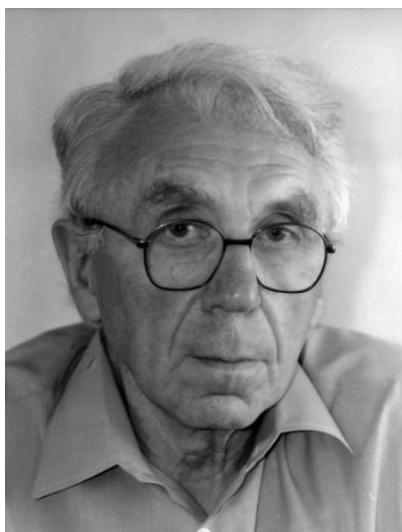


**В.И. Дмитриев, А.Г. Яковлев, Н.С. Голубцова, П.Ю. Пушкарёв,  
В.А. Куликов, В.К. Хмелевской, Н.Л. Шустов**  
*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*



*Памяти выдающегося электроразведчика,  
одного из создателей магнитотеллурики,  
прекрасного преподавателя и человека  
МАРКА НАУМОВИЧА БЕРДИЧЕВСКОГО*

## **МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИЙ МЕТОД И НАУЧНАЯ ШКОЛА ГЕОФИЗИКОВ МГУ**

На сегодняшний день магнитотеллурическое зондирование Земли (МТЗ) – один из основных методов электроразведки, широко применяемый по всему миру для решения разнообразных геологических задач, чему в немалой степени способствует хорошая разработанность его теории. В создании метода и его развитии огромную роль сыграли ученые Московского университета академик А.Н. Тихонов (1906–1993), профессор М.Н. Бердичевский (1923–2009) и их ученики.

Основное преимущество МТЗ, обладающего наибольшей среди всех электроразведочных методов глубинностью, связано с тем, что в качестве источника сигнала используется естественное электромагнитное поле Земли и благодаря этому отпадает необходимость создания генераторных систем, что обуславливает высокую экономическую эффективность метода.

### **Основы метода**

Естественное переменное электромагнитное поле Земли (магнитотеллурическое поле) порождается электрическими токами в ионосфере, дальними грозами и другими источниками, находящимися на достаточном удалении от точки наблюдения и носит региональный характер. Теория МТЗ основана на приближении плоской “волны” – модели первичного электромагнитного поля, не меняющегося в горизонтальном направлении на расстояниях, существенно превышающих глубину проникновения поля. При описании источника поля слово “волна” применяется условно. На самом деле, в диапазоне частот, используемых в различных модификациях магнитотеллурического метода (от  $10^5$  Гц до  $10^{-4}$  Гц), электромагнитное поле в земле носит не волновой, а квазистационарный характер и описывается дифференциальным уравнением типа уравнения теплопроводности или уравнения диффузии. Модель плоской “волны” с высокой точностью отображает поведение любого источника при условии его нахождения на большом удалении от точки наблюдения.

Естественное электромагнитное поле содержит колебания различной частоты. Переменное магнитное поле по закону электромагнитной индукции создает вихревые электрические поля. Электрическое поле порождает в проводящей земле электрический ток, у которого, в свою очередь, имеется свое магнитное поле. Важно отметить, что хотя первичные электрические токи в земле порождаются индукционным способом, дальнейшее их взаимодействие с горизонтально-неоднородной средой приводит к возникновению вторичного поля как индукционной, так и гальванической природы.

За счет явления скин-эффекта более высокочастотные колебания магнитотеллурического поля довольно быстро затухают с глубиной, в то время как низкочастотные компоненты поля проникают на большие глубины. Соответственно, высокочастотные составляющие поля несут информацию лишь о приповерхностной части разреза. С понижением частоты вклад более глубоких частей разреза в наблюдаемое поле возрастает, и мы получаем информацию о глубинной части геоэлектрического разреза. Таким образом, МТЗ представляет собой разновидность индукционного частотного зондирования. В отличие от других методов индукционного зондирования (частотного зондирования и зондирования становлением поля), МТЗ не требует использования генераторных установок, обеспечивая при этом глубинность исследований, не достижимую при использовании методов с контролируемыми источниками поля.

Еще одно существенное отличие рассматриваемых методов от методов с контролируемыми источниками связано с необходимостью перехода от отдельных компонент электромагнитного поля к так называемым передаточным функциям, представляющим собой, по сути, отношения определенных компонент поля, измеренных в одной или разных точках. Переход к передаточным функциям позволяет исключить из рассмотрения неизвестные параметры источников естественного электромагнитного поля. Этот подход был предложен А.Н. Тихоновым в 1950 г. [1].

В настоящее время используются следующие передаточные функции: тензор импеданса  $Z$ , отражающий связь горизонтальных компонент электрического и магнитного полей в точке наблюдения; матрица Визе–Паркинсона  $W$ , связывающая вертикальную компоненту магнитного поля с горизонтальными компонентами в точке наблюдения; горизонтальный магнитный тензор  $M$ , отражающий связь горизонтальных компонент магнитного поля в точке наблюдения и базовой точке; теллурический тензор  $T$ , связывающий горизонтальные компоненты электрического поля в точке наблюдения и базовой точке.

Существует несколько вариантов магнитотеллурического метода, обеспечивающих разную глубинность исследований в зависимости от регистрируемого диапазона частот электромагнитного поля:

1. Глубинное магнитотеллурическое зондирование (ГМТЗ) – метод изучения земной коры и верхней мантии;
2. Собственно метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ) – метод изучения осадочных бассейнов и верхней части фундамента;
3. Метод аудиомангнитотеллурического зондирования (АМТЗ) – метод изучения геологического разреза до 1–2 км;
4. Метод радиомангнитотеллурического зондирования (РМТЗ) – метод изучения верхней части геологического разреза до 100 м.

Отметим, что высокочастотные модификации АМТЗ и РМТЗ отличаются от собственно МТЗ более высокой производительностью при полевых исследованиях: время наблюдения на точке при АМТЗ составляет 20–25 мин, при РМТЗ – 1–2 мин, а в методе МТЗ – не менее 8 ч.

## История становления и развития магнитотеллурических методов

Начиная с 20–30-х годов прошлого столетия, электроразведка активно используется для решения разных 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. Одним из таких методов стал метод магнитотеллурического зондирования, рождение которого связано с именем выдающегося советского ученого математика и геофизика академика Андрея Николаевича Тихонова (1906–1993).

Большинство знает академика Тихонова как ученого в области математической физики и вычислительных методов. Именно им в МГУ был создан факультет вычислительной математики и кибернетики (ВМиК), которым Андрей Николаевич руководил многие годы. Однако значительная часть его научной жизни тесно связана с геофизикой: в 1929–1956 гг. Андрей Николаевич был сотрудником Геофизического института (ныне Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН), достаточно быстро став заведующим отделом математической физики.

Академик А.Н. Тихонов внес большой вклад в развитие теории геофизических методов и, прежде всего, электроразведки. Наиболее важными для геофизиков являются его работы в области методов решения некорректных задач, на которых основана общая идеология решения обратных задач в геофизике.

В 1950 г. в Докладах Академии наук СССР вышла статья А.Н. Тихонова “Об определении электрических характеристик глубоких слоев земной коры” [1], в которой была обоснована возможность использования естественного электромагнитного поля Земли для получения геоэлектрического разреза. Естественное поле Земли изучалось и раньше, однако использовались или только его электрические компоненты, или только магнитные. Предложенный А.Н. Тихоновым метод заключался в изучении частотной зависимости отношения электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля на поверхности Земли (импеданса) для определения электрических свойств ее внутренних слоев. При этом фундаментальное значение имела доказанная А.Н. Тихоновым теорема единственности обратной задачи – было показано, что распределение электропроводности по вертикали однозначно определяется частотной зависимостью импеданса. При использовании широкого спектра частот появляется возможность судить об электрическом строении осадочного чехла, земной коры и мантии. Таким образом, была показана возможность зондирования Земли с помощью магнитотеллурических наблюдений, выполняемых в одной точке земной поверхности. Эта простая идея привела к созданию нового геофизического метода, названного магнитотеллурическим зондированием (МТЗ), в рамках которого произошло слияние разведочного и глубинного направлений геоэлектромагнетизма; новая ветвь геофизики стала называться магнитотеллурикой.

