

ГЕОФИЗИКА

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ  
И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ЮЖНОГО УРАЛА

А.Г. Дьяконова, К.С. Иванов\*, П.Ф. Астафьев, В.С. Вишнев, А.Д. Коноплин

*Институт геофизики УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, Россия*

*\* Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620151, Екатеринбург, Почтовый пер., 7, Россия*

В результате комплексных исследований с искусственным и естественным источниками электромагнитного поля в широкой полосе частот ( $160 \text{ кГц} — 4 \cdot 10^{-4} \text{ Гц}$ ) и на основе численного моделирования была построена геоэлектрическая модель Южного Урала на протяженном геотраверсе (около 800 км) до глубин 120 км. Это позволило воссоздать общую картину строения земной коры и верхней мантии по электрическим параметрам Восточно-Европейской платформы (ВЕП), Предуральского прогиба и собственно уральской его части.

Получены новые данные о геолого-тектоническом строении Южного Урала, что существенно дополняет информативность одного из наиболее представительных сейсмопрофилей через складчатые пояса (Уралсейс-95).

Впервые в области сочленения ВЕП и Предуральского прогиба обнаружена крупная аномальная зона повышенной электропроводности, прослеженная до больших глубин (не менее 100—120 км), свидетельствующая о том, что Предуральский прогиб сформировался в тектонически ослабленной зоне на границе с ВЕП. Принципиальный результат, полученный по данным геоэлектрики, показывает, что Уральская складчатая система представляет собой в разрезе почти бивергентную структуру до глубин 70—80 км, маркируемую мозаичным распределением участков с пониженным удельным электрическим сопротивлением и уходящую своими корнями в области „зеленокаменной“ Магнитогорской мегазоны и „гранитной оси“ Восточно-Уральского поднятия на большие глубины. Горизонтальный размер этой зоны на глубине 120 км составляет 150 км. Обнаружение глубинных „корней“, следы которых отражены в модели, мы увязываем с историей формирования и развития Урала.

*Электромагнитные зондирования, моделирование, модель, тектоника, структурная геология.*

GEOELECTRICAL STRUCTURE OF CRUST AND UPPER MANTLE IN SOUTHERN URALS

A.G. Diakonova, K.S. Ivanov, P.F. Astaf'ev, V.S. Vishnev, and A.D. Konoplin

A resistivity model of the southern Urals to depths of 120 km was obtained using natural- and controlled-source EM soundings at 160 kHz to  $4 \cdot 10^{-4}$  Hz and numerical modeling. The structure of crust and upper mantle was imaged along a ~800 km long transect that traverses the East European Platform, the Ural foredeep, and the Ural mountains.

The new data on geology and tectonics of the southern Urals enlarge the knowledge gained through URSEIS-95 seismic profiling along one of the best representative cross-orogen profiles.

We discovered a large high-resistivity zone at the junction of the East European Platform and the Ural foredeep traceable to depths of at least 100–120 km. It indicates that the Ural foredeep originated in a weak tectonic zone at the platform boundary. The Ural fold system is imaged as a nearly bivergent structure to depths of 70–80 km, which produces a mosaic pattern of low-resistivity zones rooted deep beneath the Magnitogorsk greenstone province and the granite belt of the central East Ural uplift. The zone reaches 150 km wide at a depth of ~120 km. We interpret the discovered deep roots in the context of the geological history of the Ural orogen.

