

Решение прямой задачи ВЭЗ для градиентно-слоистой среды может быть использовано для развития интерпретации данных в рамках слоистой модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Князев Д.И., Горбунов А.А. Аналитическое решение задачи о расчете потенциала электрического поля точечного источника на поверхности градиентно-слоистой среды // Матер. X междунар. научн. конф. «Геофизика-2003». — СПб., 2003.
2. Методические рекомендации по интерпретации ВЭЗ для мерзлых пород в градиентных сред в условиях северо-востока СССР / Кириллов В.А., Котов И.А. и др. — СВПГО, 1983.
3. Электрические зондирования геологической среды. Ч. 1. / Под ред. В.К. Хмелевского, В.А. Шевнина. — М.: МГУ, 1988.
4. Электроразведка методом сопротивлений / Под ред. В.К. Хмелевского, В.А. Шевнина. — М.: МГУ, 1994.

© Коллектив авторов, 2004

М.Н. Бердичевский, А.Г. Яковлев, Е.Д. Алексанова,
Е.В. Андреева, В.П. Бубнов, В.А. Куликов, А.Г. Морозова,
П.Ю. Пушкарев, Д.В. Яковлев

ТЕХНОЛОГИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГИОНАЛЬНЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

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 акад. А.Н. Тихонова. На этой основе возникла геоэлектрическая школа Московского университета, сыгравшая важную роль в развитии отечественной геоэлектрики.

Исследования геофизиков МГУ охватывают вопросы теории геоэлектромагнитных методов и интерпретации электромагнитных наблюдений. Работа ведется в тесном сотрудничестве с компанией «Северо-Запад», обеспечивающей полевой 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. В настоящей статье представлены практические результаты недавних региональных исследований, проведенных сотрудниками кафедры геофизики МГУ и ООО «Северо-Запад» в ряде регионов России.

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 принимают 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 индустриальные 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 находят 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, применяют

ся 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 несоответствия 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 подэкранный 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 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 являлось изучение осадочного чехла (в том числе выделение аномалий повышенной проводимости в девонско-каменноугольных отложениях 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 г., 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 нефтегазоносности 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 сложено более проводящими, по-видимому, раннепротерозойскими отложениями. Наибо-

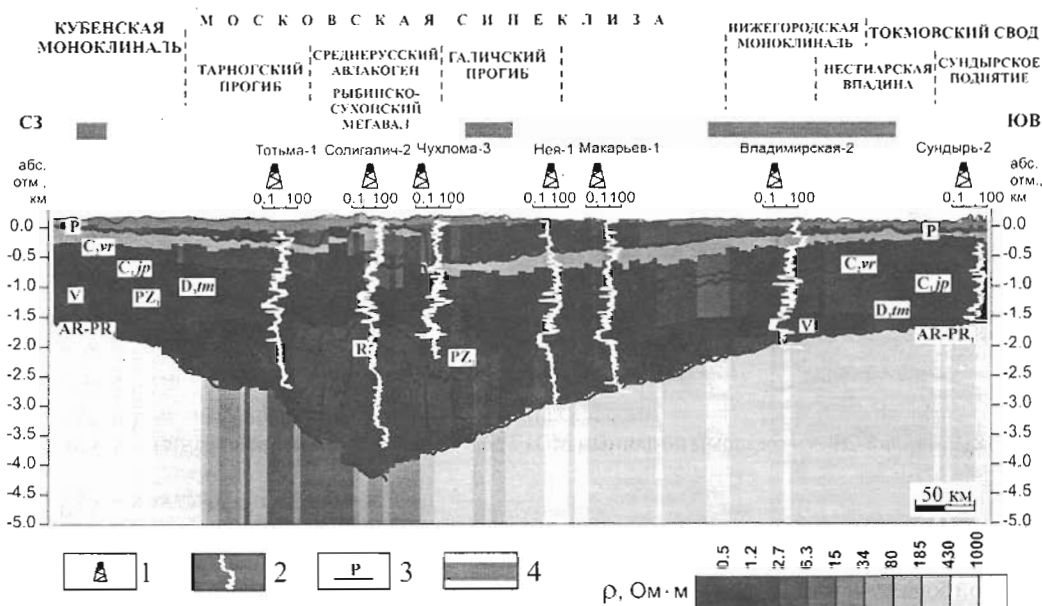


Рис. 1. Геоэлектрический разрез Московской синеклизы (профиль IV проекта «Рифей»)

более 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 минерагенического прогноза и геодинамических исследований.

