

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ИЗВЕСТИЯ
АКАДЕМИИ НАУК СССР
ФИЗИКА ЗЕМЛИ

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

7

МОСКВА • 1979

ХРОНИКА

УДК 550.372

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ЗЕМЛЕ И ЛУНЕ

С 7 по 14 сентября в курортном городке Мюрнау, расположенном в 70 км южнее Мюнхена, проходил IV Международный симпозиум по электромагнитной индукции в Земле и Луне, организованный Международной ассоциацией геомагнетизма и аэронавтики при участии Германского научно-исследовательского общества и Геттингенского и Мюнхенского университетов. Симпозиум собрал 128 ученых из 22 стран. Советская делегация состояла из 6 человек: Л. Л. Ваньян (руководитель делегации), М. Н. Бердичевский, В. И. Дмитриев, М. С. Жданов, Э. Б. Файнберг, Е. П. Харин. Советские делегаты выступили с 14 докладами, из них 3 обзорных. Симпозиум был разделен на 7 сессий, каждую из которых открывал обзорный доклад (40 мин). Затем следовали информационные доклады (15 мин) и краткие сообщения (5 мин). После каждого доклада и сообщения происходила непродолжительная дискуссия. Было выделено специальное время для кулуарных дискуссий. Кроме того, имели место заседание рабочей группы 1.3 МАГА «Электромагнитная индукция в Земле» и обсуждение Международного проекта ЭЛАС (электропроводность астеносферы). Одна из отличительных особенностей симпозиума — участие большего числа ученых из развивающихся стран и молодежи. Говоря об успехе симпозиума, нужно прежде всего отметить большую подготовительную работу, проведенную проф. У. Шмукером, чланом рабочей группы 1.3 МАГА. Ниже приводится краткое описание каждой сессии.

Сессия I. Магнитотеллурические и геомагнитные исследования электропроводности земной коры и верхней мантии

На этой сессии были представлены два обзорных доклада и 25 сообщений.

Обзорный доклад Фурнье был посвящен результатам магнитотеллурического зондирования (МТЗ). Автор привел обширную таблицу, содержащую характеристики проводящих слоев, обнаруженных в земной коре и верхней мантии за последние 15 лет, и сопроводил ее замечаниями, касающимися методов интерпретации. Глубинные проводящие слои обнаружены в Африке, Северной и Южной Америке, Австралии, Западной и Восточной Европе, Советской Азии, Японии и в нескольких районах Мирового океана. Замечания Фурнье сводятся к следующему. 1. При интерпретации МТЗ необходимо различать явления, связанные с локальной индукцией и с канализацией токов, индуцированных вдали от точки наблюдения (с эффектом концентрации). 2. Наиболее достоверная информация может быть получена при статистическом подходе, поэтому необходима региональная постановка зондирования. 3. Глобальные и региональные результаты позволяют контролировать локальную информацию о глубине проводящих слоев в земной коре и верхней мантии. 4. Магнитотеллурические и магнитовариационные исследования должны проводиться совместно.

Состояние магнитовариационных исследований было рассмотрено в обзорном докладе Сингха. Автор подчеркнул целесообразность совместного применения магнитотеллурического и магнитовариационного методов. Он подробно остановился на эффектах, связанных с неоднородностью внешнего поля. Указав на трудности, возникающие при практическом разделении магнитного поля на внешнюю и внутреннюю части, он отметил необходимость дальнейшего развития этой методики. Среди новых подходов он упомянул подход Бэйли, основанный на построении карт аномальной вертикальной компоненты магнитного поля для гипотетического однородного возбуждения, и подход Бэнкса, использующий принцип демодуляции для определения передаточных функций. Эти методы сокращают длительность регистрации поля и позволяют погасить эффект источника. Прогресс в интерпретации аномалий связан, по мнению Сингха, с использованием всех трех компонент магнитного поля. Такой подход особенно плодотворен в случае концентрационных аномалий. Сингх остановился также на исследованиях Лиллея, применившего градиентный метод пространственных производных, и упомянул исследования Хонкура, обнаружившего

ческого поля, Воезф сообщил об успехах квазитрехмерного моделирования, использующего приближение тонких слоев. Он остановился также на опытах по решению обратной двумерной задачи и на совместной интерпретации результатов магнитотеллурического и вертикального электрического зондирования. В качестве важнейшей проблемы магнитотеллурики он выделил проблему борьбы с помехами и рассмотрел методы ее решения, использующие спаренные или разнесенные магнитометры.

