели составил 5,1 мА.

Результаты моделирования аномального электрического поля цилиндра сравнивались с теоретическими значениями [36]:

$$\Delta U_a = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} E_0 r^2 \frac{h^2 - x^2}{(h^2 + x^2)^2} (MN)_n,$$

где $(MN)_n$ — расстояние между измерительными электродами в натуре; E_0 — напряженность первичного электрического поля в области, занимаемой цилиндром, при отсутствии последнего.

Отметим, что физическое моделирование аномального поля дает надежные результаты только в том случае, если суммарное поле отличается от первичного не менее чем на 5%. В противном случае амплитуда аномального поля сравнима с погрешностью измерения первичного поля.

Математическое моделирование

При математическом моделировании аномального электрического поля может быть выделено два этапа. Поскольку подход к решению задач на этих этапах различен, целесообразно рассмотреть их отдельно.

* При решении аналогичной задачи для случая полупространства следует иметь в виду, что нормальное электрическое поле удвоится, а аномальное уменьшится. Это замечание относится и к решению задач метода вызванной поляризации.

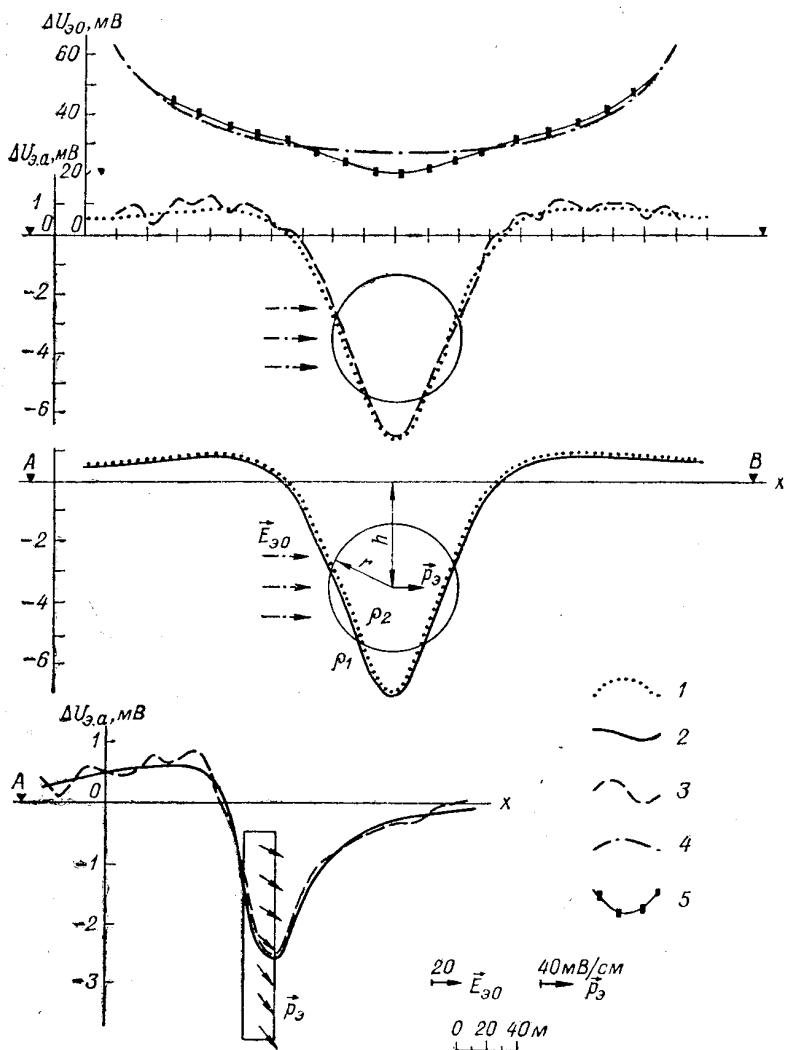


Рис. 7. Результаты электромоделирования аномального электрического поля цилиндра и пласта.

Кривые: 1 — теоретические, 2 — полученные при математическом электромоделировании, 3 — при физическом электромоделировании, 4 — в однородной среде, 5 — в присутствии проводящего цилиндра (ΔU_3).

Определение значения и направления вектора \vec{p}_3 электрической поляризации внутри тела

Операции при этом выполняются в следующей очередности.

1. Подготавливается модель реального разреза (включая и модель объекта, поле которого подлежит изучению) по методике физического моделирования.
2. Сила тока питающих электродов рассчитывается по формуле (85).
3. На накладке, имитирующей сечение исследуемого объекта, измеряется внутреннее поле, выделяются области, в пределах которых поле меняется не более чем на 10%.
4. По формуле (41) рассчитывается электрическая восприимчивость

$$c_3 = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2}.$$

5. В центре каждой выделенной области измеряется поле $\vec{E}_{\text{вн}}$ и по формуле (31) определяется вектор поляризации $\vec{p}_3 = c_3 \vec{E}_{\text{вн}}$. Внутри каждой области поляризация в дальнейшем принимается однородной.

6. Накладка, имитирующая поляризованное тело, удаляется с модели, и источник первичного поля выключается.

Определение аномального электрического поля поляризованного тела

1. Модель реального разреза сохраняется за исключением накладки, имитирующей сечение поляризованного тела.

2. На лицевой диске планшета накладывается калька, на которой в масштабе моделирования изображено сечение поляризованного тела. Тело аппроксимируется пластами или цилиндрами и заменяется источниками тока, моменты которых по направлению совпадают с векторами поляризации каждой выделенной области.

3. По найденным значениям вектора \vec{p}_3 определяется объемная плотность дипольных источников тока с помощью номограммы (зависимость $j_{\text{вл}}$ от p_3) или по формуле (40):

$$j_{\text{вл}} = \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{p_3}{K''_3}.$$

Номограмма зависимости $j_{\text{вл}}$ от p_3 (рис. 8) рассчитывается по формуле (40) и строится на билогарифмическом бланке. При работе с номограммой на оси абсцисс надо отложить значение p_3 , а с оси ординат снять значение $j_{\text{вл}}$. При этом соответствующий

индекс K''_a , является коэффициентом пропорциональности между аномальным электрическим полем в натуре и на модели.

4. По формулам (87) и (88) рассчитывается ток питающих электродов, заменяющих пласти или цилиндры, которыми аппроксимировано рудное тело. При расчете тока диполя, заменяющего цилиндр, можно воспользоваться номограммой зависимости силы тока i от радиуса цилиндра r при фиксированных зна-

полностью совпадает с соответствующей кривой в натуре (расчетанной теоретически)*.

Результаты физического и математического моделирования аномального электрического поля пласта, поляризованного полем линейного электрода (см. рис. 7), показывают, что в области высоких значений аномального поля совпадение кривых, полученных при этих видах моделирования, вполне удовлетворительное;

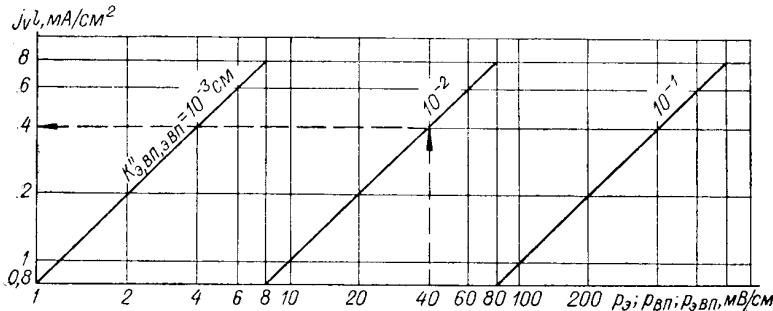


Рис. 8. Номограмма зависимости $j_V l$ от p_a , $p_BП$, $p_e BП$.

$$K''_a, BП, э ВП = \frac{1}{\rho_p} \cdot \frac{p_a (p_BП: p_e BП)}{j_V l}; \rho_p = 1000 \text{ Ом.}$$

Пример. Найти значение $j_V l$, пропорциональное $p_a = 39,6 \text{ мВ/см}$ при $\rho_m = 390 \text{ Ом}$.

$$\text{Решение. } j_V l = (j_V l)_{\text{ном}} \frac{\rho_p}{\rho_m} = 4 \cdot \frac{1000}{390} = 10,2 \text{ мА/см}^2;$$

$$j_V l = \begin{cases} 10,2 \text{ мА/см}^2 & \text{при } K''_a = 10^{-2} \text{ см}, \\ 1,02 \text{ мА/см}^2 & \text{при } K''_a = 10^{-1} \text{ см,} \end{cases}$$

чениях объемной плотности дипольных источников тока (рис. 9).

5. В точках наблюдения на модели измеряется электрическое поле, которое связано с аналогичным полем в натуре соотношением (18):

$$\Delta U_{\text{э, а(н)}} = K''_a \Delta U_{\text{э, а(м)}}.$$

На рис. 7 приведены результаты математического моделирования аномального электрического поля цилиндра, полученные для тех же условий, что и при физическом моделировании.

Внутреннее поле цилиндра, измеренное на накладке, равно 4,4 мВ/см; для данного соотношения сопротивлений цилиндра и вмещающей среды электрическая воспринимчивость $c_a = 9$. Отсюда электрическая поляризация в любой точке цилиндра равна 39,5 мВ/см. Объемная плотность дипольных источников тока, определенная по номограмме (см. рис. 8), равна 0,1 мА/см² при $K''_a = 1$ см, а сила тока дипольного источника, которым заменяется поляризованный цилиндр, 5,3 мА.

Полученная в результате математического моделирования кривая аномального электрического поля цилиндра практически

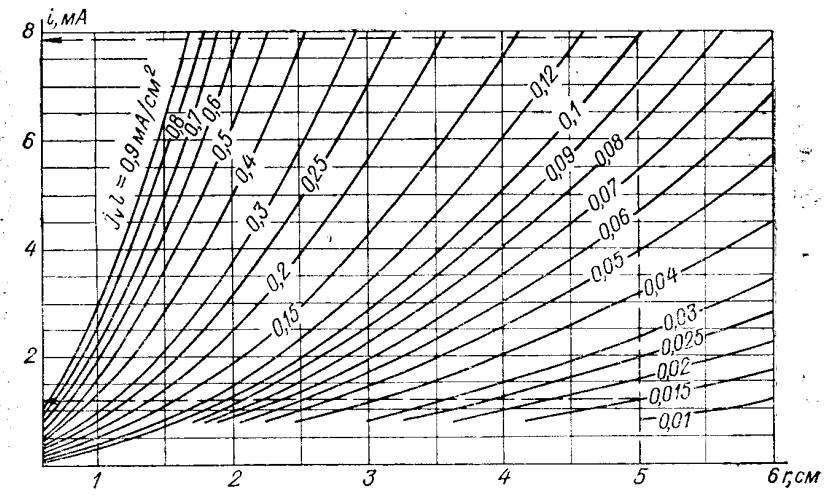


Рис. 9. Номограмма зависимости силы тока питающих электродов от радиуса цилиндра при фиксированных значениях объемной плотности дипольных источников тока.

в области же относительно слабого аномального поля предпочтение следует отдать математическому моделированию (возможность выбора масштабного коэффициента позволяет моделировать весьма слабые аномальные поля).

Отметим следующее: если выбрать коэффициент пропорциональности $K_a = 1$ и наряду с аномальным полем задать нормальное, то в точке наблюдения на модели будет измеряться суммарное электрическое поле, равное полю в натуре.

* При решении двухмерных задач электроразведки единица удельного электрического сопротивления вмещающей среды — ом-метр, а силу тока линейных источников — ампер на метр. При моделировании таких задач на электропроводной бумаге ее удельное электрическое сопротивление удобнее выражать в омах, а силу тока питающих электродов — в амперах. Получающееся при этом некоторое несоответствие единиц измеряемого на модели и фактического поля устраняется соответствующим коэффициентом пропорциональности K_a , который выражается в сантиметрах.

§ 3. МАГНИТОРАЗВЕДКА

Решение прямой задачи магниторазведки, как и электроразведки, может быть разбито на два этапа.

Определение вектора намагниченности внутри рудного тела

Исходные данные: вектор нормального магнитного поля \vec{T}_0 , магнитная восприимчивость тела χ , форма сечения тела и его положение в разрезе, вектор остаточной намагниченности \vec{J}_r , наличие в разрезе магнитных неоднородностей, поля которых являются помехами.

Операции при решении поставленной задачи выполняются в следующем порядке.

1. На модели создается однородное электрическое поле, вектор $\vec{E}_{\text{э}0}$ которого совпадает по направлению с вектором \vec{T}_0 заданного нормального магнитного поля. Для этого в центре нижнего круга электропроводной бумаги располагают два ортогональных питающих диполя; регулируя ток в них, можно получить на верхнем круге искомый вектор $\vec{E}_{\text{э}0}$. При этом электрическое поле на модели и магнитное поле в натуре оказываются связаны соотношением (52):

$$\vec{T}_0 = K_m \vec{E}_{\text{э}0}.$$

2. По формуле (41) определяют удельное сопротивление ρ_2 накладки, которая заменяет при электромоделировании реальное магнитное тело:

$$\rho_2 = \frac{\rho_1}{1 + c_3},$$

где ρ_1 — известное удельное сопротивление вмещающей среды; $c_3 = \chi$.

3. Подготавливают среду с удельным сопротивлением ρ_2 по методике, изложенной выше.

4. Из подготовленной среды с сопротивлением ρ_2 вырезают модель сечения тела, которую располагают в виде накладки на лицевом круге электропроводной бумаги.

5. Сечение тела (накладка) разбивается на области, в пределах которых внутреннее поле меняется не более чем на 10% (эти области выделяют по непосредственным измерениям внутреннего поля на накладке).

6. В центре каждой выделенной области измеряется поле $\vec{E}_{\text{э ви}}$ и по формуле (31) вычисляется значение $\rho_{\text{э}} = c_3 \vec{E}_{\text{э ви}}$.

7. По формуле (52) находится значение наведенной намагниченности

$$\vec{J}_i = K_m \vec{\rho}_{\text{э}}.$$

8. Вектор результирующей намагниченности внутри каждой выделенной области вычисляется по формуле [27]:

$$\vec{J} = \vec{J}_i + \vec{J}_r,$$

при этом в каждой области намагниченность принимается однородной.

9. Накладку, имитирующую рудное тело, удаляют с модели и выключают источники однородного электрического поля.

Определение аномального поля намагниченного тела

Порядок операций должен быть следующий.

1. На верхний диск планшета накладывается калька, на которой изображен в масштабе моделирования рассматриваемый разрез. Намагниченное тело аппроксимируется пластами или цилиндрами и заменяется источниками тока, моменты которых совпадают по направлению с векторами намагниченности внутри каждой выделенной области.

2. По найденным значениям вектора J определяется объемная плотность дипольных источников тока по nomogramme зависимости $j_V l$ от J (рис. 10) или по формуле (56):

$$j_V l = \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{J}{K_{\text{маг}}}.$$

3. По формулам (87) и (88) рассчитывается ток питающих электродов, которыми заменяются пласти или цилиндры.

4. В точках наблюдения на модели измеряется электрическое поле, которое связано с искомым аномальным магнитным полем соотношением (56):

$$\vec{T}_{\text{а}} = K''_{\text{маг}} \vec{E}_{\text{э}0}.$$

Необходимо обратить внимание на следующее обстоятельство. Обычно при геофизических исследованиях магнитное поле характеризуют через его напряженность \vec{T} (измеряется в эрстедах или гаммах), хотя правильнее было бы характеризовать его через магнитную индукцию \vec{B} (измеряется в гауссах). Соотношение, связывающее величины \vec{B} , \vec{T} и \vec{E} в системе СГС,дается уравнением [37, 58]:

$$\vec{T} = \vec{B} - 4\pi \vec{J}.$$

В вакууме между полями \vec{B} и \vec{T} существенного различия нет, так как в этом случае намагниченность \vec{J} равна нулю. В силу того что в системе

СГС размерность обоих полей совпадает, измерение вспомогательного поля \vec{T} вместо основного \vec{B} не имеет принципиального значения.

