

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР
МОСКОВСКИЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ ИНСТИТУТ
им. С. ОРДЖОНИКИДЗЕ

На правах рукописи

Г. В. ПРИС

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ
РЕЗУЛЬТАТОВ ИНДУКТИВНЫХ МЕТОДОВ
РУДНОЙ ГЕОФИЗИКИ

Автореферат диссертации, представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель — доктор технических наук,
профессор Л. М. АЛЬПИН

МОСКВА — 1965

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР
МОСКОВСКИЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ ИНСТИТУТ
им. С. ОРДЖОНИКИДЗЕ

На правах рукописи

Г. В. ПРИС

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ
РЕЗУЛЬТАТОВ ИНДУКТИВНЫХ МЕТОДОВ
РУДНОЙ ГЕОФИЗИКИ

Автореферат диссертации, представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель — доктор технических наук,
профессор Л. М. АЛЬПИН

МОСКВА — 1965

Индуктивные методы электроразведки в последние годы начали распространяться в практике геологоразведочных организаций, занимающихся поисками и разведкой рудных месторождений. Этому способствуют достоинства индуктивных методов: большая глубинность и возможность классификации аномалий по удельной проводимости на «рудные» и «безрудные». Большое практическое значение методов и их распространение повышают требования к разработке и теоретическому обоснованию способов интерпретации.

Целью интерпретации результатов индуктивных методов рудной геофизики является определение удельной проводимости, глубины залегания, размеров и формы возмущающих поле тел. Особый интерес представляет определение удельной проводимости, так как эта величина позволяет отличать хорошо проводящие рудные тела от других менее проводящих объектов.

В настоящее время разработаны способы интерпретации, позволяющие определять параметр и с его помощью оценивать проводимость возмущающего тела.

В диссертации предпринята попытка продолжить их разработку и дополнить существующие методы интерпретации способами определения геометрических характеристик проводников и способами интерпретации аномалий электрического типа. При этом большое внимание уделяется теоретическому обоснованию применяемых способов и изучению свойств определяемых при интерпретации величин.

В первой главе диссертации рассматривается история развития индуктивных методов в нашей стране, причем в соответствии с темой, обращается внимание на развитие теории и связанных с ней способов интерпретации.

Методы электрической разведки, использующие переменные поля, начали применяться в Советском Союзе с середины двадцатых годов. Теоретической основой методов послужил сделанный В. А. Фоком и В. Р. Бурсианом расчет нормального электромагнитного поля кабеля в цепи с двумя заземлениями. Однако вопросы, связанные с возбуждением токов в проводящих телах, не были решены и понимались упрощенно. Рудное тело представлялось в виде контура, имеющего активное, индуктивное и емкостное сопротивления и при интерпретации заменялось эквивалентным линейным проводом с током.

В настоящее время индуктивные методы успешно развиваются. Создание аппаратуры, разработка методики измерений, развитие теории и способов интерпретации привели к увеличению эффективности методов и их распространению.

Весьма важными работами в области теории и интерпретации, оказавшими влияние на развитие индуктивных методов, явились работы Ф. М. Каменецкого, А. А. Кауфмана, Ю. В. Якубовского, С. М. Шейнманна и Б. С. Светова. В их работах были заложены основы интерпретации: введено понятие параметра, разработаны способы определения параметра, исследовано влияние проводимости вмещающей среды на аномалии магнитного поля.

Во второй главе излагаются физико-математические основы индуктивных методов электроразведки. На основе классической работы В. А. Фока и В. Р. Бурсиана об электромагнитном поле переменного тока в цепи с двумя заземлениями, рассматриваются нормальные поля различных источников..

Подробно рассматривается электромагнитное поле прямолинейного заземленного на концах отрезка кабеля, расположенного на поверхности однородного проводящего полупространства, при гармонической зависимости тока в кабеле от времени. С помощью преобразования Лапласа выводятся формулы для расчетов неустановившегося нормального поля при мгновенном скачке тока в источнике.