После обзорного доклада участники сессии выслушали 11 сообщений (Индия, Канада, Финляндия, ФРГ, Франция, Австралия). Верма продемонстрировал пример комплексирования магнитотеллурического зондирования с методом становления поля. Эдвардс описал метод электромагнитного зондирования, основанный на использовании случайных импульсных посылок тока; посылка свертывается с сигналом, помехи подавляются с помощью фильтра Виннера; метод обеспечивает глубинность порядка нескольких километров. Сингх построил модель электромагнитного поля с учетом частотной дисперсии комплексной диэлектрической проницаемости. Елт рассмотрел методику интерпретации магнитотеллурических данных, полученных вблизи круто падающих проводников. Лозеке информировал участников сессии о результатах магнитотеллурических исследований в долине р. По; на построенном по данным МТЗ геоэлектрическом разрезе отчетливо виден Апеннинский надвиг. Верма и Дас описали метод расчета кривых кажущегося сопротивления, использующий цифровые фильтры; расчет может быть выполнен на карманном калькуляторе, метод аналогичен разработанному венгерским геофизиком Шалатом. Коутерман доложил о применении метода бесконечно длинного кабеля для обнаружения магматических карманов и указал на необходимость применения трехмерных моделей при интерпретации. Сингх выступил с описанием методики определения диэлектрической проницаемости и тангенса потерь на образцах. Лиллей рассмотрел эффект концентрации, вызванный проводящими рудными телами. Рамеш исследовал отражение электромагнитных волн от поверхности влажных образцов с частотной дисперсией электромагнитных параметров.

Сессия III. Электромагнитная индукция в океанах

Эту сессию открыл обзорный доклад Кокса, посвященный проблеме электромагнитных исследований дна Мирового океана. Автор отметил прогресс в области аппаратуры и назвал основные задачи морской геоэлектрики: 1) изучение геоэлектрического разреза дна океана, 2) выяснение различий между геоэлектрическими разрезами континентов и океанов, 3) исследование внутренней структуры срединных хребтов, трансформных разломов, зон субдукции и т. д. По мнению Кокса в модели электромагнитного поля океана имеются неопределенности, связанные с отсутствием достаточно полной информации об электрическом сопротивлении океанического дна. Такая информация необходима для выяснения соотношений между TE и TM -модами; TM -мода возникает вследствие гальванического действия континентов и горизонтальных морских течений. Кокс рассмотрел структуру электромагнитных полей, связанных с ветровыми волнами и приливами; он отметил, что благодаря успехам в изучении динамики приливов их электромагнитное поле может быть использовано в качестве источника при электромагнитном зондировании. Периоды вариаций, которые могут изучаться при электромагнитном зондировании, Кокс ограничивает 5–6 мин. В специальном разделе он перечислил особенности электромагнитного поля в океанах, которые благоприятствуют постановке зондирования: 1) однородность воды, 2) ее высокая электропроводность, облегчающая измерения электрического поля, 3) слабая расчлененность рельефа морского дна. Для определения электропроводности дна океана Кокс предложил применить зондирование с искусственным возбуждением поля. Он подчеркнул, что на основе таких измерений удастся уточнить структуру магнитотеллурического поля в океанах и построить адекватную теорию зондирования. К тексту своего доклада Кокс приложил работу Ватсона, в которой проведен расчет магнитного поля внутренних волн.

Второй обзорный доклад на этой сессии был сделан Файнбергом. Автор рассмотрел историю вопроса и подробно остановился на океанических эффектах, наблюдаемых на континентальных станциях. Он провел анализ современных способов расчета электромагнитного поля в океане и продемонстрировал модели, построенные советскими учеными. Доклад вызвал оживленную дискуссию.