Это положение не распространяется на систему единиц СИ, в которой соотношение полей дается следующим уравнением [58]:

$$\vec{T} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J},$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м.

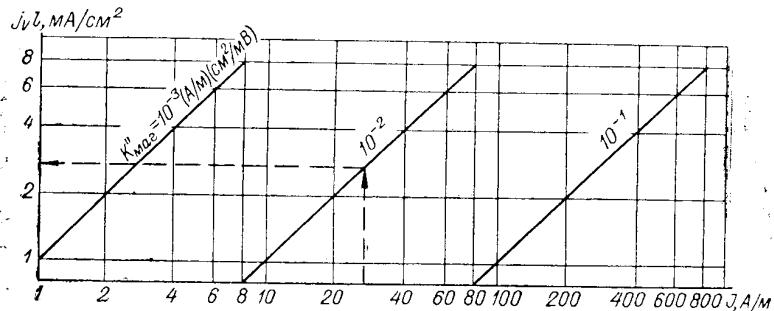


Рис. 10. Номограмма зависимости $j_V l$ от J .

$$j_V l = \frac{1}{\rho_p} \cdot \frac{J}{K''_{\text{маг}}}; \quad \rho_p = 1000 \text{ Ом.}$$

Пример. Найти значение $j_V l$, пропорциональное $J=27,2$ А/м при $\rho_m=390$ Ом.

$$\text{Решение. } j_V l = (j_V l)_{\text{ном}} \frac{\rho_p}{\rho_m} = 2,7 \cdot \frac{1000}{390} = 7 \text{ мА/см}^2;$$

$$j_V l = \begin{cases} 7 \text{ мА/см}^2 \text{ при } K''_{\text{маг}} = 10^{-2}; \\ 0,7 \text{ мА/см}^2 \text{ при } K''_{\text{маг}} = 10^{-1}; \\ 0,07 \text{ мА/см}^2 \text{ при } K''_{\text{маг}} = 1. \end{cases}$$

В этом случае даже для вакуума векторы \vec{B} и \vec{T} имеют разную размерность и их численные значения отличаются друг от друга. В системе СИ поля \vec{T} и \vec{B} измеряются соответственно в амперах на метр (А/м) и теслах (Т). Вектор наведенной намагниченности находится по формуле $\vec{J} = [\chi/(1+N\chi)]\vec{T}_0$, где $\vec{T}_0 = \vec{B}/\mu_0$ [(Вб/м)² (А·м/Вб) = А/м]. Отсюда единица намагниченности J в системе СИ будет также ампер на метр. Таким образом, строго говоря, магнитное поле следует измерять в теслах, а намагниченность при моделировании определять в амперах на метр. Однако это неудобно. Для инженерных расчетов магнитное поле целесообразнее описывать через его напряженность, выраженную в единицах системы СИ, т. е. в амперах на метр (табл. 2).

Рассмотрим результаты электромоделирования аномального магнитного поля цилиндрической залежи, намагниченной однородным магнитным полем (рис. 11, а).

Напряженность поля $T_0 = 40$ А/м. Сечение залежи представляет собой эллипс с полуосами $c=50$ м, $b=20$ м. Магнитная восприимчивость залежи 1,0 СИ. Теоретическое значение наведенной намагниченности 26,4 А/м (горизонтальная составляющая 12,4 А/м, вертикальная 23,3 А/м).

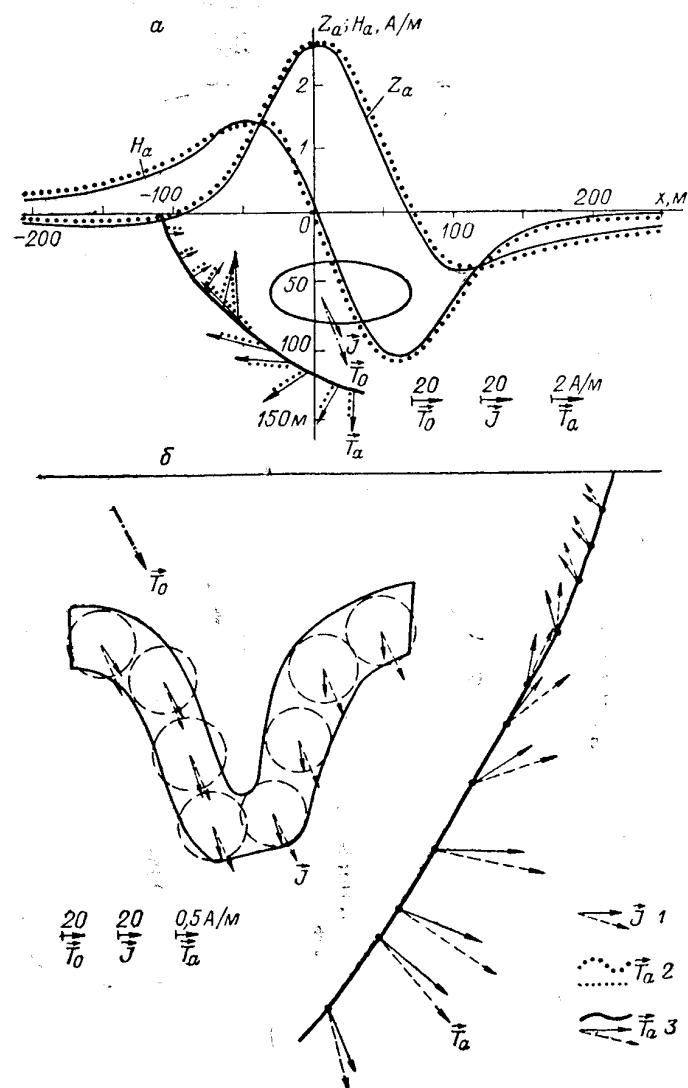


Рис. 11. Результаты электромоделирования аномального магнитного поля горизонтального цилиндра (а) и двухмерного объекта с произвольной формой сечения (б).

I — векторы наведенной намагниченности; кривые Z_a и векторы \vec{T}_a : 1 — полученные при теоретических расчетах, 2 — при электромоделировании. Штриховой линией показаны векторы в предположении однородной намагниченности тела.

Основные магнитные величины и соотношение их единиц

Величина	СГС		СИ		Соотношение
	Название	Обозначение	Название	Обозначение	
Магнитный поток	максвелл	Мкс	вебер	Вб	$1\text{Мкс} = 10^{-8}\text{Вб}$
Магнитная индукция \vec{B}	гаусс	Гс	tesла	Т	$1\text{Гс} = 10^{-4}\text{T}$
Напряженность магнитного поля \vec{T}	эрстед	Э	ампер на метр	А/м	$1\mathcal{E} = 10^3/(4\pi)\text{A/m} = 79,6 \text{ A/m}$
Интенсивность намагниченности (намагниченность) \vec{J}	—	—	то же	А/м	$1\text{СГС} = 10^3\text{A/m}$
Магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума)	—	—	генри на метр	Г/м	$1\text{СГС} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Г/м} = 12,56 \cdot 10^{-7} \text{ Г/м}$
Магнитная восприимчивость	—	—	—	—	$1\text{СГС} = 4\pi \text{ СИ} = 12,56 \text{ СИ}$

Моделирование проводилось в масштабе 1:1000. Удельное электрическое сопротивление вмещающей среды 390 Ом; сопротивление накладки, определяемое по формуле (41), 195 Ом. Напряженность однородного электрического поля на модели была выбрана равной 1 мВ/см. Коэффициент пропорциональности между первичными магнитным и электрическим полем (соответственно в натуре и на модели) равен 40 (А/м) : (мВ/см). Напряженность внутреннего электрического поля на модели составляет 0,68 мВ/см, вектор электрической поляризации 0,68 мВ/см, интенсивность наведенной намагниченности 27,2 А/м. Таким образом, погрешность в определении наведенной намагниченности в данном случае не превышает 3%.

Величина $j_V l$, определяемая по nomogramme зависимости $j_V l$ от J (интенсивности наведенной намагниченности), равна 7 мА/см² при $K_{\text{маг}} = 1 \cdot 10^{-2}$ (А/м) (см²/мВ). Ток питающих электродов, которыми заменяется цилиндрическая залежь при моделировании аномального поля, составляет 7 мА (при аппроксимации залежи серией пластов, длинные оси которых вытянуты по направлению намагниченности, одна пара электродов заменяет пласт мощностью 1 см).

Теоретическая и экспериментальная кривые вертикальной составляющей аномального магнитного поля, а также соответствующие векторы вдоль оси криволинейной скважины в этом случае совпадают практически полностью.

Рассмотрим распределение вектора наведенной намагниченности в теле, имеющем в сечении форму синклинальной складки; тело намагниченено однородным полем, направленным под углом 65° к горизонту. Рисунок показывает, как меняется вектор наведенной намагниченности (по значению и направлению) в разных частях тела. Сопоставление диаграмм векторов аномального маг-

нитного поля, построенных вдоль криволинейной скважины в предположении однородной и реальной намагниченности тела, также подтверждает, что при решении прямых задач для тел с произвольной формой сечения необходимо учитывать неоднородность их намагниченности.

§ 4. МЕТОД ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

В главе I рассмотрены теоретические основы трех способов электрического моделирования поля вызванной поляризации. Методические рекомендации по решению прямых задач соответствующими способами также целесообразно рассмотреть раздельно. По аналогии с задачами магнито- и электроразведки задачи метода вызванной поляризации также целесообразно решать в два этапа: определение значения и направления вектора вызванной поляризации внутри рудного тела и определение аномального поля поляризованного тела.

Исходными данными для решения прямой задачи служат: сила тока I питающего электрода, сопротивление и поляризуемость вмещающей среды (ρ_1, η_1) и исследуемого тела (ρ_2, η_2), форма сечения тела и его положение в разрезе, наличие в разрезе электрических неоднородностей, поля которых являются помехами.

Первый способ

Определение вектора $\vec{p}_{\text{вн}}$ вызванной поляризации

Операции выполняются в следующем порядке.

1. Определяется эквивалентное сопротивление вмещающей среды и тела как функция заданной поляризуемости по формуле (58):

$$\rho^* = \frac{\rho}{1 - \eta}.$$

2. Подготавливается модель исследуемого геоэлектрического разреза, в котором все действительные сопротивления ρ заменены эквивалентными сопротивлениями ρ^* .

3. Сила тока питающих электродов на модели рассчитывается по формуле (85):

$$I_m = \frac{I_h}{L_h} \cdot \frac{\rho_h}{\rho_m}.$$

4. На накладке, имитирующей сечение исследуемого тела, измеряется внутреннее поле $\vec{E}_{\text{вн}}^* = \vec{E}_{\text{п}}$ и выделяются области, в пределах которых поле меняется не более чем на 10%.

5. Рассчитывается значение поляризационной восприимчивости $c_{\text{ВП}}$ по формуле (60):

$$c_{\text{ВП}} = -\frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{\gamma_{\text{и}}}{1 - \gamma_{\text{и}}}.$$

6. В центре каждой выделенной области измеряется поле $\vec{E}_{\text{а.вп}}^*$ и по формуле (59) рассчитывается значение дипольного момента вызванной поляризации единицы объема $p_{\text{ВП}}$:

$$\vec{p}_{\text{ВП}} = c_{\text{ВП}} \vec{E}_{\text{а.вп}}^*.$$

7. Накладка с сопротивлением ρ_2^* , имитирующая поляризованное тело, заменяется накладкой с сопротивлением ρ_2 .

8. Источник первичного поля выключается.

Определение аномального поля вызванной поляризации

Методика моделирования аномального поля вызванной поляризации в основном такая же, как и аномального электрического поля. Отличие состоит в том, что в данном случае источники тока располагаются на накладке, имитирующей сечениерудного тела и имеющей сопротивление ρ_2 . Порядок моделирования следующий.

1. Тело аппроксимируется пластами или цилиндрами, которые заменяются источниками тока, соответствующим образом расположенным на модели; моменты источников должны совпадать по направлению с вектором $\vec{p}_{\text{ВП}}$ в каждой выделенной области тела.

2. Объемная плотность дипольных источников тока j_{Vl} определяется по nomogramme зависимости j_{Vl} от $p_{\text{ВП}}$ (см. рис. 8) или рассчитывается по формуле (62):

$$j_{Vl} = \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{p_{\text{ВП}}}{K''_{\text{ВП}}},$$

где ρ_m — сопротивление вмещающей среды модели.

3. По формулам (87) и (88) или по nomogramme зависимости тока i от радиуса r цилиндра (см. рис. 9) определяется ток питающих электродов.

4. В точках наблюдения измеряется электрическое поле, которое связано с искомым аномальным полем вызванной поляризации соотношением (64):

$$\Delta U_{\text{ВП}} = K''_{\text{ВП}} \Delta U_a.$$

Рассмотрим результаты моделирования поля вызванной поляризации над цилиндрической залежью, поляризованной однородным электрическим полем (рис. 12, a).

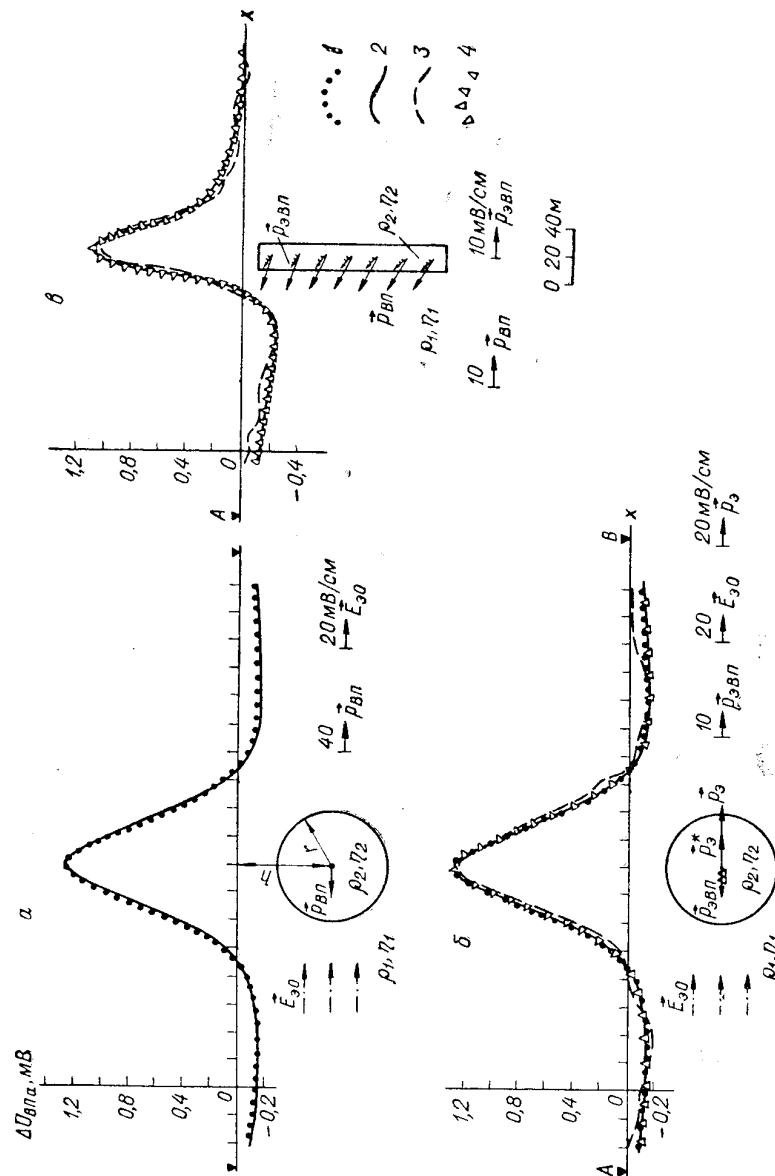


Рис. 12. Результаты электромоделирования аномального поля вызванной поляризации цилиндра и пластины.
Кривые: 1 — теоретические, 2—4 — полученные различными способами электромоделирования (2 — первым, 3 — вторым, 4 — третьим),

Задача решалась для следующих условий: цилиндр радиусом 41 м находится в однородном изотропном пространстве в поле двух линейных электродов, расстояние между которыми 470 м. Сила тока, стекающего с электродов, равна 5,1 мА/м; вмещающая среда предполагается неполяризующейся ($\eta_1=0$) с удельным сопротивлением $\rho_1=390$ Ом·м. Удельное сопротивление залежи $\rho_2=39$ Ом·м, а ее поляризуемость $\eta_2=50\%$. Расстояние между измерительными электродами 10 м.