Магнитотеллурика сразу же привлекла внимание геофизиков всего мира, так как открывала новые возможности для изучения строения планеты. Наиболее интересным событием того времени было появление статьи Луи Каньяра “Фундаментальная теория магнитотеллурического метода геофизической разведки”, опубликованной в 1953 г. в журнале *Geophysics* [2]. Л. Каньяр трансформировал частотные характеристики импеданса в кривые кажущегося сопротивления и на примере многослойных моделей показал, что МТЗ может быть прекрасным инструментом для электроразведки на обширных площадях. Каньяр верил в быстрый успех магнитотеллурики и утверждал, что МТЗ выведет электроразведку из тупика, в котором она оказалась из-за ограничений, связанных с применением постоянного тока.

Идеи А.Н. Тихонова и Л. Каньяра намного опередили геофизику первого послевоенного десятилетия. Неудивительно, что практическая реализация МТЗ заняла почти двадцать лет. В работе участвовали геофизики многих стран, их общие усилия были направлены на разработку теории, аппаратуры, вычислительной электродинамики, техники интерпретации. Первые магнитотеллурические опыты были поставлены М.Н. Бердичевским, Н.В. Липской, Т. Кантуэллом, Ф. Бостиком, Д. Рэнкином.

Один из первых выпускников кафедры геофизики МГУ выдающийся отечественный ученый-электроразведчик Марк Наумович Бердичевский на студенческой скамье и во все последующие годы большую часть своих работ посвятил развитию методов электроразведки, связанных с использованием естественного электромагнитного поля Земли. После окончания в 1949 г. университета в течение двадцати лет Марк Наумович работал во ВНИИгеофизике, на первом этапе занимаясь разработкой методов теллурических токов и дипольного электрического зондирования. В шестидесятые годы он активно развивал теорию метода магнитотеллурического зондирования и внедрял его в практику. Благодаря усилиям М.Н. Бердичевского, в СССР магнитотеллурическим методом работали десятки полевых геофизических отрядов, было получено множество важных геологических результатов. Например, в Западной Сибири эти работы позволили выявить структуры, в которых были обнаружены крупнейшие месторождения нефти и газа.

В 1969 г. М.Н. Бердичевский становится профессором кафедры геофизики МГУ и, продолжая научные исследования в области МТЗ, ведет обширную педагогическую и научно-организационную работу.

Одному из авторов настоящей статьи, В.И. Дмитриеву, посчастливилось не только быть учеником академика Тихонова, но и на протяжении более чем сорока лет оставаться его соратником и другом. С 60-х годов В.И. Дмитриев занимался решением прямых задач электродинамики методом интегральных уравнений. Им выполнены расчеты магнитотеллурического поля для целого ряда принципиальных моделей и на их основе совместно с М.Н. Бердичевским разработана теория искажений кривых МТЗ в горизонтально-неоднородных средах. Одновременно были разработаны методы интерпретации магнитотеллурических данных. Подходы, предложенные В.И. Дмитриевым и М.Н. Бердичевским, были опробованы при интерпретации магнитотеллурических данных в Байкальской рифтовой зоне, Каскадной зоне субдукции, на Тянь-Шане и в других местах.

По инициативе М. Н. Бердичевского в 1972 г. В. И. Дмитриевым был разработан новый курс “Теория геофизических полей”. Впоследствии Марк Наумович модернизировал этот курс и на протяжении многих лет читал его на геологическом факультете МГУ. Выпускники кафедры геофизики разных поколений вспоминают лекции по “Теории геофизических полей” как наиболее яркие и интересные за все время обучения в университете.

В 1980 г. в связи с развитием методов решения обратных задач геофизики на факультете был введен курс “Методы решения некорректных задач”, который разрабатывал и читал В. И. Дмитриев. За годы совместной работы М.Н. Бердичевским и В.И. Дмитриевым опубликован целый ряд фундаментальных монографий, посвященных магнитотеллурическому методу (см., например, [3–5]).

В 1970–1980 гг. по инициативе М.Н. Бердичевского, В.И. Дмитриева и Л.Л. Ваньяна, проводились Всесоюзные школы по электромагнитной индукции в Земле, сыгравшие огромную роль в развитии отечественной электроразведки. Формат этих школ объединял академическую, вузовскую и производственную общественность и предполагал не только лекции ведущих ученых и широкий спектр научных докладов по актуальным проблемам, но и возможность интенсивного неформального общения участников.

### **Проблемы, с которыми сталкивался метод МТЗ**

В своем развитии магнитотеллурика прошла через ряд критических моментов, сталкиваясь с проблемами и теоретического, и практического характера, в преодолении которых важнейшую роль сыграли ученые Московского университета.

Самым спорным казался вопрос о физической правомерности модели плоской волны Тихонова–Каньяра. Дискуссию открыли Дж. Уэйт и А. Прайс, указав на сильную горизонтальную неоднородность внешнего поля [6, 7]. Наиболее резкую позицию в этом вопросе занял Д.Н. Четаев, предложивший заменить одномерную модель Тихонова–Каньяра моделью, в которой горизонтально распространяющаяся волна несет 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. Многолетние наблюдения подтвердили реализм тензорного подхода. Теперь задача свелась к исключению промышленных 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 (см., например, [8, 9]), мы имеем ряд методов, позволяющих находить магнитотеллурические передаточные функции с довольно высокой точностью.

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 [5, 10]. Весьма удачным подходом оказалось использование фазового тензора, обладающего иммунитетом к приповерхностным гальваническим искажениям [11].

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 разработана в работах М.Н. Бердичевского, В.И. Дмитриева, Л.Л. Ваньяна и др. (см. например, [12, 13]). 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.

И, наконец, несколько слов об эффективности магнитотеллурики. Обратная задача магнитотеллурического зондирования неустойчива и, как следствие, некорректна. Впрочем, эта неопределенность характерна для любого другого метода электрического или электромагнитного зондирования. Решение такой задачи имеет смысл, если ограничить область поиска, используя априорные представления о разрезе. Очевидно, что эффективность магнитотеллурической интерпретации находится в прямой связи с объемом априорной геолого-геофизической информации. Краеугольным камнем магнитотеллурической интерпретации является теория регуляризации некорректных задач, центральные положения которой были сформулированы А.Н. Тихоновым [14] в начале 1960-х годов.

### **Современное состояние магнитотеллурического метода**

#### *Технология полевых наблюдений*

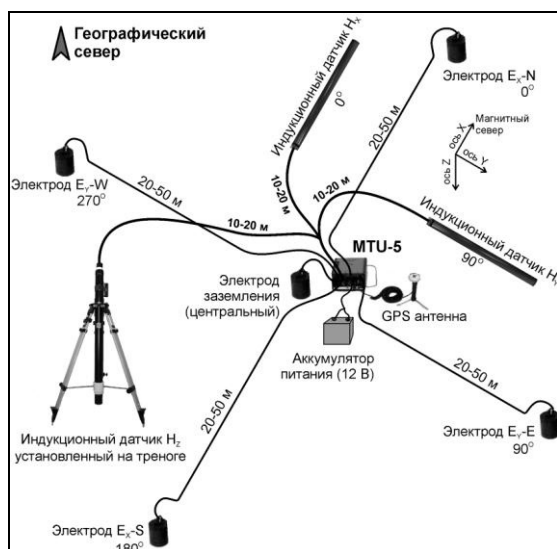
В советское время наиболее распространенной аппаратурой для метода МТЗ были станции ЦЭС-1 и ЦЭС-2, разработанные на рубеже 60–70-х годов прошлого столетия. Станция ЦЭС-1 была первой в мире электроразведочной цифровой аппаратурой. Комплекты ЦЭС-1 и ЦЭС-2 монтировались на базе автомобиля или вездехода и обслуживались отрядом в несколько человек. Аппаратура была достаточно громоздкой и ненадежной. Всего было выпущено несколько сотен комплектов этой аппаратуры; с ней одновременно работало более 100 отрядов по всей территории СССР.