Источник поля в виде прямолинейного заземленного на концах кабеля конечной длины является исходным, из которого путем сложения составляются другие источники, применяемые в индуктивных методах электроразведки. В диссертации таким способом рассчитываются нормальные электромагнитные поля незаземленной петли прямоугольной формы и заземленной полулетти. Приводятся простые приближенные формулы для расчетов в области низких и высоких частот при гармонической зависимости поля от времени, а также в области малых и больших времен при мгновенном скачке тока в источнике.

Большое место в этой главе занимает анализ влияния проводимости вмещающей среды. На основании анализа задачи о возбуждении бесконечно длинного кругового цилиндрического проводника электромагнитным полем плоской волны вводятся понятия аномалий электрического и магнитного типов.

Если на поверхности проводника для нормальных составляющих электрического и магнитного полей выполняются условия

$$E_n = 0, \quad H_n \neq 0,$$

то вторичное электромагнитное поле называется в этом случае вторичным полем магнитного типа.

Если на поверхности проводника выполняются условия

$$H_n = 0, \quad E_n \neq 0,$$

то вторичное электромагнитное поле при этом называется полем электрического типа.

В непроводящей среде при низкой частоте возможны аномалии только магнитного типа, так как в этом случае ток из проводника в окружающую среду вытекать не может ($E_n = 0$). В проводящей среде возможно протекание токов через проводник в среду, что вызывает появление аномалий электрического типа. Аномалии электрического и магнитного типов по разному зависят от вида возбуждающего поля, от формы проводящего включения, от проводимости включения и среды и от частоты. Поэтому они дают различную информацию об изучаемом геоэлектрическом разрезе.

Свойства аномалий электрического типа изучаются в диссертации на основе решения и анализа задачи о возбуждении сфероидального проводника, находящегося в проводящей однородной среде, переменным электромагнитным полем.

В третьей главе излагаются основные принципы интерпретации. Величинами, непосредственно получаемыми при интерпретации, являются параметры и моменты сечения цилиндрического проводника. Для определения этих величин не требуется знать форму проводящего тела.

Параметр проводника пропорционален произведению удельной проводимости на квадрат размеров сечения тела. Эта величина характеризует силу тока в проводнике. Определение параметров основано на изучении асимптотического поведения магнитного поля в области высоких и низких частот.

Моменты характеризуют распределение тока по сечению проводника и связаны с его формой, величиной и условиями залегания. Они определяются по форме графика магнитного поля при низкой частоте.

Способы определения параметра, справедливые для кругового цилиндрического проводника, распространяются на проводники произвольной формы путем обобщения понятия параметра. Параметр определяется как величина, связанная степенной зависимостью с отношением коэффициентов разложения вторичного магнитного поля по степеням частоты в области высоких и низких частот. Такое обобщение позволяет получить теоретическое обоснование известным способам интерпретации и предложить новые.

Теоретически исследуются свойства параметров, их зависимость от формы проводника, координат точки наблюдения поля, способа определения параметра. Вычисляются параметры цилиндрических проводников эллиптического и прямоугольного сечений. Рассматриваются параметры неодно-

родных по проводимости тел: цилиндра и шара, проводимость которых меняется в зависимости от радиуса.

Параметры проводников в методе переходных процессов определяются с помощью коэффициентов разложений вторичного магнитного поля по степеням времени в области больших и малых времен. На полученных формулах могут основываться практические способы интерпретации.

Для исследования поздних стадий переходного процесса магнитного поля в цилиндрическом проводнике выводится интегральное уравнение для вектора-потенциала. С его помощью вычислено значение параметра эллиптического цилиндра и получены оценки для параметров проводников произвольного сечения.

Определение геометрических характеристик проводников основано в диссертации на том, что вторичное магнитное поле, создаваемое текущими в проводнике произвольной формы токами, вне проводника можно представить в виде суммы полей мультиполей различных порядков, моменты которых должны быть определены из результатов измерений. Автором вводятся по аналогии с магниторазведкой комплексные моменты сечения цилиндрического проводника. Эти моменты определяются посредством коэффициентов разложения вторичного магнитного поля на бесконечно большом расстоянии от проводника. Комплексные моменты могут быть определены из результатов измерений, например, с помощью интегральных способов интерпретации.

