

ШКОЛА ГЕОЭЛЕКТРИКИ МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА: ДОСТИЖЕНИЯ НА РУБЕЖЕ ВЕКОВ

*М.Н. Бердичевский, В.И. Дмитриев, А.Г. Яковлев, Е.Д. Алексанова,
Е.В. Андреева, В.П. Бубнов, Н.С. Голубцова, А.В. Кошурников,
В.А. Куликов, А.Г. Морозова, П.Ю. Пушкарев, А.К. Рыбин,
Н.Л. Шустов, Д.В. Яковлев*

В течение более чем трех десятилетий на кафедре геофизики геологического факультета МГУ под руководством проф. М.Н. Бердичевского и доц. А.Г. Яковлева и на факультете ВМиК под руководством проф. В.И. Дмитриева ведутся исследования по геоэлектрике (главным образом, по магнитотеллурике), направленные на изучение осадочного чехла, консолидированной земной коры и верхней мантии Земли.

Современная методика региональных и глубинных геоэлектрических съемок, проводимых в России, во многом сформировалась под влиянием этих исследований, восходящих к пионерским работам академика А.Н. Тихонова. На этой основе возникла геоэлектрическая школа Московского университета, сыгравшая важную роль в развитии отечественной геоэлектрики.

Исследования геофизиков Московского университета охватывают вопросы теории геоэлектромагнитных методов и интерпретации электромагнитных наблюдений. В последнее десятилетие работа ведется в тесном сотрудничестве с компанией "Северо-Запад", обеспечивающей полевую эксперимент.

В геоэлектрической школе МГУ получены следующие важные результаты: 1) развита теория электромагнитных аномалий, вызванных геоэлектрической неоднородностью земных недр; 2) разработаны принципы построения интерпретационных моделей; 3) предложены эффективные стратегии интерпретации.

Теоретические основы магнитотеллурики были недавно обобщены М.Н. Бердичевским и В.И. Дмитриевым в монографии, изданной в США [1].

В настоящей статье представлены результаты недавних геоэлектрических исследований, проведенных сотрудниками геологического факультета в ряде регионов России и за рубежом. Рассмотрены промышленные региональные работы, осуществленные по простой схеме, которая обеспечивает быстрое извлечение информации об осадочном чехле и кристаллическом фундаменте из большого объема наблюдаемых данных, и глубинные исследования земной коры и верхней мантии, выполненные в тектонически активных областях.

Методика

региональных магнитотеллурических исследований

Магнитотеллурика, состоящая из двух ветвей - магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и магнитовариационного зондирования (МВЗ), является важной частью промышленного комплекса региональных геофизических исследований, проводимых с целью изучения

осадочного чехла и кристаллического фундамента в нефтеперспективных и рудоносных регионах. Авторы статьи принимали участие в МТ-исследованиях, выполненных компанией "Северо-Запад" на Русской плите, в Предкавказье, на Урале, в Сибири и на Северо-востоке России. Работы, как правило, проводились по заказу МПР РФ совместно с ФГУ ГНПП "Спецгеофизика", ФГУП "Кавказгеолсъемка", Центром "ГЕОН", ООО "ЦЭМИ".

Особенность этих работ заключалась в том, что МТ- и МВ-зондирования выполнялись по протяженным профилям (порядка нескольких сотен километров) с небольшим расстоянием между точками (обычно 1 - 2 км). Благодаря применению надежных и простых в использовании измерительных станций (главным образом, станций канадской фирмы Phoenix Geophysics) производительность полевых работ была достаточно высокой. Сложнее обстояло дело с обработкой и интерпретацией большого объема получаемых данных, поскольку зачастую приходилось работать в районах с высоким уровнем промышленных помех и сложным геоэлектрическим строением.

Регистрация и обработка данных. Современная измерительная аппаратура и методика полевых работ позволяют при отсутствии промышленных помех получать главные значения тензора импеданса с погрешностью до 1% по модулю и 1° по фазе. При наличии сильных помех точность измерений ухудшается. Для подавления помех используются системы синхронных наблюдений.

Источниками электромагнитных помех являются промышленные установки, трубопроводы, линии электропередачи. Наиболее интенсивны помехи от электрифицированных железных дорог (ЭЖД), образующих в европейской части России густую сеть. Поля ЭЖД создаются токами, стекающими в землю с рельсов. Они обладают интенсивной электрической и сравнительно слабой магнитной составляющей, что отличает их от МТ-поля. В настоящее время МТ-поле и поле ЭЖД разделяются с помощью ручной коррекции кривых кажущегося сопротивления. Характерным признаком помехи являются локальные восходящие ветви, отрывающиеся от кривой кажущегося сопротивления. Эти участки удаляются, а кривая кажущегося сопротивления сглаживается при помощи сплайнов. Если в непосредственной близости от ЭЖД не удается получить МТ-данные достаточно высокого качества, то на первый план выходит более помехоустойчивое МВ-зондирование. Кроме того, используется метод становления поля (ЗС) с индукционным возбуждением и индукционным приемом поля с накоплением сигнала.