Измерения компонент электрического поля выполнялись с помощью заземленных неполяризующимися электродами горизонтальных линий. Регистрация вариаций геомагнитного поля проводилась магнитостатическими вариометрами для низких частот. В ЦЭС-2 впервые были применены индукционные датчики для измерения магнитного поля на высоких частотах.

С тех пор сменилось несколько поколений магнитотеллурической аппаратуры. В настоящее время и в мире, и в России наиболее широко распространена аппаратура для метода МТЗ 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.

Станции *MTU* компактны и автономны; отряд из двух человек может оперировать 5–7 станциями, расставляя их по очереди. Кроме того, эти станции просты в эксплуатации, надежны и неприхотливы. Благодаря перечисленным достоинствам станций *MTU*, их использование позволяет существенно повысить производительность электроразведочных работ и снизить затраты на их производство. Определение координат и точного времени осуществляется в автоматическом режиме с ис-

пользованием встроенного модуля *GPS*. Регистрация проводится синхронно несколькими станциями. Это позволяет, с одной стороны, получать не только передаточные функции между компонентами в одной точке (тензор импеданса, матрица Визе–Паркинсона), но и пространственные передаточные функции – теллурический тензор, горизонтальный магнитный тензор. С другой стороны, синхронные наблюдения позволяют подавить помехи, не укладывающиеся в поле плоской волны от относительно близких источников. В аппаратуре *MTU* измерения компонент геомагнитного поля осуществляются широкополосными индукционными датчиками. Расстановка аппаратуры и датчиков на местности показана на рис. 4.



**Рис. 4.** Пятиэлектродная крестообразная установка МТЗ (аппаратура *MTU*)

При глубинных исследованиях методом МТЗ для измерения вариаций магнитного поля в 70–80-е годы применялись, главным образом, кварцевые вариометры; позже широкое распространение получили феррозондовые магнитометры. Использование современных феррозондовых магнитометров позволяет регистрировать вариации геомагнитного поля с периодом до суток.

#### *Обработка, анализ и интерпретация данных*

Процесс обработки записей магнитотеллурического поля выполняется в следующей последовательности:

1. Просмотр и редакция временных рядов записей электромагнитного поля;
2. Получение основных передаточных функций (кривых МТЗ);
3. Редактирование результатов обработки (пост-обработка).

В результате обработки мы получаем гладкие частотные зависимости передаточных функций. Главные компоненты тензора импеданса пересчитываются в кривые кажущегося сопротивления.

На следующем этапе проводится анализ магнитотеллурических данных, играющий важную роль, поскольку позволяет корректно выбрать интерпретационную модель и общую стратегию инверсии. Основные задачи этого этапа состоят в следующем:

- выявление закономерностей поведения передаточных функций в зависимости от пространственных координат и частоты;
- выделение основных черт геоэлектрического строения и положения аномальных объектов;
- оценка размерности геоэлектрической ситуации в исследуемом районе и выбор интерпретационной модели;

- анализ и оценка характера искажений передаточных функций;
- выбор компонент передаточных функций, наиболее чувствительных к целевым объектам и наименее искаженных геоэлектрическими объектами-помехами;
- коррекция приповерхностных гальванических искажений.

На основании результатов анализа МТ-данных составляется качественная геоэлектрическая модель. После этого при необходимости выполняется математическое моделирование (1D, 2D, 3D) для оценки чувствительности МТ-данных к ее различным элементам и выбора стратегии инверсии.

На этапе инверсии используется ряд подходов:

1. Автоматическая 1D-, 2D-, 3D-инверсии с большим количеством мелких элементов с регуляризацией общего вида – ограничениями на само значение удельного сопротивления, на скорость его изменения и на его вторую пространственную производную;

2. Автоматизированная 1D-, 2D-, 3D-инверсия с фиксированной геометрией, в которой рассматриваются кусочно-однородные блоки, и подбирается их удельное сопротивление;

3. Интерактивная 1D-, 2D-, 3D-инверсия с возможностью гибко использовать конкретную априорную информацию по данному району (фиксация или ограничение положения отдельных границ и удельного сопротивления). В этом подходе сочетаются элементы ручного и автоматизированного подходов.

При одномерной интерпретации используются инварианты или основные компоненты тензора импеданса (амплитудные и фазовые кривые МТЗ).

В двумерном случае магнитотеллурическое поле распадается на две части – ТЕ- и ТМ-моды. В ТЕ-моде, отвечающей токам, текущим вдоль структур, аномальное поле носит чисто индукционный характер. Кроме продольного импеданса (который пересчитывается в кривые кажущегося сопротивления и фазовые кривые) мы имеем аномалии вертикального и горизонтального магнитного поля. В ТМ-моде на земной поверхности из передаточных функций мы имеем только поперечный импеданс, и, соответственно, поперечные фазовые и амплитудные кривые МТЗ. При решении обратной задачи в двумерном случае, как правило, основываются на ТЕ-моде, которая в целом может дать правильное представление о геоэлектрическом разрезе. ТМ-мода используется для уточнения высокоомных частей разреза, которые слабо отражаются в ТЕ-моде.

В трехмерном случае могут быть использованы все передаточные функции магнитотеллурического поля, однако, базовой функцией является импеданс. Часто используют не весь тензор импеданса, а ограничиваются только основными его компонентами.

Следует отметить, что с повышением размерности обратной задачи не только резко увеличивается время решения вычислений, но, отчасти, теряется и детальность исследования. Поэтому на практике преимущественно ограничиваются одномерной интерпретацией для осадочных бассейнов и двумерной интерпретацией для дислоцированных районов. Трехмерная инверсия требуется в тех случаях когда мы имеем площадную съемку и когда из анализа магнитотеллурических данных мы видим, что трехмерные эффекты существенны.

#### *Практическое использование МТЗ*

Области применения МТЗ включают в себя региональные и нефтегазовые исследования, разведку твердых полезных ископаемых, поиски гидротермальных ресурсов и ряд других.

Региональные магнитотеллурические исследования направлены на изучение региональных особенностей строения основных структурных этажей осадочного чехла, поведения кровли кристаллического фундамента, исследования глубинных разломов, распределения проводящих зон в земной коре, на изучение распределения сопротивления в верхней мантии.

При поисках углеводородов МТЗ эффективно дополняет сейсморазведочные исследования, позволяя получать информацию о литологических и коллекторских свойствах горных пород. В ряде случаев, когда сейсморазведка демонстрирует низкую эффективность, МТЗ оказывается наиболее информативным методом при решении структурных задач. Большая глубинность зондирования обуславливает возможность применения метода для изучения глубоких горизонтов осадочного чехла.

Магнитотеллурическое зондирование, и, в особенности, его высокочастотная модификация (АМТЗ), является высокоэффективным инструментом при разведке твердых полезных ископаемых, включая сульфидные руды и трубки взрыва. Оно позволяет изучать как непосредственно сами рудные объекты, так и глубинное строение рудных районов и зон.

Наконец, МТЗ играет одну из ведущих ролей при поисках и изучении гидротермальных месторождений, так как такие объекты представляют собой скопления хорошо проводящих высокотемпературных минерализованных вод, которые обладают высокой электропроводимостью.

### **О магнитотеллурических проектах в России и за рубежом, реализованных при участии геофизиков МГУ**

За последние 40 лет геофизики МГУ приняли активное участие в реализации более ста магнитотеллурических проектов как в России, так и за рубежом. Приведем несколько примеров таких проектов, которые позволят оценить и возможности метода МТЗ, и масштабы его применения на практике.