Моделирование проводилось в масштабе 1 : 1000. Сопротивление вмещающей среды при моделировании $\rho_{m1}=390$ Ом; накладки, имитирующей цилиндр с действительным удельным сопротивлением, $\rho_{m2}=39$ Ом; накладки, имитирующей цилиндр с фиктивным сопротивлением, $\rho_{m2}^*=78$ Ом. Ток питающих электродов на модели, определяемый по формуле (85), равен 5,1 мА.

Результаты моделирования сравнивались с значениями поля, рассчитанными теоретически [22]:

$$\Delta U_a = \left(\frac{\rho_1^* - \rho_2^*}{\rho_1^* + \rho_2^*} - \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \right) E_0 r^2 \frac{h^2 - x^2}{(h^2 + x^2)^2} (MN)_u.$$

Внутреннее поле цилиндра, измеренное на накладке с сопротивлением $\rho_2^*=78$ Ом, составляет 8,1 мВ/см, поляризационная восприимчивость для данных условий $c_{VP}=-5,0$. Отсюда значение вектора вызванной поляризации \vec{p}_{VP} в любой точке цилиндра равно $-40,5$ мВ/см, т. е. вектор \vec{p}_{VP} направлен навстречу поляризующему полю. Объемная плотность дипольных источников тока $j_V l$, определяемая по nomogramme (см. рис. 8), равна $0,104$ мА/см² при $K_{VP}=1$ см. Сила тока дипольного источника (расположен на накладке $\rho=39$ Ом), заменяющего действие источников вызванной поляризации, составляет 5,5 мА.

Полученная в результате моделирования кривая ΔU_{VP} практически полностью совпадает с соответствующей кривой, рассчитанной теоретически для условий натуры.

Второй способ

Этот способ определения аномального поля вызванной поляризации в общих чертах аналогичен физическому моделированию аномального электрического поля. Порядок операций при решении задачи следующий.

1. Подготавливается модель исследуемого геоэлектрического разреза по методике, изложенной в §1 настоящей главы.
2. Ток питающих электродов рассчитывается по формуле (85).
3. В точках наблюдения измеряется электрическое поле \vec{E}_o .
4. На модели разреза все действительные сопротивления заменяются эквивалентными сопротивлениями ρ^* , определяемыми по формуле (58).
5. При том же токе питающих электродов в точках наблюдения измеряется поле \vec{E}_o^* .
6. Аномальное поле вызванной поляризации находится по формуле (65):

$$\vec{E}_{VIIa} = \vec{E}_o^* - \vec{E}_o.$$

Результаты моделирования поля вызванной поляризации для цилиндра и пласти (см. рис. 12) показывают, что измеренные и теоретически рассчитанные кривые близко совпадают. Выполненная работа подтверждает принципиальную пригодность установки МУСГ-1 и рассмотренной выше методики моделирования для изучения аномальных полей вызванной поляризации двухмерных объектов. Как недостаток данного способа следует отметить, что значения аномального поля вызванной поляризации часто бывают сравнимы с погрешностью измерения суммарного электрического поля.

Третий способ

Отличие этого способа от первого заключается в том, что на первом этапе решения ищут вектор суммарной поляризации тела \vec{p}_{VP} , обусловленной электрической и вызванной поляризацией одновременно, а на втором этапе — аномальное поле совокупности заменяющих поляризованное тело источников тока, расположенных на вмещающей среде, моменты которых пропорциональны вектору \vec{p}_{VP} .

Определение вектора суммарной поляризации внутри тела

1. По методике, рассмотренной для первого способа моделирования, определяется вектор \vec{p}_a^* в каждой выделенной области.
2. Эквивалентные сопротивления на модели разреза заменяются действительными и по той же методике определяется вектор \vec{p}_a .
3. По формуле (66) вычисляется вектор суммарной поляризации \vec{p}_{VP} , который в пределах каждой выделенной области принимается постоянным:

$$\vec{p}_{VP} = \vec{p}_a^* - \vec{p}_a.$$

4. С модели разреза удаляется накладка, имитирующая поляризующее тело, и выключается источник первичного поля.

Определение аномального поля поляризованного тела

1. Сечение тела аппроксимируется пластами или цилиндрами и заменяется соответственно разнополярными или дипольными источниками тока, моменты которых совпадают по направлению с векторами \vec{p}_{VP} в каждой выделенной области.

2. Объемная плотность дипольных источников тока определяется по номограмме зависимости $j_{\text{вл}}$ от $\rho_{\text{вп}}$ (см. рис. 8) или рассчитывается по формуле (69):

$$j_{\text{вл}} = \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{\rho_{\text{вп}}}{K''_{\text{вп}}}.$$

3. По формулам (87) и (88) рассчитывается ток, пропускаемый через питающие электроды, которыми заменено поляризованное тело при моделировании.

4. В точках наблюдения на модели измеряется электрическое поле, которое связано с искомым аномальным полем вызванной поляризации соотношением (64):

$$\Delta U_{\text{впа}} = K''_{\text{вп}} \Delta U_{\rho}.$$

Результаты моделирования (для тех же условий, что и в первом способе) сводятся к следующему (см. рис. 12, б).

Внутреннее поле $E_{\text{вн}}$ цилиндра на накладке с сопротивлением $\rho_2^* = 78 \Omega$ составляет 8,1 мВ/см, электрическая восприимчивость $c_2^* = 4$, вектор $\vec{p}_2^* = c_2^* E_{\text{вн}}^* = 32,4 \text{ мВ/см}$; на накладке с сопротивлением $\rho_2 = 39 \Omega$ внутреннее поле $\vec{E}_{\text{вн}} = 4,4 \text{ мВ/см}$, $c_2 = 9$; $\vec{p}_2 = 39,6 \text{ мВ/см}$. Отсюда $\vec{p}_{\text{вп}} = \vec{p}_2^* - \vec{p}_2 = 32,4 - 39,6 = -7,2 \text{ мВ/см}$, т. е. вектор $\vec{p}_{\text{вп}}$, так же как и $\vec{p}_{\text{вп}}$, направлен навстречу поляризующему полю. По номограмме зависимости $j_{\text{вл}}$ от $\rho_{\text{вп}}$ (см. рис. 8) находим $j_{\text{вл}} = 0,0185 \text{ mA/cm}^2$ при $K_{\text{вп}} = 1$. Сила тока дипольного источника, которым заменяется при моделировании поляризованный цилиндр, равна $i_l = j_{\text{вл}} S = 0,0185 \cdot 3,14 \cdot 4,1^2 = 0,98 \text{ mA}$.

Совпадение кривых, полученных теоретически и экспериментально, практически полное.

Результаты моделирования тремя способами аномального поля вызванной поляризации пласта ($\rho_1 = 390 \Omega \cdot \text{м}$, $\rho_2 = 98 \Omega \cdot \text{м}$, $\eta_2 = 50\%$), поляризованного полем одного линейного электрода (см. рис. 12, в), показывают, что первый и третий способы дают практически одинаковые кривые, а второй способ менее надежен.

При анализе рассмотренных способов моделирования аномальных полей можно сделать вывод, что все они обладают теми или иными достоинствами и недостатками и что их эффективность зависит от исходных условий задачи. Выбор того или иного способа определяется конкретной решаемой задачей.

Следует отметить, что если коэффициент $K_{\text{вп}}$ выбрать равным единице и включить источник тока первичного поля, то в точках наблюдения на модели будет измеряться суммарное поле, равное полю пропускания в методе вызванной поляризации.

§ 5. МЕТОД ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Поляризованный пласт можно представить как поле системы из двух заземлений: линейного, расположенного в голове пласта и заряженного отрицательно, и пластинчатого, расположенного

в плоскости пластины и заряженного положительно [46]. Такой системой можно заменить и тело произвольной формы. Для моделирования естественного поля надо из фольги или электропроводной бумаги соответствующего сопротивления вырезать модель сечения исследуемого тела. Принимая, что катодная область природного гальванического элемента сосредоточена на незначительной части поверхности поляризованного объекта, перпендикулярной к вектору поляризации (при решении прямой задачи его направление предполагается известным), на модели сечения выделяют и вырезают эту область. Получившиеся при этом обе части модели сечения следует расположить в виде накладок на вмещающей среде моделирующей установки МУСГ-1 с небольшим смещением относительно друг друга в направлении вектора поляризации. Как показывает опыт, смещение можно выбирать произвольно, исходя из удобства моделирования, так как его изменение мало сказывается на модели поля. К накладкам, имитирующим катодную и анодную области поляризованного тела, подключается источник стабилизированного напряжения, которое должно быть равно разности скачков потенциала между анодной и катодной частями поляризованного тела в натуре.

Рассмотрим примеры моделирования естественного электрического поля, сопоставим их результаты с теоретическими расчетами и данными моделирования в электролитическом баке. Методика моделирования для пластрообразных тел проверялась на результатах физического моделирования естественного поля [16] вертикальной алюминиевой пластины размерами $35 \times 25 \times 0,2 \text{ см}$, верхняя часть которой была покрыта слоем меди. В работе Я. Грунторада [16] указывается, что разность электродных потенциалов такой биметаллической пластины составляет 500 мВ. Следует отметить, что это справедливо для меди и алюминия, находящихся в воде и не замкнутых друг с другом. Однако биметаллическая пластина из этих двух металлов имеет разность скачков потенциала только 90 мВ, и поэтому э. д. с. тела в опытах Я. Грунторада следует считать равной 90 мВ.

Сравнивались результаты физического и математического моделирования для одиночной пластины и для группы из четырех пластин, расположенных на разных глубинах относительно дневной поверхности. При моделировании сечение пластины заменялось накладками из фольги, причем, как и при физическом моделировании в баке, верхняя часть тела имела размер по падению 1 см, а нижняя 24 см. Зазор между накладками составлял 0,5 см, разность потенциалов между ними 90 мВ. Полученные при моделировании на установке МУСГ-1 кривые потенциала хорошо совпадают с результатами физического моделирования в баке (рис. 13).

В процессе электромоделирования было установлено, что с увеличением глубины залегания поляризованного объекта при фиксированной разности скачков потенциала токи, протекающие

через данный объект, несколько возрастают. Отсюда можно ожидать, что при равных физико-химических условиях глубокозалегающие тела должны подвергаться более сильному электрохимическому воздействию, чем приповерхностные.

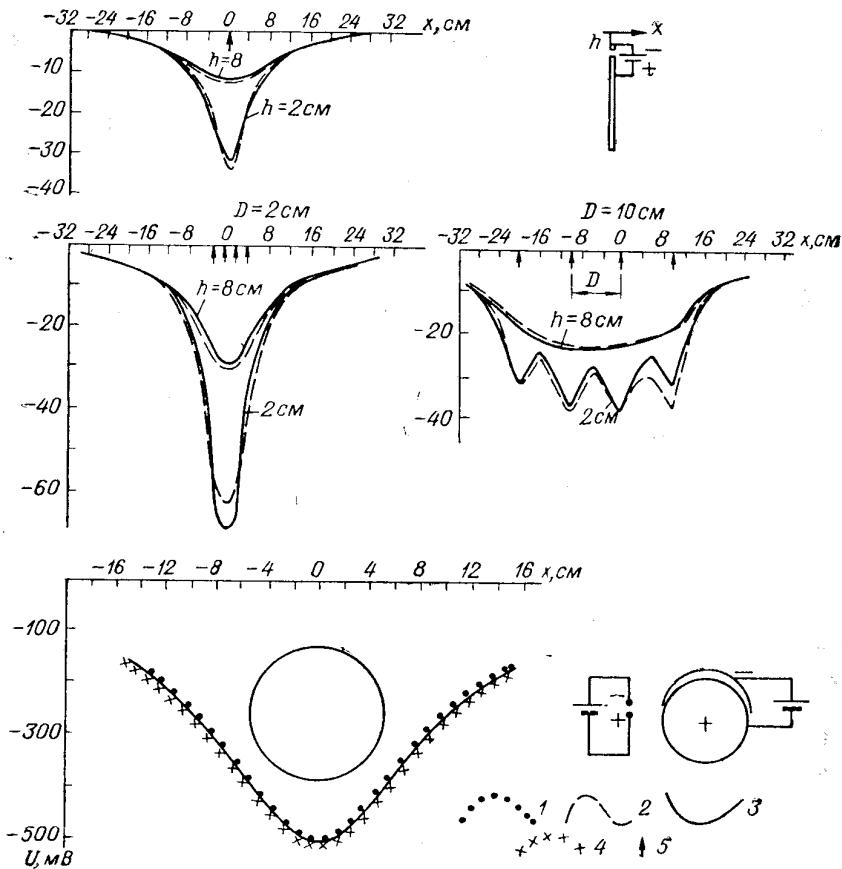


Рис. 13. Результаты электромоделирования естественного электрического поля одиночной пластины, совокупности пластин и цилиндра.

Кривые потенциала естественного поля: 1 — теоретическая, 2 — при физическом моделировании в электролитическом баке (по Я. Грунтораду), 3, 4 — при электромоделировании (3 — тело заменено двумя накладками из фольги, 4 — цилиндр заменен дипольным источником тока); 5 — проекции верхних кромок пластин на дневную поверхность.

Аналогичная методика электромоделирования была применена и при изучении естественного электрического поля совокупности четырех пластин. Каждая пластина заменялась двумя накладками из фольги, между которыми включались стабилизированные источники напряжения. Разность потенциалов в каждом

источнике устанавливалась 90 мВ. В этом случае через каждое тело протекает ток, значительно меньший, чем при одиночном теле, но разность потенциалов в каждом источнике остается неизменной, т. е. выполняется подобие между природным гальваническим элементом в природе (рудным телом) и его аналогом на модели. Подобие обеспечивается тем, что в цепь включается источник напряжения, имеющий малое внутреннее сопротивление, который соединяет накоротко верхнюю и нижнюю части тела во внутренней электрической цепи. Протекающие через тело стоячие токи суперпозирируют с током источника, но не создают на его полюсах дополнительной разности потенциалов. Решение рассматриваемой задачи на установке МУСГ-1 также хорошо согласуется с результатами физического моделирования в баке.

Отмеченная суперпозиция токов позволяет сделать вывод, что не исключен вариант, когда ток через поляризованное тело может полностью отсутствовать или даже иметь обратное направление, несмотря на наличие стабильных потенциалопределяющих факторов и, следовательно, стабильную э. д. с. природного гальванического элемента. Возможность при электромоделировании непосредственно измерять токи, протекающие через поляризованное тело в реальных геолого-геофизических условиях, представляет интерес для изучения электрических полей спонтанных электрохимических процессов.

Математическое электромоделирование естественного электрического поля позволяет решать прямые задачи — воспроизводить естественные поля двухмерных тел произвольного сечения при наличии любых электрических неоднородностей в разрезе и определять токи, протекающие через сечения рассматриваемых тел. С его помощью возможно решать и обратные задачи — находить в первом приближении местоположение, размеры и форму сечения поляризованных тел при наличии в разрезе любых известных искажающих факторов.

