

ФАНО России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт Тектоники и Геофизики имени Косыгина

РЕФЕРАТ
по истории и философии науки
История развития метода магнитотеллурического зондирования

Направление подготовки
05.06.01 Науки о Земле
25.00.10 Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Выполнил: Бронников Анатолий
Константинович, аспирант

Научный руководитель: Каплун
Виталий Борисович, к.г.- м.н.,
звание)
Шифр и наименование научной
специальности

Рецензент: Шевченко Борис Фёдорович,
к.г.- м.н., звание)

Владивосток
2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
ГЛАВА 1. РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ.....	3
ГЛАВА 2. РАЗВИТИЕ АППАРАТУРЫ.....	7
ГЛАВА 3. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИНТЕРПРЕТАЦИИ	10
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	21
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	22

ВВЕДЕНИЕ

Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) — один из методов индукционных зондирований Земли, использующий измерения естественного электромагнитного поля и применяется при геофизических исследованиях. Метод открыт в 1950 году нашим соотечественником А. Н. Тихоновым. Существенный вклад в развитие метода также внёс французский учёный Л. Каньяр. Значительный вклад в теорию МТЗ внесли М. Н. Бердичевский, В. И. Дмитриев; в настоящее время метод широко используется как один из неразрушающих (экологических) методов геофизического исследования Земли, разрабатываются новые способы повышения точности исследований в работах учёных из таких стран, как Россия, США, Франция, Канада, Китай.

На сегодняшний день магнитотеллурическое зондирование Земли – один из основных методов электроразведки, широко применяемый по всему миру для решения разнообразных геологических задач, чему в немалой степени способствует хорошая разработанность его теории. К тому же высокая мобильность аппаратуры, большое количество качественного программного обеспечения позволяют получать предварительные результаты в довольно короткие сроки.

МТЗ используется:

- при исследовании геологического строения земной коры на глубинах до многих сотен километров в фундаментальной геофизике (фундаментальной и в прямом, и в переносном смысле);
- в электроразведке при исследованиях на глубинах от первых десятков метров до первых десятков километров:
 - для поиска и разведки месторождений полезных ископаемых:
 - рудных: уран, никель, медь, платина и др.;
 - нерудных: фосфор, соли, алмаз, графит, геотермальные ресурсы, керамическое сырьё, стройматериалы и др.;
 - горючих: угли, нефть, газ и др.;
 - для решения инженерно-геологических и гидрогеологических задач;
 - для регионального изучения геологических структур.

В данной работе рассматривается путь через который прошёл метод магнитотеллурического зондирования к его текущему уровню развития. Для этого рассказывается о тех изменениях, что произошли в областях теоретических представлений, аппаратной составляющей, а также методах интерпретации.

ГЛАВА 1. РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

Метод магнитотеллурического зондирования появился в 50-х годах прошлого века. Он основан на измерении естественного электромагнитного поля Земли, создаваемого токами текущими в земной коре (теллурическими). Об их существовании известно давно. Ещё в 1868 году сэр Джордж Айри, английский математик и астроном, произвёл первое координированное исследование земных токов и их связи с вариациями магнитного поля. В 1862 году один из первых экспериментов по измерению теллурических токов был проведён Ламонтом в Альпах. Терада в 1917 году, возможно, стал первым, кто измерил зависимость отношений электрического и магнитного поля от проводимости Земли.

В 20-30х годах началось активное использование электроразведки для решения различных геологических задач. Так, фирма Шлюмберже уже тогда проводила работы для поисков неглубоких месторождений нефти в районе Баку и Грозного методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Позднее перед электроразведкой были поставлены задачи наращивания глубинности исследований. Увеличение глубинности при электрических зондированиях на постоянном токе требует увеличения разносов, которые должны в несколько, а иногда и в несколько десятков раз превышать глубину исследований. При больших разносах метод ВЭЗ становится весьма трудоемким, но главная проблема не в этом. Дело в том, что в большинстве осадочных бассейнов имеются слои галогенных пород (гипс, ангидрит, каменная соль), сопротивление которых на несколько порядков превышает сопротивление других осадочных пород, достигая 10^4 – 10^5 Ом м. Если в разрезе присутствует такой высокоомный экран, то получение информации о нижележащих породах методом ВЭЗ крайне затруднительно. Именно это побудило геофизиков к разработке новых методов электромагнитных зондирований на переменном токе, как с искусственным, так и с естественным источником поля. Братья Шлюмберже наблюдали теллурические токи во время их экспериментов с измерением постоянного тока на поверхности. Они также первыми предположили, что теллурические токи могут быть использованы для разведки нефти и газа. Однако полевые измерения показывали сильные вариации и нестабильность в поведении теллурических токов, что сделало трудным развитие какой-либо обоснованной техники интерпретации данных измерений теллурических токов. Главными источниками нестабильности теллурических токов являлись сложные процессы в ионосфере и магнитосфере, которые были в то время неизвестны.

Решение данной проблемы было найдено в 50-х годах, когда независимо друг от друга А.Н. Тихонов (1950) в СССР, Л. Каньяр (1953) во Франции и Т. Рикитаки (1950) в Японии предложили теоретические концепции, ставшие основанием для метода

магнитотеллурического зондирования. Суть открытия, сделанного ими, состояла в том, что влияние процессов в ионосфере и магнитосфере может быть исключено, если электрические компоненты теллурического поля нормализовать компонентами магнитного поля. Тихонов и Каньяр ввели концепцию магнитотеллурического импеданса, определяемого отношением электрического и магнитного полей.