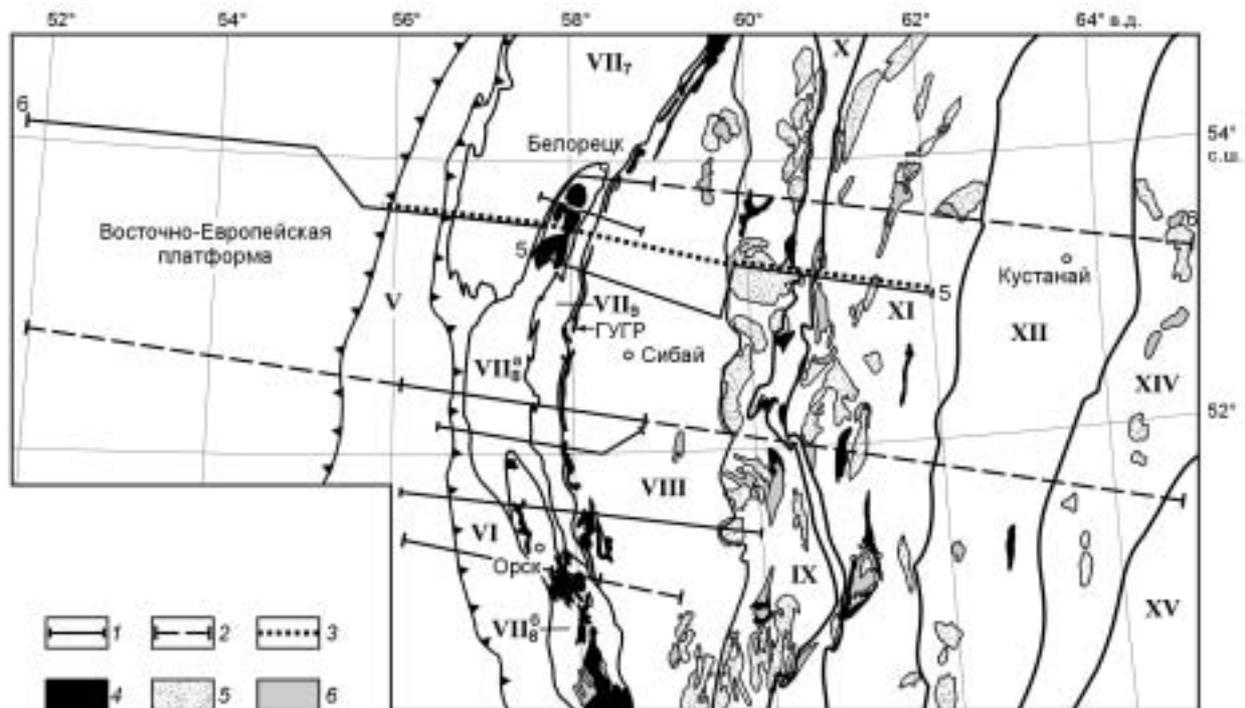
*Electromagnetic sounding, modeling, model, tectonics, structural geology*

ВВЕДЕНИЕ

Для расшифровки древних и прогнозирования современных процессов развития тектоносферы на различных ее уровнях, определяющих в том числе специфику формирования и условия залегания полезных ископаемых, особый интерес представляют исследования такой планетарной структуры, как Уральская складчатая система. Являясь зоной сочленения протерозойской Восточно-Европейской платформы (ВЕП) и молодой Западно-Сибирской плиты, Урал всегда считался типоморфной структурой для создания

глобальных тектонических моделей. Применение в России классической геосинклинальной модели во многом базировалось на уральских материалах, коренное переосмысление и привлечение новых данных по Уралу используется и при развитии теории литосферных плит. В настоящее время принято считать, что Уральский ороген возник на месте палеозойского океана и представляет собой коллаж преимущественно островодужных, а также палеоконтинентальных террейнов, избежавших поглощения в зонах субдукции. Океаническая кора сохранилась лишь в основании дуг и аллохтонах, надвинутых на окраину Восточно-Европейского континента [Пейве и др., 1977; Иванов и др., 1986; Иванов С., 1998]. Понятно, что эта общая точка зрения настоятельно требует комплексного использования разнообразных геофизических и геологических данных, без чего невозможно построение адекватных геодинамических моделей строения и развития Урала.