#### *Каскадная зона субдукции*

В 1985–1987 гг. на западном побережье Северной Америки были выполнены магнитотеллурические (МТ) и магнитовариационные (МВ) исследования в рамках международного проекта *EMSLAB*, целью которого было изучение геоэлектрического строения тектоносферы в области погружения океанической плиты Хуан де Фука под Северо-Американскую плиту. Точки наблюдения располагались как на дне океана, так и на континентальном субширотном профиле Линкольн, пересекающем зону субдукции, Береговой хребет, осадочный бассейн Вилламет и Каскадные горы.

На первом этапе интерпретации магнитотеллурических данных была создана двумерная модель региона, отражающая современные геодинамические концепции, с помощью которой исследовалась чувствительность магнитотеллурических и магнитовариационных данных к ее основным структурным элементам. Был выполнен также ряд пробных инверсий, характеризующих информативность разных мод электромагнитного поля, показавших, в частности, что ТЕ-мода обладает более высокой чувствительностью по отношению к коровым проводящим зонам и низкоомной астеносфере, а ТМ-мода позволяет лучше определить связь океанических и континентальных структур.

На втором этапе проводился анализ магнитотеллурических и магнитовариационных данных, полученных по линии профиля Линкольн, показавший преимущественно двумерный характер среды и позволивший оконтурить области трехмерных низкочастотных искажений.

Содержанием последнего – третьего – этапа была инверсия данных. Для грубых оценок глубинного строения использовалась программа *REBOCC*, позволившая построить сглаженный геоэлектрический разрез. Основными элементами построенной модели были начинающаяся с глубин ~40 км океаническая астеносфера и обширная проводящая зона в континентальной коре и мантии, приуроченная к вулканической провинции Каскадных гор и относящаяся к интервалу глубин примерно от 30 до 100–150 км. Строение верхних горизонтов (до глубины 3 км) было определено с помощью одномерной интерпретации высокочастотных континентальных данных. Полученные результаты вводились в стартовую модель для двумерной интерпретации низкочастотных данных. Полная интерпретационная модель была сконструирована с учетом геотермических, сейсмических и гравиметрических данных.

Далее использовалась программа Варенцова–Голубева, позволяющая вести двумерную инверсию в классе блочных моделей с фиксированной геометрией. Наибольшее внимание при этом уделялось низкочастотным данным, полученным на континентальном сегменте профиля. Инверсия выполнялась в режиме проверки гипотез. Геометрия блоков выбиралась так, чтобы был обеспечен свободный выбор любой из рассматриваемых гипотез. Инверсия была разбита на большое количество подэтапов, на каждом из которых использовались разные компоненты данных и разные начальные приближения. Надежную базовую геоэлектрическую модель региона удалось построить по магнитовариационным данным, позволившим выявить глубинные проводящие зоны. Эта модель была уточнена при инверсии ТМ-моды, характеризующей степень гальванической связи выявленных структур.

Основным результатом работы стала обобщенная геоэлектрическая двумерная модель исследуемого региона (рис. 6), полученная путем схематизации результатов последовательной инверсии магнитовариационных данных и данных ТМ-моды. На разрезе отчетливо выделяются погружающаяся океаническая плита, включающая низкоомные осадки ( $\rho=20$  Ом·м), высокоомную литосферу ( $\rho=500$ –4500 Ом·м) и низкоомную астеносферу ( $\rho=15$ –30 Ом·м); низкоомный слой в нижней части континентальной коры ( $\rho=20$  Ом·м,  $z=25$ –40 км); низкоомная континентальная астеносфера ( $\rho=30$  Ом·м,  $z=100$ –155 км); низкоомное столбообразное тело ( $\rho=30$  Ом·м), соединяющее астеносферу с коровым проводящим слоем.

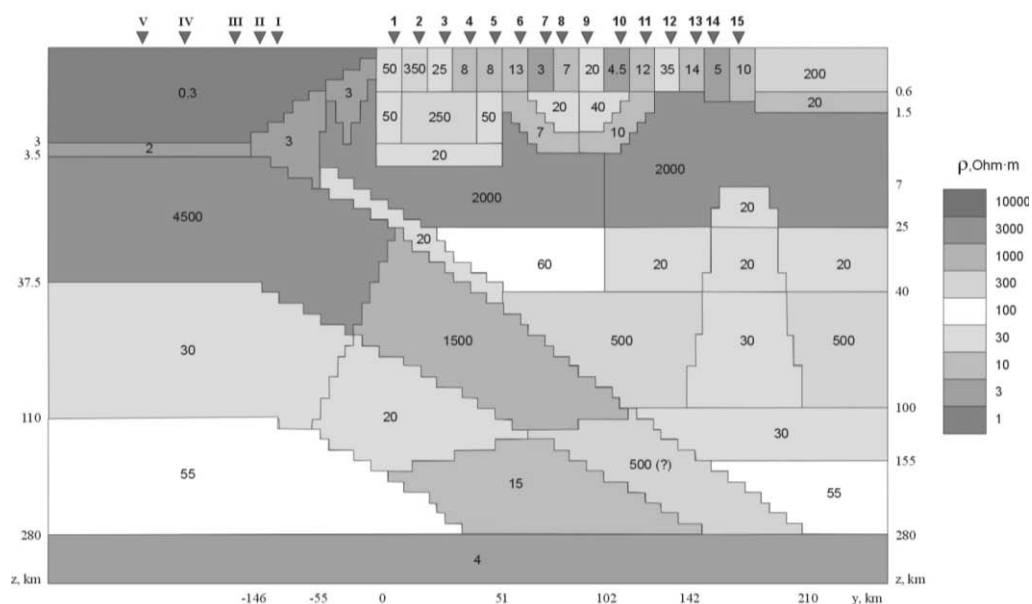


Рис. 6. Геоэлектрическая модель Каскадной зоны субдукции

Геоэлектрическая модель помогает составить представление о флюидном режиме субдукционной зоны. Выделение флюидов, по-видимому, связано с несколькими механизмами. Сначала на небольших глубинах (до 10–20 км) под действием возрастающего литостатического давления выделяется свободная вода, содержавшаяся в микропорах и микротрещинах субдуцируемой плиты. Затем на глубинах более 30 км при температурах  $> 400^{\circ}\text{C}$  начинаются реакции дегидратации, приводящие к образованию корового проводящего слоя и вызывающие “мокрое” плавление в астеносфере. Проводящие астеносферные расплавы мигрируют вверх, образуя вулканическую дугу Высоких Каскад.

### *Результаты МТЗ на Восточно-Европейской платформе*

С 1997 г. на Восточно-Европейской платформе отработан ряд профилей, пересекающих Московскую синеклизу, Токмовский свод, Мелекесскую впадину, Воронежскую антеклизу, кряж Карпинского и другие тектонические структуры. Целью работ было изучение осадочного чехла (включая выделение аномалий повышенной проводимости в девон-каменноугольных отложениях и прогноз участков предполагаемого развития рифейских отложений) и выявление неоднородностей в верхней части земной коры (проводящих зон, связанных с глубинными флюидонасыщенными разломами, областями графитизации и сульфидизации пород).

По результатам магнитотеллурических исследований выявлен ряд важных особенностей геоэлектрического строения осадочного чехла. В частности, обнаружено, что при переходе от вершины Токмовского свода к его бортам проводимость осадочного чехла уменьшается за счет выклинивания наиболее проводящего комплекса, представленного терригенными отложениями среднего и верхнего девона. В Мелекесской впадине отмечено резкое несогласие сейсмических и геоэлектрических границ, что обусловлено изменением коллекторских свойств пород и минерализации вод.

Новые сведения о геоэлектрическом строении Московской синеклизы получены на профиле IV (длина профиля 650 км) проекта “Рифей” при работах, проводимых в 2001 г. На геоэлектрическом разрезе, построенном с учетом данных бурения и сейсморазведки ОГТ, отчетливо выделяются проводящие породы девона, венда, рифея, интересные с позиции нефтегазоносности (рис. 7, см. в конце статьи). Мощность этих отложений в Солигаличском авлакогене оценивается в 2–3 км. Сопротивление пород, составляющее первые единицы Ом·м, свидетельствует о их хороших коллекторских свойствах. На ряде участков, в пределах которых по данным ОГТ выделены нефтегазоперспективные структуры, зафиксированы низкоомные аномалии, связанные с увеличением пористости предполагаемых коллекторов.