Нормализация, анализ и трансформация МТ-данных. Другая важная проблема МТ-исследований связана с искажением кривых МТЗ локальными приповерхностными неоднородностями, образующими неинтерпретируемый геоэлектрический шум. Эти искажения проявляются в смещении кривых кажущегося сопротивления вдоль вертикальной оси. Наиболее простой способ подавления геоэлектрического шума - это сглаживание графиков кажущегося сопротивления на некоторой выбранной частоте и смещение кривых кажущегося сопротивления к среднему уровню. Более надежная нормализация кривых МТЗ обеспечивается их приведением к кривым ЗС, дающим информацию о сопротивлении верхней части разреза. Если геоэлектрический шум подавляется с трудом, то основная роль при интерпретации МТ-данных отводится типперам и фазовым кривым импеданса, которые на низких частотах свободны от приповерхностных искажений.

Важнейшим этапом интерпретации является анализ полевых данных, позволяющий построить интерпретационную модель. На этом этапе находятся главные значения и главные направления тензора импеданса (метод Эггерса, SVD-метод) и строятся частотные разрезы магнитотеллурических параметров, определяющих размерность, положение и соотношение изучаемых структур. Анализируются также диаграммы тензора импеданса и индукционные векторы, локализирующие неоднородности различных классов и фиксирующие простирание вытянутых региональных структур. Кроме того, применяются методы декомпозиции тензора импеданса (метод Бара, метод Грума-Бэйли, недавно предложенный метод фазового тензора), позволяющие разделить эффекты региональных и локальных структур.

Интерпретация МТ-данных. На основе анализа МТ-данных выбирается размерность интерпретационной модели - обычно 1D или 2D. Важным условием получения достоверного и детального разреза является использование всей имеющейся априорной информации. Для оценки надежности 1D-2D интерпретации выполняется 3D моделирование и оцениваются трехмерные эффекты. Интерпретация обычно проводится последовательно в два этапа. На первом (грубом) этапе инверсия выполняется в классе сглаженных градиентных сред. На втором этапе используются кусочно-однородные (блочные) среды и уточняется строение отдельных наиболее интересных участков. В интерпретации участвуют все компоненты МТ-данных, хотя их одновременная инверсия далеко не всегда эффективна из-за различной чувствительности к геоэлектрическим структурам и разной устойчивости к трехмерным искажениям.

Интерпретация МТ-данных в платформенных условиях. При изучении осадочного чехла платформ мы обычно располагаем обширной априорной информацией о строении среды. Как правило, имеются результаты каротажа глубоких скважин, расположенных вблизи профиля. Во многих случаях доступны сейсмические результаты, по которым надежно прослеживается рельеф отдельных горизонтов. Используя результаты бурения и сейсморазведки, интерпретатор может контролировать положение слоев с учетом возможного несовпадения геоэлектрических и сейсмических границ. Итоговая модель строится в классе кусочно-однородных сред, хорошо описывающих слоистую осадочную толщу с медленным горизонтальным изменением сопротивлений.

Для Русской плиты характерны грабенообразные впадины в фундаменте и валы в осадочном чехле, часто генетически связанные друг с другом. Основные геоэлектрические аномалии создают именно структуры чехла (валы). Дело в том, что на небольших глубинах (первые сотни метров) на Русской плите присутствуют тонкие высокоомные слои, слабопроницаемые для электрического тока. Над поднятием такого слоя резко возрастает поперечная по отношению к структуре компонента тензора импеданса. В этих условиях поперечный импеданс позволяет получить рельеф высокоомного слоя, а продольный импеданс используется для изучения проводящей подэкранной толщи.

Интерпретация МТ-данных в складчатых областях. Складчатые области, как правило, существенно неоднородны по горизонтали, и 1D интерпретация здесь не применима. Объем достоверной априорной информации при изучении складчатых областей обычно невелик. В этих условиях интерпретацию начинают со сглаженной 2D инверсии, отражающей основные геоэлектрические структуры. Успех интерпретации зависит от выбора стартовой модели, которая должна быть хорошо согласована с общими представлениями о регионе. В ряде случаев на основе сглаженной инверсии и гипотезы о геолого-геофизическом строении региона строятся кусочно-однородные (блочные) модели, которые затем уточняются в процессе интерпретации. Достоинством блочных моделей является их большая геологическая осмысленность. Важно подчеркнуть, что, используя блочные модели, мы можем выполнять интерпретацию в режиме проверки конкурирующих гипотез.

Основная проблема, с которой приходится сталкиваться при изучении складчатых областей, связана с трехмерными искажениями МТ-данных. Часто встречается ситуация, когда на двумерную глубинную структуру накладывается приповерхностная трехмерная структура (например, впадина, заполненная осадками). Здесь продольный импеданс испытывает сильные гальванические искажения, многократно превышающие эффект глубинных структур, а поперечный импеданс слабо чувствителен к глубинным структурам. В этой ситуации глубинное строение удается восстановить по типперу, слабо искажаемому влиянием трехмерной приповерхностной неоднородности, и обладающему высокой чувствительностью к глубинным проводящим структурам.

Некоторые результаты региональных исследований

Основной целью региональных промышленных исследований является обеспечение национальной минерально-сырьевой базы, включающее оценку нефтегазоперспективности осадочных бассейнов и минерагеническое районирование территорий. Кроме того, стоят задачи изучения геодинамического состояния регионов, оценки развития и распространения опасных геологических процессов.