Исторически сложилось так, что при региональных исследованиях основную информацию о глубинном строении Уральского региона получали по сейсмогравитационным, магнитным и другим геофизическим данным. Между тем из рассмотрения исчезла созидательная роль флюидного фактора, отражающаяся на электропроводности ( $\sigma$ ) горных пород, которая наряду с вещественным составом пород характеризует и реологические свойства среды. В верхних частях коры, где породы хрупко реагируют на тектонические воздействия, а флюид находится под гидростатическим давлением, зоны повышенной проницаемости и трещиноватости будут существенно отражаться на этом параметре. По мере увеличения глубины и с переходом влаги в химически связанную,  $\sigma$  зависит от температуры и давления. При температуре выше критической (это 374 °С для пресной воды и 400—450 °С для водных флюидов) исчезают различия физических свойств жидкости и пара. Флюид в таком состоянии обладает более низкими плотностью и вязкостью, что улучшает его способность к миграции. По данным геотермии на рассматриваемой в настоящей работе территории температура 450 °С соответствует глубине 20 км под ВЕП и 35 км — в зоне Предуральского прогиба и Урала [Щапов, 2003]. Другим важным объектом глубинной геоэлектрики является получение информации о строении верхней мантии. Предполагаемые ее специфические особенности — это близость температуры к точке плавления вещества, низкая вязкость



**Рис. 1. Карта структурного районирования Южного Урала по геологическим данным [Тектоническая..., 1983] и расположение профилей электромагнитных исследований.**

Номера тектонических структур: V — Предуральский прогиб, VI — Западно-Уральская внешняя зона складчатости; VII<sub>7</sub> — Центрально-Уральское поднятие — Башкирский мегантиклинорий, VII<sub>8</sub><sup>a</sup> — Зилаирский мегасинклинорий, VII<sub>8</sub><sup>b</sup> — Сакмарская зона, VII<sub>9</sub> — Уралтауский мегантиклинорий, ГУГР — Главный Уральский глубинный разлом, VIII — Магнитогорская мегазона, IX — Восточно-Уральское поднятие, X — Восточно-Уральский прогиб, XI — Зауральское поднятие, XII — Тюменско-Кустанайский прогиб, XIV — Тобольско-Убаганское поднятие, XV — Аксуатский прогиб. Профили электромагнитных исследований (пояснение номеров см. в тексте): 1 — ИЭМЗ—АМТЗ—МТЗ, отработанные в течение 1998—2003 гг., 2 — МТЗ—ГМТЗ прошлых лет, 3 — профиль Уралсейс-95. Геологические формации и их состав: 4 — перидотиты и серпентинизированные ультрабазиты, 5 — граниты и гранодиориты, 6 — габбро, нориты, диабазы.

и, следовательно, текучесть материала, возможно, гравитационная неустойчивость, что позволяет предполагать именно здесь источник многих тектонических процессов.

Внедрение в практику работ цифровой измерительно-вычислительной аппаратуры в широком диапазоне частот позволило в полной мере реализовать возможности электромагнитных методов при изучении электрических параметров литосферы и ее структуры в южном секторе Урала. Здесь нами проведены обширные экспериментальные магнитотеллурические исследования и малоглубинные индукционные зондирования с контролируемым источником поля (магнитный диполь) по ряду субширотных профилей, положение которых приведено на рис. 1. В данной статье рассматриваются результаты комплексных электромагнитных зондирований в 110 пунктах геотраверса 6—5 (см. рис. 1), который частично совпадает с западным отрезком Троицкого профиля ГСЗ (6 на рис. 1) и международным сейсмопрофилем Уралсейс-95. Общая протяженность трассы исследований составляет около 800 км. Это позволило представить единую картину глубинного геоэлектрического строения восточной части Восточно-Европейской платформы, Предуральского прогиба и Уральской складчатой системы в южном сечении вплоть до населенного пункта Николаевка на востоке, расположенного на границе с Казахстаном. Кроме того, в работе предпринята попытка сопоставления информативности данных двух независимых геофизических методов — геоэлектрического и сейсмического. Показано, что информация об электропроводности коры и верхней мантии существенно дополняет сведения о составе, строении и состоянии земных недр, полученные с помощью сейсмических, геологических и других методов.