В то время это была революционная идея, так как она позволила геофизикам преобразовать наблюдаемые данные в величины сопротивления земных недр. Этот результат открыл дорогу к развитию метода магнитотеллурического зондирования. Интересно, что ещё в 1934 году Хираяма нашёл точную формулу для отношения электрической напряжённости поля к магнитной на поверхности Земли для падающей плоской волны, Хатакаяма в 1938 даже использовал тензорные удельные проводимости для объяснения разницы между отношением электрической напряжённости поля, направленной вдоль оси x , к магнитной, направленной вдоль оси y , (E_x/H_y) и отношением электрической напряжённости поля, направленной вдоль оси y , к магнитной, направленной вдоль оси x (E_y/H_x). Однако Тихонов и Каньяр заслуженно считаются основателями магнитотеллурического метода, поскольку они создали цельный физический и математический фундамент для метода магнитотеллурического зондирования. Сила подхода Тихонова и Каньяра заключается в том, что, с одной стороны, он основан на простой геоэлектрической модели, а с другой стороны, он даёт геофизически и геологически обоснованный результат, используя относительно простую технику интерпретации. Дальнейшее развитие принципы магнитотеллурической теории получили в работах М. Бердичевского, В. Дмитриева, У. Шмукера, Л. Ваньяна, К. Возоффа, Д. Вивера и П. Вайдельта, а также в трудах многих других исследователей, коллективные усилия которых преобразовали магнитотеллурический метод в практический инструмент геофизики.

Но физическая правомерности модели плоской волны Тихонова–Каньяра казалась спорным вопросом. Дискуссию открыли Дж. Уэйт и А. Прайс, указав на сильную горизонтальную неоднородность внешнего поля. Наиболее резкую позицию в этом вопросе занял Д.Н. Четаев, предложивший заменить одномерную модель Тихонова–Каньяра моделью, в которой горизонтально распространяющаяся волна несёт поля магнитного и электрического типов. В защиту модели Тихонова–Каньяра выступили В.И. Дмитриев, М.Н. Бердичевский, Л.Л. Ваньян. Споры были полезными, так как появилась уверенность в том, что модель Тихонова–Каньяра достаточно хорошо аппроксимирует магнитотеллурические соотношения.

Много времени было потрачено на разработку методов, обеспечивающих устойчивое определение импеданса, определявшегося в первых опытах с большим (иногда очень

большим!) разбросом. М.Н. Бердичевский и Т. Кантуэлл связали этот разброс с влиянием горизонтальных геоэлектрических неоднородностей и от скалярных определений перешли к тензорным.

Марк Наумович Бердичевский первым осознал важность учёта влияния горизонтальных геоэлектрических неоднородностей на МТ-данные. Он ввёл тензорные измерения в МТ-метод, которые скоро стали широко использоваться по всему миру. Тензорный подход резко увеличил объем получаемой информации. Вращая тензор импеданса, можно в каждой точке земной поверхности построить множество кривых кажущегося сопротивления, зависящих от ориентации координатных осей. Эту информацию удалось упорядочить и сконцентрировать на оптимальных направлениях с помощью методов, тяготеющих к классической задаче о собственных значениях матрицы. Весьма удачным подходом оказалось использование фазового тензора, обладающего иммунитетом к приповерхностным гальваническим искажениям. Немало разочарований принесла одномерная интерпретация, игнорирующая искажающее действие горизонтальных неоднородностей Земли, внутренняя противоречивость и геологическая недостоверность которой бросались в глаза. Перелистывая старые журналы, можно найти немало примеров такой вульгарной интерпретации, порождающей ложные структуры. К середине семидесятых годов стало ясно, что магнитотеллурическую интерпретацию надо начинать с диагностики и анализа латеральных эффектов. Таким образом, возникла необходимость в теории, рассматривающей типичные искажения МТ-кривых и методы их нормализации. Эта теория искажений была развита в работах М.Н. Бердичевского, В.И. Дмитриева, Л.Л. Ваньяна и других учёных. Используя критерии и методы теории искажений, можно исключить или, по крайней мере, сгладить латеральные эффекты, открывая путь к одномерной интерпретации МТ-кривых. Такая нормализация кривых не всегда надежна и почти всегда сопряжена с потерей части информации. Поэтому главным вопросом современной магнитотеллурики является переход к двумерным и трехмерным интерпретационным моделям, направление, которое в настоящее время активно развивается российскими и зарубежными учеными.

Многолетние наблюдения подтвердили реализм тензорного подхода. Теперь задача свелась к исключению индустриальных и модельных помех. Ее решение лежало в сфере математической фильтрации, робастной статистики, детерминированного и статистического контроля. Сегодня, благодаря работам Т. Гэмбла, Д. Ларсена, И.А. Безрука, А. Джонса, А. Чейва, Г. Эгберта, мы имеем ряд методов, позволяющих находить магнитотеллурические передаточные функции с довольно высокой точностью.

Развитие эффективных численных методов в 1980-х и 1990-х годах сделало возможным переход от упрощённых составных одномерных разрезов к более реалистичным двумерным или даже трёхмерным геоэлектрическим моделям при интерпретации МТ-данных. Это создало возможности для практического применения МТ-метода в геофизической разведке.