С сообщениями выступили геофизики СССР, Австралии, Англии, США, Японии, Канады, Франции (14 сообщений). Ваньян и Шиловский обобщили результаты магнитотеллурических зондирований, выполненных вблизи Калифорнии, у Вермудских островов и в центральной части Тихого океана; на глубинах около 100 км обнаружен проводящий слой, отождествляемый с астеносферой. Паркинсон показал результаты моделирования, свидетельствующие о том, что береговой эффект вызван как океаническими токами, так и токами, текущими под океаном. Бимиш и Кендал описали метод расчета токов, индуцируемых в океане суточными вариациями магнитного поля; используется приближение тонких слоев. Ранганьяки и Мэйди исследовали береговой эффект на модели, состоящей из двух тонких слоев: проводящего и непроводящего. Они пришли к выводу, что локальность теллурических аномалий

индукционное действие нормальной вертикальной компоненты магнитного поля. Во второй части доклада Сингх перечислил наиболее интересные аномалии переманного магнитного поля (Эскдалемюр, Хоккайдо, Центральная Европа, Карпаты, Кения, Марокко, Восточная часть США, Австралия, Индия, Северо-Западная Атлантика) и изложил историю их исследования. Выделение нормальной части поля Сингх полагает важнейшим моментом интерпретации.

С краткими сообщениями выступили геофизики СССР, ФРГ, ВНР, Англии, США, Испании, Франции, Индии, Австралии. По мнению Лозеке, Северогерманская аномалия обусловлена хорошо проводящими отложениями допермского возраста. Ротштейн сообщил о проводящем коровом слое на территории Израиля. Сапужак описал метод глубинного зондирования с использованием длинных питающих линий. Стегана назвал районы, в которых глубинные проводящие слои могут быть связаны с геотермической активностью (Паннонский бассейн, Восточное Предкавказье, Русская платформа, Рязано-Саратовский прогиб, Токмовский свод, Кара-Кумская платформа, Южнокаспийская депрессия). Верктольд сделал сообщение о слабо выраженной аномалии электропроводности вблизи Штуттгарта, где наблюдается аномально-высокий температурный градиент. Хатти привела пример корреляции между геоэлектрическими и сейсмическими данными (Шотландия); интерпретация была выполнена по методу Монте-Карло. Бэйли и Эдвардс исследовали линейно-протяженную зону повышенной электропроводности в северо-восточной Америке, приуроченную к разлому в докембрийском фундаменте. Россигноль обнаружил аномалию электропроводности в Пиренейской складчатой зоне и в Северном Марокко; интерпретация была проведена с помощью модели, содержащей тонкий неоднородный слой. По мнению Эльбой, геомагнитная аномалия в районе Рейнского грабена вызвана вихревыми токами в осадочном чехле. Анализируя частотную зависимость аномалии геомагнитного поля на юге Индии, Сингх пришел к выводу о ее глубинном происхождении. Бэнкс исследовал южное окончание геомагнитной аномалии Эскдалемюр (Англия) и оценил максимальные глубины эквивалентного тока (20–35 км). Беннет сообщил о магнитовариационных исследованиях в Эфиопии; в рифтовой зоне обнаружена хорошо проводящая мантия на глубине около 50 км. Моснье сделал сообщение о новом методе разделения геомагнитного поля на нормальную и аномальную части. В сообщении Бэнкса был рассмотрен метод продолжения геомагнитного поля, позволяющий строить эквивалентные токовые системы на различных глубинах и изучать эффект канализации. Малик предложил метод интерпретации геомагнитных аномалий, основанный на определении передаточных функций из уравнений типа свертки. Беннет применил метод авторегрессии для спектрального анализа геомагнитных вариаций и определения передаточных функций. Карман продемонстрировал разработанную немецкими геофизиками цифровую портативную магнитотеллурическую станцию (фирма «Метроники», вес станции около 15 кг, полоса пропускания от 1 до 30000 сек).

Сессия II. Электромагнитные методы в прикладной геофизике

Впервые в истории МАГА в повестку симпозиума по электромагнитной индукции в Земле была включена специальная сессия, посвященная электроразведочной проблематике.