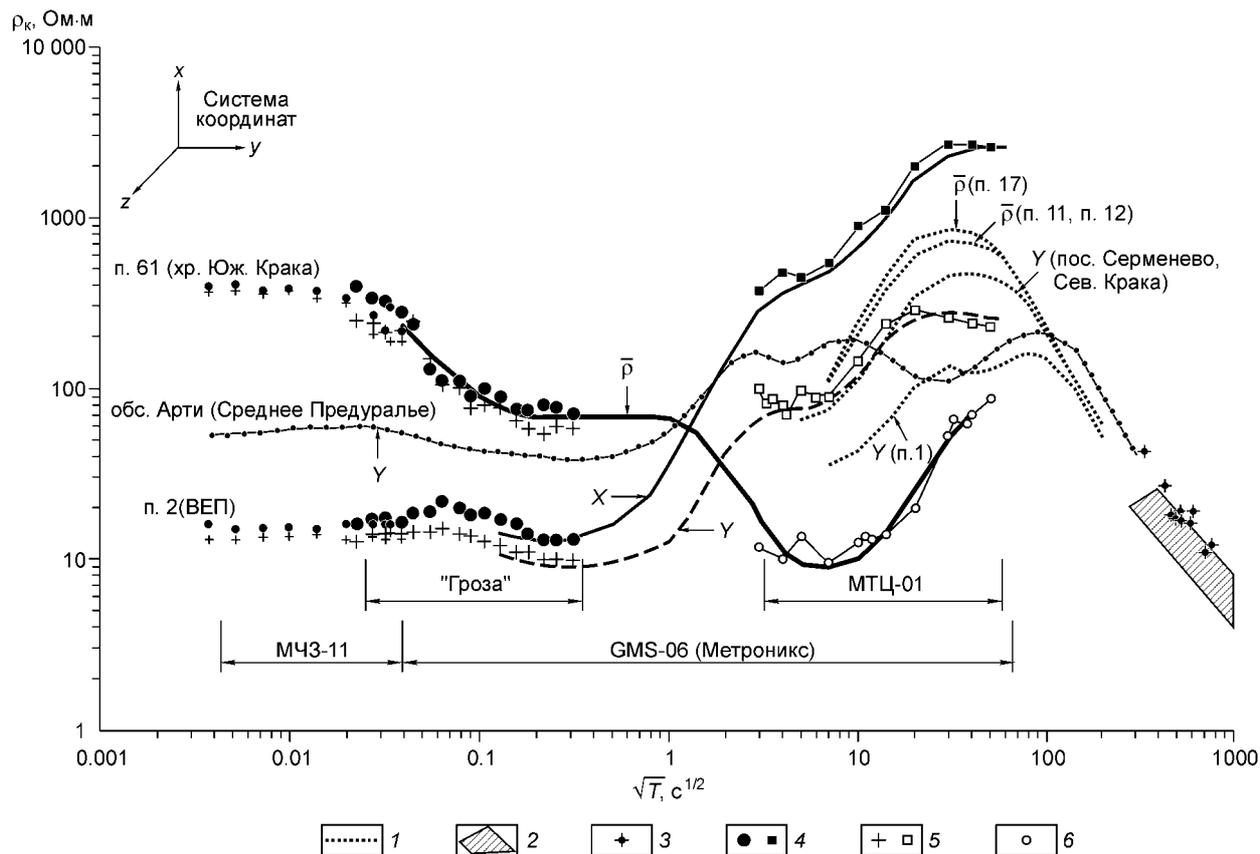
### МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассматриваемая работа выполнялась сотрудниками двух организаций: Института геофизики и Института геологии и геохимии УрО РАН. В ходе изучения осуществлялась тесная увязка и комплексное использование геологических и геофизических исследований с привязкой пунктов электромагнитных наблюдений к структурно-вещественным комплексам с целью наиболее достоверного учета геологических данных. Заново выполнена документация тектонических контактов специально в помощь количественной интерпретации электромагнитных данных, собраны новые фактические материалы и обобщена имеющаяся геологическая, петролого-геохимическая и другая информация о строении и формировании магматических, метаморфических и других комплексов Урала вдоль трассы исследований (см. рис. 1). Кроме того, с целью изучения строения, природы и истории формирования разломов и других проводников выполнен геолого-структурный анализ пород в области проекции проводящих зон на дневную поверхность. Оказалось, что, по крайней мере, в тех местах, где это удалось сделать, проводники были идентифицированы как зоны достаточно крупных разломов, что, по всей видимости, вызвано повышенным содержанием воды и водных флюидов в дислоцированных и трещиноватых породах этих разломных зон. Наклонные и вертикальные проводящие зоны, отождествляемые с положением палеоотделителя [Иванов С., 1998], могут быть плохо выражены с поверхности как из-за недостаточной глубины эрозионного среза и плохой обнаженности, так и вследствие гипергенеза, приводящего к понижению электропроводности. В процессе выполнения экспериментальных работ нами впервые в практике электромагнитных зондирований предложен и опробован новый подход, позволяющий получать полную информацию об электрических параметрах среды на глубинах от 10 м до сотен километров. Сущность его заключается в следующем.