ГЛАВА 2. РАЗВИТИЕ АППАРАТУРЫ

Немаловажным для развития магнитотеллурического метода стало появление новой аппаратуры. Ведь отчасти из-за отсутствия технических возможностей развитие метода началось лишь в 50-х, хотя эксперименты с теллурическими токами производились ранее.

Первой отечественной станцией использовавшейся при работе методом МТЗ была МТЛ-62 (магнитотеллурическая лаборатория). Станция позволяла регистрировать колебания горизонтальных составляющих магнитотеллурического поля с периодом от десяти секунд до нескольких минут. Аппаратура размещалась в автомобиле КАВЗ-651 или вездеходе ГАЗ-47. В аппаратурный комплекс входил осциллограф ЭПО-8, пульт управления ПУ, два усилителя Т-1, два выносных Н-магнитометра МЭ-1. Компоненты поля сохранялись в аналоговой форме, выводились на ленту осциллографа. Питание осуществляется от источников постоянного тока. Аппаратура имеет четыре измерительных канала: два – для электрических составляющих поля, два – для горизонтальных магнитных.

Магнитометр МЭ-1 системы Брюнелли представляет собой устройство для преобразования колебаний магнитного поля в колебания электрического напряжения. В основе работы магнитометра лежит принцип автокомпенсации. С помощью компенсационного магнита вращают магнит-индикатор и добиваются такого положения, когда световой блик, отражённый от зеркала магнита-индикатора, прилипает к краю окна тубуса фотоэлемента, частично освещая катод. Возникающий при этом фототок усиливается в анодной цепи радиолампы и пропускается через обмотку колец Гельмгольца, внутри которых помещён магнит-индикатор. Магнитное поле этой обмотки стремится вернуть магнит-индикатор в прежнее положение. В результате одновременного действия колебаний горизонтальной составляющей магнитного поля и изменений магнитного поля обмотки обратной связи магнит-индикатор остаётся практически неподвижен, а колебания $H_n(t)$ проявляются в пропорциональных колебаниях электрического тока в анодной цепи, которые регистрируются гальванометром.

Следующим этапом развития аппаратуры стала модификация МТЛ-62 - МТЛ-71. В отличие от предыдущей версии в лабораторном комплексе имелось пять измерительных каналов: два – для электрических, три – для магнитных. Диапазон регистрируемых вариаций от одной секунды до ста тысяч секунд. В состав лаборатории МТЛ-71 входят осциллограф ЭПО-10 (или ЭПО-9), усилители УЭТ-71, магнитометры МЭ-71, контрольные кольца Гельмгольца, пульта управления и эталонирования, автоматический синхронизатор осциллограмм, радиостанция, блоки питания.

Затем появилась ЦЭС-1 (цифровая электроразведочная станция) первая в мире цифровая электроразведочная аппаратура. Имела пять измерительных каналов. Диапазон частот от нуля до двадцати герц. Аппаратура была смонтирована на автомобиле Газ-66 и могла транспортироваться поблочно другими видами транспорта. Для ввода полевой информации в ЭВМ использовалось специальное вводное устройство ВУ-1. Регистрация производилась на магнитную ленту типа 6 или 10 шириной 6,25 мм. Ёмкость одной кассеты - 350 м. Одновременно с регистрацией измеряемые величины возможно просматривать в аналоговой форме на экране осциллографа. Запись могла быть воспроизведена с магнитной ленты со скоростью 190 мм/с и просмотрена на экране осциллографа. Питание аппаратуры ЦЭС-1 осуществлялось от бензоэлектрического двигателя.

Новым витком технического прогресса стала станция ЦЭС-2. В ЦЭС-2 впервые были применены индукционные датчики для измерения магнитного поля на высоких частотах. Регистрировались все пять компонент магнитотеллурического поля. Частотный диапазон регистрации от нуля до десяти герц. В поддиапазоне от одной десятой до десяти герц в качестве первичных преобразователей использовались электрические диполи и индукционные датчики, а в поддиапазоне от нуля до одной десятой герца – электрические диполи и статические магнитометры. Для наблюдения сигналов в процессе регистрации в станции используются цифро-аналоговый преобразователь и электронный осциллограф. После окончания регистрации запись может быть воспроизведена и снова просмотрена в аналоговой форме на экране осциллографа.

Естественно развитие магнитотеллурической аппаратуры происходило не только в России. Оно происходило в Америке, Германии, Канаде.

Немецкая фирма Metronix основанная в 1976. Первый микропроцессорный МТ системы, MMS02, был разработан в середине семидесятых годов, и продавались в различные университеты и научно-исследовательские институты. Это оборудование было специально разработано для длиннопериодных МТ зондирований и с чрезвычайно низким энергопотреблением. Ввели системы реального времени МТ MMS04 в 1986 году, и автоматическую МТ система MMS02e в 1987 году. В 1988 году ввели недорогую дистанционно управляемую МТ систему MMS03e, что стал одной из лучших из-за её удобства эксплуатации, высокого качество данных и материально-технической гибкости. GMS-05 была выпущен 1989, а в 1998 г. - ADU-06. Концепция была новой: измерительная часть была отделена от программного обеспечения. В конце 90-х годов стало ясно, что компьютерная техника (ноутбуки) развиваются гораздо быстрее, чем встроенное промышленное оборудование, используемого внутри регистратора данных. Последнее

поколение ADU-07e с выдающейся производительностью и серией датчиков MFS-06e, MFS-07e, MFS-10e и MFS-02e.