Возможность моделирования естественного поля объектов, имеющих сечение изометрической формы, рассматривалась на примере моделирования поля поляризованного цилиндра. Модель сечения цилиндра представлялась в виде дуги и диска из фольги, между которыми включался источник напряжения, равного удвоенному скачку потенциала на границе цилиндра с вмещающей средой.

Рассматривалась цилиндрическая залежь радиусом 50 м с центром на глубине 100 м от дневной поверхности. Максимальный скачок потенциала 500 мВ. Удельное сопротивление вмещающей среды и залежи составляет соответственно 1000 и 10 Ом·м.

Теоретические значения потенциала на дневной поверхности рассчитывались по формуле (70) с коэффициентом 2, учитывающим влияние дневной поверхности. При математическом моделировании сила тока дипольного источника, которым заменяется поляризованный цилиндр, вычислялась по формуле (71).

Кривые потенциала естественного поля, полученные в процессе математического моделирования при замене цилиндра двумя накладками из фольги и рассчитанные теоретически, хорошо совпадают.

§ 6. ГРАВИРАЗВЕДКА

Исходными данными являются: распределение избыточной плотности в теле, форма его сечения и положение в разрезе, наличие гравитационных неоднородностей.

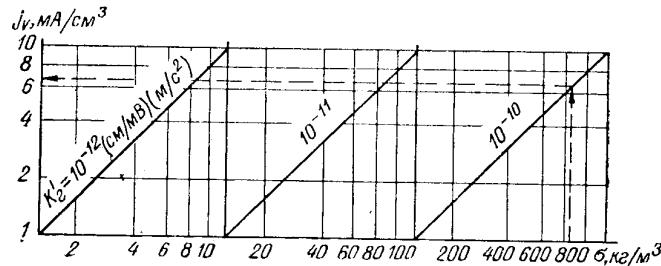


Рис. 14. Номограмма зависимости j_V от σ .
 $\rho=1000$ Ом; $K_l=1$ м/см.

Операции при определении аномального гравитационного поля выполняются в следующем порядке.

1. На лицевой диске планшета накладывают кальку, на которой изображен в масштабе моделирования рассматриваемый разрез. Тело аппроксимируется вертикальными пластами или цилиндрами, которые заменяются на модели источниками тока.

2. На основании заданной избыточной плотности σ определяется объемная плотность однополярных источников тока по номограмме зависимости j_V от σ (рис. 14) или по формуле

$$j_V = \frac{4\pi}{\rho_m} \cdot \frac{f_3}{K'_r} K_l,$$

где $f = 6,67 \cdot 10^{-11}$ Н·м²/кг² [м³/(кг·с²)] — гравитационная постоянная.

3. По формулам (87) и (88) рассчитывается ток питающих электродов, которыми заменяются пластины или цилиндры.

4. В точках наблюдения на модели измеряется потенциал электрического поля, которое связано с искомым аномальным гравитационным полем соотношением

$$\Delta g = K'_r E_{\vartheta z}.$$

Приведем результаты электромоделирования аномального гравитационного поля пласта (рис. 15).

Размеры пласта 40×10 м, глубина верхней кромки от профиля наблюдения 55 м. Избыточная плотность тела $\sigma = 860$ кг/м³ (0,86 г/см³). Моделирование выполнялось в масштабе 1 : 1000. Удельное электрическое сопротивление среды $\rho_m = 5700$ Ом. Объемная плотность однополярных источников тока при $K'_r = 10^{-9}$ (см/мВ) (м/с²)

$$j_V = \frac{12.56}{5700} \cdot \frac{66.7 \cdot 10^{-12} \cdot 860}{10^{-9}} \cdot \frac{10}{1} = 1,256 \text{ mA/cm}^3.$$

При моделировании пласт заменялся двумя разнополярными источниками тока, расположенными в его верхней и нижней кромках. Сила тока (если мощность пласта 2 $b=1$)

$$i = j_V \cdot 2b = 1,256 \text{ mA.}$$

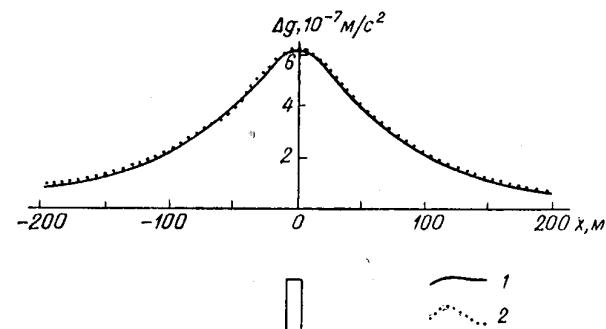


Рис. 15. Результаты электромоделирования гравитационного поля пласта.

Кривые Δg : 1 — теоретическая, 2 — экспериментальная.

Значения поля Δg в системах СГС и СИ связаны соотношением

$$1 \text{ мгаль} = 10^{-5} \text{ м/с}^2.$$

Совпадение экспериментальной и теоретической кривых хорошее, погрешность не более 5%.

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ

§ 7. СХЕМА РЕШЕНИЯ

Решение обратных задач сводится к нахождению источников аномального поля по его значениям, измеренным на профиле. Критерием точности решения обратной задачи методом подбора является совпадение кривых (векторов), наблюденных в поле и

полученных в результате интерпретации. Естественно, что такая постановка задачи некорректна и, чтобы сузить область неоднозначности решения, необходимо привлечь дополнительную информацию по изучаемому разрезу. Для решения обратной задачи на установке МУСГ-1 надо на основе имеющейся информации составить рабочую гипотезу о геолого-геофизической характеристике разреза. Сущность решения заключается в проверке этой гипотезы (в частности, представлений о форме, элементах залегания и положении в разрезе объекта, вызвавшего аномалию) и во внесении корректировки при несоответствии поля на модели наблюденному полю в натуре. Решение задачи можно считать законченным, если кривые (векторы) поля, наблюденные при съемке и полученные на модели, совпадают с заданной точностью и полученный результат согласуется с геологическими представлениями о разрезе и с данными других геофизических методов.

По сути дела, в предлагаемой схеме интерпретации реализуется такая связь человека с машиной, при которой по заданной программе (набранному на модели геолого-геофизическому разрезу и первичному полю) отыскивается решение, сравниваемое затем с результатами полевых наблюдений. Если совпадение неудовлетворительное, интерпретатор вносит соответствующие корректировки в разрез (программу) и решение повторяется. Таким образом, решение обратной задачи сводится к многократному решению прямой задачи.

Поскольку подход к решению обратных задач для разных методов геофизики в общих чертах аналогичен, может быть составлена общая схема решения.

Исходными данными для решения обратной задачи являются: значения поля, полученные при съемке; координаты точек наблюдения; общие представления о геолого-геофизических характеристиках разреза. Решение обратной задачи, так же как и прямой, может быть разделено на два этапа: определение вектора поляризации внутри рудного тела, подбор сечения тела. При физическом моделировании методика решения обратной и прямой задач полностью совпадает. Поэтому рассмотрим только методику решения обратных задач математическим моделированием.

Определение вектора поляризации внутри рудного тела

1. На модели создается предполагаемый разрез по методике, изложенной в соответствующих разделах решения прямой задачи. Подготавливается несколько наиболее вероятных вариантов сечения тела.

2. Для разных вариантов сечения по уже известной методике определяются векторы поляризации.

Подбор сечения тела

1. По найденным векторам поляризации с помощью номограмм зависимости j_{vl} от r или J (см. рис. 8, 10) определяется объемная плотность дипольных источников тока и коэффициент подобия K'' .

2. Значения наблюдаемых при съемке полей переводятся в милливолты путем деления их на коэффициент K'' .

3. Полученные таким образом значения набираются на потенциометрах узла задания наблюдаемой кривой. Порядковый номер потенциометра соответствует порядковому номеру точки на профиле.

4. На планшете установки накладывают кальку, на которой нанесен в масштабе моделирования предполагаемый разрез, и вдоль профиля наблюдения набирают на планшете электроды измерительного профиля.

5. Предполагаемое сечение тела заменяется электродами, ток которых в зависимости от способа аппроксимации рассчитывается по формулам (87) или (88).

6. На экране осциллографа сравниваются кривые, поступающие с узла задания интерпретируемой кривой и с планшета установки.

7. В случае совпадения кривых решение считается законченным. Если кривые расходятся, то берут следующий вариант разреза и все операции повторяют. Перебор вариантов идет до тех пор, пока кривые не совпадут с заданной точностью при условии, что найденное решение не противоречит геологическому представлению о разрезе.

§ 8. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОМПЛЕКСНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ НА УСТАНОВКЕ МУСГ-1

Неоднозначность решения обратной задачи уменьшается, если интерпретацию вести одновременно по данным нескольких методов, использующих разные физические поля, аномалии которых вызваны одними и теми же объектами. В этом случае источники аномальных полей имеют разную физическую природу, но пространственно локализуются в пределах одного и того же объекта. Если используются независимые друг от друга аномальные поля, то совпадение подобранных тел резко повышает вероятность правильности интерпретации.

Возможность комплексной интерпретации на установке МУСГ-1 вытекает из формального подобия решения задач для разных методов геофизики. В самом деле, если аномалии разных физических полей вызываются одним и тем же объектом, то на моделирующей установке можно по очереди создать аналоги соответствующих первичных полей, определить векторы поляризации и заменить рассматриваемый объект совокупностью соот-

ветствующим образом распределенных дипольных или разнополярных источников тока. Электрическое поле каждой совокупности источников тока на модели будет подобно соответствующему полю в натуре. Если полученное решение удовлетворяет одним наблюденным полям, но не удовлетворяет другим, внесение поправок в рабочую гипотезу продолжается до тех пор, пока поле на модели не воспроизведет все рассматриваемые поля в натуре. Такой подход может быть успешным только при условии, что все поля вызываются одним и тем же объектом. Комплексная интерпретация требует осторожного и разумного обращения с фактическим материалом, зато при правильном ее применении значительно повышаются точность и однозначность решения геологических задач.

ГЛАВА IV

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА УСТАНОВКЕ МУСГ-1

Описанная выше методика интерпретации естественных и искусственных потенциальных полей была опробована при решении конкретных производственных задач рудной геофизики в различных районах Советского Союза.

§ 1. САЯНСКИЙ ЖЕЛЕЗОРУДНЫЙ БАССЕЙН

Моделирующая установка МУСГ-1 использовалась для анализа материалов скважинной геофизики по железорудным месторождениям Красноярского края [8]. Приведем результаты интерпретации данных скважинной магниторазведки по Абаканскому и Ирбинскому месторождениям [5, 8].

Абаканское месторождение

Это месторождение находится в северо-западной части Западного Саяна. Простирание пород на площади рудного поля северо-восточное, падение на восток под углом 70—80°, иногда почти вертикальное. Тектоническое строение рудного поля очень сложное. Широко развита как дорудная тектоника, оказавшая решающее влияние на формирование магнетитовых тел, так и послерудная, в результате которой рудное поле было разбито на множество блоков разных размеров. Рудные тела залегают в породах верхнемонокской свиты нижнего кембрия и тяготеют к пач-

кам алевролитов, песчаников и известняков внутри толщи агломератовых туфов. На месторождении выделяются две такие осадочные пачки, заключающие Главную рудную залежь и Третье рудное тело.

Главная рудная залежь имеет неправильную пластообразную форму, вытянута в северо-восточном направлении согласно с простиранием вмещающих пород. Длина залежи по простирианию около 1000 м, горизонтальная мощность до 190 м, падение близко к вертикальному. На глубине 200—300 м рудное тело имеет значительный раздув. На глубине около 600 м залежь выклинивается.

Третье рудное тело расположено к востоку от Главной залежи и отделено от нее тектоническим нарушением. Длина тела по простирианию около 340 м, горизонтальная мощность от 20 до 70 м, падение крутое. Вследствие интенсивной трещинной тектоники рудное тело представляет собой ряд блоков, осложненных подвижками, с вытянутыми участками пустых пород. Контакты рудных тел обычно резкие, тектонические, сопровождаются рядом параллельных трещин как по руде, так и по боковой породе.

Основная масса руд месторождения представлена магнетитом, среднее содержание которого составляет 60—65%. Распределение магнетита в рудных телах, как правило, неравномерное, встречаются не полностью замещенные участки боковых пород. Месторождение не связано непосредственно с контактевой зоной интрузивного массива. Его локализация определяется сочетанием тектонически ослабленных зон с благоприятными для замещения горизонтами пород осадочно-вулканогенной толщи.

Данные скважинной магниторазведки анализировались по разрезам разведочных линий XIV, XVIII и XXI (рис. 16). Поисковое бурение здесь проводилось для оценки глубоких горизонтов Третьего и Главного рудных тел. По результатам измерений магнитная восприимчивость руд меняется от 0,070 до 0,230 СГС при среднем значении 0,176 СГС. Моделированием на установке МУСГ-1 установлено, что для данной формы тел и магнитной

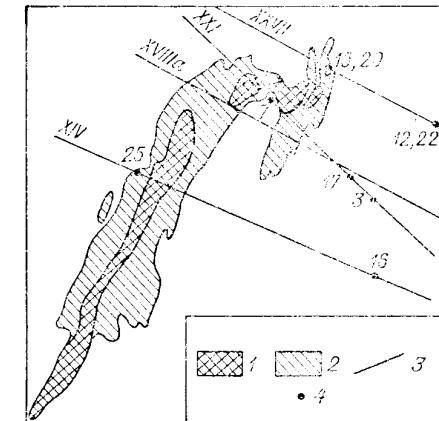


Рис. 16. Схематический план Абаканского месторождения.

1 — руды, выходившие на поверхность до эксплуатации; 2 — проекции рудных тел с глубоких горизонтов; 3 — разведочные линии; 4 — скважины.

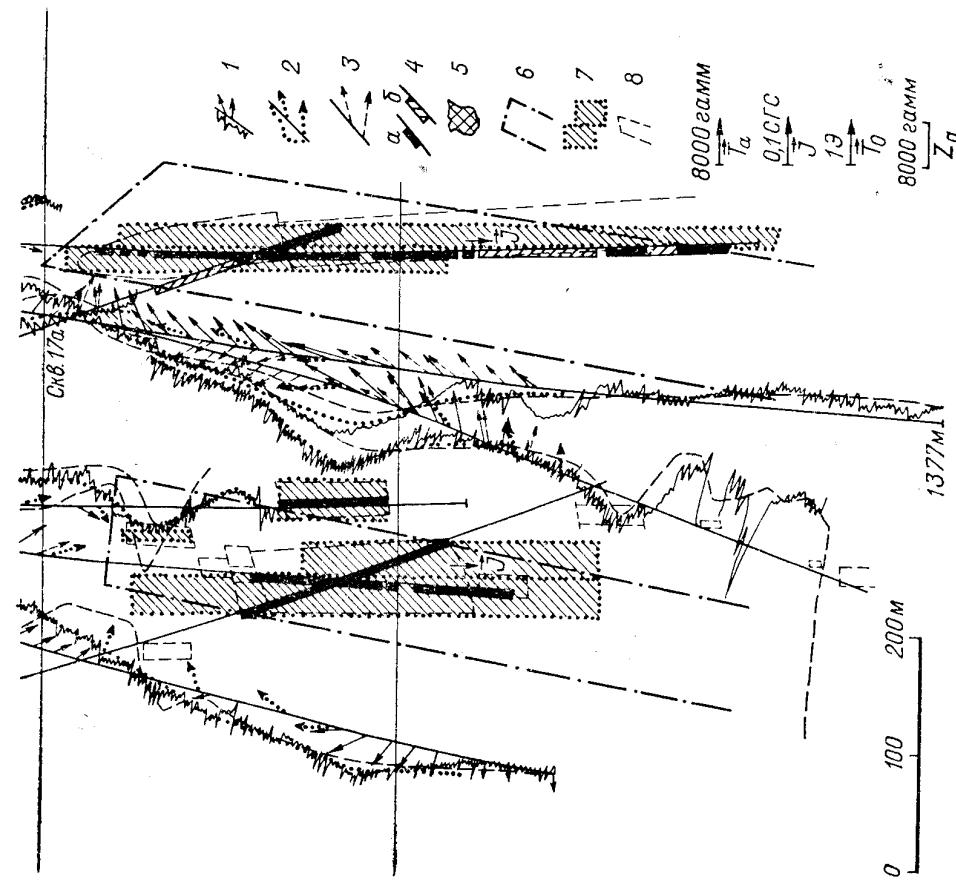


Рис. 17. Результаты интерпретации данных скважинной магниторазведки на Абаканском месторождении (по разведочной линии XVIlla).