**1. Аппаратурно-методическое обеспечение.** Известно, что от точности, помехозащищенности и технологичности измерений, а также качества обработки полученных данных средствами вычислительной техники зависит информативность интерпретации магнитотеллурических данных и, в конечном счете, ценность геолого-геофизической информации. На базе измерительно-вычислительной системы GMS-06 фирмы „Метроник“ и разработанной в Институте геофизики УрО РАН высокочастотной аппаратуры МЧЗ-11 и „Гроза“, а также низкочастотной цифровой станции МТЦ-01, нам удалось объединить в единый комплекс индукционное электромагнитное зондирование (ИЭМЗ) с искусственным источником в диапазоне частот 160 кГц—700 Гц [Коноплин, Человечков, 2001], аудиоманнитотеллурическое зондирование (АМТЗ), магнитотеллурическое зондирование в среднепериодном (МТЗ) и низкочастотном (ГМТЗ) диапазонах. Функциональные возможности перечисленной выше аппаратуры состоят в следующем:

— широкополосная станция GMS-06 (от 20 000 Гц до 5000 с), использующаяся в технологически развитых странах мира, позволяет получать полные амплитудные и фазовые кривые в этом диапазоне;

— высокочастотная аппаратура „Гроза“ (метод АМТЗ) позволяет измерять пять компонент электромагнитного поля на 16 фиксируемых частотах, оптимально размещенных в диапазоне 2000—10 Гц [Патент..., 2003]. Узкополосная полоса пропускания сигнала (десятые доли Гц) помогает обеспечить требуемый динамический диапазон, снизить уровень влияния промышленных помех с частотой 50 Гц и их гармоник и субгармоник, а в случае применения контролируемого источника электромагнитного поля стабильной частоты и амплитуды, наиболее эффективно проводить измерения путем настройки на его



**Рис. 2. Результаты сопоставления кривых электромагнитного зондирования, полученных с помощью различных аппаратных комплексов на практических примерах.**

Цифры у кривых — номера пунктов профиля. 1 — кривые ГМТЗ; 2 — глобальное распределение  $\rho_k$  с оценкой неопределенности [Рокитянский, 1981]; 3 — уточненные данные глобального магнитовариационного зондирования [Файнберг, 1983]; кривые  $\rho_k$ : 4 — меридиональное (север—юг) направление (X), 5 — широтное (восток—запад) направление (Y), 6 — эффективные кривые  $\bar{\rho} = \sqrt{X \cdot Y}$ .

частоту. Генератор синхронизированных частот входит в комплект аппаратуры „Гроза“. Преимущества использования искусственного источника поля в аудиодиапазоне позволяют повысить достоверность информации, получаемой при зондировании на частотах 600—2000 Гц в области минимума интенсивности естественного электромагнитного поля;

— низкочастотная 5-компонентная цифровая станция МТЦ-01 позволяет регистрировать вариации естественного поля в диапазоне периодов от 1.6 до 10 000 с (метод МТЗ). Амплитудный диапазон станции составляет  $\pm 1000$  нТл для измерений магнитного и  $\pm 2000$  мВ для электрических полей. В аппаратуре используется оптико-механический блок торсионных магнитометров и 24-разрядное аналого-цифровое преобразование, обеспечивающее проведение продолжительной непрерывной записи. Она отличается малыми габаритами, весом и энергопотреблением [Коноплин, Человечков, 2003].

**2. Оптимизация экспериментальных исследований.** Разумное совмещение вышеперечисленных измерительных комплексов при проведении зондирований с учетом апостериорной проверки в ранее выполненных пунктах МТЗ—ГМТЗ с аналоговой аппаратурой (МТЛ-71, МЭВС-5) позволило обеспечить достаточную мобильность работ и большую достоверность согласованных кривых зондирования с естественным и контролируемым источниками.