С тех пор сменилось несколько поколений магнитотеллурической аппаратуры. В настоящее время и в мире, и в России наиболее широко распространена аппаратура для метода MTЗ серии MTU компании “Phoenix Geophysics” (Канада). Эта аппаратура, разработанная в конце 1990-х годов, и сегодня широко используется электроразведчиками – в мире работает более 3 тысяч комплектов MTU, в том числе около 200 в России.

ГЛАВА 3. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Интерпретация данных метода магнитотеллурического зондирования состоит из нескольких этапов и в каждом из них происходили изменения. Суть изменений кроется в разработке новых численных методов и более оптимальных алгоритмов вычисления необходимых параметров. Рассмотрим развитие каждого этапа в отдельности.

Первым этапом интерпретации МТ-данных является обработка данных, полученных в процессе магнитотеллурического и магнитовариационного зондирования. Она включает определение передаточных функций магнитотеллурических полей, а также компонент электрических и магнитных типперов. Задача анализа данных наблюдений с использованием магнитотеллурических методов, в сущности, является статистической задачей установления линейной корреляции между различными параметрами наблюдений при наличии значительного шума. С развитием науки изменялись и методы обработки данных.

Вероятно, самым распространённым методом обработки параметров, определяющих линейные соотношения между данными наблюдений, является метод наименьших квадратов. Он позволяет найти передаточную функцию (т.е. элементы матрицы магнитотеллурических параметров или магнитовариационных параметров), которая минимизирует сумму квадратов коэффициентов ошибок в линейных соотношениях. Для контроля точности определения матрицы магнитотеллурических и магнитовариационных параметров рассчитываются предикторы ошибок для всех компонент магнитотеллурического поля. Термин предиктор используется для описания вычисления, в котором одна компонента поля рассчитывается на основании других с использованием определённых матриц импедансов и вектора Визе-Паркинсона. Результаты обработки набора данных считаются приемлемыми, если погрешность не превышает нескольких процентов.

Метод наименьших квадратов даёт наилучшие статистические оценки магнитотеллурических и индукционных матриц, только если компоненты остаточного шума удовлетворяют трём условиям. Во-первых, компоненты шума должны быть некоррелированными. Во-вторых, они должны быть нормально распределены (т.е. они должны соответствовать гауссовому распределению). В-третьих, ошибки должны характеризоваться одинаковой дисперсией.

На практике любое из трёх условий может определённым образом нарушаться, что может привести к неприемлемому влиянию на надёжность матриц магнитотеллурических параметров, определённых с использованием метода наименьших квадратов. Например, коррелированный шум часто встречается в полевых наблюдениях, что приводит к существенным искажениям в такой рассчитанной матрице. Реже встречаются предикторы

ошибок, рассчитанные с использованием метода наименьших квадратов, в случаях, когда ошибки в данных наблюдений значительно отличаются от нормально распределённых (гауссовых) ошибок. Наконец, однородное распределение присутствует не всегда, поскольку наблюдаемое распределение ошибок линейно связано с амплитудой магнитотеллурических микропульсаций, особенно в случае больших периодов. Все эти факторы приводят к тому, что на практике магнитотеллурические процессы являются нестационарными.

В последнее время были внесены некоторые улучшения в процедуры предварительной обработки данных магнитотеллурического метода, которые позволяют преодолеть указанные выше сложности с методом наименьших квадратов.

В случае, когда линейные соотношения являются некоррелированными и нормально распределёнными, при этом дисперсии отличаются друг от друга, используют метод взвешенных наименьших квадратов. Он позволяет исключить или уменьшить влияние систематических ошибок с неравными дисперсиями на результаты, полученные при предварительной обработке данных магнитотеллурического метода. Однако этот метод не может дать приемлемых результатов для объёмов данных, для которых отсутствует нормальное распределение шума. В таких случаях необходимо использовать робастный метод оценки ошибок. В робастном методе данные отбрасываются на основании некоторого произвольного решения.

Как уже отмечалось, на практике встречаются ситуации, когда присутствует коррелированный шум. Основной источник такого шума имеет промышленное происхождение. Этот шум оказывает существенное влияние на предварительную обработку данных. Если шум, присутствующий в каналах записи, взаимно коррелирован, то это приведёт к искажениям при определении матриц магнитотеллурических и магнитовариационных параметров. Для устранения этой проблемы в работе (Gamble, Gaubau and Clarke, 1979) было предложено проводить магнитотеллурические и магнитовариационные наблюдения одновременно в двух точках: точке наблюдения и контрольной точке, разделённых некоторым расстоянием.

Расстояние выбирается таким образом, что, с одной стороны, отсутствует взаимная корреляция шума между двумя точками, а с другой стороны, геоэлектрическая структура достаточно сходна в обеих точках. Обычно расстояние между станцией и её удалённой контрольной точкой составляет несколько километров. Метод удалённой привязки даёт намного лучшие результаты по сравнению с наборами данных, полученных с использованием одной станции, в областях, где присутствует сильная составляющая промышленного шума. Если проблема коррелированного шума отсутствует, то использование удалённой привязки не улучшает результаты.

Основой метода наименьших квадратов и метода взвешенных квадратов является минимизация ошибок в линейных соотношениях, т.е. ошибок, определённых между значением, предсказанным для одной компоненты поля на основании других наблюдаемых компонент и значений наблюдений. Однако в этих методах можно определить «плохие» данные на основании того, что ошибка в заданной точке может отличаться на несколько стандартных отклонений от предсказанного значения. Такие плохие точки сильно влияют на окончательный расчёт функции удельной электрической проводимости. В прошлом эта сложность устранялась после визуального контроля данных полевых наблюдений. В работе (Egbert and Booker, 1986) был предложен подход к удалению «плохих» данных на статистической основе, а не посредством эмпирического выбора. Наличие хорошо определённого основания для удаления «плохих» данных способствует выполнению компьютерной редакции с удалением небольшого количества наблюдаемых точек.