Результаты МТЗ на Восточно-Европейской платформе. С 1997 года на Восточно-Европейской платформе отработан ряд профилей, пересекающих Московскую синеклизу, Токмовский свод, Мелекесскую впадину, Воронежскую антеклизу, кряж Карпинского и другие тектонические структуры. Целью работ являлось изучение осадочного чехла (в том числе выделение аномалий повышенной проводимости в девонско-каменноугольных от-

ложениях и прогноз участков предполагаемого развития рифейских отложений), а также выявление неоднородностей в верхней части земной коры (проводящих зон, связанных с глубинными флюидонасыщенными разломами, областями графитизации и сульфидизации пород).

По результатам МТ-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 проекта "Рифей". Работы проводились в 2001 году, длина профиля составила 650 км (160 точек МТЗ). На геоэлектрическом разрезе, построенном с учетом данных бурения и сейсморазведки ОГТ, отчетливо выделяются интересные с точки зрения нефтегазонасыщенности проводящие породы девона, венда и рифея (рис. 1). Мощность этих отложений в Солигаличском авлакогене оценивается в 2 - 3 км. Их сопротивление, составляющее первые единицы Ом · м, указывает на хорошие коллекторские свойства. В пределах некоторых участков с нефтегазоперспективными структурами, выделенных по данным ОГТ, выявлены низкоомные аномалии, связанные с увеличением пористости предполагаемых коллекторов.

Высокоомный комплекс в основании разреза, датируемый архейским-нижнепротерозойским возрастом, состоит из крупных блоков различного сопротивления.

На бортах Московской синеклизы и на Кубенской моноклинали он представлен высокоомными породами предположительно архейского возраста. В центральной части Московской синеклизы основание разреза сложнее более проводящими, по-видимому, раннепротерозойскими отложениями. Наиболее низкоомные образования приурочены к погруженной части Тарногского прогиба.

МТ-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 связанные с графитизацией и сульфидизацией пород. Это может свидетельствовать о тектонической активизации региона, поднятии глубинных флюидов и связанных с ними геохимических изменениях пород. Такие данные очень важны для минерагического прогноза и геодинамических исследований.

Результаты МТЗ на Кавказе и в Предкавказье. В Западном и Центральном Предкавказье и Приэльбрусье с 1997 года отработано 9 профилей общей протяженностью около 1500 км.

В геоэлектрическом разрезе по Кубанскому профилю (Новороссийск - Славянск) выделяется ряд блоков различного сопротивления, отвечающих основным тектоническим элементам в составе складчатого сооружения Большого Кавказа и Предкавказского краевого прогиба. В центральной части Восточно-Кубанского прогиба установлена мощная проводящая толща юрских образований, формирующая древний прогиб, ось которого несколько смещена от современного прогиба.

На геоэлектрическом разрезе по Приэльбрусскому профилю (рис. 2) отчетливо виден переход от складчатого глибового сооружения Большого Кавказа к Скифской плите с постепенным нарастанием мощности осадочных