На рис. 2 приведены кривые кажущегося сопротивления ( $\rho_k$ ) в совмещенных пунктах профиля (п. 2 и п. 61), построенные по данным различных комплексов цифровой измерительной аппаратуры. Здесь же для сравнения приведены кривые МТЗ—ГМТЗ с аналоговой аппаратурой, а также полная кривая электромагнитного зондирования в обсерватории Арти, которая демонстрирует возможности изучения Земли с помощью электромагнитных методов до глубин 600 км. Ее правая нисходящая ветвь, построенная по данным Sq-вариаций, дополняет глобальное распределение  $\rho_k$  по данным магнитовариационного зондирования [Рокитянский, 1981; Файнберг, 1983] и показывает, что на глубине 600 км наблюдается перепад

сопротивления вещества, по крайней мере, на два порядка [Дьяконова, 1994]. На Южном Урале эта граница фиксируется на глубине порядка 500 км.

**3. Обработка магнитотеллурических данных.** Процесс обработки полностью автоматизирован, что обеспечивает получение оперативных оценок электрических свойств разреза непосредственно в процессе исследований. В аппаратуре GMS-06 с программным обеспечением „MAPROS“ предусматривается построение амплитудных и фазовых кривых с отбраковкой случайных выбросов (помех) на основе робастных способов.

В станции МТЦ-01 создана программа обработки с применением робастной статистики, позволяющая вычислять магнитотеллурические числа по временным рядам измеренного поля, в том числе с одной или несколькими удаленными опорными точками, получать стабильные результаты при входном сигнале низкого уровня магнитного и, особенно, электрического поля случайной природы с различным спектральным составом и высоким уровнем помех.

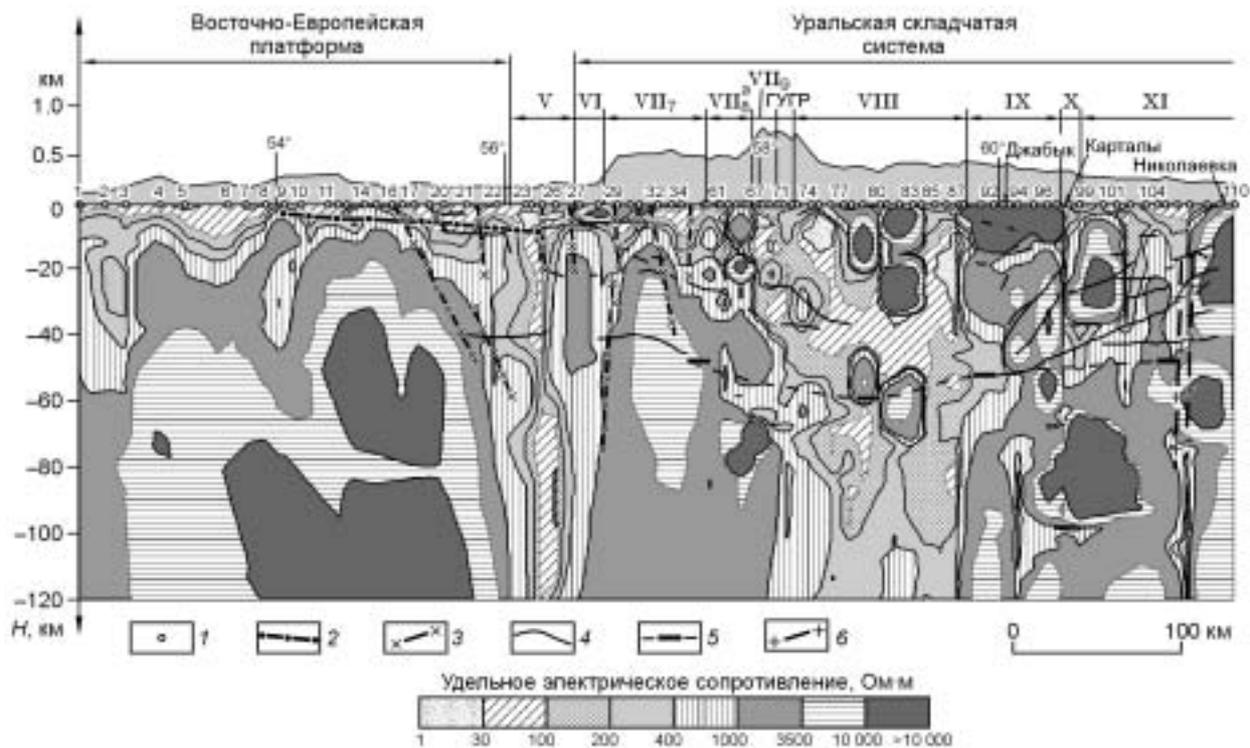
В силу особенностей узкополосного сигнала в аппаратуре „Гроза“ обработка ее записей подвергается специальной процедуре. Вначале полевые данные преобразуются в серию мгновенных комплексных значений амплитуд 5-компонентного поля. Затем сигнал анализируется по двум характеристикам — коэффициенту частной когерентности и коэффициенту корреляции между абсолютными значениями амплитуд электрических и магнитных компонент. Если сигнал имеет коэффициенты выше заданного порога (когерентность 0.4, корреляция 0.65), то они подвергаются дальнейшей обработке, если нет, то отбрасываются. На одной полевой точке записывается до 150 тыс. отсчетов по каждой компоненте, что позволяет при определении амплитуды и фазы на каждой из 16 частот применять статистические методы. Алгоритмы обработки МТ-данных тестированы на синтетических временных рядах, предоставленных И.М. Варенцовым. Сглаживание кривых осуществляется по программе Ю.М. Смирнова [1998].