Суть метода в минимизации суммы уравнений наименьших квадратов, взвешенных квадратов или минимизация некоторой более общей функции (эти более общие функции называются функциями потерь). Основное значение выбора функции потерь заключается в способе исключения плохих точек или статистически выпадающих значений. Данный подход позволяет получить робастную оценку матриц импедансов и Визе-Паркинсона. Метод робастной обработки может применяться при анализе данных, полученных с использованием удалённой привязки.

Перед проведением количественной интерпретации необходимо выполнить качественный анализ данных магнитотеллурического метода. Процедуры качественной интерпретации включают идентификацию нормальных и аномальных откликов, классификацию аномалий по их геометрическим и частотным характеристикам, диагностику эффектов приповерхностного происхождения, локализацию искажающих объектов и выбор класса моделей, который может быть использован для получения решения обратной задачи. Процедуры, используемые на этом первом этапе интерпретации, в основном, являются графическими по своему характеру и основаны на различных представлениях взаимодействия электромагнитного поля с землёй. Интерпретация обычно начинается с составления фазовых и амплитудных карт для различных компонент поля. При изучении связей аномалий между частотой и поляризацией поля количество карт, которые можно составить, настолько велико, что большой объём содержащейся в них информации может препятствовать их использованию. При более современном анализе полезно сделать динамическое представление благодаря использованию последовательностей видеок кадров или иной формы виртуальной реальности.

На следующем этапе осуществляется графическое представление информации, полученной из предварительно обработанных магнитотеллурических данных. Существует множество способов графического представления матриц магнитотеллурических и индукционных параметров.

Первоначально интерпретация МТ-данных была основана на простой горизонтальнослоистой модели Земли, что позволяло представлять кривые МТ-зондирования в виде простых графиков кажущегося сопротивления относительно периодов наблюдаемых данных или квадратного корня периода (которой пропорционален глубине исследования). Такие кривые строятся с использованием определения кажущегося удельного сопротивления для магнитотеллурического метода.

На практике обычно используются две различные формы кривых кажущегося удельного сопротивления: кривые максимума/минимума МТЗ, основанные на значениях главного импеданса, эффективные кривые МТЗ, основанные на эффективном импедансе. В одномерной модели Тихонова-Каньяра три кривые идентичны, однако в реальной среде они таковыми не являются.

Визе и Шмукер предложили идею векторного представления. Вектор Визе-Паркинсона описывает соотношение между вертикальной составляющей магнитного поля и его горизонтальными компонентами. Его представляют в виде пары векторов, а именно, вещественного и мнимого. Полезной характеристикой вектора вещественной части индукции является тот факт, что он указывает на зоны повышенной удельной проводимости. Поведение стрелки мнимой части индукции зависит от характера аномалии. Если с уменьшением частоты направление изменяется на обратное, такое поведение указывает на приповерхностный эффект. Компоненты векторов Визе-Паркинсона определяются на основании частотного анализа магнитотеллурических микропульсаций. Для ускорения получения информации предварительная оценка основывается на анализе мгновенных значений поля.

Бердичевский и Лилли в 1976 году предложили использовать графики в полярных координатах. Они наилучшим образом показывают связь между элементами матриц магнитотеллурических и индукционных параметров и направлениями осей координат. График в полярных координатах – это след конца вектора при перемещении направления вектора на 360 градусов. Значением отображаемого вектора могут быть модуль, фаза, либо вещественная или мнимая часть любого элемента матрицы магнитотеллурических или индукционных параметров. Графики поляризации могут служить основанием для выводов о геометрии и неоднородности среды.

Геоэлектрическая интерпретация данных магнитотеллурического метода включает построение модели геоэлектрической структуры среды, лучше всего совместимой с получаемой информацией о магнитотеллурическом поле. На данный момент развивается трёхмерная интерпретация, но изначально возможности были ограничены лишь одномерной из-за слабого развития вычислительной техники.

Простейшие используемые модели основаны на одномерной (горизонтально однородной) модели среды. К сожалению, в реальной среде всегда существует определенное отклонение от идеальной одномерности, или неоднородность по горизонтали. В результате всегда существует определенное отклонение наблюдаемой кривой МТЗ от идеальной (нормальной) кривой, рассчитанной теоретически для конкретной модели слоистой среды в данной точке зондирования. Такие отклонения называются искажениями кривой МТЗ, а наблюдаемые в этих случаях кривые называются искаженными кривыми. Формальная интерпретация кривых МТЗ в рамках одномерной модели с игнорированием таких искажений приводит к построению предварительной (грубой) геоэлектрической структуры. Такие предварительные разрезы иногда называются сшитыми, так как отдельные одномерные разрезы сшиты вместе как лоскутное одеяло, при этом в расчет не принимается то, как влияет на каждое зондирование изменение в разрезе, на которое указывает соседнее зондирование.