Эта сессия открылась обзорным докладом Воезффа. Автор отметил, что в последние годы электроразведка интенсивно применялась для решения геотермических задач и различного рода структурных и рудных задач. Он подробно остановился на вопросе о частотной дисперсии электромагнитных свойств горных пород и привел результаты Дэвиса и Пелтона, свидетельствующие о существенной зависимости диэлектрической проницаемости и сопротивления от частоты в мерзлых и металлических минерализованных породах. Новым явилось сообщение о частотной дисперсии магнитной проницаемости. Не менее интересным было сообщение Воезффа о развитии методов, основанных на радиоволновых принципах. Эти методы используются при изучении плохо проводящих сред (льда, мерзлых пород, угля, соли). Так, например, Кук разработал метод, позволяющий локализовать разрывы угольных пластов, а Олхоефт применил радиоволновой метод для изучения вечной мерзлоты. Радарная техника находит широкое применение при определении толщины морского льда и исследовании ледников. Фаулер предложил метод интерпретации, использующий общую глубинную точку. Одним из наиболее популярных методов рудной электроразведки является метод переходных процессов. В Австралии Сайротем разработал аппаратуру, представляющую собой автоматизированный вариант советской аппаратуры МПП. Спайс создал установку для физического моделирования переходных процессов. Клэй развил метод интерпретации, в котором диффузия электромагнитного поля аппроксимируется волновым процессом. При магнитотеллурических исследованиях и аэроэлектроразведке широко применяются криогенные магнитометры. Кетчен разработал криогенный градиентометр с чувствительностью 10^{-5} гамма/м. Особый интерес представляет сообщение Воезффа о «беспрецедентном росте объемов магнитотеллурических исследований в западных странах», стимулированном поисками источников геотермической энергии, а также высокой стоимостью сейсморазведки. Отметив трудности, возникающие при трехмерном моделировании магнитотеллури-

зависит от степени проникания тока в непроводящий слой. Хонкура предложил метод нормализации электромагнитного поля, наблюдаемого на островах. Аналогичный метод был продемонстрирован Борцом и Хариним. Доссо показал результаты физического моделирования электромагнитных аномалий, наблюдаемых на Британских островах. Ваньян сообщил о результатах магнитотеллурического зондирования на Дальнем Востоке. Чэн и Доссо с помощью физической модели исследовали поле в заливе, имеющем форму полукруглости. Хоббс рассчитал океанический эффект в суточных вариациях; модель содержит неоднородный поверхностный тонкий слой и проводящее ядро; расчет выполнен для континентов, соединенных вместе. Филлоу сообщил о новой интерпретации результатов магнитотеллурического зондирования в 700 км от побережья Центральной Калифорнии; астеносфера обнаружена на глубине около 85 км, к западу она погружается и становится менее проводящей, что согласуется с представлениями тектоники плит.

Сессия IV. Методы решения прямых и обратных задач

Обзорный доклад Жданова содержал обобщение теоретических результатов, полученных за последние годы в СССР в области интегральных преобразований электромагнитного поля Земли, его аналитического продолжения и разделения на нормальную и аномальную части. К числу наиболее интересных результатов относятся: а) разработка аппарата электродинамических аналогов интегралов типа Коши, б) развитие методов, позволяющих разделить аномальное поле на части поверхностного и глубинного происхождения.

С 18 сообщениями выступили геофизики СССР, Австралии, США, Чехословакии, Нигерии, ФРГ, Канады, Италии, Венгрии, Финляндии. Несколько сообщений было посвящено обратной одномерной задаче электромагнитного зондирования. В сообщении Голберга был рассмотрен усовершенствованный итерационный алгоритм для обращения данных МТЗ; решение стабилизируется по первоначальному заданию. Андерсен сообщил о разработке вариационного метода одномерной инверсии. Дивэйн продемонстрировал применение метода Монте-Карло для интерпретации данных глобального магнитовариационного зондирования. Печева и Праус для интерпретации магнитотеллурических данных в Чехословакии применили метод, сочетающий процедуру Монте-Карло с уточняющей итерационной процедурой. Ларсен предложила итерационный алгоритм, в котором начальное приближение строится путем линейаризации рекуррентных соотношений для импеданса. Она рассмотрела возможность прямой интерпретации электромагнитных данных; используется двуслойная модель с абсолютным проводником в основании; глубина до основания находится путем аналитического поля.

Внимание участников симпозиума привлекло сообщение Вайдельта, посвященное доказательству единственности решения обратной двумерной задачи в случае *E*-поляризации. Для практического решения обратных задач Вайдельт предлагает простой итерационный алгоритм, применимый для моделей, в которых конечные по размерам области с аномальной электропроводностью помещены в нормальную среду с известным разрезом. Задача линейна и решается с использованием функции Грина.