Прослеженный в основании разреза высокоомный комплекс, датируемый как архейско-нижнепротерозойский, состоит из крупных блоков разного сопротивления. На бортах Московской синеклизы и на Кубенской моноклинали он представлен высокоомными породами предположительно архейского возраста; в центральной части Московской синеклизы основание разреза сложено более проводящими, по-видимому, раннепротерозойскими отложениями; наиболее низкоомные образования приурочены к погруженной части Тарногского прогиба.

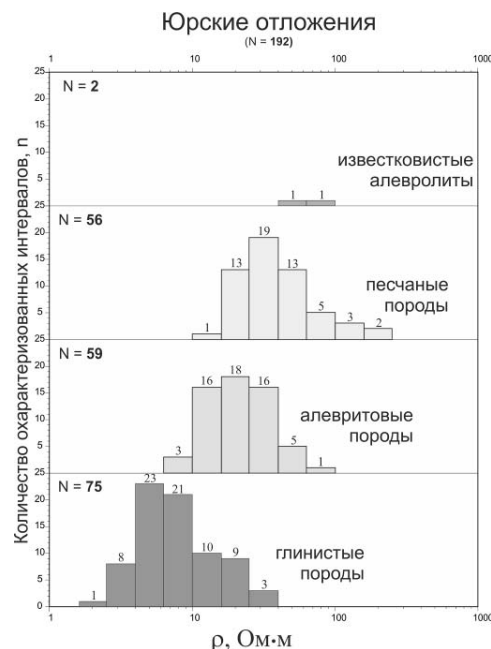
Магнитотеллурические исследования в зоне сочленения Балтийского щита и Русской плиты (на участке профиля 1-ЕВ), на Воронежской антеклизе и в районе кряжа Карпинского позволили выделить коровые аномалии электропроводности, предположительно связываемые с графитизацией и сульфидизацией пород. Это может свидетельствовать о тектонической активизации региона, поднятии глубинных флюидов и связанных с ними геохимических изменениях пород. Подобные данные очень важны для минерагенического прогноза и геодинамических исследований.

Основные перспективы обнаружения крупных залежей углеводородов на Таймыре связываются с юрско-меловым уровнем разреза, нефтегазоносность которого уже доказана известными месторождениями. Отложения названного возраста заполняют Енисей-Хатангский региональный прогиб. В отличие от Горного Таймыра, в пределах Енисей-Хатангского прогиба пробурено несколько десятков скважин, что делает актуальным комплексирование данных, полученных наземными геофизическими методами, со скважинными.

Пологое залегание юрско-меловых отложений позволило использовать следующий подход при комплексной интерпретации результатов геофизических исследований – положение границ основных толщ определялось по данным сейсморазведки, а на основе данных МТЗ подбирались значения сопротивления слагающих их пород, осредненные по всей мощности соответствующих толщ. При этом, если в рамках заданной геометрии подобрать кривую МТЗ не удавалось, то вводились дополнительные геоэлектрические границы. При подборе значений сопротивления использовались результаты каротажа на ближайших скважинах глубокого бурения.

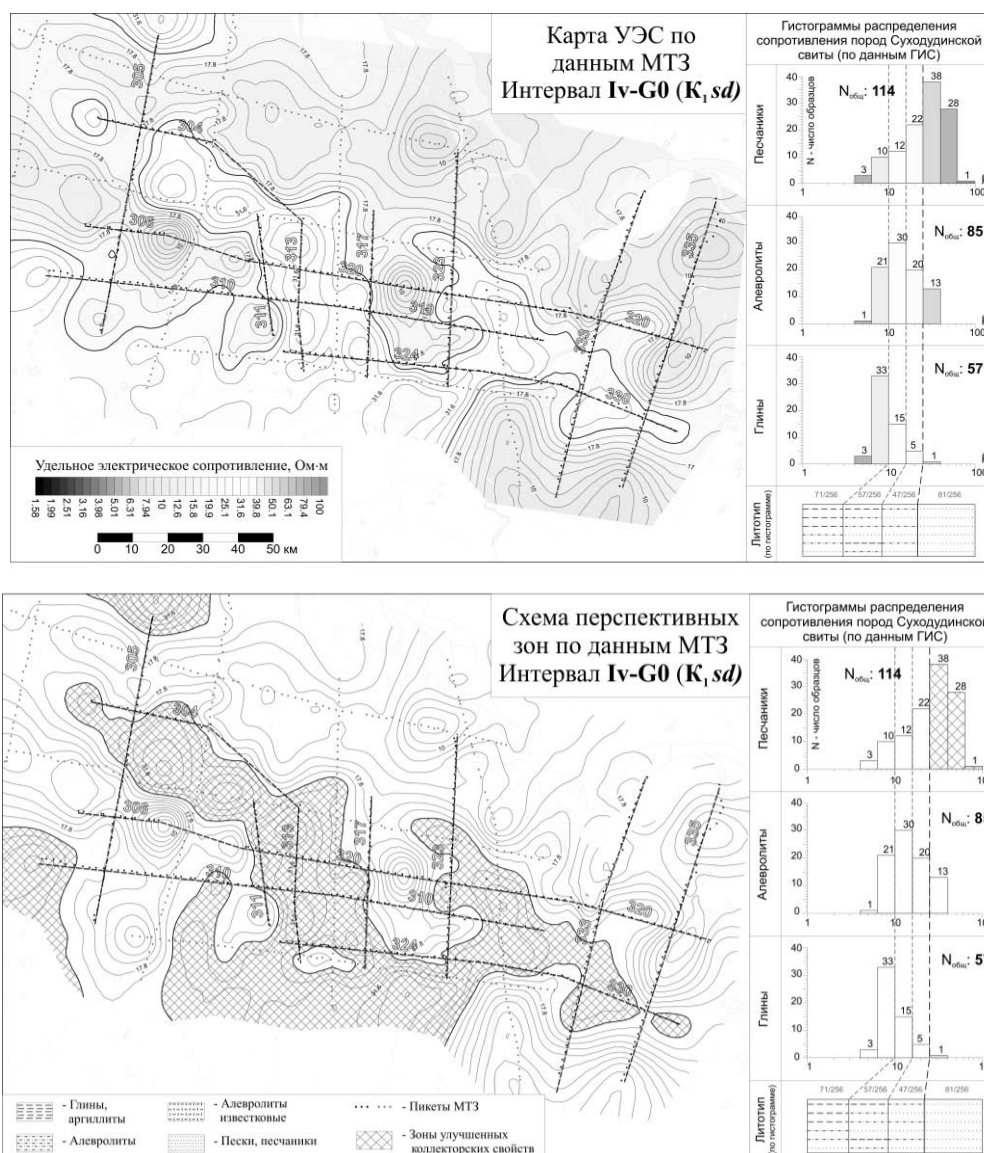
Для перехода от геоэлектрических разрезов к литологическим обобщались данные электрического каротажа скважин на площади исследования. Результаты обобщения представлялись в виде гистограмм распределения сопротивления пород в зависимости от их литологии (рис. 8), которые строились как для крупных систем, так и для отдельных свит.

**Рис. 8.** Гистограммы распределения сопротивления по типу пород, построенные по данным ГИС



На основе полученных геоэлектрических разрезов составлены карты латерального изменения удельного электрического сопротивления каждой свиты. На картах достаточно наглядно отражены основные закономерности изменения сопротивления (литологии) по площади, что позволило в пределах перспективных свит выделить области с наилучшими коллекторскими свойствами и оценить качество флюидоупоров (рис. 9, см. в конце статьи; 10).

Таким образом, выработана методика литологической интерпретации результатов комплексирования данных сейсморазведки МОГТ и магнитотеллурического зондирования.