Учет искажений, вызванных горизонтальными изменениями геоэлектрического разреза, является наиболее важным этапом интерпретации. Таким образом, интерпретация данных магнитотеллурического метода с помощью одномерных моделей состоит из двух этапов: этап качественной интерпретации, включающий анализ искажений кривых МТЗ, выделение районов в области зондирования, характеризующихся сходными формами искажения, и формирование качественной геоэлектрической модели. Количественная интерпретация, включающая одномерную интерпретацию наименее искаженных кривых для получения локальной характеристики квазиодномерной структуры области.

Искаженные кривые МТЗ обнаруживают гальванические и индуктивные эффекты. Гальванические эффекты возникают, когда токи, вызывающие искажение, пересекают границы с различной электрической проводимостью; индукционные эффекты возникают, когда токи, вызывающие искажения, протекают полностью внутри области с аномальной удельной проводимостью.

В областях, характеризующихся линейными геологическими структурами, оси измерительной системы совпадают с осью y , расположенной вдоль простираня структуры, при этом ось x расположена вкрест простираня. Соответствующие кривые МТЗ называются продольной и поперечной кривыми, соответственно. Они отражают продольное и

поперечное направление тока, что соответствует случаям электрической и магнитной поляризации в двумерных структурах.

Практика интерпретации кривых магнитотеллурических зондирований потребовала классификацию их искажений, возникающих в горизонтально-неоднородных средах. И в ходе развития метода она была разработана.

Создание такой классификации встретило множество затруднений, так как аномальное электромагнитное поле представляет собой сложное физическое явление, в котором избыточные токи и заряды взаимодействуют друг с другом. Для преодоления этих затруднений пришлось вводить ряд грубых упрощений, разграничивающих действие избыточных зарядов и токов. Главное упрощение сводится к тому, что аномальное электромагнитное поле условно разделяется на две части: первая возбуждается избыточными зарядами и называется «гальванической», а вторая – избыточными токами и носит название «индукционной». В соответствии с этим говорится о гальваническом и индукционном действии неоднородностей. Следуя такой классификации, искажения кривых магнитотеллурического зондирования можно свести к трём типам:

1. эффекты, сглаживающие изменения глубинного геоэлектрического разреза;
2. эффекты, вызывающие появление ложных слоёв в разрезе;
3. эффекты, порождающие ложные структуры в рельефе глубинных геоэлектрических границ.

Эффекты сглаживания характерны для большинства геофизических методов, а эффекты ложных слоёв и ложных структур являются специфической особенностью глубинного магнитотеллурического зондирования и представляют наибольшую опасность.

Для анализа искажений также ввели понятия гальванической и индукционной связей между слоями. Слои связаны гальванически, если ток перетекает из одного слоя в другой. Индукционная связь между слоями выражается во взаимной индукции токов, текущих в этих слоях.

Для поперечных кривых магнитотеллурического зондирования характерны искажения гальванического типа. Среди них выделяют S-эффект и эффект экранирования.

S-эффект наблюдается в средах, содержащих промежуточный плохо проводящий слой. Этот поверхностный эффект проявляется в том, что из-за нарушений гальванического связи между верхней и нижней частями разреза поперечный импеданс в области низких частот сохраняет зависимость от суммарной продольной проводимости верхней части разреза (в нормальной модели такая зависимость с понижением частоты исчезает). Формальная интерпретация кривых магнитотеллурического зондирования искажённых S-

эффектом ведёт к появлению ложных структур в рельефе глубинных геоэлектрических границ.

S-эффекту сопутствует эффект экранирования. Этот глубинный эффект связан с экранирующим действием промежуточного плохо проводящего слоя. Он выражается в том, что из-за нарушения гальванической связи поперечный импеданс слабо реагирует на изменение части разреза. Формальная интерпретация кривых магнитотеллурического зондирования, искажённых эффектом экранирования, нивелирует рельеф глубинных геоэлектрических структур.

Для поперечных кривых магнитотеллурического зондирования характерны искажения индукционного типа. Они подразделяются на поверхностные и глубинные.

Особенность поверхностных индукционных эффектов заключается в том, что с понижением частоты усиливается действие избыточных токов, текущих вдали от точки наблюдения. Поэтому существует интервал низких частот, в пределах которого импеданс обладает повышенной чувствительностью к изменениям электропроводности верхних слоёв разреза в удалённых зонах. Формальная интерпретация кривых магнитотеллурического зондирования, искажённых поверхностными индукционными эффектами (т.е. боковым влиянием соседних структур), создаёт неверное представление о верхней части разреза вплоть до появления ложных проводящих слоёв.

В районах с нелинейными структурами значительную роль начинают играть новые эффекты, связанные с тем, что ток обтекает плохо проводящие структуры (эффект обтекания) и концентрируется в хорошо проводящих структурах (эффект концентрации). Эти поверхностные эффекты относятся к разряду гальванических. Формальная интерпретация кривых магнитотеллурического зондирования, искажённых эффектами обтекания и концентрации, даёт неверное представление о верхней части разреза и порождает ложный рельеф глубинных геоэлектрических границ.

Следует отметить, что в областях со сложным геологическим строением, которые описываются в трехмерных геоэлектрических моделях, наблюдаются те же эффекты, как и в двухмерных моделях, хотя и в меньшей степени. Однако эти эффекты зачастую усложняются присутствием особых трехмерных искажающих эффектов поляризации и деполяризации (фокусировки и расфокусировки) токов вблизи от квазисферических тел.

Причины различных искажений кривых МТЗ изучаются с использованием численного моделирования геологических условий, характерных для каждого изучаемого региона.