В остальных сообщениях рассматривались различные аспекты интерпретации геоэлектрических данных и геоэлектрического моделирования. Кизак и Сильвестр описали решение прямой задачи геоэлектрики методом конечных элементов с использованием интерполяционных полиномов до шестого порядка включительно; расчет компонент электромагнитного поля ведется при произвольном рельефе поверхности наблюдения, вычисляются также кривые кажущихся сопротивлений. Дмитриев и Бердичевский показали применимость модели Тихонова — Каньяра для полей, линейно меняющихся на расстояниях порядка первых сотен километров; это свойство модели Тихонова — Каньяра существенно повышает надежность магнитотеллурических зондирований. Илито и Санторато привели пример расчета и импеданса для одномерно-градиентной среды. Огунаде и Доссо продемонстрировали результаты расчетов, выполненных с помощью известного решения Дьяконова для модели, в которой проводящий цилиндр, помещенный в однородное проводящее полупространство, возбуждается внешним однородным полем или линейным током. Сообщения Вивера и Доусона, а также Рэвла, Грина и Вивера были посвящены исследованию модели с поверхностным неоднородным слоем, расположенным на поверхности однородной проводящей Земли; индуцированное поле в этой модели определяется путем решения сингулярных интегральных уравнений, полученные результаты используются для анализа берегового эффекта. Ваньян, Дебабов и др. сообщили о моделировании магнитотеллурических аномалий с использованием методов Прайса и Джонса. В сообщении Жданова, Бердичевского и Варенцова был описан новый итерационный метод интерпретации локальных геомагнитных аномалий, основанный на принципе стягивающихся поверхностей. Хоман сообщил о применении метода интегральных уравнений для расчета электромагнитного поля над трехмерным проводящим телом, погруженным в слоистую среду; расчеты выполнены на машине УНИВАК, использована сетка, состоящая из 300 узлов. Татраллия исследовала источники ошибок, возникающих при конечно-разностном моделировании электромаг-

нитных аномалий; рассмотрены ошибки дискретизации (при замене производных конечными приращениями) и округления (при решении системы линейных уравнений по методу сверхрелаксации). Кайконен привел пример численного моделирования двумерного электромагнитного поля по методу конечных элементов.

Сессия V. Зависимость электромагнитных передаточных функций от времени

Эта сессия была посвящена одному из важнейших вопросов геоэлектрики: временным изменениям передаточных функций (коэффициентов линейных соотношений между компонентами электромагнитного поля).

В обзорном докладе Ниблета и Хонкура была рассмотрена возможность использования вариаций передаточных функций для прогноза землетрясений. В Японии обнаружены заметные изменения компонент индукционного вектора, предвещающие землетрясения с большой магнитудой ($M > 5$). Корреляция наблюдается при сравнительно небольшом расстоянии от фокусов землетрясений (не более 100 км). Изучалась также зависимость горизонтальных компонент магнитного поля от сейсмической активности; синхронные наблюдения на станциях, расположенных в стабильных и сейсмически активных зонах, показали, что в периоды подготовки землетрясений возникают слабые аномалии горизонтальных компонент поля. Интересным является обнаружение значительных изменений теллурического поля перед землетрясением (до 30 мВ/км). Менее четкая картина получена в Калифорнии. Филлипс обнаружил здесь значительные изменения тензора импеданса, однако не связал их с сейсмической активностью. Отсутствие четкой корреляции между передаточными функциями и сейсмической активностью характерно также для Аляски и Канады. Однако существенно, что на Аляске перед землетрясением с $M=7,2$ произошло резкое изменение H -компоненты главного поля. Анализируя магнитограммы Ашхабадской и Ташкентской обсерваторий, Маякешки отметил возрастание модуля индукционного вектора перед Ташкентским землетрясением и отсутствие каких-либо изменений перед Ашхабадским землетрясением. Остановившись на сообщении Шапиро, Иванова и Пьянкова о сильных изменениях ориентации вектора Визе на Урале, Ниблетт отметил отсутствие данных, позволяющих связать эти изменения с тектонической активностью. Заслуживает внимания сообщение китайских геофизиков о том, что они предсказали землетрясение в Хай-чине с магнитудой 7,3; программа включала измерения магнитного поля, за 8 месяцев до землетрясений вертикальная компонента магнитного поля увеличилась на 20 гамм. Рикитак и Хонкура исследовали модели с локальными неоднородностями и определили частотные интервалы, в пределах которых изменения электропроводности на различных глубинах могут вызывать заметные изменения передаточных функций. По мнению авторов обзорного доклада, электромагнитное поле может заметно реагировать на изменения напряжений в земной коре и верхней мантии. Неопределенность результатов связана с ошибками в вычислении передаточных функций. Поэтому магнитотеллурические и магнитовариационные наблюдения не имеют преимуществ перед измерениями на постоянном токе, обеспечивающими более высокую точность результатов.