**Рис. 10.** Прогнозные литологические схемы Суходудинского резервуара

Комплексирование на количественном уровне сейсморазведки и электроразведки позволило провести районирование перспектив нефтегазонасности огромной территории западной части Енисей-Хатангского прогиба с использованием практически непрерывной и равномерной (за исключением акваторий р. Енисей и Енисейской губы) сети фактических данных. Также по результатам проведенных комплексных работ удалось построить послойную объемную геологическую модель неокомского клиноформного комплекса Таймыра, которая с учетом прогноза литологии пород по электроразведочным данным позволяет картировать зоны возможного нефтегазонакопления.

#### *Опыт применения МТЗ для решения рудных задач*

Относительно новое для магнитотеллурических методов направление – поиск и изучение рудных месторождений – начало развиваться с появлением высокочастотной модификации метода, названной аудиоманнитотеллурическим зондированием (АМТЗ).

Назовем причины быстрого и эффективного внедрения метода АМТЗ в рудный электроразведочный комплекс: (1) существенное увеличение поисковых глу-

бин в рудных задачах (1 км и более); (2) появление современной высокоточной компактной магнитотеллурической аппаратуры; (3) мобильность метода; (4) отсутствие необходимости в дорогостоящих искусственных источниках электромагнитного поля; (5) использование удаленной базы с целью подавления промышленных помех; (6) развитие программ обработки магнитотеллурического сигнала; (7) развитие аппарата двух- и трехмерной интерпретации магнитотеллурических данных.

Метод АМТЗ эффективен в тех случаях, когда рудные объекты перекрыты мощной толщей высокоомных пород и недоступны для изучения методами наземной электроразведки на постоянном токе. Благодаря малой длительности регистрации, необходимой для выделения высокочастотной составляющей магнитотеллурического поля, появилась возможность перехода от отдельных профильных наблюдений к площадной съемке с плотным шагом. В результате интерпретации площадных данных мы можем переходить к построению трехмерной модели поисковых объектов. Кроме того, важным преимуществом магнитотеллурических методов является возможность выделения слабоконтрастных аномалий электропроводности на фоне высокоомного вмещающего разреза.

Сегодня роль геофизических методов сводится не столько к прямым поискам самих рудных тел, сколько к определению и последующему поиску косвенных рудоконтролирующих признаков, к которым можно отнести картирование и изучение тектонических нарушений; выделение и классификацию интрузивных тел; картирование областей метасоматоза и т.п. В сложнопостроенных неоднородных средах возможности сейсморазведки сильно ограничены. Решение обратной задачи по магнитному или гравитационному полю неоднозначно и требует существенной регуляризации с привлечением априорной информации. В случае дифференциации пород по сопротивлению с помощью магнитотеллурического метода мы можем восстановить геоэлектрическую модель региона до больших глубин. При использовании полученной геоэлектрической модели в качестве стартовой появляется возможность более устойчиво интерпретировать данные магнитной и гравиметрической съемки.

Данные о глубинном строении региона в совокупности с информацией о приповерхностных структурно-фациальных условиях могут способствовать установлению металлогенической специализации провинции и обоснованию регионального прогноза размещения полезных ископаемых. Большинство рудных месторождений, так или иначе, связано с тектоническими нарушениями, в некоторых случаях наличие разлома – основной рудоконтролирующий признак. Например, все медно-никелевые месторождения Норильской рудной зоны приурочены к Норильско-Хараелахскому разлому.

Зоны тектонических нарушений, как правило, характеризуются более низкими сопротивлениями, чем вмещающие породы (рис. 11, см. в конце статьи), что может быть связано как с повышенной трещиноватостью и обводненностью, так и с наличием графитизированных пород по разломам. Повышенная проводимость позволяет уверенно выделять и изучать разломы с помощью магнитотеллурических методов. При проведении детальных профильных или площадных работ с использованием МТЗ мы можем определять ширину, положение верхней кромки, глубину простираения и наклон разломной зоны.

Многие рудные месторождения связаны с интрузивными образованиями, которые часто занимают большие объемы рудовмещающих пород, частично поглощая как собственно рудовмещающие породы, так и рудные тела. В отдельных случаях происходит переотложение рудного вещества с образованием гнездовых и жильных месторождений внутри гранитных массивов.

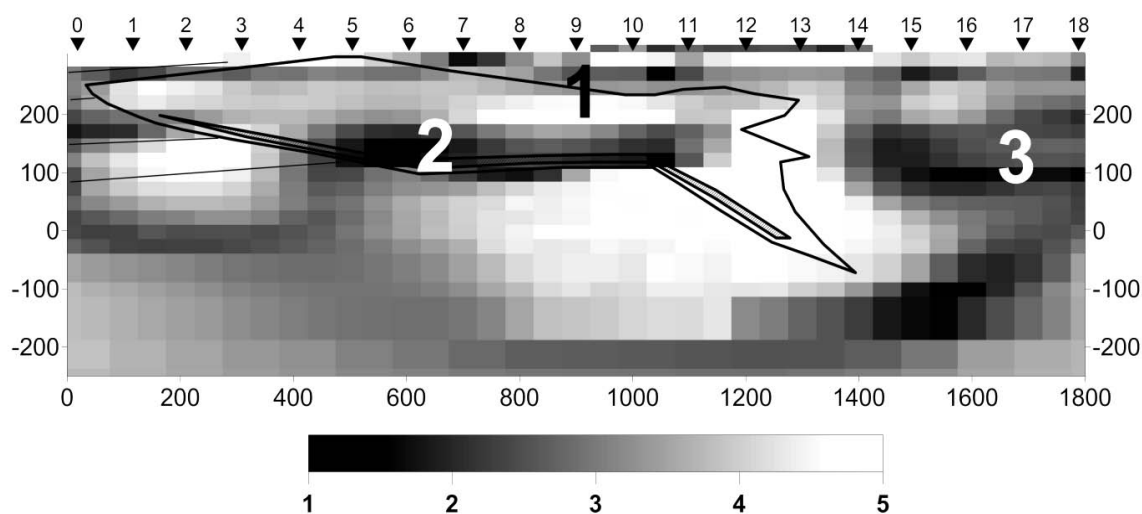
Электрические свойства интрузивных образований могут существенно различаться в зависимости от их состава. Как правило, сопротивления интрузивных

тел более высоки по сравнению с вмещающими их породами (рис. 12, см. в конце статьи). Если интрузия или ее часть содержит значительное количество электропроводящих включений, то ее электрическое сопротивление может быть и пониженным. Таким образом, в большинстве случаев мы имеем благоприятные условия для изучения формы и свойств интрузивных тел электроразведочными методами.

Для рудовмещающих метасоматитов, как правило, характерны разного рода изменения пород (рассланцевание, гидротермальная переработка и т.д.), которые выражаются в изменении физических свойств. Такие процессы, как серицитизация, хлоритизация, каолинизация, приводят к уменьшению магнитной восприимчивости, а нередко удельной плотности и удельного электрического сопротивления пород. Процессы окварцевания вызывают увеличение электрического сопротивления и понижение естественной радиоактивности вмещающих оруденение пород и т.д.

В тех рудных областях, где коренные породы и месторождения перекрыты молодыми рыхлыми осадками, актуальными остаются задачи по изучению состава пород складчатого основания, выяснения структурно-тектонических условий площади, выделения рудовмещающих толщ, установлению гипсометрии кровли фундамента. Если существуют геологические предпосылки приуроченности рудных месторождений к тому или иному геологическому комплексу, то уточнение границ между ними становится важнейшей задачей на этапе поиска месторождений. Если, кроме того, между породами, относящимися к различным геологическим комплексам, есть существенная дифференциация по электрическим свойствам, то эта задача легко решается с помощью магнитотеллурических методов. С помощью АМТЗ можно не только проследить геологические границы непосредственно под четвертичными образованиями, но и изучить их изменение с глубиной.