Результаты МТЗ на Кавказе и в Предкавказье. В Западном и Центральном Предкавказье и Приэльбрусье с 1997 г. 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 складчато-глыбового сооружения Большого Кавказа к Скифской плите с постепенным нарастанием мощности осадочных образований. В пределах обоих тектонических элементов герцинский фундамент неоднороден, наи-

более сложная картина распределения сопротивлений отмечается в пределах Центрально-Кавказского тектонического блока. Аномалии проводимости в районе вулкана Эльбрус тракуются 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 гг. были проведены региональные работы методом МТЗ по профилю «Уралсейс» длиной 510 км. Отработано 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 Казахской эпикаледонской плиты. Кора Восточно-Европейской платформы и Казахской плиты формируют на геоэлектрических разрезах два крупных высокоомных блока, разделенных в районе Урала 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 при-

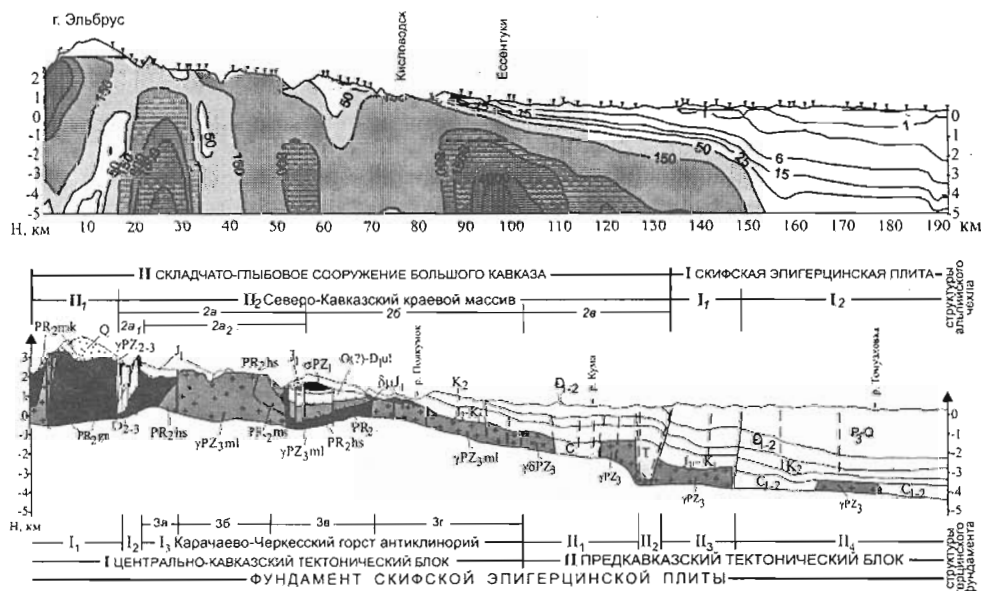


Рис. 2. Геоэлектрический и геологический разрезы по Приэльбрусскому профилю

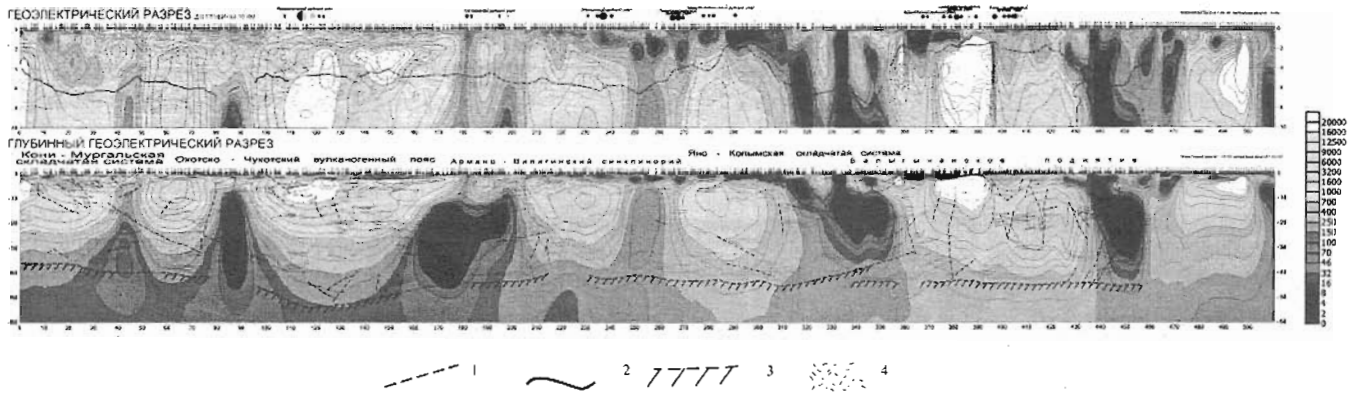


Рис. 3. Геоэлектрический разрез по участку профиля 2-ДВ: 1 — разломы по данным МОГТ; 2 — основные отраженные границы; 3 — граница Мохо; 4 — неоднородности в мантии

урочены 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 г. выполняются на опорном геофизическом профиле 2-ДВ, пересекающем Магаданскую область и Чукотский а.о. Метод МТЗ применяется в различных частотных интервалах (ГМТЗ, МТЗ, АМТЗ). В 2001–2002 гг. 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-Мургальской 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, указывающей на тектономагматическую активизацию.

В заключение можно сделать следующие выводы.

Применение электромагнитных методов существенно расширяет информативность региональной 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. Анализируя все эти результаты, можно с уверенностью говорить о том, что геоэлектрика, дающая уникальную информацию о земных недрах, должна занять важное место в комплексе региональных геофизических исследований.