После анализа и определения искажений можно перейти к формальной одномерной интерпретации наименее искаженных кривых с использованием схемы одномерного обращения. Как и в случае с обращением других типов данных электроразведки, инверсия

данных магнитотеллурического метода является некорректной задачей в математическом смысле, т.е. большие изменения в прямой модели могут вызвать лишь незначительные изменения в наблюдаемом поле, и наоборот. Следовательно, необходима регуляризация задачи, т.е. обращение должно формулироваться на основе некоторой эквивалентной корректной задачи. Выбор эквивалентной корректной модели зависит от использования любой имеющейся дополнительной информации наряду с различными гипотезами о том, какие структуры являются приемлемыми с геологической точки зрения в области разведки.

Главный камень преткновения на пути интерпретации при инверсии данных заключается в нелинейности процесса. В результате обращение должно выполняться методом проб и ошибок, т.е. расхождение между предложенной моделью и набором данных наблюдений постепенно сокращается в рамках итеративного процесса. Если первоначальный выбор модели сделан неудачно, для улучшения модели может потребоваться достаточно большое количество итераций. Этим обуславливается необходимость процедуры, обеспечивающей разумный выбор исходной модели, используемой для обратной задачи. Процедура получения приближенной модели с минимальными усилиями называется быстрой и приближенной интерпретацией, или интерпретацией по эмпирическим правилам.

Очень быстрым подходом к грубой интерпретации кривой магнитотеллурического зондирования является совмещение восходящих и нисходящих асимптот, характеризующих проводимость проводящих слоев и толщину резистивных слоев. Чтобы использовать эти асимптоты, кривая полевых исследований магнитотеллурическим методом строится в тех же размерных координатах, которые применяются на эталонном графике асимптот. Лист с кривой данных наблюдений налагается точно на эталон. Затем выбираются восходящие и нисходящие асимптоты, которые дают проводимость и толщину соответствующих слоев.

Подходы, ведущие к определению быстрой и приближенной модели с более высоким разрешением, обеспечиваются различными алгебраическими и дифференциальными преобразованиями кривой средневзвешенного удельного сопротивления. Были предложены многие такие преобразования, однако в настоящее время наиболее популярным представляется преобразование Ниблетта или Бостика.

В середине прошлого века, на раннем этапе развития метода МТЗ, были разработаны сложные ручные методики совмещения наблюдаемой кривой МТЗ с предварительно рассчитанным набором теоретических кривых. Современные методы интерпретации основаны на принципе регуляризированного обращения. Помимо надежности к преимуществам таких методов можно отнести единообразие интерпретации.

Стандартные методы интерпретации данных МТЗ основаны на автоматическом определении «наилучшей» модели, совместимой с данными. В алгоритмах обращения один

из быстрых и приближенных методов, описанных в последнем разделе, может использоваться для формулировки «первоначальной оценки» профиля удельного сопротивления-глубины.

Развитие вычислительной техники привело к возможности работы с трёхмерными моделями и соответственно к появлению методов трёхмерной инверсии.

Например, итеративное борновское обращение данных магнитотеллурического метода. Процесс состоит из двух основных этапов. Сначала оценивается нормальное кажущееся удельное сопротивление путем подбора логарифма наблюдаемого кажущегося удельного сопротивления для всех станций и всех частот с логарифмом кажущегося удельного сопротивления, полученным из модели слоистой среды. Остаток подгонки связывается с логарифмом аномального кажущегося удельного сопротивления. Далее аномальное поле представляется линейной комбинацией откликов отдельных ячеек на основании борновского приближения, и решается трехмерная обратная задача с использованием метода фокусирующего обращения.

Хорошей альтернативой решению полного интегрального уравнения является приближение строгого решения с использованием относительно простых алгоритмов (Habashy et al., 1993; Zhdanov and Fang, 1996a; Zhdanov et al., 2000). Эти методики не только обеспечивают возможность быстрого моделирования, но также являются полезными в построении алгоритмов обращения.

Также использует инверсия данных магнитотеллурического метода на основе квазианалитического метода. Объем расчетов в квазианалитическом приближении практически тот же, что и в борновском приближении в аномальной области. С другой стороны, в работе (Zhdanov et al., 2000) показано, что точность квазианалитического приближения намного выше точности борновского приближения. В рамках квазианалитического обращения можно использовать квазилинейный (или квазианалитический) оператор моделирования (Zhdanov, 2002). Этот оператор значительно ускоряет расчеты на каждом этапе обращения.

Существует также регуляризованное гладкое и фокусирующее обращение данных магнитотеллурического метода. Так как обратная задача магнитотеллурического метода является некорректной. Решение этой задачи требует применения соответствующих методов регуляризации. Традиционный способ регуляризации в решении обратной задачи основан на рассмотрении класса обратных моделей с гладким распределением параметров модели. В рамках классической регуляризации Тихонова можно выбрать гладкое решение, введя соответствующую минимальную норму, или «сглаживающие» стабилизирующие

функционалы. Этот подход широко используется в геофизике и зарекомендовал себя мощным инструментом устойчивого обращения геофизических данных.

Традиционные алгоритмы обращения, дающие гладкие решения для геоэлектрических структур, сталкиваются со сложностями при описании резких границ между различными геологическими формациями. Эта проблема возникает, например, при обращении локального проводящего объекта с резкими границами между проводником и резистивными вмещающими породами, что является типичной моделью в шахтной разведке. В таких ситуациях может быть полезным поиск устойчивого решения в классе обратных моделей с резкими геоэлектрическими границами.