С сообщениями выступили геофизики Англии, Канады, СССР и Японии. Ранкин сообщил об обнаружении квадратичных членов в соотношениях между горизонтальными компонентами поля; докладчик считает, что эти члены отражают нелинейные явления в земле. Харин привел данные об изменениях векторов Визе на обсерватории Сурлари (Румыния), эти изменения коррелируются с изменениями магнитной активности. Санс исследовал поведение векторов индукции на обсерватории Какнеки и наметил связь с сейсмической и геомагнитной активностью. Хонкура продемонстрировал результаты анализа, выполненного на обсерватории Накаизу; из-за большого разброса передаточных функций, обусловленного недостаточной длиной записей, результаты оказались очень нечеткими. Бимиш изучал эффект неоднородности внешнего поля; обнаружена зависимость от периода вариаций, широты станции и числа степеней свободы анализа. Сик и Теулер изучали зависимость передаточных функций от времени наблюдений, уровня магнитной активности. Ширази провел анализ передаточных функций на обсерватории Какиоки в период слабой сейсмической активности; отмечены слабые вариации, связанные с сезонными изменениями внешнего геомагнитного поля. Хонкура и Ширази пытались уменьшить разброс передаточных функций путем анализа синхронных наблюдений геомагнитного поля на обсерваториях Какиоки и Ятсугатаке (расстояние 160 км). Предполагалось, что причиной разброса является отсутствие корреляции между вертикальной и горизонтальными компонентами внешнего поля; эксперимент не подтвердил это предположение.

Сессия VI. Региональные исследования.

Связь электропроводности с физическими условиями в верхней мантии.

Влиянию термодинамических условий на электропроводность астеносферы были посвящены обзорные доклады Вольфа и Адама.

Вофф подчеркнул, что изучение электропроводности верхней мантии может дать информацию о зонах частичного плавления. В последнее десятилетие в методах расчета электропроводности двухфазной системы достигнут существенный прогресс. Расчеты показали, что электропроводность сильно зависит от формы каналов, заполненных расплавом. Автор детально исследовал распределение жидкой фазы в частично расплавленных ультраосновных породах и проследил превращение изолированных расплавленных включений в сообщающиеся каналы. Касаясь современного состояния лабораторных исследований электропроводности, Вофф отметил, что при давлении выше 8 кбар измерения при контролируемой фугативности кислорода не проводились. Наименьшего влияния окисления, а также давления следует ожидать в силикатных расплавах. Появились первые данные об измерении частично расплавленных ультраосновных пород. Докладчик относится к ним критически, считая более надежным расчет электропроводности двухфазной системы.

В обзорном докладе Адама рассмотрена связь глубины проводящего астеносферного слоя с другими геофизическими параметрами. Показана хорошая корреляция между глубиной проводящего слоя и тепловым потоком, а также мощностью литосферы по сейсмическим данным. Опираясь на результаты лабораторных измерений, Адам оценил содержание расплава в астеносфере с удельным сопротивлением 10 ом.м при температуре 1300°, концентрация жидкой фазы составляет примерно 3%. Докладчик отметил, что под древними щитами астеносфера, характеризующаяся частичным плавлением, отсутствует.