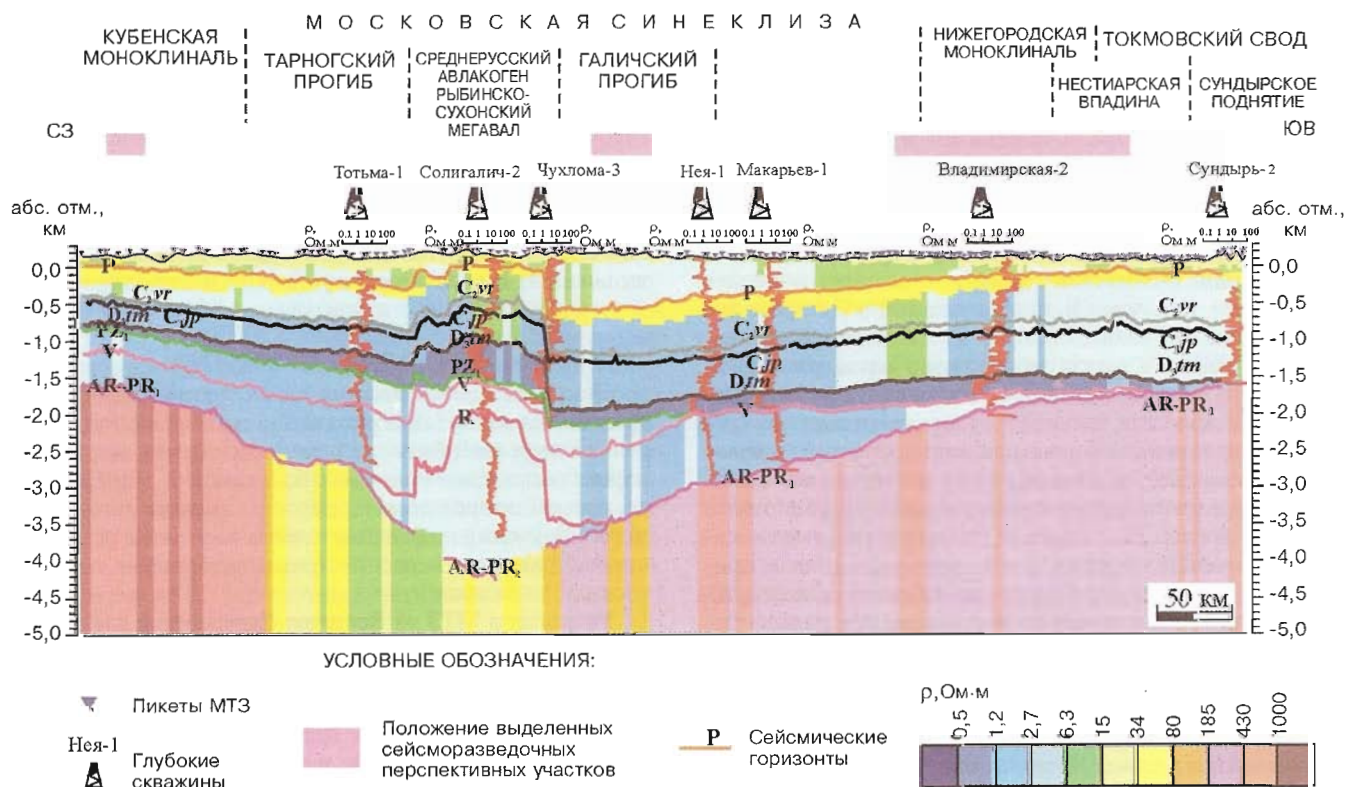


Рис. 1. Геоэлектрический разрез Московской синеклизы (профиль IV проекта "Рифей")

образований. В пределах обоих тектонических элементов герцинский фундамент неоднороден, наиболее сложная картина распределения сопротивлений отмечается в пределах Центрально-Кавказского тектонического блока. Аномалии проводимости в районе вулкана Эльбрус трактуются как магматическая камера (на глубинах 2 - 8 км) и магматический очаг (глубины свыше 30 км). На геоэлектрическом разрезе находят также отражение зоны тектонических нарушений, проявляющиеся в виде проводящих областей, видимо, вследствие их обводненности.

Результаты МТЗ на Южном Урале. В 2001 -2002 годах были проведены региональные работы методом МТЗ по профилю "Уралсейс" длиной 510 км. Оработано 500 точек МТЗ и АМТЗ с шагом 1 км. По результатам интерпретации в геоэлектрической структуре Южного Урала выделяются три домена: Западно-Уральский, являющийся частью окраины Восточно-Европейской платформы; Восточно-Уральский, образованный палеозойскими вулканическими и плутоническими комплексами основного и ультраосновного состава; Зауральский, являющийся частью Казахстанской эпикаледонской плиты. Кора Восточно-Европейской платформы и Казахстанской плиты формируют на геоэлектрических разрезах два крупных высокоомных блока, разделенных в районе Уралтау зоной пониженных сопротивлений.

Наиболее ярко в геоэлектрическом отношении проявляются разломы: Главный Уральский, Зюраткульский, Западно-Уралтауский и Карталинский. Сопротивление пород в зоне разломов составляет единицы Ом·м, что указывает на их обводненность. К выходу этих зон на поверхность приурочены месторождения хрома и золота Магнитогорской структурно-металлогенической зоны.

В Магнитогорской и Зауральской зонах выявлены коровые проводящие слои. Магнитогорская проводящая зона, мощностью около 30 км и суммарной продольной проводимостью более 1000 См, залегает на глубине 15 - 25 км. Зауральский коровый проводник плавно погружается на восток от Карталинской разломной зоны.

Суммарная продольная проводимость слоя составляет свыше 150 См.

Результаты МТЗ на Северо-востоке России. Комплексные геофизические исследования с 2001 года выполняются на опорном геофизическом профиле 2-ДВ, пересекающем Магаданскую область и Чукотский автономный округ. Метод МТЗ применяется в различных частотных интервалах (ГМТЗ, МТЗ, АМТЗ). В 2001 - 2002 годах работы МТЗ выполнены на южной части профиля (830 км) с шагом 1 км.

На рис. 3 представлен геоэлектрический разрез, полученный на южном участке профиля 2-ДВ. В пределах Кони-Мургалской складчатой системы и Охотско-Чукотского вулканогенного пояса на нескольких участках выделяются глубинные проводящие зоны. Следует отметить корреляцию этих зон с областями, в которых по сейсмическим данным наблюдаются "разрывы" границы Мохо. Таким образом, на этих участках возможно наличие зон проницаемости, по которым происходит подъем мантийных флюидов к земной поверхности. Данная информация важна для понимания закономерностей минерагенической зональности региона и выработки критериев прогноза месторождений полезных ископаемых.

Далее на север в пределах Яно-Колымской складчатой системы выделяются проводящие зоны, связанные с накоплением осадков в чехле и, как можно предполагать, обводненностью верхнемантийного горизонта, указывающую на тектономагматическую активизацию.