Исследуется связь получаемых при интерпретации моментов с геометрическими свойствами сечения проводника. Моменты зависят от главных радиусов инерции тела и угла наклона главной оси инерции к горизонту. Изменения формы тела, при которых не изменяются эти величины, не изменяют также и моментов и не могут быть отмечены при интерпретации. Это позволяет в целях наглядности результатов заменять реальные тела «эквивалентными» эллиптическими цилиндрами, полуоси которых равны главным радиусам инерции тел сложного сечения.

В четвертой главе предлагается методика интерпретации, учитывающая тип аномалии.

Полученный в результате измерений график какой-либо составляющей магнитного поля сопоставляется с графиком нормального поля, в результате чего производится выделение аномалий. По форме графика, частотной характеристике и зависимости формы графика от расположения источника поля определяется тип аномалии. Правильное определение типа аномалии очень важно, так как дальнейшая интерпретация аномалий электрического и магнитного типов существенно различна. Рассмотрено определение типа аномалий с помощью комплексных моментов на низкой частоте. Показано,

что если нулевой комплексный момент равен нулю, то наблюдается аномалия магнитного типа. Если же нулевой комплексный момент не равен нулю, то наблюдаемая аномалия есть сумма аномалий электрического и магнитного типов.

В этом случае из результатов измерений при фиксированном положении источника поля невозможно определить электрические и геометрические характеристики возмущающего тела. Для того, чтобы интерпретация была возможна, необходимо проводить измерения при различных положениях источника поля относительно аномального объекта.

Для аномалий магнитного типа описаны практические способы (в том числе несколько новых) определения параметров.

Большое место в данной главе занимает разработка и обоснование приближенных способов определения геометрических характеристик проводников. Приближенные способы базируются на том, что для проводников простой формы, или на больших расстояниях от проводников сложной формы, график вторичного магнитного поля определяется величиной первого отличного от нуля момента. При этом аналитическая зависимость вторичного магнитного поля от координат упрощается, что позволяет предложить простые способы интерпретации по характерным точкам графика с использованием вспомогательных номограмм, или по палеткам. Приведенные способы интерпретации различаются в зависимости от типа аномалии, способа измерений (абсолютные или относительные измерения) и от измеряемой составляющей (вертикальной или горизонтальной).

Некоторые способы интерпретации результатов измерений по методике двух горизонтальных рамок не требуют перестройки графиков относительных измерений в абсолютные.

Рассмотренные способы определения геометрических характеристик возмущающих тел в случае аномалий магнитного типа справедливы в области предельно низких частот. При интерпретации результатов измерений в области средних частот вводятся поправки, учитывающие скин-эффект в проводнике. Рассмотрено определение геометрических характеристик проводника по результатам измерений на высоких частотах (сильный скин-эффект).

Конечным результатом интерпретации по предложенной методике является получение следующих сведений о возмущающих телах.

Для аномалий магнитного типа определяются главные радиусы инерции, угол наклона главной оси инерции к горизонту, глубина залегания центра тяжести сечения тела и удельная проводимость.

Для аномалий электрического типа определяется кажущаяся продольная проводимость и глубина залегания центра тяжести сечения тела.

В пятой главе кратко рассмотриваются особенности интерпретации для менее распространенных способов измерений: методики ортогональных рамок, методики скрещенных рамок и методики измерения полуосей эллипса поляризации магнитного поля.

В шестой главе приводятся конкретные примеры интерпретации результатов измерений на месторождениях медно-колчеданных руд. Подобранные примеры позволяют показать на практике применение различных способов интерпретации аномалий как магнитного, так и электрического типов.

Результаты применения индуктивного метода на Власничихинском месторождении (Северный Кавказ) позволяют продемонстрировать способы интерпретации аномалий магнитного типа при измерениях амплитуды и фазы вертикальной составляющей магнитного поля. Способы интерпретации аномалий магнитного типа при относительных измерениях амплитуды и фазы по методике двух горизонтальных рамок иллюстрируются на примере результатов работ на Маукском месторождении (Средний Урал). Способы интерпретации аномалий электрического типа показываются на примере Урупского месторождения (Северный Кавказ).

Интерпретация аномалий магнитного типа позволила оценить размеры, глубину залегания, угол наклона и удельную проводимость рудных тел Власничихинского и Маукского месторождений. Интерпретация аномалий электрического типа позволила определить глубину залегания и кажущуюся продольную проводимость рудного тела Урупского месторождения. Приведен пример применения интегрального способа интерпретации. Полученные при интерпретации данные хорошо увязываются с геологическими и физическими сведениями о рудных телах.