В большинстве случаев удельное электрическое сопротивление рудных минералов на порядки меньше сопротивления вмещающих пород. Сплошные или жильные руды характеризуются интенсивными аномалиями проводимости, и электроразведочные методы, в том числе магнитотеллурические, являются основными геофизическими методами поиска и изучения подобных объектов (рис. 13).



**Рис. 13.** Разрез удельного сопротивления вдоль профиля АМТЗ, пересекающего центральную часть Черногорской интрузии (Норильский район). 1 – высокоомная часть интрузии, 2 – проводящее основание интрузии, 3 – графитизированные породы тунгусской серии.

Шкала –  $\rho$ , Ом·м в  $Lg$ -масштабе

В том случае, когда мы имеем дело с вкрапленной рудой, состоящей преимущественно из пустой породы, эффективность электроразведочных методов обычно существенно снижается. Отсутствие гальванической связи между зернами руды приводит к тому, что вкрапленные руды по сопротивлению практически не отличаются от вмещающих пород. Особенно это сказывается при гальваническом возбуждении при использовании методов на постоянном токе. Однако, наш опыт показывает, что применение АМТЗ позволяет выделять области вкрапленного оруденения по удельному сопротивлению даже при содержании рудных минералов в первые проценты.

### **Перспективы развития магнитотеллурического метода**

Сформулируем основные направления исследований и определим главные задачи, которые будут способствовать дальнейшему развитию магнитотеллурического метода и определяют его перспективы, разделив их на две основные категории – инженерно-технические задачи и научные задачи.

#### *Инженерно-технические задачи*

1. Создание портативной и дешевой аппаратуры. Так же как и в других геофизических методах, перспективы магнитотеллурики связаны с увеличением объемов получаемой информации, что требует снижения затрат на получение данных в пересчете на пункт измерения. Это требует, прежде всего, удешевления аппаратуры. Важной задачей является создание эффективных измерительных комплексов и датчиков отечественного производства.

2. Развитие систем морских магнитотеллурических наблюдений. Применение магнитотеллурического метода на акваториях до настоящего времени не нашло широкого распространения. Одной из причин этого является отсутствие на мировом рынке донной магнитотеллурической аппаратуры. Монополистами в донной магнитотеллурике являются две-три крупные нефтедобывающие компании, которые не заинтересованы в распространении этой технологии. Отдельной задачей является создание измерительных комплексов для транзитных зон, что особенно актуально для России в связи необходимостью проведения геологоразведочных работ на Арктическом шельфе, в Охотском и Каспийском морях.

3. Магнитотеллурика с контролируемым источником поля. Существенное ограничение при проведении МТЗ – влияние промышленных помех, в особенности вызываемых электрифицированными железными дорогами, а также ведением современного индустриального сельского хозяйства. В результате, на обширных территориях проведение магнитотеллурических работ существенно затруднено. Использование мощных генераторов, работающих на фиксированных частотах, позволяет обеспечить высокую помехозащищенность. Однако, при выполнении работ с искусственным источником для интерпретации данных в рамках метода МТЗ мы должны обеспечить условия дальней зоны. Проблема заключается в том, что на больших разносах уровень полезного сигнала становится очень низким, и это выдвигает определенные требования к регистрации и последующей обработке таких сигналов.

4. Развитие программных комплексов. Объемы МТ работ могут достигать нескольких тысяч точек на одном объекте. В такой ситуации предъявляются высокие требования к программному обеспечению магнитотеллурики. Программные комплексы должны обеспечить повышение эффективности хранения, обработки, анализа и интерпретации больших объемов МТ данных и совместимость данных с существующими геофизическими пакетами.

## Научные задачи

1. 3D инверсия МТ данных. Генеральное направление развития магнитотеллурики – переход от единичных и профильных измерений к площадным, что позволит перейти от бимодальной двумерной инверсии к трехмерной инверсии полного ансамбля магнитотеллурических передаточных функций.

2. Дальнейшее исследование информативности различных передаточных функций и их совместное использование при решении обратных задач. В современной магнитотеллурике используются различные передаточные функции и их инварианты, имеющие разную разрешающую способность. В частности, кажущееся сопротивление (модуль импеданса) подвержено влиянию гальванических искажений, тогда как магнитные передаточные функции в значительной степени свободны от них. Важная задача – построение графа интерпретации, использующего сильные стороны каждой из передаточных функций.

3. Анизотропия и масштабирование модели. Геологическая среда часто характеризуется макроанизотропией электропроводности, вызванной, например, слоистостью осадочных толщ или наличием субвертикальных разломов. При генерализации геоэлектрических моделей необходимо введение анизотропии, как средства параметризации.

4. Совместная интерпретация различных геофизических методов. Новое, бурно развивающееся направление в геофизике – построение геологических моделей на основе совместной инверсии данных различных геофизических методов, например, магнитотеллурики и гравитики, магнитотеллурики и сеймики – позволяет получать принципиально новые геологические результаты.

## Литература

1. Тихонов А.Н. Об определении электрических характеристик глубоких слоев земной коры // Докл. АН СССР. 1950. Т. 73, № 2. С.295–297.
2. Cagniard L. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting // Geophys. 1953. V. 18. P.605–535.
3. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Магнитотеллурическое зондирование горизонтально-однородных сред. М.: Недра, 1992. 250 с.
4. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Новиков Д.Б., Пастуцан В.В. Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. М.: Диалог-МГУ, 1997. 161 с.
5. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.
6. Wait J.R. On the relation between telluric currents and the Earth's magnetic field // Geophysics. 1954. V. 19. P.281–289.
7. Price A.T. Theory of the magnetotelluric field when the source field is considered // J. Geophys. Res. 1962. V. 67. P.1907–1918.
8. Gamble T.D., Goubau W.M., Clark J. Magnetotellurics with a remote reference // Geophys. 1979. V. 44. P.53–68.
9. Larsen J.C. Transfer functions: smooth robust estimates by least squares and remote reference methods // Geophys. J. Inter. 1989. V. 124. P.645–663.
10. Swift C.M. A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the South-Western United States: Ph.D. Diss. MIT. Cambridge, 1967.
11. Caldwell T.G., Bibby H.M., Brown C. The magnetotelluric phase tensor // Geophys. J. Inter. 2004. V. 158. P.457–469.
12. Дмитриев В.И. Электромагнитные поля в неоднородных средах. М.: МГУ, 1969. 131 с.
13. Ваньян Л.Л., Дебабов А.С., Юдин М.Н. Интерпретация данных магнитотеллурических зондирований неоднородных сред. М.: Недра, 1984. 197 с.
14. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 288 с.