восприимчивости 0,176 СГС намагниченность должна быть равной 0,07 СГС, а вектор намагниченности направленным по падению тел. При такой же восприимчивости намагниченность тел, имеющих малые размеры по падению, не должна превышать 0,05 СГС. Таким образом, в рассматриваемой задаче следует считать намагниченность направленной по падению тел, а ее значение заключенным в интервале 0,07—0,05 СГС.

Интерпретация аномального магнитного поля по разведочным линиям XVIIIa и XXI на установке МУСГ-1 проводилась в два этапа. В 1969 г. в результате интерпретации магнитного поля, измеренного в скв. 7 и 3 по линии XXI, было предсказано наличие рудных тел на глубоких горизонтах и в согласии с прогнозом заданы проверочные скважины, которые встретили руду. Во всех скважинах было измерено магнитное поле и результаты проанализированы на установке МУСГ-1 (интерпретация проводилась в плоскости линии XVIIIa, на которую была спроектирована вся информация с линии XXI). Наблюденные аномалии хорошо согласуются с полем, создаваемым телами с намагниченностью 0,05 СГС. Построенные в результате моделирования сечения рудных тел (рис. 17) довольно близко совпадают с сечениями, найденными при интерпретации данных наземной и скважинной магниторазведки с помощью ЭВМ по методике Г. Н. Константинова [8].

Ирбинское месторождение

Месторождение расположено в юго-западных отрогах Восточного Саяна и приурочено к контакту Ирбинского интрузивного массива, сложенного кварцевыми диоритами, сиенито-диоритами и диоритами, с породами осиновской свиты среднего кембрия (мраморизованные известняки, ороговикованные и скарнированные порфириты). В краевой части массива имеются ленточные тела порфировидных сиенитов и граносиенитов. Широко развиты дайки разного состава мощностью до 15—20 м. Скарноворудная зона мощностью 80—600 м протягивается в меридиональном направлении. Зона имеет сложную форму; кроме рудных тел встречаются многочисленные участки незамещенных пород-реликтов, которые разграничивают зону на ряд параллельных полос. Скарны составляют основную массу метасоматических пород, основной минерал скарнов — гранат, широко развит также пироксен.

Рудные тела представлены линзообразными и гнездовыми застежками субмеридионального простирания, падение западное под углом 40—85°. Протяженность рудных тел по простиранию до 900 м, по падению до 470 м, мощность от 2 до 60 м. Всего на месторождении выявлено около 30 рудных тел. Магнетитовые руды представлены скарнами, в разной степени обогащенными магнетитом. Наиболее развиты пятнисто-брекчевые и массивные

руды, часто в рудах присутствуют сульфиды в виде вкрапленности и гнезд пирита и пирротина.

Западная группа рудных тел хорошо выражена на разрезе по разведочной линии VII (рис. 18). Рудные тела прослеживаются по простиранию на 440 м, по падению до 200 м, общая мощность пачки около 100 м, мощность отдельных тел достигает 56 м, падение западное под углом 42—70°. Среднее значение магнитной восприимчивости рудных скарнов составляет около 0,01 СГС, а магнетитовых тел 0,14 СГС.

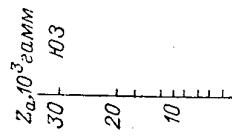
Перед скважинной магниторазведкой стояла задача оценить вероятность обнаружения дополнительных рудных тел в нижних горизонтах месторождения. В результате моделирования было установлено, что при магнитной восприимчивости 0,14 СГС намагниченность рудных тел в виде крутопадающих пластов должна заключаться в интервале 0,04—0,06 СГС.

Из анализа с помощью установки МУСГ-1 поля, измеренного в скв. 178, было сделано заключение о возможном наличии довольно крупного намагниченного объекта непосредственно под забоем скв. 95 (рис. 18). Для проверки этого предположения была запроектирована скважина из устья скв. 66. Однако в силу ряда причин вместо запроектированной была пробурена скв. 260, которая предполагаемого тела не встретила. Измерение в этой скважине вертикальной составляющей магнитного поля показало отсутствие аномалии. Материалы наблюдений в скв. 260 были проанализированы на установке МУСГ-1. Результаты этого анализа сводятся к следующему. Если бы в нижней части разреза намагниченных объектов не было, то наблюдалась бы положительная аномалия Z_a . Для компенсации ее необходимо допустить присутствие намагниченных объектов в данном разрезе на глубоких горизонтах. Чтобы определить местоположение объектов, знать только вертикальную составляющую магнитного поля недостаточно. Поэтому показанные на рис. 18, б прогнозные рудные тела следует рассматривать как один из возможных вариантов.

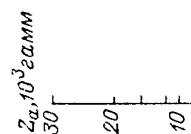
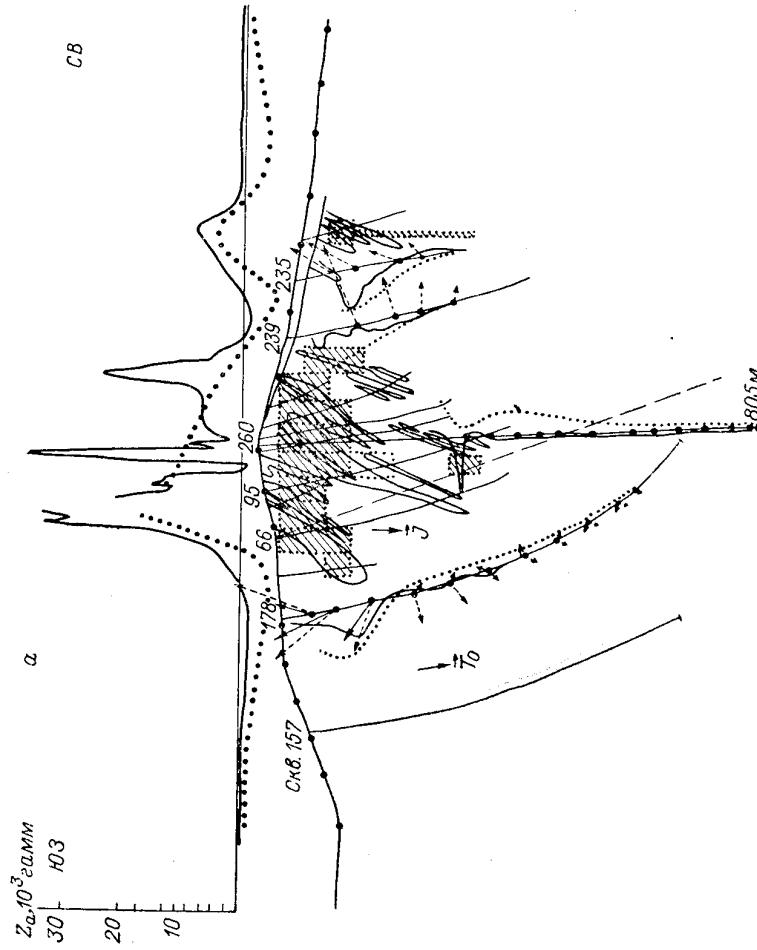
Кратко результаты интерпретации данных скважинной магниторазведки по разведочной линии VII могут быть сформулированы следующим образом.

1. Полученной информации о магнитном поле недостаточно, чтобы уверенно ответить на вопрос о перспективности или неперспективности глубоких горизонтов на обнаружение дополнительных рудных тел.

2. Для однозначного ответа необходимо провести трехкомпонентные измерения магнитного поля в скв. 260, так как результаты моделирования показывают, что рудные тела на глубоких горизонтах должны сопровождаться интенсивной аномалией горизонтальной составляющей и, следовательно, значение модуля вектора аномального поля может служить надежным критерием наличия или отсутствия искомых намагниченных объектов.



a $Z_\alpha, 10^3 \text{ гамма}$



b

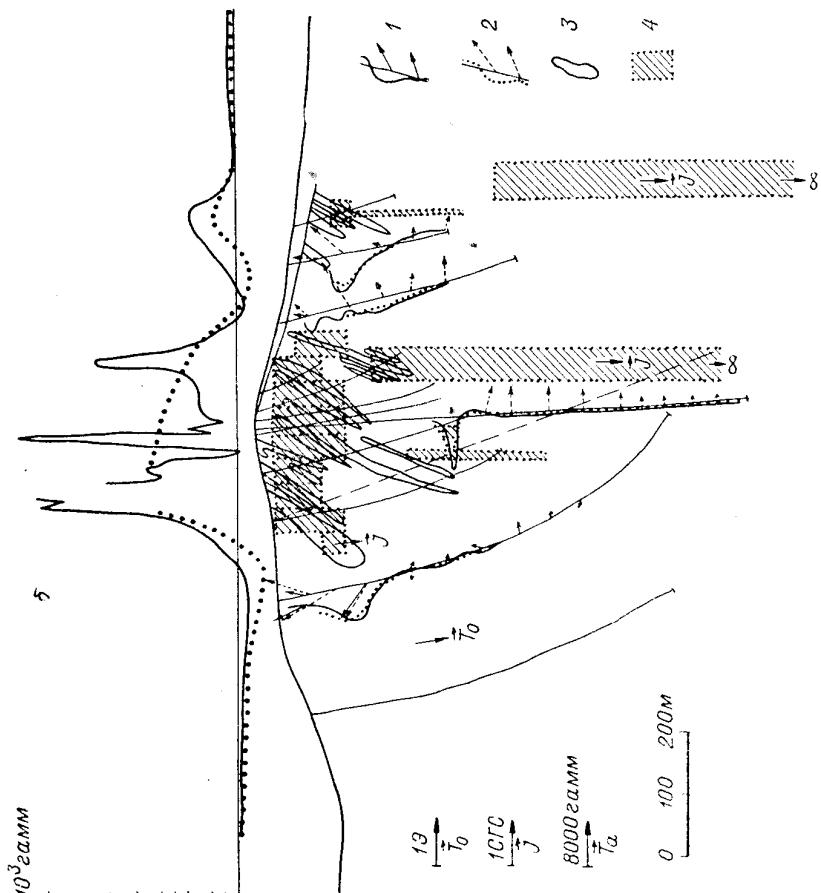


Рис. 18. Результаты интерпретации данных скважинной магниторазведки на Ирбинском месторождении.
a, б — варианты разреза.
Кривые Z_α и векторы T_α :
1 — по полевым наблюдениям, 2 — по электромоделированию; сечения рудных тел: 3 — по данным бурения, 4 — по электромоделированию.

нино.

3. Если аномалия модуля магнитного поля будет установлена, следует пробурить наклонную скважину (например, рекомендованную ранее из устья скв. 66) и провести в ней трехкомпонентные измерения.

§ 2. КРИВОРОЖСКИЙ ЖЕЛЕЗОРУДНЫЙ БАССЕЙН

Рассмотрим Белановское месторождение железистых кварцитов, которому соответствует центральная часть Кременчугской магнитной аномалии. Район месторождения слагают докембрийские метаморфические породы криворожской серии (амфиболиты сланцево-метадиабазовой серии, железистые кварциты и сланцы), а также комплексы древних гранитоидов и гнейсов (рис. 19). Из осадочных пород развиты палеозойские, мезозойские, третичные и четвертичные. Полоса железистых кварцитов вытянута по простиранию примерно на 5 км. С востока она ограничена древними плагиогранитами и мигматитами, а с запада — главным тектоническим разломом. Вмещающие породы обладают невысокой магнитной восприимчивостью — до 0,0003 СГС.

Геологический разрез непосредственно Белановского месторождения сложен пятью подсвитами (K_2^1 — K_2^5) средней свиты K_2 Криворожской серии. Подсвиты K_2^1 и K_2^4 сланцевые, K_2^2 , K_2^3 , K_2^5 — железистые.

Подсвита K_2^1 прослеживается по восточному борту месторождения, сложена в основном кварцево-биотитовыми сланцами. Подсвита K_2^4 протягивается по западному борту месторождения, представлена филлитовидными кварцево-биотитовыми сланцами, иногда графитом. Обе подсвиты обладают слабыми магнитными свойствами.

Из железистых подсвит наиболее продуктивной является K_2^2 , к ней приурочены богатые железные руды. В пределах месторождения подсвита имеет мощность 60—100 м, сложена в основном магнетитовыми кварцитами с восприимчивостью в среднем 0,1 СГС. Подсвита K_2^3 представлена биотито-магнетитовыми кварцитами с прослоями магнетито-кумминтонитовых сланцев. Магнитная восприимчивость кварцитов 0,025 СГС, сланцев 0,01 СГС. Мощность подсвиты колебается от 30 до 800 м. Подсвита K_2^5 сложена магнетитовыми кварцитами, восприимчивость которых составляет в среднем 0,08 СГС.

Осадочные отложения развиты на месторождении повсеместно в виде сплошного чехла мощностью 80—100 м. Наибольшее распространение здесь имеют пески, алевролиты, мергели и известняки.

Электромоделирование использовалось для интерпретации данных наземной и скважинной магниторазведки по разведочной

линии скв. 69 — скв. 71. В восточной части разреза по данным наземной магниторазведки предполагалось наличие двух слепых рудных зон, не вскрытых бурением. По измерениям в скв. 1173 такое предположение надо считать маловероятным, так как по векторной картине аномального магнитного поля можно допустить наличие магнитных масс только к западу от скважины (рис. 20).

Анализ аномального магнитного поля для разных вариантов разреза проводился с помощью установки МУСГ-1. Результаты моделирования сводятся к следующему. Если принять, что рудная зона ограничена по вертикали (глубина нижней кромки 300—400 м), то для объяснения наземной магнитной аномалии следует допустить наличие слепых рудных зон в восточной части разреза. Но это противоречит полю, измеренному по скв. 1173. Для объяснения магнитного поля, измеренного как в скважине, так и на дневной поверхности, наиболее вероятным представляется вариант разреза, построенный в результате электромоделирования: магнитные массы расположены к западу от скв. 1173 и нижняя кромка рудной зоны находится на глубине не менее 800—1000 м, что хорошо согласуется с расчетной глубиной погружения центра магнитных масс на месторождении.

На основе проведенной интерпретации можно сделать вывод о нецелесообразности бурения за проектированной ранее скв. 71, которая предназначалась для проверки прогнозных слепых рудных зон в восточной части разреза. Так как рудная зона имеет переменную мощность по простиранию (см. рис. 19), то построенное в результате интерпретации с помощью установки МУСГ-1 сечение тела следует считать сугубо приближенным. Однако можно

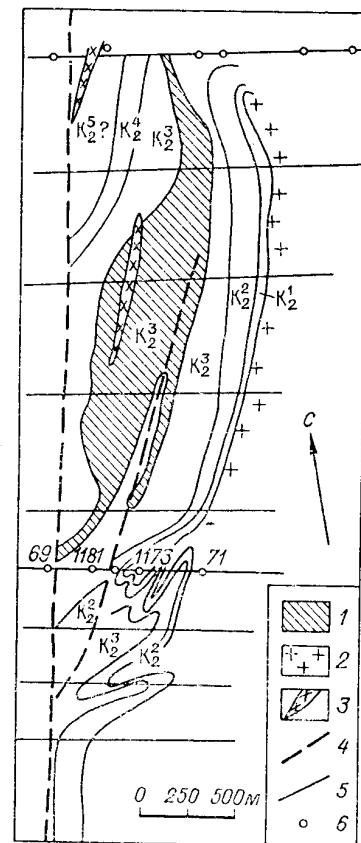


Рис. 19. Схематическая геологическая карта Белановского месторождения железистых кварцитов.