© Коллектив авторов, 2004

Д.А. Алексеев, В.А. Куликов, А.Г. Яковлев (МГУ), В.П. Гребнев (ООО «Северо-Запад»), А.И. Корвяко (ГФУГП ЦГЭ), В.А. Матросов (ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА»)

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АМТЗ ПРИ ПОИСКАХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

В последние годы широкое применение получил магнитотеллурический метод, основанный на регистрации высокочастотных колебаний естественного электромагнитного поля Земли — метод АМТЗ (аудиомагнитотеллурическое зондирование). Распространению АМТЗ способствовал ряд факторов: 1) прогресс в области аппаратуры и программ обработки, 2) простота технологического процесса и, как следствие, высокая скорость проведения зондирования, 3) хорошо развитый аппарат интерпретации МТЗ, включая двух- и трехмерное моделирование. Все это позволило занять АМТЗ наряду с зондированием становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) достойное место в комплексе геофизических исследований проводимых при решении структурных задач и поиске месторождений полезных ископаемых.

В течение 2002–2003 гг. сотрудниками кафедры геофизики МГУ и ООО «Северо-Запад» совместно с другими организациями были проведены работы методами АМТЗ и ЗСБ в различных районах России в комплексе с другими геофизическими методами при поиске негорючих полезных ископаемых.

Осенью 2002 — летом 2003 г. на Бобровском участке Воронежской области ГФУГП «Центральная Геологическая Экспедиция» и ООО «Северо-Запад» были выполнены работы методом аудиомагнитотеллурического зондирования (АМТЗ) с целью изучения строения верхней части фундамента и выявления урановорудных районов. Работы выполнялись с аппаратурой АКФ (завод «Геологоразведка», С.-Петербург) и аппаратурой MTU-5A («Phoenix», Канада). Общий объем работ составил 725 точек АМТЗ.

В августе-сентябре 2003 г. специалистами ООО «Северо-Запад» (Москва) при участии студентов МГУ и поддержке ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА» проводились работы ме-