**4. Численное моделирование.** На данной стадии исследований при построении геоэлектрических моделей широко используются сервисные программы математического моделирования в различных средах, разработанные ведущими российскими учеными (Э.Б. Файнбергом, Л.Н. Пороховой, И.Л. Варданянц, А.А. Бобачевым и др.) и любезно предоставленные для практического использования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ И ИХ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Мощные тектонические движения, сформировавшие Урал как крупную линейную систему планетарного характера, за время своей геологической истории вовлекли в сферу кардинальной перестройки большую территорию смежных крупных структурных элементов и проявились на значительных глубинах коры и верхней мантии, что предопределило необходимость проведения наших исследований на значительной территории ВЕП как эталона древнего кратона. В течение 2001—2003 гг. выполнены работы на геотраверсе 6—5 (см. рис. 1) и построен по нему полный геоэлектрический разрез до глубины 120 км (рис. 3).

Основным интерпретационным материалом для построения разреза являются согласованные амплитудно-фазовые кривые  $\rho_k$  в направлении север — юг ( $X$ ) или восток — запад ( $Y$ ), либо эффективные  $\bar{\rho}$ . Выбор наименее искаженных кривых  $\rho_k$  осуществлялся на основе пленочного и квазитрехмерного численного моделирования с учетом структурно-тектонических особенностей различных зон и привязкой кривых в низкочастотном диапазоне к глобальной магнитовариационной кривой  $\rho_k$ . Результаты этих исследований детально рассмотрены в работах [Дьяконова и др., 1987, 1990]. Получены научно обоснованные критерии для правильной интерпретации данных МТЗ в условиях региональной и локальной геоэлектрической неоднородности верхних горизонтов коры. Выделены участки земной поверхности, где гальванические искажения поля можно свести к минимуму, если использовать для интерпретации ту или иную поляризацию поля. Наименее искаженными на Урале, как правило, являются квазипродольные кривые ( $X$ ), а на ВЕП и в Предуральском прогибе — квазипоперечные по отношению к Уралу ( $Y$ ), либо эффективные. Интерпретировались индивидуальные кривые зондирования, полученные в каждом пункте наблюдения, за исключением участка профиля между пунктами 93—96, соответствующего Джабыкскому гранитному плутону (Восточно-Уральское поднятие), где рассматривалась средняя обобщенная кривая  $X$  ввиду резких локальных искажений поля, обусловленных влиянием промышленных помех. На основе полученных данных с использованием результатов численного моделирования в 1D и 2D средах рассматривались альтернативные варианты моделей. В условиях резкой горизонтальной неоднородности среды, особенно на территории „открытой“ части Урала, наиболее информативными оказались одномерные модели, учитывающие тонкую структуру разреза. Геоэлектрический разрез, приведенный на рис. 3, построен Л.М. Пороховой по инверсионной автоматизированной программе 1D, позволяющей получать полную информацию об электрических параметрах коры и верхней мантии без привлечения априорных данных. В этом аспекте его можно рассматривать как альтернативный построенным разрезам других геофизических методов.