Глубинные электромагнитные исследования

Байкальская рифтовая зона. В литературе обсуждаются две модели глубинного строения байкальского рифта: (1) "мантийный диапир" (Н.Н. Пузырев, С.В. Крылов, А.Ф. Грачев) и (2) "астеносферный выступ" (Ю.А. Зорин). В первой модели астеносфера лежит на глубине 100 - 150 км и имеет в районе рифта узкое ответвление, заканчивающееся пластовой апофизой в

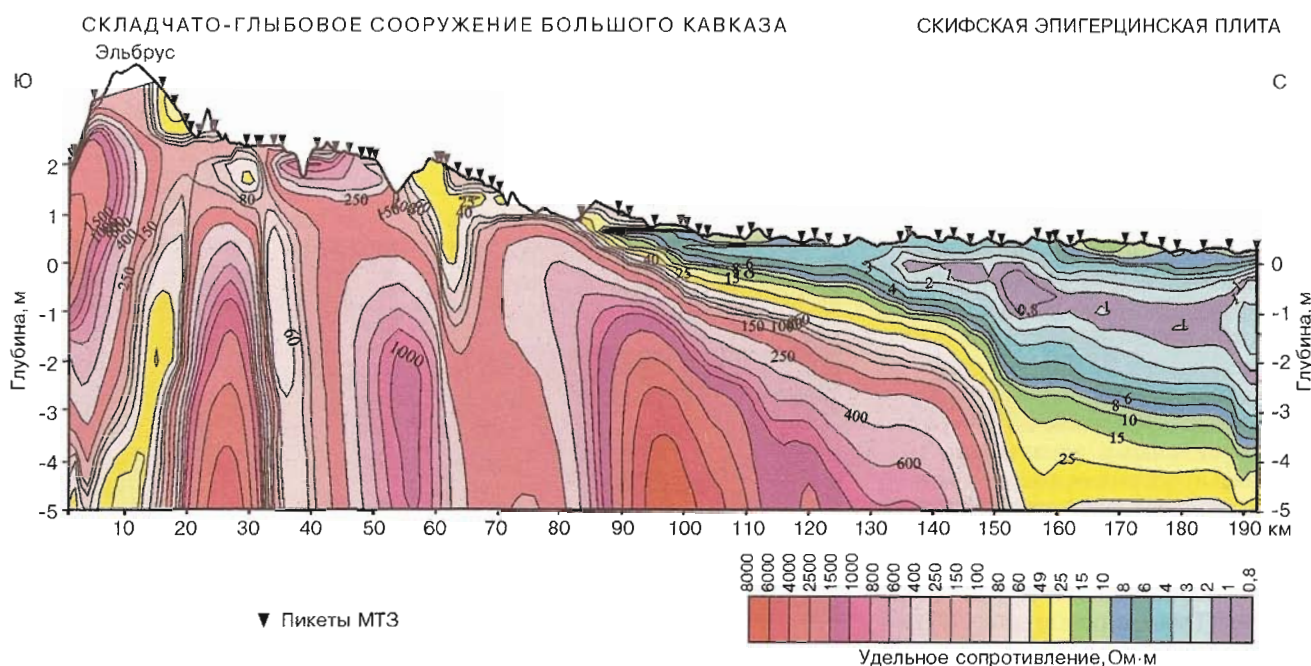


Рис. 2. Геоэлектрический разрез по Приэльбрусскому профилю

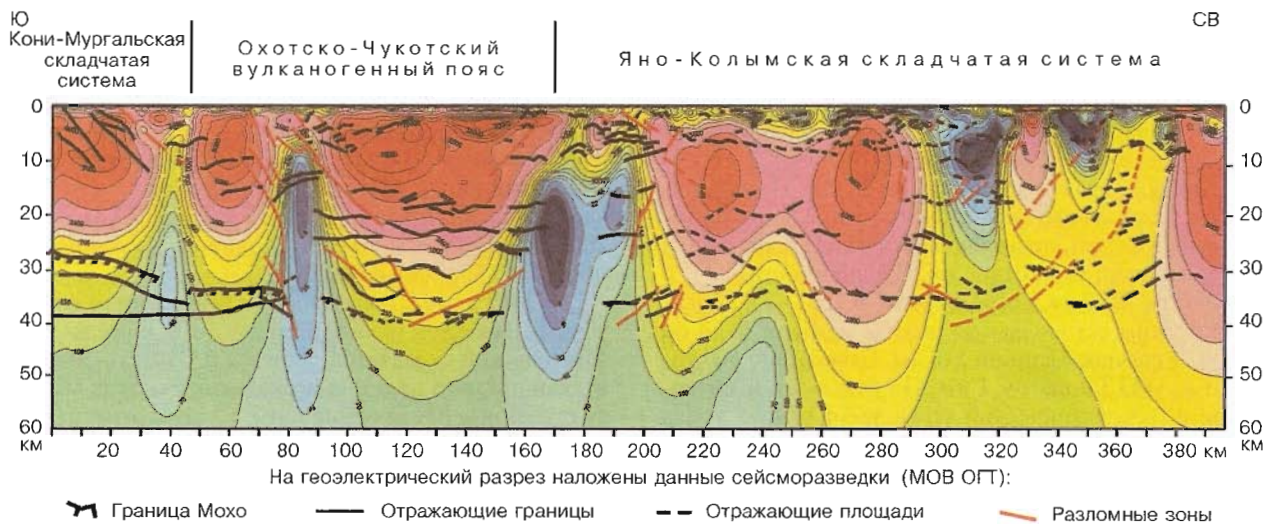


Рис. 3. Геоэлектрический разрез по участку профиля 2-ДВ

интервале глубин 40 - 60 км. Во второй модели астеносфера плавно подымается до глубины 40 - 50 км. Интерпретация МТ-данных была проведена в режиме проверки гипотез, для которого характерны две особенности: (1) инверсия выполняется в узком классе моделей, ограниченных рамками проверяемой гипотезы - таким образом, повышается устойчивость инверсии (однако ухудшается ее детальность), и (2) стартовая модель, которая строится на основе проверяемой гипотезы, позволяет предложить четко обоснованные реперы, необходимые для коррекции статических смещений - таким образом, существенно повышается определенность получаемой информации [2]