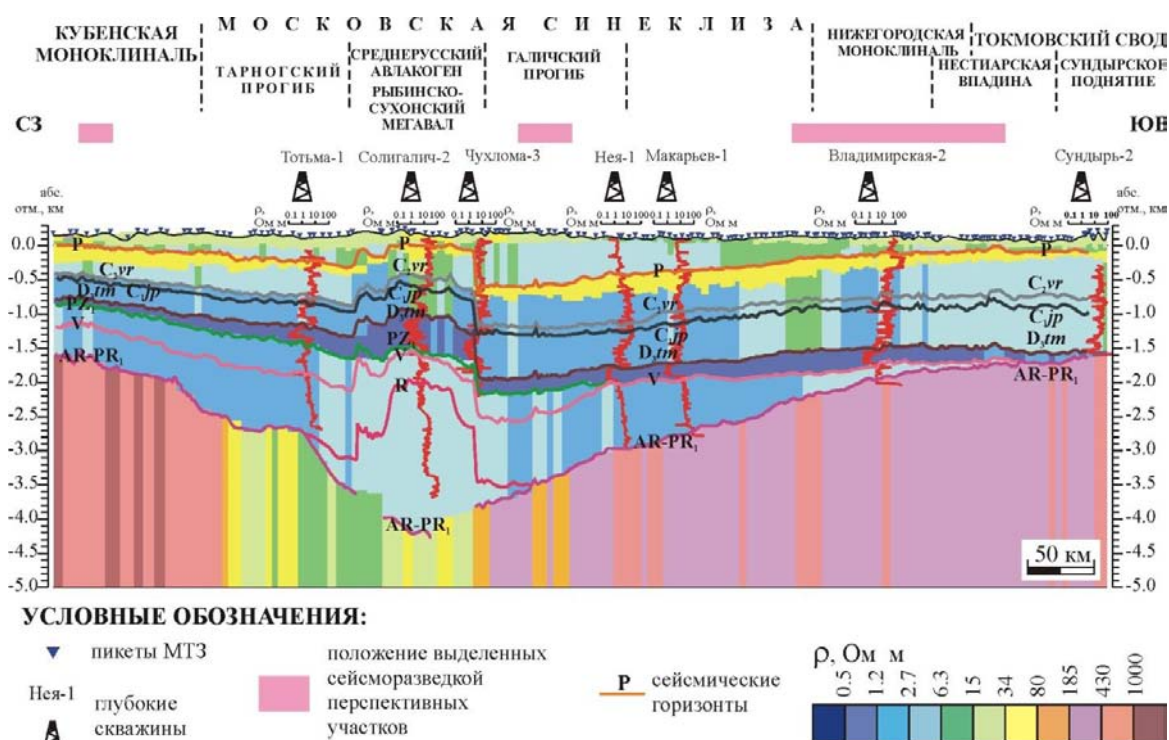


Рис. 7. Геоэлектрический разрез Московской синеклизы. Проект РИФЕЙ, пр. IV

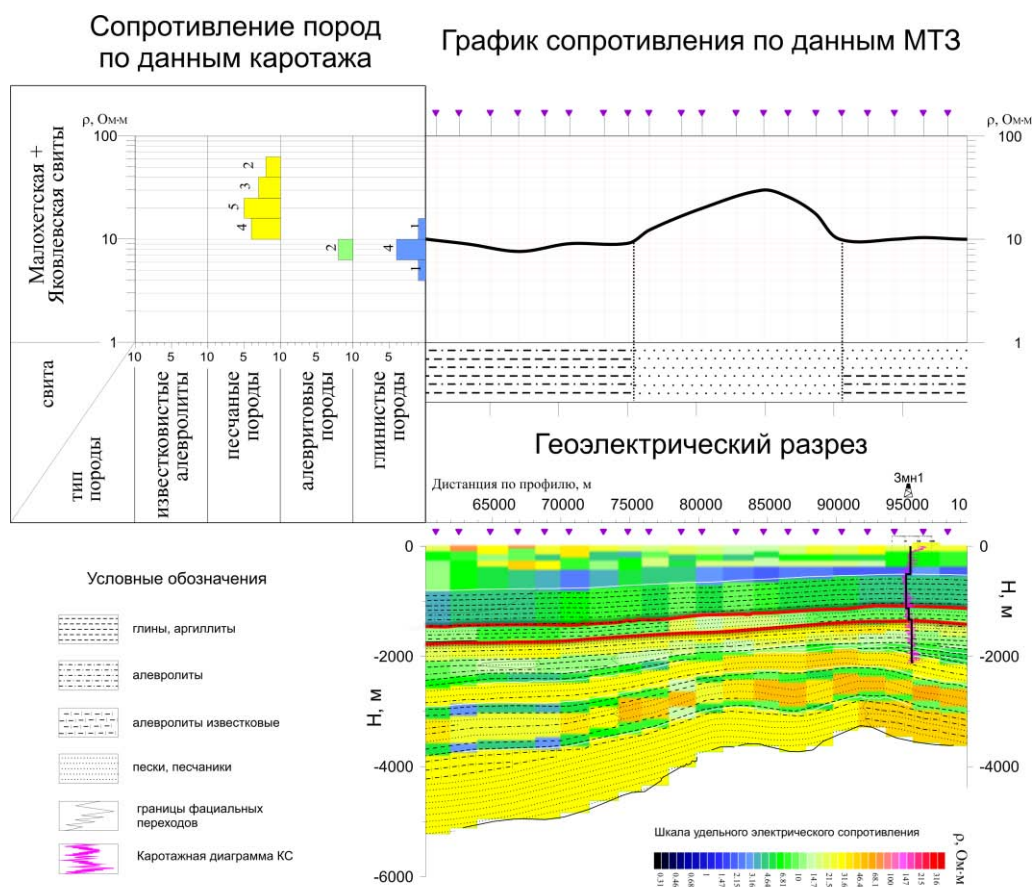
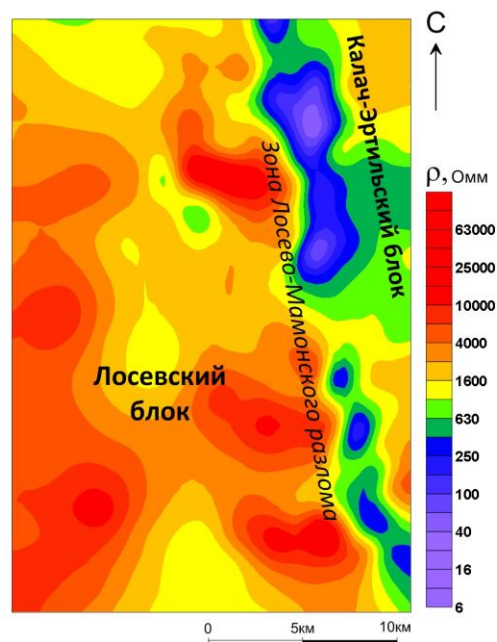
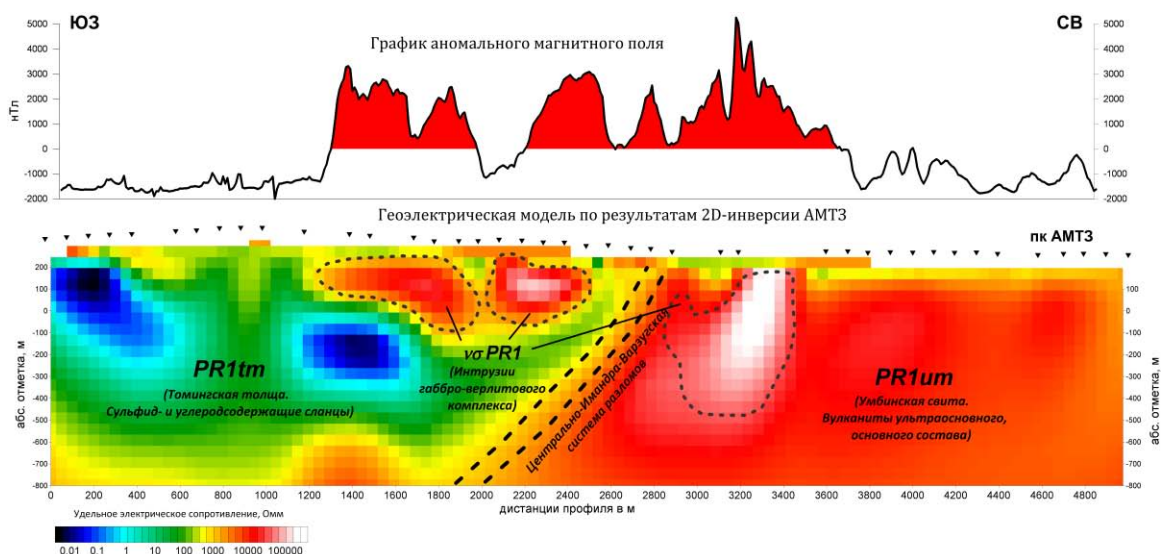


Рис. 9. Методика построения литологических разрезов



**Рис. 11.** Геоэлектрическая модель по результатам инверсии данных АМТЗ. Бобровский участок. Горизонтальное сечение на глубине 500 м



**Рис 12.** Участок Озерский. Аномальное магнитное поле и геоэлектрический разрез до глубины 1 км по результатам двумерной инверсии АМТЗ