На сессии были представлены также 7 сообщений, сделанных геофизиками Австралии, Новой Зеландии, СССР, ФРГ, США, Индии. Осипова, Бердичевский, Борисова и Ваньян обобщили магнитотеллурические и магнитовариационные данные по северо-американскому континенту и выделили на Канадском щите коровый проводящий слой, связанный, как можно предполагать, с дегидратацией; астеносферная зона, характеризующаяся частичным плавлением, здесь не обнаружена; на западе континента мощность и проводимость корового слоя значительно возрастают, а на глубине около 100 км выделяется зона частичного плавления. В сообщении Бердичевского, Ваньяна и др. были показаны результаты новой интерпретации магнитотеллурических данных по Прибайкалью, основанной на: 1) выделении зон с однотипными кривыми, 2) осреднении кривых внутри зон, 3) интерпретации средних кривых с учетом нормального градиентного разреза; выделен коровый проводящий слой, по-видимому, гидротермального происхождения; астеносфера характеризуется умеренной электропроводностью. Большой интерес вызвало сообщение Бебло о магнитотеллурических исследованиях в Исландии; осреднив продольные кривые МТЗ, автор построил модель глубинной электропроводности, основным элементом которой является коровый проводящий слой на глубине около 15 км. Лиллей и Вудс использовали метод пространственных производных и по данным суточных вариаций геомагнитного поля построили геоэлектрическую модель Центральной Австралии. Беннет, Мидх и Кристофель сообщили об аномалии электропроводности, протягивающейся в северо-западном направлении через геотермальную зону северного острова Новой Зеландии; аномалия выделена по синхронным магнитовариационным наблюдениям в 20 пунктах. Шривастава и Аббас провели анализ поведения индукционных векторов на 8 индийских обсерваториях; ориентация векторов в основном определяется морскими токами и лишь на обсерватории Сабхавала (предгорье Гималаев) предполагается заметный вклад токов, вызванных аномалией электропроводности. Шэнкленд в своем выступлении затронул важный вопрос об оценке степени частичного плавления в астеносфере по комплексу магнитотеллурических и сейсмических данных: при удельном сопротивлении 10 ом.м на глубине 100 км и понижении скорости поперечных волн по сравнению с нормальным разрезом на 10% доля расплава составляет около 3%.

Сессия VII. Электромагнитное возбуждение Земли суточными вариациями и магнитными бурями. Индукция в Луне

Эта сессия состояла из двух обзорных докладов и 6 сообщений. Она открылась обзорным докладом Хаака «Связь электропроводности с петрологическими параметрами верхней мантии». Докладчик напомнил общепринятую модель, согласно которой верхняя мантия состоит из твердой фазы ультраосновных пород и базальтовой фракционной выплавки. Учитывая разброс экспериментальных данных и значительную неопределенность в лабораторных измерениях зависимости электропроводности от температуры, автор сделал вывод о невозможности объективной оценки температуры по результатам электромагнитных зондирований. Предпочтение следует отдать выделению проводящих слоев в земной коре и верхней мантии. Автор приводит пример интерпретации магнитотеллурических данных, полученных в Эфиопии; в нижней части земной коры выделен проводящий слой. Взгляды докладчика во многом совпадают со взглядами советских геофизиков.

Обзорный доклад Ваньяна был посвящен электропроводности Луны. Используются данные магнитовариационных наблюдений, выполненных советскими и американскими геофизиками. Интерпретация этих данных позволяет сделать вывод

о том, что наружная оболочка Луны (толщиной около половины ее радиуса) имеет высокое сопротивление, не менее 10^3 ом. По-видимому, это лунная литосфера. Синхронные наблюдения в районе кратера Лемонье и в районе кратера Декарта указывают на существование региональных аномалий переменного магнитного поля, связанных с повышением сопротивления лунной мантии под круговыми морями.

С сообщениями выступили геофизики ЧССР, Турции, ФРГ, ЮАР, Англии. Печева и Праус продемонстрировали результаты анализа 27-дневных вариаций на территории Центральной Европы. Искара сообщил об обработке полугодовых вариаций и об определении отношения внешней и внутренней частей потенциала. Хемпфлинг и Шмукер рассмотрели искажения суточных вариаций теллурического поля приповерхностными неоднородностями; наблюдения, выполненные осенью 1976 г. вблизи Геттингена, показали, что теллурическая компонента четырех гармоник суточной вариации примерно вдвое превышает нормальную величину. Шипперс исследовал искажения суточных вариаций магнитного поля. В сообщении Эди, Маршалла и Моргана была показана сравнительная характеристика низкочастотных компонент магнитных бурь. Шмукер рассказал о новом методе определения отклика Земли на переменное магнитное поле с периодами от 12 час; в основе метода лежит сферический анализ горизонтальных компонент поля, слабо чувствительных к влиянию горизонтальных геоэлектрических неоднородностей, и нахождение отклика Земли по вертикальным компонентам поля, зарегистрированным на внутриконтинентальных станциях, характеризующихся нормальным, т. е. слабо искаженным полем.