Двумерная интерпретация МТ-данных в режиме проверки гипотез показала, что в рамках гипотезы "астеносферный выступ" модельную невязку не удается опустить ниже уровня 80 - 100%. Переход к гипотезе "мантийный диапир" позволил уменьшить невязку до 15%. Таким образом, выступая в роли арбитра в споре между двумя геодинамическими моделями, магнитотеллурика дает веское свидетельство в пользу "мантийного диапира". В построенной модели "мантийный диапир" выделяются коровый проводящий слой и флюидонасыщенные глубинные разломы (рис. 4).

Ороген Тянь-Шаня. Большой объем магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований был выполнен в 1988 - 1990 гг. в горах Киргизского Тянь-Шаня геофизическими отрядами Института высоких температур РАН [3]. Зондирования были проведены по субмеридиональным профилям, характеризующимся сильными локальными и региональными искажениями кажущихся сопротивлений, затрудняющими интерпретацию полученных данных. Ситуацию удалось нормализовать лишь с помощью МВ-зондирований (Трапезников и др., 1997). На рис. 5 показаны графики вещественных типперов (отношения вертикального и горизонтального маг-

нитного поля) и подобранная по этим графикам геоэлектрическая модель. В земной коре этой модели выделяются неоднородный проводящий слой (интервал глубин 25 - 55 км) и вертикальные проводящие зоны, приуроченные к известным разломам (к линии Николаева, ЛН, и Атбаши-Иньльчикским разломам, АИР). Здесь же представлена модель, построенная по данным сейсмической томографии. Геоэлектрическая модель находится в хорошем согласии с наблюдениями и обнаруживает удивительное сходство с сейсмической моделью: низкие сопротивления устойчиво коррелируются с пониженными скоростями. Эта корреляция подтверждает реальность геоэлектрических построений, выполненных по МВ-данным. Тянь-Шаньский опыт свидетельствует о том, что магнитовариационное зондирование не только локализует коровые структуры, но и стратифицирует земную кору. Развивая этот результат, мы можем предложить новую схему электромагнитного зондирования, в которой метод МВЗ играет ведущую роль, а метод МТЗ служит для контролирования и детализации результатов МВЗ.

Каскадная зона субдукции. В 1985 - 1987 гг. на западном побережье Северной Америки были выполнены магни-

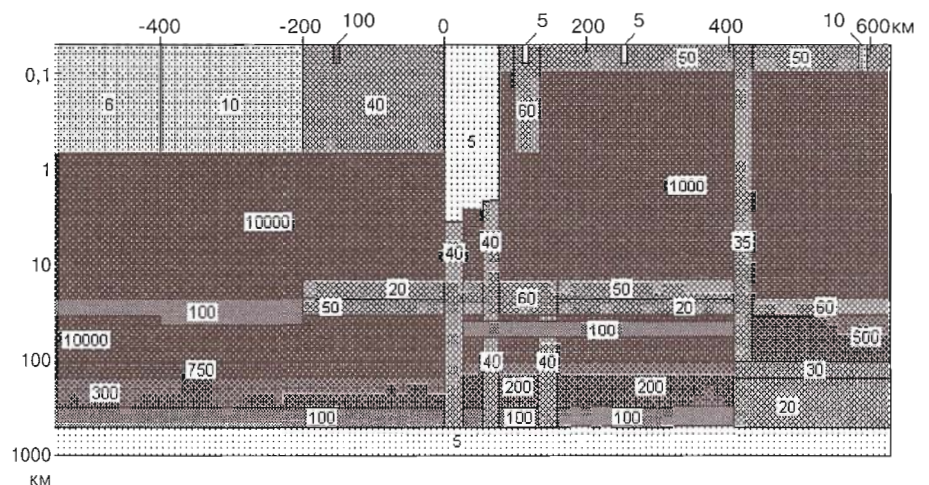


Рис. 4. Геоэлектрическая модель Байкальской рифтовой зоны

тотеллурические (МТ) и магнитовариационные (МВ) исследования в рамках интернационального проекта EMSLAB. Целью проекта 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, пересекающем зону субдукции, Береговой хребет, осадочный бассейн Вилламет и Каскадные горы. Этот профиль получил название линии Линкольн [4, 5].

Интерпретация данных состояла из нескольких этапов. На первом этапе была создана двумерная (2D) интерпретационная модель региона, отражающая современные геодинамические концепции. С ее помощью была исследована чувствительность МТ- и МВ-данных к основным структурным элементам этой модели, а также выполнен ряд пробных инверсий, характеризующих информативность различных мод электромагнитного поля. В частности, было показано, что ТЕ-мода (Е-поляризация) обладает более высокой чувствительностью по отношению к коровым проводящим зонам и низкоомной астеносфере, однако ТМ-мода (Н-поляризация) позволяет лучше определить связь океанических структур с континентальными структурами.

На втором этапе был проведен анализ МТ- и МВ-данных, полученных по линии Линкольн. Этот анализ показал преимущественно двумерный характер среды, а также позволил оконтурить области трехмерных низкочастотных искажений.