Примеры показывают возможность применения описанных способов интерпретации в простых геолого-геофизических условиях.

В седьмой главе рассматриваются некоторые возможности дальнейшего совершенствования индуктивных методов и повышения точности интерпретации.

Наличие фона геологических помех, сложность определения соотношения между аномалиями электрического и магнитного типов — все это затрудняет применение количественных методов интерпретации. Повышение точности интерпретации связано с дальнейшим совершенствованием теории, аппаратуры, методики измерений, разработкой новых приемов интерпретации, комплексным изучением геоэлектрического разреза различными методами. В частности, автор оста-

навливается подробнее на возможности создания источников магнитного поля, обладающих направленным действием, и позволяющих увеличить разрешающую способность разведки и повысить точность интерпретации.

Основные результаты проведенной работы сводятся к следующему:

1. Разработаны и опробованы на практике способы определения геометрических характеристик проводников и интерпретации аномалий электрического типа, дополнившие существовавшие ранее способы. Исходя из этого предложена методика интерпретации результатов индуктивных методов, учитывающая тип аномалии. Основу интерпретации составляет определение из результатов измерений так называемых параметров и моментов.

Параметры определяют силу тока в проводнике и зависят от его размеров и удельной проводимости. Моменты характеризуют распределение тока по сечению проводника и связаны с формой, величиной и глубиной залегания проводника.

Рассмотренные способы интерпретации позволяют определить для аномалий магнитного типа координаты центра тяжести сечения проводника, главные радиусы инерции, связанные с размерами проводника, и удельную проводимость.

Для аномалий электрического типа определяется кажущаяся продольная проводимость и координаты центра тяжести сечения.

2. Решены некоторые теоретические задачи, позволившие обосновать применяемые способы интерпретации, уточнить смысл получаемых при интерпретации величин, указать границы, в которых может применяться тот или иной способ. Продолжено изучение влияния вмещающей среды в индуктивном методе разведки, в частности, изучена зависимость аномалий электрического типа от частоты.

3. Рассмотрены некоторые возможности повышения точности интерпретации, в частности, путем применения источников магнитного поля, обладающих направленным действием.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Прис. Г. В. Параметры цилиндрических проводников в индуктивном методе разведки. Изв. АН СССР, серия геофиз., № 11, 1961 г.

2. Прис Г. В. Возможности количественной интерпретации индуктивных аномалий на низкой частоте. Изв. АН СССР, серия геофиз., № 1, 1962 г.

3. Прис Г. В. Переходные процессы в цилиндрическом проводнике после выключения внешнего магнитного поля. Изв. АН СССР, серия геофиз., № 6, 1962 г.

4. Прис Г. В. Определение параметров рудных включений по кривой переходного процесса в методе становления. Изв. АН СССР, серия геофиз., № 6, 1962 г.

5. Прис Г. В., Светов Б. С. О роли способа возбуждения поля в низкочастотном индуктивном методе электроразведки. Труды ин-та ЦНИГРИ, вып. 59, 1964 г.

6. Прис Г. В. Источники магнитного поля, обладающие направленным действием. Изв. АН СССР, физика Земли, № 1, 1965 г.

7. Прис Г. В. Прибор для измерения большой и малой полуосей эллипса поляризации магнитного поля. Описание изобретения к авторскому свидетельству № 139028 с приоритетом от 29 февраля 1960. Опубликовано в «Бюллетене изобретений», № 12 за 1961 г.

8. Светов Б. С., Прис Г. В. Способ измерения магнитного поля в индуктивных методах электроразведки. Описание изобретения к авторскому свидетельству № 136481 с приоритетом от 10 августа 1960. Опубликовано в «Бюллетене изобретений», № 5 за 1961 г.

9. Прис Г. В. Источник магнитного поля для индуктивной геоэлектроразведки. Описание изобретения к авторскому свидетельству № 164084 с приоритетом от 9 апреля 1963 г. Опубликовано в «Бюллетене изобретений», № 14 за 1964 г.