Обсуждение программы Международного проекта ЭЛАС

Специальная сессия симпозиума была посвящена дискуссии по программе Международного проекта ЭЛАС (электропроводность астеносферы). Сессия открылась вступительным словом советского делегата профессора Л. Л. Ваньяна, определившего задачи проекта и познакомившего участников симпозиума с Советской национальной программой. Главная цель проекта — сконцентрировать усилия геофизиков на получении информации о проводящем астеносферном слое, связанном с частичным плавлением в верхней мантии. Советская национальная программа включает 5 разделов: 1) теория, 2) исследование механизма электропроводности астеносферы, 3) разработка аппаратуры для измерений в океане, 4) разработка методов интерпретации, 5) построение геоэлектрических моделей астеносферы для основных тектонических провинций СССР. Около 20 стран, в том числе Канада, США, ФРГ, Франция, Финляндия, Турция, Индия, Нигерия, выразили желание координировать магнитотеллурические и магнитовариационные исследования в рамках проекта ЭЛАС. Организована рабочая группа из представителей этих стран (председатель — У. Шмукер, зам. председателя — Л. Ваньян).

Основные итоги симпозиума

Доклады и сообщения, с которыми выступили участники симпозиума, свидетельствуют об успешном развитии электромагнитных методов изучения земных недр за последние 2–3 года:

- достигнут значительный прогресс в обработке и спектральном анализе магнитотеллурических вариаций; разработаны методы контролирования достоверности результатов, элементы тензора импеданса определяются с точностью до нескольких процентов (по модулю);
- разработан ряд новых образцов регистрирующей аппаратуры; в ФРГ фирмой «Метроник» начат серийный выпуск цифровой магнитотеллурической станции (переносной), а в Институте геофизики создан комплект аппаратуры, включающий компьютер «Паккард»; в США завершена разработка донной магнитотеллурической аппаратуры для измерений в океане;
- развита теория, подтверждающая физическую правомерность применения модели Тихонова — Каньяра при магнитотеллурическом зондировании в большинстве районов Земли;
- значительно возросли объемы магнитотеллурических и магнитовариационных исследований, особенно в Африке и Австралии. Во многих регионах обнаружен коровый проводящий слой. Ведется интенсивное изучение астеносферы. В США начато широкое применение магнитотеллурического метода для поисков источников геотермической энергии;
- существенно усовершенствованы методы решения двумерных и квазитрехмерных задач геоэлектрики и проведен большой объем расчетов, позволивших получить теоретическую информацию о структуре и источниках аномалий переменного электромагнитного поля Земли. При решении трехмерных задач возникают серьезные затруднения, связанные с громоздкостью расчетов. Расширена база физического моделирования;
- созданы новые методы интерпретации геоэлектрических данных. Широкое применение на западе находят статистические методы (метод Монте-Карло). Развиваются итерационные способы. Существенный вклад в теорию интерпретации сделан Вайдельтом, разработавшим метод решения двумерной обратной задачи;

— лабораторные измерения позволили получить новые данные об электропроводности верхней мантии в зонах частичного плавления. Эти результаты открывают путь к использованию результатов геоэлектрики для количественной оценки концентрации жидкой фазы в астеносфере;

— исследование электромагнитных предвестников землетрясений показало, что в ряде случаев электромагнитное поле реагирует на нарастание напряжений в земной коре и верхней мантии.

Несомненным успехом симпозиума является организация международного проекта ЭЛАС, в задачу которого входит построение геоэлектрических моделей астеносферы различных геодинамических зон.

*М. Н. Бердичевский, Л. Л. Ваньян,
В. И. Дмитриев, М. С. Жданов,
Э. Б. Файнберг, Е. П. Харин*