Содержанием последнего этапа была инверсия МТ и МВ-данных. Для грубых оценок глубинного строения

была использована программа REBOCC, позволяющая построить сглаженный геоэлектрический разрез. Была построена модель, основными элементами которой являлись океаническая астеносфера, начинающаяся с глубин порядка 40 км, 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 были введены в стартовую модель для 2D 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 была выбрана так, что обеспечивала 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 МВ-данным, позволившим выявить глубинные проводящие зоны. Эта модель была уточнена при инверсии ТМ-моды, характеризующей степень гальванической связи выявленных структур.

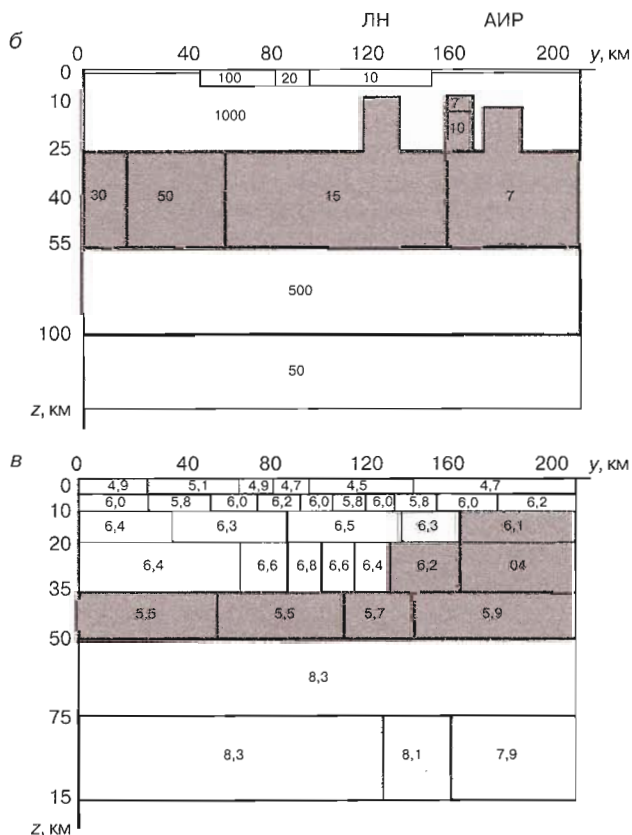
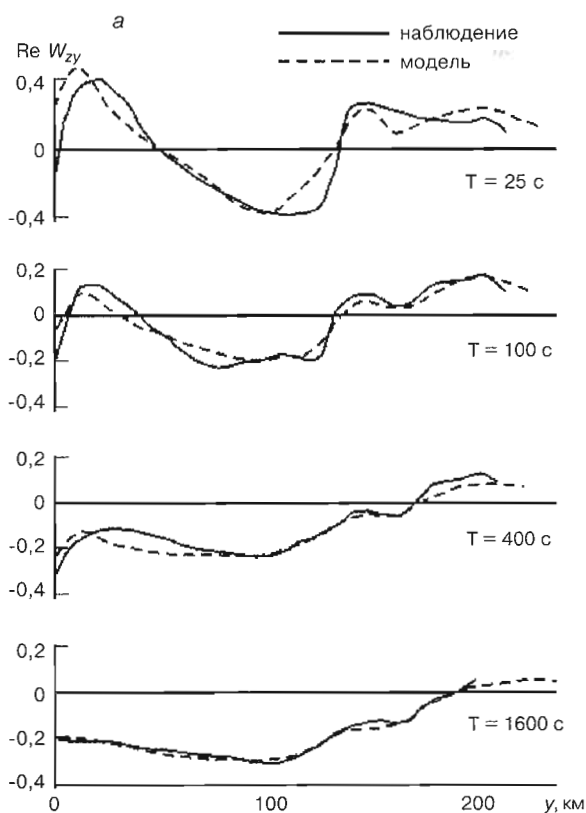


Рис. 5. Магнитовариационное зондирование в горах Киргизского Тянь-Шаня: а - графики вещественного типпера вдоль профиля; б - разрез сопротивлений по данным магнитовариационного зондирования; в - скоростной разрез по данным сейсмической томографии