1 — биотито-магнетитовые кварциты;
2 — плагиограниты и их мигматиты;
3 — дайки плагиогранитов; 4 — разрывные нарушения; 5 — разведочные линии;
6 — скважины; K_2^1 , K_2^2 , K_2^3 , K_2^4 , K_2^5 — магнетитовые кварциты.

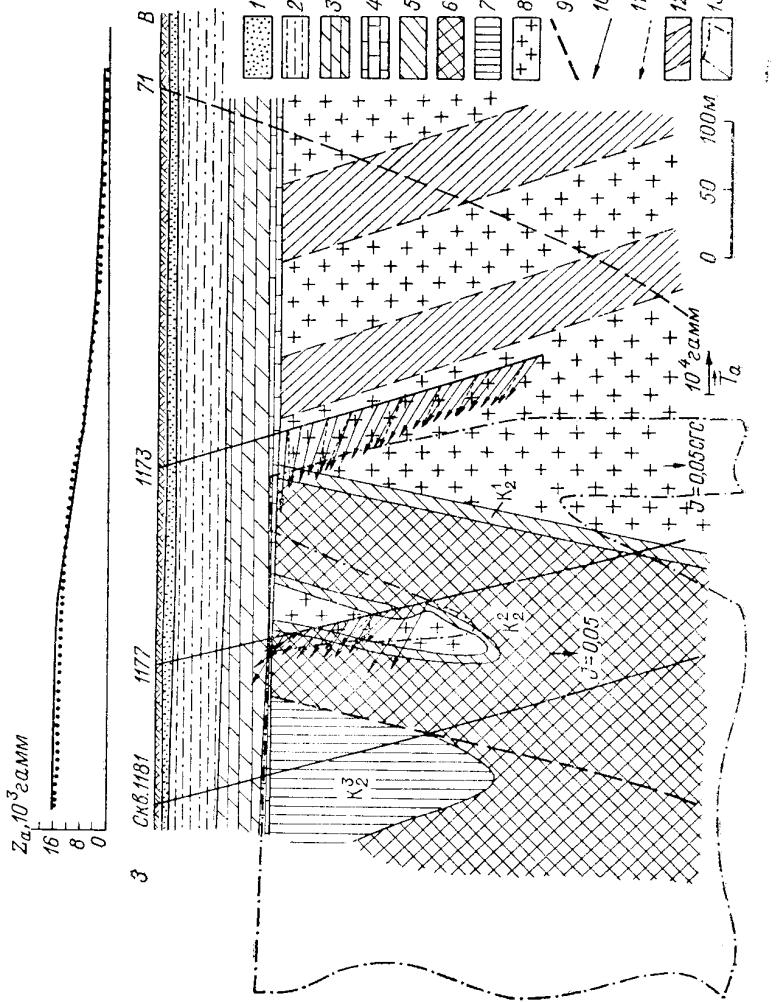


Рис. 20. Результаты интерпретации данных наземной и скважинной магниторазведки на Белдановском месторождении.

1 — пески; 2 — алевролиты; 3 — мергели; 4 — известняки; 5 — сланцы; кварцево-биотитовые; 6 — кварциты; 7 — магнетитовые; 8 — магматиты; 9 — тектонические нарушения; 10 — второго порядка;

11 — по подземным измерениям; 12 — по электромоделированию на МУСГ-1; 13 — по данным геофизической корреляции; 14 — по результатам моделирования.

достаточно уверенно полагать, что найденное сечение по форме довольно близко к действительному, находящемуся за плоскостью моделирования.

§ 3. ХАНДИЗИНСКОЕ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ

Методика физического моделирования электрического поля постоянного тока была опробована при интерпретации данных метода заряда на Хандизинском полиметаллическом месторождении в Узбекистане. По результатам электрической корреляции требовалось дать ответ о наличии или отсутствии связи между рудными телами, подсеченными в разных скважинах.

Месторождение представлено серией пологозалегающих сульфидных тел, расположенных согласно среди горизонтов липаритовых туфов нижнего карбона. Рудовмещающие палеозойские вулканогенные породы перекрыты юрскими отложениями: алевролитами, песчаниками, конгломератами с прослоями известняков и углистых пород. Отложения имеют субширотное простирание и падают на север под углом около 30° . На поверхности обнажаются только мелкие рудные тела. Основные рудные объекты вулканогенного горизонта слепые: не доходят до поверхности на 100—150 м и распространяются по падению на глубины до 600 м и более. Они представлены сплошными рудами тонкозернистой структуры, а также прожилковыми и вкрапленными зонами минерализации. Основными рудными минералами являются сфалерит, галенит, халькопирит. Соотношение содержаний свинца, цинка и меди в среднем составляет 5 : 10 : 1.

Рудные залежи имеют достаточно сложное строение. По простиранию отдельные тела прослеживаются на горизонте горных работ до 600 м при весьма изменчивой мощности, сопровождаются многочисленными разветвлениями и апофизами. Это обстоятельство существенно затрудняет увязку рудных тел даже на горизонте горных работ, а тем более между буровыми скважинами. Характерна также пострудная тектоника, приводящая к смещению рудных тел до 10—15 м. По падению основные рудные залежи достаточно уверенно увязываются на протяжении до 300 м. Видимая вертикальная мощность рудных тел колеблется в широких пределах: от нескольких сантиметров до 30 м при среднем значении 7 м. В сплошных рудах содержание суммы металлов обычно составляет 20—40%, в прожилковых и вкрапленных — до 10%.

Среднее удельное электрическое сопротивление рудных зон для сплошных руд составляет единицы, для прожилковых и вкрапленных — десятки ом-метров, в то время как сопротивление вмещающих пород и перекрывающих их юрских отложений достигает сотен и первых тысяч ом-метров. Это обстоятельство со-

здаст благоприятные условия для применения на месторождении методов заряда (в модификации электрической корреляции рудных подсечений) и радиоволнового просвечивания. Довольно широкое распространение сплошных сульфидных руд позволяет с успехом использовать метод индукционной электроразведки. Комплексирование этих методов должно дать достаточно обоснованный ответ на поставленный вопрос. Неблагоприятными моментами для применения перечисленных методов является значительная глубина залегания основного рудного горизонта (300—500 м) и наличие в юрских отложениях, перекрывающих рудную толщу, прослоев низкоомных углистых пород. Эти обстоятельства исключают постановку наземных геофизических съемок, а также исследований в варианте скважина — поверхность. Осложняющим моментом является также наличие сближенных пологозалегающих рудных залежей, что затрудняет оконтуривание в межскважинном пространстве отдельных рудных тел.

Рассмотрим результаты интерпретации данных метода электрической корреляции между скв. 41 и 42, расположеными в плоскости главного сечения рудной зоны (рис. 21). Качественный анализ графиков потенциала электрического поля не позволяет получить уверенный ответ на вопрос о наличии или отсутствии связи между рудными подсечениями. Качественно новую информацию из наблюденных полей можно извлечь при интерпретации их с помощью электромоделирования. При этом можно не только решить поставленную задачу, но и оценить в первом приближении размеры подсеченных проводников по простианию.

Из геолого-геофизической характеристики месторождения следует, что рудные зоны имеют сопротивление на два порядка ниже, чем вмещающие породы, и могут рассматриваться как эквипотенциальные проводники. Следовательно, при физическом электромоделировании на установке МУСГ-1 они могут быть заменены накладками из металлической фольги. Сопротивление вмещающих пород по данным каротажа составляет 1200 Ом·м. Среда при моделировании принята однородной и изотропной. Моделирование проводилось в масштабе 1:1000. Сечение тела выполнялось в виде накладки шириной 0,7 см. Токи питающих электродов при заряде в рудное тело на модели рассчитывались по формуле (85), при этом размер рудных тел по простианию принимался равным 500 м.

Судя по наблюдаемым графикам потенциала, точки заряда в скв. 41 имеют между собой хорошую гальваническую связь (рис. 21, а), поэтому при моделировании вместо трех графиков рассматривался один (рис. 21, б). Интерпретация проводилась с учетом графиков для обеих скважин. Кратко результаты могут быть сформулированы следующим образом. Рудные подсечения в скв. 41 и нижнее в скв. 42 не имеют между собой хороший электрической связи, откуда следует, что этими скважинами встречены разные рудные тела. Безрудный интервал находится при-

мерно в 30 м от скв. 41 и имеет ширину около 20 м. Тело, встреченное скв. 42, выклинивается примерно в 30 м по надвижу от точки подсечения. Не исключено, что с некоторым перерывом ниже находится следующее тело. Тело, подсеченное скв. 41, про-

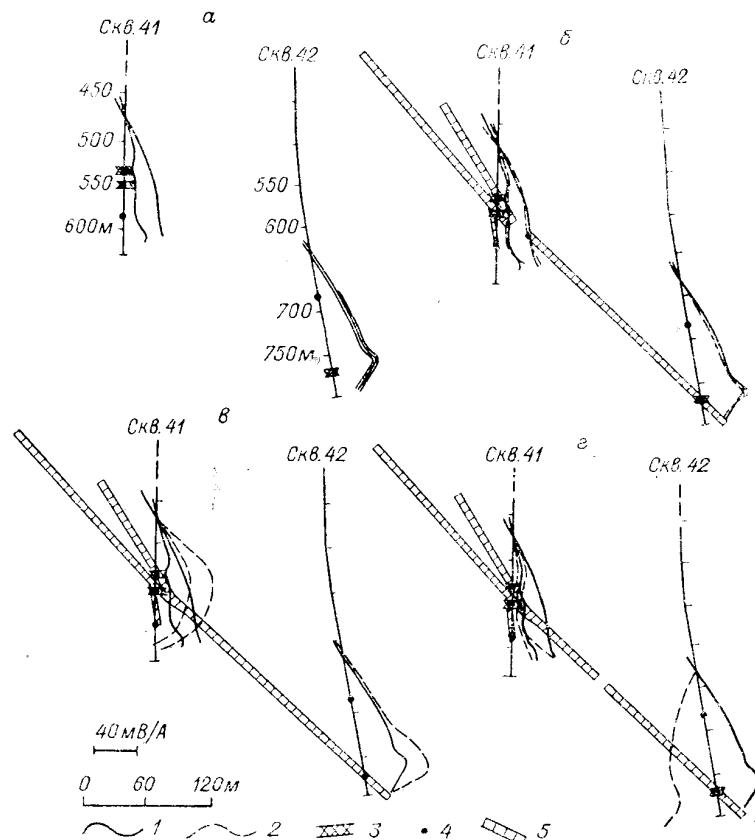


Рис. 21. Результаты интерпретации данных метода заряда на Хандизинском полиметаллическом месторождении.

Кривые потенциала: 1 — по полевым измерениям; 2 — по моделированию для разных вариантов разреза; 3 — рудные подсечения; 4 — места заряда; 5 — сечение рудных тел.

должается по восстанию примерно на 200 м; по простианию его вероятные размеры 250—300 м, о чём можно судить по току питающего электрода на модели.

В самом деле, расчетный ток 8,6 мА был вычислен в предположении, что размер тела по простианию 500 м. Фактически же значение тока, при котором удалось добиться совпадения кривых

§ 4. КОЛЧЕДАННО-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ АКБАСТАУ

Результаты полевых исследований методом вызванной поляризации на месторождении Акбастау в Центральном Казахстане были проинтерпретированы с помощью установки МУСГ-1. Месторождение характеризуется следующей геологической обстановкой. Вмещающими породами являются тонко- и грубообломочные туфы альбитофиры и туфопесчаники верхнего силура. Оруденение приурочено к древнему тектоническому нарушению, которое подновлялось уже послерудными надвигами. Руды представлены густовкрапленными и сплошными сульфидами (пирит, халькопирит, сфалерит, галенит), при этом наблюдается некоторая зональность в распределении рудных минералов по разрезу, а именно увеличение содержания халькопирита с глубиной. В поверхностных условиях первичные сульфиды не сохранились и зона богатых руд выражена четкой железной шлявой (лимонит, малахит, барит). В висячем боку отмечается значительно более высокая пиритизация вмещающих пород, а также интенсивное гидротермальное изменение (обеление и каолинизация).

Метод вызванной поляризации был поставлен над зоной оруденения по наиболее изученному бурением профилю (рис. 22). Поляризуемость руды меняется от 30 до 70% в зависимости от относительного содержания в ней пирита, халькопирита и галенита; поляризуемость вмещающих пород не превышает 1—2%. Общее представление о вызванной поляризации пород и руд по профилю дает график η_k для установки срединного градиента с $AB = 840$ м, $MN = 20$ м. Над безрудными породами $\eta_k = 2 \div 3\%$, а максимальная аномалия над железной шлявой достигает 22%. Область аномалий вызванной поляризации характеризуется общим понижением сопротивления r_k до 40—150 Ом·м. Для вмещающих пород значение r_k достигает 600—800 Ом·м.

При интерпретации результатов полевых исследований с помощью электромоделирования были приняты следующие исходные данные: удельное сопротивление вмещающих пород $r_1 = 700$ Ом·м, руд 10 Ом·м, вмещающих пород, зараженных сульфидной минерализацией, 200 Ом·м. Поляризуемость руд и минерализованных вмещающих пород считалась одинаковой и равной 50%. Сила тока питающих электродов $I_n = 4$ А. Моделирование поля вызванной поляризации проводилось по второму способу в масштабе 1 : 2000 на бумаге с сопротивлением $r_m = 5000$ Ом. Соответственно сопротивление накладки, имитирующей руду, $r_{mz} = 70$ Ом, а минерализованных пород $r_{m2} = 1500$ Ом. Сопротивление (с учетом поляризуемости) рассчитывалось по формуле

$$r^* = \frac{r}{1 - \eta},$$

потенциала по скв. 42 при заряде в рудные подсечения скв. 41, оказалось равным 4,6 мА. Отсюда нетрудно сделать вывод о длине по простианию тела, встреченного скв. 41. По аналогичной оценке тело, встреченное скв. 42, протягивается по простианию на 500 м. Следует отметить, что приведенная оценка размеров по простианию справедлива лишь при условии эквипотенциальности тел. Отсюда следует, что определенные таким образом размеры для тел, не являющихся идеальными проводниками, окажутся заниженными, т. е. в любом случае реальные размеры тела по простианию не меньше, чем найденные по данной методике.

Для оценки чувствительности моделирования к разным вариантам интерпретации приведем кривые потенциала в предположении, что скважинами встречено одно и то же рудное тело (рис. 21, в) и разные тела, но безрудный интервал находится примерно посередине между скважинами (рис. 21, г). При моделировании с одновременным учетом кривых, полученных в разных скважинах, есть возможность различить очень близкие варианты разреза. Так, в варианте единого тела кривая по скв. 42 незначительно отличается от кривой, построенной по результатам наблюдения в поле. Но по скв. 41 аналогичные кривые различаются принципиально. На полевой кривой намечается тенденция к незначительному росту потенциала с глубиной, в то время как при моделировании в точке подсечения появляется максимум потенциала, затем уменьшающегося с глубиной. Отсюда следует, что рудные тела, встреченные скв. 41 и 42, не могут иметь между собой хорошего гальванического контакта.

В случае раздельных рудных тел, когда безрудный интервал находится примерно посередине между скважинами, наблюдается другая картина. Кривые потенциала, полученные на модели и в натуре вдоль скв. 41, по характерным особенностям аналогичны друг другу, и сделать по ним однозначный вывод о местоположении разрыва между телами не удается. Однако соответствующие кривые по скв. 42 имеют совершенно разный характер: кривая вдоль скв. 42 оказывается весьма чувствительной к местоположению разрыва тела. Подобным образом было проанализировано большое количество вариантов, но только при разрезе, представленном на рис. 21, б, удалось добиться удовлетворительного совпадения кривых потенциала, полученных в поле и на модели по обеим скважинам.