Математическая методика основана на введении специального типа стабилизирующего функционала, так называемого минимального опорного функционала, или минимального градиентного опорного функционала. Эти стабилизаторы выбирают обратные модели из класса моделей с минимальным объемом области с аномальным распределением параметров (минимальный опорный стабилизатор) или с минимальным объемом области, в которой градиент параметров модели не равен нулю (минимальный градиентный стабилизатор). Эти классы моделей описывают компактные объекты (минимальная опора) или объекты с резкими границами (минимальная градиентная опора), которые, например, являются типичными объектами геофизической разведки полезных ископаемых. Эта методика названа фокусирующим регуляризованным обращением, чтобы отделить ее от традиционного гладкого регуляризованного обращения.

Для решения нелинейной обратной задачи используют метод регуляризованного сопряженного градиента. Этот метод может включать гладкое регуляризованное обращение, создающее гладкий образ обращенной удельной проводимости, и сфокусированное регуляризованное обращение, дающее четкий, сфокусированный образ геоэлектрического объекта. В частности, для применения фокусирующих стабилизаторов может использоваться метод повторного взвешивания (Zhdanov, 2002).

В работе (Portniaguine and Zhdanov, 1999a) разработан упрощенный подход к минимизации параметрического функционала с использованием так называемого метода повторно взвешенного регуляризованного сопряженного градиента. Преимущество этого подхода заключается в его простоте. Недостаток связан с тем фактом, что из-за повторного взвешивания функционал несоответствия и стабилизирующий функционал могут изменяться и даже увеличиваться от итерации к итерации (Zhdanov, 2002).

В работе (Zhdanov and Tolstaya, 2004) было предложено использовать нелинейное преобразование неквадратичного стабилизирующего функционала с минимальной опорой в квадратичный функционал с использованием специально подобранного нелинейного преобразования параметров модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За 60 лет развития метод магнитотеллурического зондирования прошёл путь от теории до одного из самых распространённых электроразведочных методов исследования Земли.

Представления о теллурическом токе развились от необъяснимого явления до хорошо проработанной теории. И теперь наблюдения вариаций электромагнитного поля когда-то неизвестной природы, позволяют изучать строение не только земной коры, но и верхней мантии.

Интенсивное развитие аппаратуры позволило достичь высокой точности метода и увеличения глубины зондирования до сотен километров. Что в свою очередь дало большой толчок к развитию всей геофизической науки, и позволило человечеству лучше понять строение Земли.

Рост возможностей вычислительной техники и развитие численных методов, позволяют решать всё более сложные задачи интерпретации, благодаря чему распространяется трёхмерная интерпретация магнитотеллурических данных.

Развитие метода не останавливается и сейчас основные направления – это производство новой более совершенной аппаратуры, и дальнейшее развитие методов интерпретации.

Всё это делает метод магнитотеллурического зондирования – одним из самых востребованных методов изучения Земли и гарантирует ему долгое существование, а также способность принести новые знания людям.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бердичевский М.Н. Интерпретация аномалий переменного электромагнитного поля Земли / М.Н. Бердичевский, М.С. Жданов – М.: Недра, 1981. – 327 с.
2. Бердичевский М.Н. Электрическая разведка методом магнитотеллурического профилирования / М.Н. Бердичевский – М.: Недра, 1967. – 254 с.
3. Ваньян Л.Л. Глубинная электропроводность океанов и континентов / Л.Л. Ваньян, П.П. Шиловский – М.: Наука, 1983. – 83с.
4. Ваньян Л.Л. Магнитотеллурические зондирования слоистых сред / Л.Л. Ваньян, А.И. Бутковская – М.: Недра, 1980. – 228 с.
5. Вольвовский Б.С. Краткий справочник по полевой геофизике / Б.С. Вольвовский, Н.Я. Кунин, Е.И. Терехин – М.: Недра, 1977. – 391с.
6. Дмитриев В.И. Альбом палеток для магнито-теллурического зондирования в неоднородных средах / В.И. Дмитриев, М.Н. Бердичевский, Г.А. Кокотушкин – М.:Издательство московского университета, 1975, – Ч. IV – 101 с.
7. Дмитриев В.И. Магнитотеллурический метод и научная школа геофизиков МГУ / В.И. Дмитриев, А.Г. Яковлев, Н.С. Голубцова и др. // Геофизика в МГУ. Вчера. Сегодня. Завтра. 1944 - 2014. Сборник трудов Научной конференции, посвящённой 70-летию кафедры геофизики в Московском университете. — Сампринт Москва, 2014. — С. 80–98.
8. Жданов М.С. Геофизическая электромагнитная теория и методы / М.С. Жданов. - Пер. с англ. / Под ред. Е.П. Велихова. – М.: Научный мир, 2012. – 680с.: ил., 2с. цв. ил.
9. Ковтун А.А. Строение коры и верхней мантии на северо-западе Восточно-Европейской платформы (по данным магнитотеллурических зондирований) / А.А. Ковтун – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1989. – 284 с.
10. Рокитянский И.И. Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования / И.И. Рокитянский – Киев: Наукова думка, 1975. – 279 с.
11. Спичак В.В. Магнитотеллурические поля в трёхмерных моделях геоэлектрики / В.В. Спичак – М.: Научный мир, 1999. – 204 с.
12. Электроразведка: Справочник геофизика. В двух книгах/ Под ред. В.К. Хмелевского и В.М. Бондаренко. Книга первая. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1989. – 438 с.: ил.