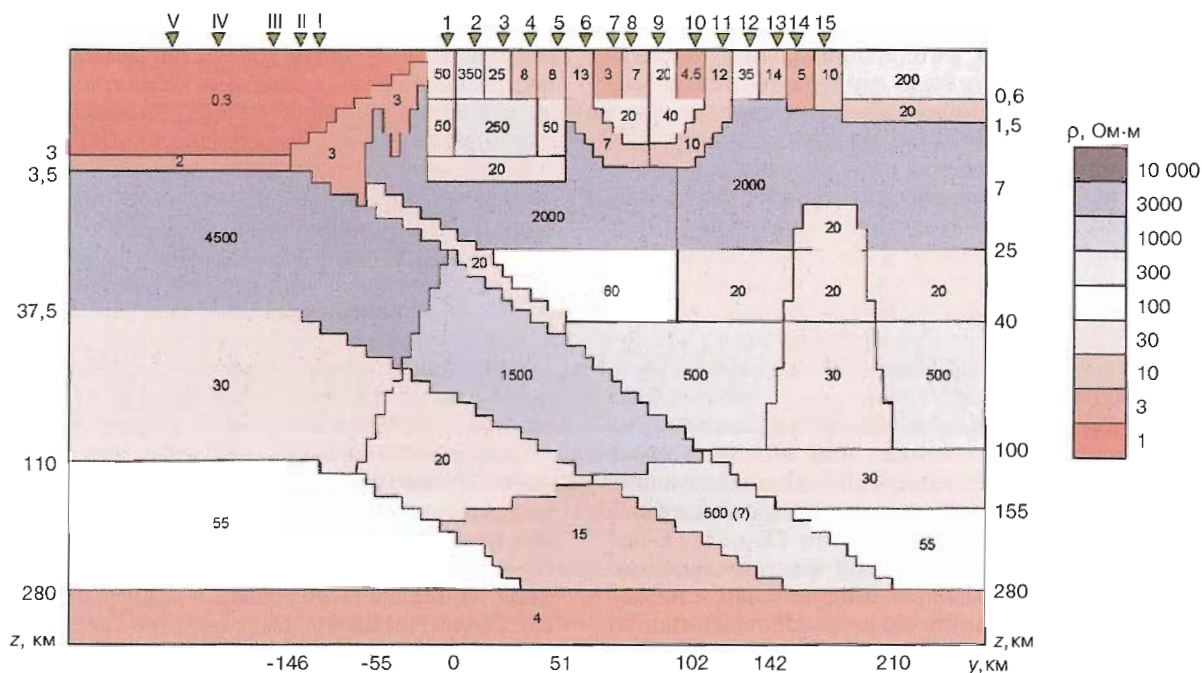


Рис. 6. Геоэлектрическая модель Каскадной субдукционной зоны

Основным результатом работы является обобщенная геоэлектрическая 2D модель региона (рис. 6). Она была получена путем схематизации результатов последовательной инверсии МВ-данных и данных ТМ-моды. Здесь отчетливо выделяются а) погружающаяся океаническая плита, включающая низкоомные осадки ($\rho = 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), высокоомную литосферу ($\rho = 500 - 4500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) и низкоомную астеносферу ($\rho = 15 - 30 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), б) низкоомный слой в нижней части континентальной коры ($\rho = 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $z = 25 - 40 \text{ км}$), в) низкоомная континентальная астеносфера ($\rho = 30 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $z = 100 - 155 \text{ км}$) и г) низкоомное столбовобразное тело ($\rho = 30 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), соединяющее астеносферу с коровым проводящим слоем. 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, содержащаяся в микропорах и микротрещинах субдуцируемой плиты. Затем на глубинах свыше 30 км и температурах более 400 градусов 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.

Заключение

Применение электромагнитных методов существенно расширяет информативность региональной и глубинной геофизики.

Так, с помощью магнитотеллурического зондирования были получены новые сведения о строении Московской синеклизы (в отложениях осадочного чехла выделены проводящие зоны с хорошими коллекторскими свойствами, в верхней части фундамента обнаружены низкоомные слабометаморфизованные породы). Не менее интересны результаты, полученные на Кавказе и в Предкавказье

(установлены проводящие магматические корни вулкана Эльбрус; в центральной части Восточно-Кубанского прогиба выявлена мощная проводящая толща юрских образований повышенной пористости). На Южном Урале и на Северо-Востоке России по данным МТЗ прослежены глубинные флюидонасыщенные ослабленные зоны.

Показательны результаты, полученные с помощью МТЗ в Байкальской рифтовой зоне. Здесь магнитотеллурика дала веское свидетельство в пользу гипотезы мантийного диапира. В построенной модели рифтовой зоны отчетливо выделяются глубинные разломы и коровы проводящий слой (предположительно дегидратационного происхождения). Особого внимания заслуживают результаты, полученные в Каскадной субдукционной зоне, где по данным МВЗ и МТЗ построена достаточно детальная модель мантийного клина, содержащая континентальную астеносферу с вертикальной миграцией астеносферного расплава в область вулканической дуги.

Анализируя все эти результаты, можно с уверенностью говорить о том, что современная геоэлектрика, дающая уникальную информацию о земных недрах, должна занять важное место в комплексе региональных и глубинных геофизических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. M.N. Berdichevsky, V.I. Dmitiev. Magnetotellurics in the context of the theory of ill-posed problems. Tulsa. SEG. 2002.
2. М.Н. Бердичевский, Л.Л. Ваньян, А.В. Кошурников. Магнитотеллурические зондирования в Байкальской рифтовой зоне. Физика Земли, 1999, № 10.
3. Ю.А. Трапезников, Е.В. Андреева, В.Ю. Баталёв, М.Н. Бердичевский, Л.Л. Ваньян, А.М. Вольхин, Н.С. Голубцова, А.К. Рыбин. Магнитотеллурические зондирования в горах Киргизского Тянь-Шаня. Физика Земли, 1997, № 1.
4. Л.Л. Ваньян, М.Н. Бердичевский, П.Ю. Пушкарёв, Т.В. Романюк. Геоэлектрическая модель Каскадной субдукционной зоны. Физика Земли, 2002, № 10.
5. М.Н. Бердичевский, В.И. Дмитриев, Н.С. Голубцова, Н.А. Мерцикова, П.Ю. Пушкарёв. Магнитовариационное зондирование: новые возможности. Физика Земли, 2003, № 9.