Результаты интерпретации, выполненной с помощью установки МУСГ-1, неплохо согласуются с выводами, сделанными по методам радиоволнового просвечивания и индукционной электроразведки. Таким образом, интерпретация данных метода заряда на установке МУСГ-1 позволяет проводить не только качественную, но и количественную оценку размеров и взаимной связи рудных тел, встреченных разными скважинами.

а сила тока на модели, обеспечивающая равенство потенциалов в натуре и на модели, — по формуле

$$I_m = I_n \frac{\rho_i}{\rho_m} \cdot \frac{1/AM_m - 1/AN_m + 1/BM_m - 1/BN_m}{2K_l \ln [AN_m BM_m / (AM_m BN_m)]}.$$

Разность потенциалов измерялась дважды: при сопротивлении элементов разреза ρ_i и ρ_i^* . Разность между измеренными

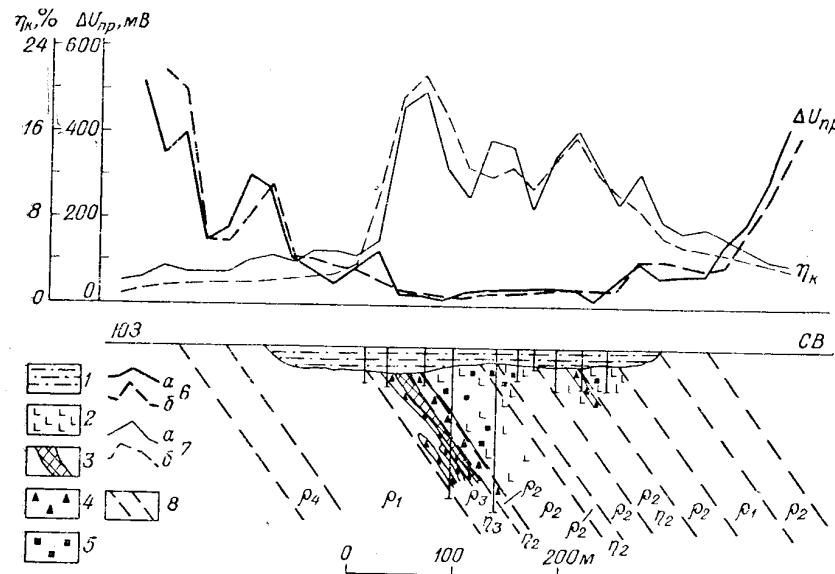


Рис. 22. Результаты интерпретации данных метода вызванной поляризации на колчеданно-полиметаллическом месторождении Акбастау.

1 — элювиально-делювиальные отложения; 2 — альбитофиры; 3 — сплошные сульфиды; 4 — частая вкрапленность сульфидов; 5 — пиритизация во вмещающих породах; 6 — криевые $\Delta U_{\text{пр}}$ (а — полученная в поле, б — при моделировании); 7 — кривые η_k (а — полученная в поле, б — при моделировании); 8 — геолого-геофизические границы, построенные в результате моделирования.

значениями есть величина $\Delta U_{\text{ВПа}}$; а напряжение ΔU^* , измеренное при сопротивлении ρ_i^* , есть величина $\Delta U_{\text{пр}}$; кажущаяся поляризуемость $\eta_k = \Delta U_{\text{ВПа}} / \Delta U_{\text{пр}}$.

В результате интерпретации было установлено, что исходное сопротивление пород выбрано правильно, а поляризуемость руд следует принять равной 65%, в то время как поляризуемость минерализованных вмещающих пород не должна превышать 40%. Смоделированный геоэлектрический разрез довольно хорошо совпадает с разрезом, построенным по данным бурения.

Чтобы оценить влияние электрических неоднородностей в разрезе на первичное электрическое поле и на аномальное поле вы-

званной поляризации, был рассмотрен следующий теоретический случай. Изучалось аномальное поле вызванной поляризации цилиндра, поляризованного электрическим полем линейного источника постоянного тока. Было взято два варианта: цилиндр расположен в однородной безграничной проводящей среде; между питающим электродом и цилиндром находится проводящая зона.

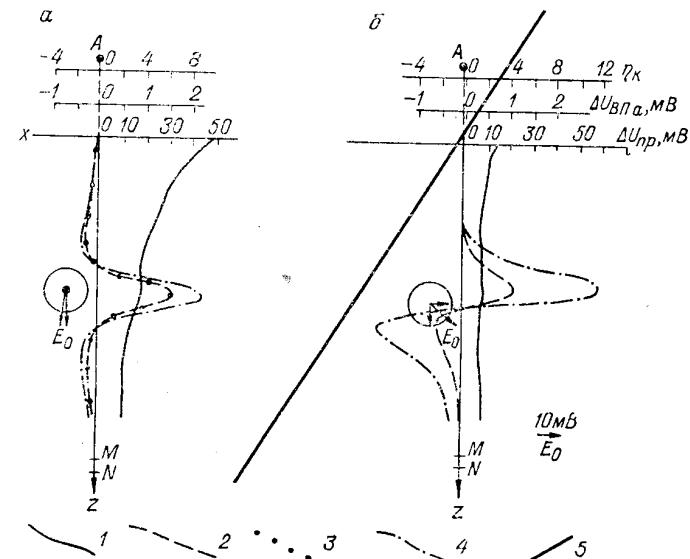


Рис. 23. Результаты моделирования на установке МУСГ-1 аномального поля вызванной поляризации цилиндра.

а — в однородной изотропной среде; б — в присутствии проводящей зоны.
Кривые: 1 — $\Delta U_{\text{пр}}$, 2 — $\Delta U_{\text{ВПа}}$ экспериментальная, 3 — $\Delta U_{\text{ВПа}}$ теоретическая, 4 — η_k рассчитанная по результатам моделирования; 5 — проводящая зона.

Избыточная поляризуемость цилиндра была принята равной 50%, по электрическому сопротивлению цилиндр не отличался от вмещающей среды.

Из сопоставления результатов эксперимента (рис. 23) следует, что векторы первичного поля в области расположения цилиндра в этих случаях резко различаются как по значению, так и по направлению. Следствием этого является и резкое расхождение как соответствующих кривых аномального поля вызванной поляризации, так и кривых кажущейся поляризуемости.

В реальных условиях довольно часто встречается ситуация, когда форма и физические свойства каких-либо неоднородностей, не являющихся объектами поисков (наносы, зоны трещиноватости и т. д.), бывают известны. Эти неоднородности существенно,

как показывает проведенный эксперимент, искажают первичное, а также и аномальное поле. Аналитический расчет их влияния на исследуемое поле крайне сложен и практически никогда не проводится. Между тем недооценка этого эффекта может привести к существенным ошибкам при интерпретации полевых материалов. Одним из основных достоинств предложенной методики электромоделирования является возможность довольно просто учитывать влияние известных неоднородностей и тем самым существенно повышать качество интерпретации.

§ 5. ПЕВЕКСКИЙ ПОЛУОСТРОВ

Методика моделирования естественного электрического поля была опробована при интерпретации полевых материалов на одном из месторождений Магаданской области. В районе работ развита мощная толща терригенных пород раннемелового возраста, представленная чередующимися пачками песчаников, алевролитов и сланцев. В толще встречаются пачки черных углистоглинистых сланцев, которые характеризуются низким удельным электрическим сопротивлением (единицы ом-метров) и повышенной электрохимической активностью. Эти сланцы являются источником довольно интенсивных (сотни милливольт) аномалий естественного электрического поля. Сланцы образуют тела, сильно вытянутые по простираннию (тысячи метров), и поэтому создаваемое ими естественное электрическое поле можно рассматривать как двухмерное и моделировать его на установке МУСГ-1.

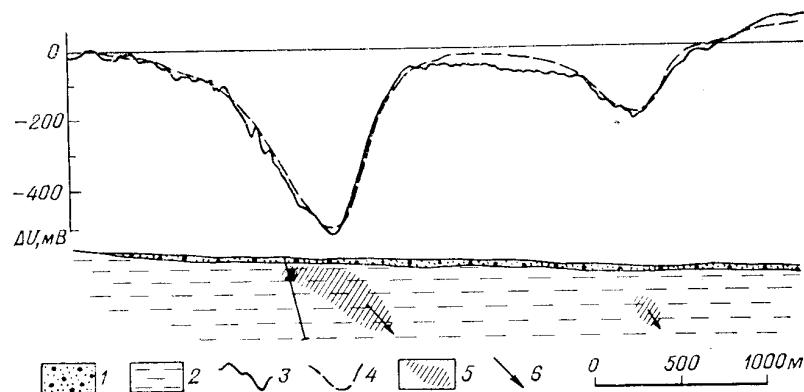


Рис. 24. Результаты интерпретации данных метода естественного поля на Певекском полуострове Магаданской области (полевые материалы по Б. Б. Шатрову).

1 — покровные суглинки; 2 — песчано-сланцевые отложения; кривые потенциала естественного поля: 3 — наблюденная в поле, 4 — полученная при моделировании; 5 — сечения поляризованных объектов по результатам интерпретации на установке МУСГ-1; 6 — направление вектора поляризации.

На кривой естественного поля, построенной по результатам полевых наблюдений, на одном из профилей отчетливо видны две аномалии (рис. 24). При моделировании предполагалось, что обе аномалии вызваны поляризованными объектами одной и той же природы, находящимися в одинаковых геологических условиях. В результате интерпретации были определены местоположение, размеры и форма сечения объектов, естественное электрическое поле которых довольно хорошо совпадает с измеренным в натуре. При этом был сделан вывод, что э. д. с. поляризованных объектов равна 1000 мВ. Такое значение характерно для графитовых и угольных залежей [45]. Проверочная скважина подсекла поляризованный объект, которым оказались черные углистоглинистые сланцы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрены теоретические основы и даны методические рекомендации по использованию математического электромоделирования для интерпретации потенциальных геофизических полей. Проверка этого метода при решении конкретных производственных задач показала его высокую эффективность. Дальнейшие исследования по повышению оперативности и качества интерпретации должны проводиться в следующих направлениях: расширение областей применения математического электромоделирования потенциальных полей; автоматизация процесса ввода и вывода информации, комплексирование аналогового моделирования с дискретным моделированием на малогабаритных цифровых машинах.

Возможность моделирования потенциальных полей путем задания и изучения поля постоянного тока в проводящей среде может быть распространена на электромагнитное поле, используемое при индукционной электроразведке. При индукционной электроразведке исследования проводятся в ближней зоне, где поле во многом напоминает создаваемое постоянными токами или зарядами [57]. Вторичные поля здесь в основных чертах сходны с полями постоянных зарядов и токов. Однако внутри локальных объектов поле может быть и волновым: имеет место явление скин-эффекта и вторичное поле создается почти исключительно токами, циркулирующими внутри скин-слоя. Вид аномальных кривых какого-либо локального объекта вдоль профиля наблюдения определяется в основном формой и местоположением объекта, а изменение его индукционного параметра влияет только на амплитуду мнимой и вещественной компонент составляющих поля.

Коэффициент пропорциональности между аномальным электромагнитным полем в природе и полем электрического диполя на модели записывается в виде

$$k_n = \frac{2}{\rho_m} \cdot \frac{\operatorname{Re}(\operatorname{Im}) H_{\text{вт}}}{j_V l},$$

где $\operatorname{Re}(\operatorname{Im}) H_{\text{вт}}$ — функции, описывающие вещественную и мнимую компоненты аномального магнитного поля на поверхности

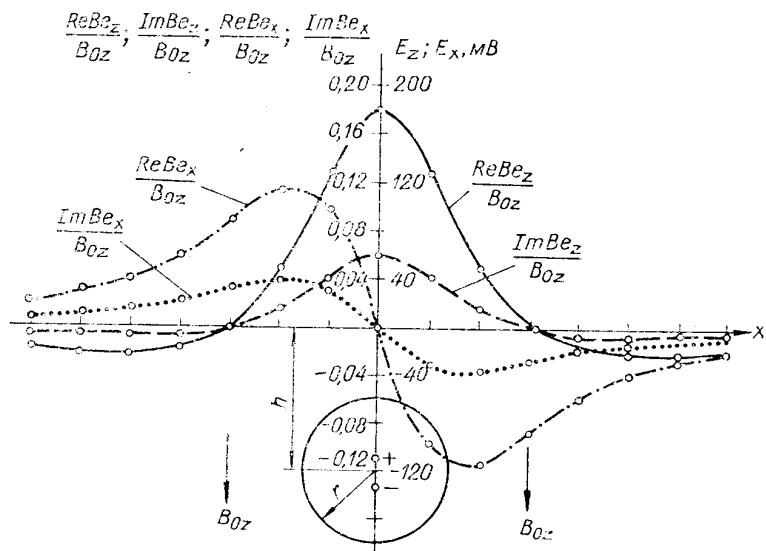


Рис. 25. Результаты математического моделирования аномального электромагнитного поля цилиндра.

Крупные светлые точки относятся к экспериментальным кривым E_z и E_x , совпадающим с соответствующими теоретическими кривыми.

тела; значение $\operatorname{Re}(\operatorname{Im}) H_{\text{вт}}$ может быть определено по диаграмме обобщенной частотной характеристики как $f(k^2 Q)$, где Q — характерный размер тела [57].

Результаты математического моделирования аномальных электромагнитных полей, вызванных цилиндром и пластом, вполне удовлетворительно сопоставляются с теоретическими расчетами и с данными физического моделирования (рис. 25, 26). Отсюда очевидна принципиальная возможность использовать методику и технику моделирования потенциальных полей для интерпретации индукционных электромагнитных полей [3].

Повышению качества интерпретации, снижению неоднозначности решения обратных задач способствует использование большего количества подготовленных для интерпретации исходных

данных, полученных по одному или нескольким методам геофизики. Но здесь возникает проблема оперативного ввода информации в моделирующее устройство и оперативного вывода результатов решения. В ВИТР разрабатывается информационно-вычислительная система (ИВС) для оперативной обработки и интерпретации геофизических данных, основное назначение которой состоит в автоматизации скважинных геофизических исследо-

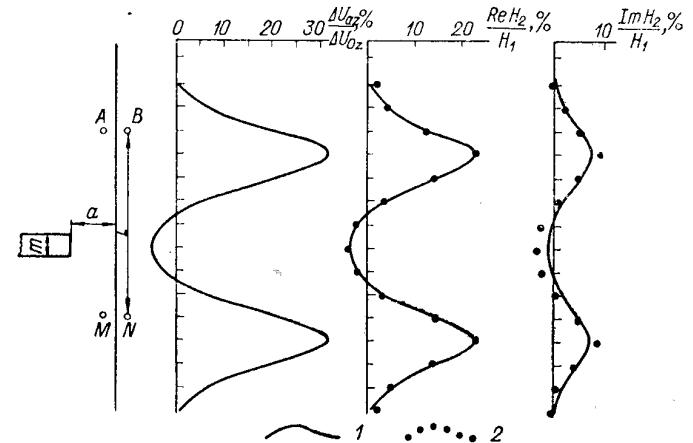


Рис. 26. Результаты математического моделирования аномального электромагнитного поля неподсеченного пласта.

Кривые, полученные: 1 — при электромоделировании на МУСГ-1, 2 — при физическом моделировании.

$$L=80 \text{ м}; a=m=10 \text{ м}; \rho_t=0,08 \text{ Ом} \cdot \text{м}; f=375 \text{ Гц}.$$

$$\operatorname{Re}(\operatorname{Im}) H_{\text{вт}} = f(a); \alpha = k^2 m L = 30;$$

$$\frac{\operatorname{Re} H_2}{H_1} = \frac{\Delta U_{0z}}{\Delta U_{0z}} \operatorname{Re}_{\text{вт}}; \quad \frac{\operatorname{Im} H_2}{H_1} = \frac{\Delta U_{az}}{\Delta U_{0z}} \operatorname{Im}_{\text{вт}}.$$

дований с целью сократить время от момента получения информации до выдачи геологических рекомендаций. Система должна быть удобной и работоспособной в полевых условиях. Те же требования предъявляются и к вычислительному устройству, предназначенному для оперативной количественной интерпретации геофизических данных и являющемуся составной частью ИВС.

В настоящее время единственным оперативным средством, которое отвечает всем предъявляемым к ИВС требованиям, является установка МУСГ-1. Установка позволяет проводить непрерывное и практически мгновенное решение уравнения Лапласа в широких вариантах граничных условий, получать решение для любой точки разреза, оперативно менять условия задачи. Следует отметить малые размеры установки, наглядность решений, а также гораздо меньшую, чем для ЭВМ, стоимость экс-

плутации при достаточной для практических целей точности. Задачи на установке МУСГ-1 и ИВС должны решаться в полуавтоматическом режиме: ввод и вывод информации автоматический, а набор разреза и оценка правильности решения задачи выполняются интерпретатором.

С развитием малой вычислительной техники она сможет конкурировать с аналоговым математическим моделированием, предназначенным для оперативной интерпретации геофизических данных. Для этого должны быть разработаны новые поколения малых ЭВМ, которые, обладая присущими цифровой технике достоинствами, должны сравняться с аналоговыми устройствами по другим, не менее важным для практики параметрам. Многие исследователи [40] считают целесообразной разработку гибридных вычислительных систем, сочетающих аналоговые и цифровые элементы и совмещающих достоинства тех и других. Одним из вариантов такой системы может быть сочетание моделирующей установки типа МУСГ-1 и малой клавишной вычислительной машины. В данном случае электромоделированием можно определять вектор поляризации тела произвольной формы, поляризуемого неоднородным первичным полем (задача, крайне трудная даже для самых современных ЭВМ), и затем по найденным векторам поляризации с помощью ЭВМ рассчитывать поле в любой интересующей интерпретатора точке пространства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеевич М. М. О возможности математического моделирования аномальных полей вызванной поляризации от вытянутых по простианию объектов.— «Методика и техника разведки», 1972, № 80, с. 60—65. (Всесоюз. науч.-исслед. ин-т методики и техники разведки).
2. Авдеевич М. М. Использование электрического моделирования для определения вектора намагниченности внутри рудного тела.— «Методика и техника разведки», 1973, № 87, с. 16—20.
3. Авдеевич М. М. Решение задач индукционной электроразведки на установке МУСГ-1.— «Методика и техника разведки», 1975, № 98, с. 51—56.
4. Авдеевич М. М., Фокин А. Ф. Математическое электромоделирование естественного электрического поля вытянутых по простианию проводников.— «Методика и техника разведки», 1975, № 101, с. 62—65.
5. Авдеевич М. М., Афанасьев Б. М., Полушкин А. В. Интерпретация данных магниторазведки на Абаканском и Ирбинском месторождениях с помощью электромоделирования.— «Методика и техника разведки», 1976, № 105, с. 25—30.
6. Авдеевич М. М., Величко В. А., Гитлин Я. Л. Методика моделирования анизотропных сред и плохо проводящих объектов на установке МУСГ-1.— «Методика и техника разведки», 1975, № 95, с. 59—61.
7. Альпин Л. М. Теория поля. М., «Недра», 1966. 384 с.
8. Афанасьев Б. М., Полушкин А. В. Значение скважинной магниторазведки в обнаружении и изучении глубинного этажа Абаканского железорудного месторождения (Западный Саян).— «Регион, развед. и промысл. геофизика», 1973, № 5, с. 28—34. (Всесоюз. науч.-исслед. ин-т экономики минерал. сырья).
9. Булах Е. Г. Автоматизированная система интерпретации гравитационных аномалий. Киев, «Наукова думка», 1973. 109 с.
10. Булах Е. Г., Зейгельман М. С. Анализ условий перехода от трехмерного вертикального пласта к двухмерному.— «Геофиз. сб.», 1973, вып. 55, с. 9—14. (АН УССР).
11. Венников В. А. Теория подобия и моделирования. М., «Высшая школа», 1966. 488 с.
12. Волынский В. А., Бухман В. Е. Модели для решения краевых задач. М., Физматгиз, 1960. 452 с.
13. Воскобойников Г. М. Некоторые элементы теории интерпретации потенциальных полей.— В кн.: Состояние и перспективы развития геофиз. методов на Урале. Свердловск, 1971, с. 56—66.
14. Герштейн Г. М. Моделирование полей методом электростатической индукции. М., «Наука», 1970. 316 с.
15. Гнусин Н. П., Поддубный Н. П., Маслый А. И. Основы теории расчета и моделирования электрических полей в электролитах. Новосибирск, «Наука», 1972. 276 с.

16. Грунторад Ян. Электрическое поле поляризованных проводников в однородных и неоднородных средах.—«Учен. зап. Ленингр. ун-та. Сер. физ. и геол. наук», 1958, № 249, вып. 10, с. 114—133.
17. Земцов В. Н. Интерпретация магнитных и гравитационных аномалий с приборами типа ЭИП.—«Геофиз. аппаратура», 1972, вып. 49, с. 122—124.
18. Зидаров Д. Метод нахождения точечных (дипольных) решений обратных задач потенциала.—«Изв. Геофиз. ин-та (Болгария)», 1974, т. 19, с. 185—200.
19. Злавдинов Л. З. Простой способ использования палеток для двухмерных тел при интерпретации гравитационных аномалий трехмерных тел.—«Геология и разведка недр», 1971, вып. 2, с. 119—124. (Каз. политехн. ин-т).
20. Карплюс У. Моделирующие устройства для решения задач теории поля. М., ИЛ, 1962. 488 с.
21. Колюбакин В. В., Лапина М. И. Обзор способов решения прямой и обратной задач магнитной разведки. М., Изд-во АН СССР, 1960. 280 с.
22. Комаров В. А. Электроразведка методом вызванной поляризации. Л., «Недра», 1972. 342 с.
23. Константинов Г. Н. К методике решения прямой трехмерной задачи магнитной и гравитационной разведки на железорудных месторождениях Алтая-Саянской области.—«Геология и геофизика», 1968, № 7, с. 108—113.
24. Константинов Г. Н., Константина Л. С., Колесник М. А. Моделирование в рудной магниторазведке. Метод. пособие. Новосибирск, СНИИГГИМС, 1971. 112 с. (Сиб. науч.-исслед. ин-т геологии, геофизики и минерал. сырья).
25. Красюков В. А., Степанов В. С. Прибор для интерпретации геофизических аномалий ЭИП-2.—«Геофиз. аппаратура», 1967, вып. 31, с. 119—122.
26. Либерман А. А., Мусатов А. А., Шевнин В. А. О правомерности моделирования трехмерных полей точечных заземлителей на электропроводной бумаге. Деп. ВИНИТИ 25 сент. 1975 г., № 2750—75 деп.
27. Логачев А. А. Курс магниторазведки. Л., «Недра», 1968. 283 с.
28. Методика и результаты исследований глубинного строения Кременчугского синклиниория (по геофизическим данным).—«Геофиз. сб.», 1973, вып. 55, с. 55—66. (АН УССР). Авт.: З. А. Крутыховская, И. М. Силина, А. А. Гарбуза и др.
29. Моделирование геологических разрезов по геофизическим данным с помощью ЭЦВМ.—«Разведка и охрана недр», 1974, № 4, с. 53—55. Авт.: Л. И. Казанкина, Ю. А. Лебедев, Э. А. Мягкова, В. М. Омелин.
30. Моделирование процесса геологической интерпретации гравитационных и магнитных аномалий на электронных цифровых машинах. Практ. руковод. Новосибирск, «Наука», 1970. 411 с. Авт.: Г. И. Карапаев, Т. Л. Захарова, Н. Н. Черная и др.
31. Моделирующая установка для решения задач скважинной геофизики (МУСГ-1).—«Геофиз. аппаратура», 1976, № 60, с. 158—164. Авт.: М. М. Авдеевич, А. Ф. Фокин, Ю. Д. Панов, С. А. Пуйконен.
32. Моисеев В. С. Способ расчета и моделирования объемных естественных электрических полей.—«Вопросы рудной геофизики Сибири». Новосибирск, 1967, с. 154—164. (Труды Сиб. науч.-исслед. ин-та геологии, геофизики и минерал. сырья, вып. 53).
33. Моисеев В. С. Метод заряда при разведке полиметаллических рудных полей Рудного Алтая. Метод. руковод. Новосибирск, 1973. 79 с. (Сиб. науч.-исслед. ин-т геологии, геофизики и минерал. сырья).
34. Непомнящих А. А. Интерпретация геофизических аномалий. Л., «Недра», 1964. 284 с.
35. Ницецкий Л. В. Аналоговые и разностные методы решения внешних краевых задач. —«Учен. зап. Рижск. политехн. ин-та», 1965, т. 12, с. 5—430.
36. Овчинников И. К. Теория поля. М., «Недра», 1971. 312 с.
37. Парсек Э. Электричество и магнетизм. М., «Наука», 1971. 448 с.
38. Пономарев В. Н., Бахвалов А. Н. Интерпретация векторов напряженности магнитного поля двухмерных тел. —«Регион», развед. и промысл. геофизика», 1965, № 7, с. 53. (Всесоюз. науч.-исслед. ин-т экономики минерал. сырья).
39. Попов А. А. Оценка запасов и качественного состава магнетитовых руд по материалам наземной и скважинной магниторазведки.—«Методика и техника разведки», 1972, № 80, с. 21—28.
40. Расчет физических полей методами моделирования. М., «Машиностроение», 1968. 428 с.
41. Рысс Ю. С. Поиски и разведка рудных тел контактным способом поляризационных кривых. Л., «Недра», 1973. 168 с.
42. Рязанов Г. А. Опыты и моделирование при изучении электромагнитного поля. М., «Недра», 1966. 192 с.
43. Рязанов Г. А. Электрическое моделирование с применением вихревых полей. М., «Наука», 1969. 336 с.
44. Сапужак Я. С. Высшие производные электрического потенциала в геофизической разведке. Киев, «Наукова думка», 1967. 155 с.
45. Свешников Г. Б. Электрохимические процессы на сульфидных месторождениях. Л., 1967. 160 с. (Ленинград. ун-т).
46. Семенов А. С. Электроразведка методом естественного электрического поля. Л., «Недра», 1974. 391 с.
47. Скважинная рудная геофизика. Л., «Недра», 1971. 536 с.
48. Тамм И. Е. Основы теории электричества. М., Гостехиздат, 1956. 620 с.
49. Тарапов Г. А. Электрическое поле над комплексом вертикально поляризованных проводящих сфер.—«Вопр. рудн. геофизики», 1960, вып. 1, с. 61—68.
50. Тархов А. Г. О взаимных связях геофизических полей.—«Изв. АН СССР. Сер. геофиз.», 1959, вып. 4, с. 635—637.
51. Тетельбаум Н. М. Электрическое моделирование. М., Физматгиз, 1959. 320 с.
52. Филатов В. А. Расчет магнитного поля от двухмерного тела произвольного сечения.—«Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли», 1969, № 2, с. 82—91.
53. Фокин А. Ф. Принципы электромоделирования потенциальных полей, используемых в рудной геофизике.—«Методика и техника разведки», 1968, № 62, с. 5—16.
54. Фокин А. Ф., Авдеевич М. М. Интерпретация данных скважинной геофизики с использованием моделирующей установки МУСГ-1. Метод. рекомендации. Вып. 134. Л., 1971. 37 с. (Всесоюз. науч.-исслед. ин-т методики и техники разведки).
55. Шайнманн С. М. Современные физические основы теории электроразведки. Л., «Недра», 1969. 224 с.
56. Шимони К. Теоретическая электротехника. М., «Мир», 1964. 775 с.
57. Электромагнитные методы разведки в рудной геофизике. М., «Недра», 1966. 308 с. Авт.: Б. С. Светов, А. Д. Петровский, Е. М. Ершов и др.
58. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. М., «Наука», 1974. 943 с.
59. Яковлев Г. Е. Палетки для интерпретации материалов электропрофилирования, полученных методом срединного градиента над двухмерными телами с горизонтальной образующей. Казань, 1962. 20 с. (Казанск. ун-т).
60. Grant F. S. Review of date processing and interpretation methods in gravity and magnetics, 1964—1971. — „Geophysics“, 1972, v. 37, N 4, p. 647—661.

61. Harbooygh J. W., Bonham-Carter G. Computer simulation in geology. — „Geophysics“, 1971, v. 36, N 4, p. 770—771.

62. High-speed computing device for interpretation of gravite anomalies. — «Докл. Болг. АН», 1959, v. 12, N 1, p. 37—40. I. P. Nedialkov, G. Z. Stainov, S. I. Ormandjiev, I. D. Iliev.

63. Lehmann H. J. A control of two-dimensional magnetic interpretation by three-dimensional model body anomalies. — „Geophys. Prospect“, 1971, v. 19, N 1, p. 133—155.

64. Saha S. N. An electromagnetic analog method for computing gravity and magnetic effects of two demensional bodies. — „Geophysics“, 1967, v. 32, N 5, p. 833—852.

65. Shuey R. T., Pasquale A. S. End corrections in magnetic profile interpretation. — „Geophysics“, 1973, v. 38, N 3, p. 507—512.

66. Zidarov D. Solution experimentale du probleme inverse gravimetrique et magnitometrique. — «Докл. Болг. АН», 1957, v. 10, N 5, p. 351—354.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Глава I. Теоретические основы	9
§ 1. Общие положения	17
§ 2. Электрическое поле	23
§ 3. Магнитное и гравитационное поля	26
§ 4. Поле вызванной поляризации	31
§ 5. Естественное электрическое поле	34
§ 6. Особенности моделирования плоских потенциальных полей	34
Глава II. Моделирующая установка для решения задач скважинной геофизики МУСГ-1	36
§ 1. Конструкция установки	40
§ 2. Анализ погрешностей моделирования	40
Глава III. Методика расчета полей по заданным параметрам геологического разреза	42
§ 1. Общие замечания	48
Прямые задачи	48
§ 2. Электроразведка постоянным током	54
§ 3. Магниторазведка	59
§ 4. Метод вызванной поляризации	64
§ 5. Метод естественного электрического поля	68
§ 6. Гравиразведка	69
Обратные задачи	69
§ 7. Схема решения	71
§ 8. Рекомендации по комплексной интерпретации на установке МУСГ-1	71
Глава IV. Примеры решения практических задач на установке МУСГ-1	72
§ 1. Саянский железорудный бассейн	80
§ 2. Криворожский железорудный бассейн	83
§ 3. Хандзинское полиметаллическое месторождение	87
§ 4. Колчеданно-полиметаллическое месторождение Акбастау	90
§ 5. Певекский полуостров	95
Заключение	91
Список литературы	95

ИБ № 2316

МИХАИЛ МИХАИЛОВИЧ АВДЕВИЧ,
АНАТОЛИЙ ФЕДОРОВИЧ ФОКИН

**ЭЛЕКТРОМОДЕЛИРОВАНИЕ
ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ
ПОЛЕЙ**

Редактор издательства Л. Г. Ермолаева
Техн. редактор Н. П. Старостина
Корректор В. Н. Малахова

Сдано в набор 25/IV 1977 г. Подписано в печать 14/XI 1977 г. М-44109
Формат 60×90^{1/16}. Бумага тип. № 2. Печ. л. 6^{1/4}. Уч.-изд. л. 6.05.
Тираж 1500 экз. Заказ № 327/1154. Цена 90 коп.

Издательство «Недра». Ленинградское отделение. 193171, Ленинград, С-171,
ул. Фарфоровская, 12.
Ленинградская картографическая фабрика объединения «Аэрогеология».