**Рис. 3. Геоэлектрический разрез по геотраверсу Камышла—Стерлитамак—Николаевка с элементами сейсмических данных.**

1 — пункты комплексных электромагнитных зондирований; 2 — геологическая граница кристаллического фундамента [Камалетдинов, 1974]; 3 — тектонические нарушения по данным ГСЗ [Дьяконова и др., 1994]; результаты сейсмических исследований по профилю Уралсейс-95 [Echtler et al., 1996; Глубинное..., 2001]; 4 — основные высокоотражательные границы по данным МОВ—ОГТ, 5 — метка нижней границы М, 6 — глубинный разлом. Римские цифры — номера тектонических структур (пояснение см. на рис. 1).

Для сравнения на рис. 3 нанесены данные сейсмических методов: границы высокоотражающих слоев, которые четко видны на оригинале профиля МОВ—ОГТ Уралсейс-95 [Echtler et al., 1996] и отметки нижней границы Мохоровичича (М) в четырех пунктах этого же профиля [Глубинное..., 2001], а также тектонические нарушения в коре по западному отрезку Троицкого профиля ГСЗ [Дьяконова и др., 1994]. Анализ приведенных на рис. 3 данных показывает, что построенный геоэлектрический разрез до глубины 120 км в совокупности с сейсмическими данными по коре, по нашим представлениям, может иметь принципиально новую трактовку в вопросах образования и развития Урала в отличие от интерпретации многочисленных исследователей, изложенной в монографии по проекту Уралсейс-95 [Глубинное..., 2001]. Согласно геоэлектрическим данным, не останавливаясь на деталях разреза коры, которые имеют самостоятельное региональное значение, рассматриваемую территорию на современном срезе земной поверхности возможно разделить на три сектора: I — пункты профиля 1—21, II — пункты 22—29, III — пункты 30—110.

*Сектор I* — захватывает восточную часть ВЕП. В геоэлектрической модели в пределах ВЕП в районе пунктов наблюдения 6, 11, 20 (см. рис. 3) в поверхности архейско-протерозойского фундамента отчетливо видны прогибы, выполненные, по всей видимости, терригенными, терригенно-карбонатными и, возможно, местами эффузивными образованиями рифейского и рифейско-вендского возраста. Повсюду в разрезе наблюдается генетическая связь (унаследованность) между рельефом фундамента и мощностью преимущественно терригенных и, в отдельных случаях, карбонатных пород, слагающих верхний слой платформенного чехла рифейско-палеозойского возраста. Они представлены неметаморфизованными породами различной литологии — от глинисто-терригенных (с удельным сопротивлением 1—100 Ом·м) до галогенных и карбонатных разностей, сопротивление которых изменяется в широких пределах от сотен до нескольких тысяч омов на метр. Мы трактуем эти структуры как авлакогены и грабенообразные впадины, заложенные в рифее при частичном растяжении фундамента платформы. По особенностям глубинного строения сектор I будем в дальнейшем рассматривать, судя по величине  $\rho$ , как типично континентальный жесткий блок.

*Сектор II* — переходная область между ВЕП и Уральской складчатой областью. Пространственно он включает восточную часть ВЕП, Предуральский прогиб и Западно-Уральскую зону складчатости. На построенной нами геоэлектрической модели в пределах восточной части ВЕП и западной части Предуральского прогиба на глубинах 1—10 км отчетливо видна горизонтально-слоистая, контрастная по сопротивлениям среда, обусловленная различиями в литологии палеозойских осадочных комплексов, причем проводник с наиболее низким сопротивлением располагается на глубинах 1.5—2 км. Эта горизонтально-слоистая часть разреза ограничена с востока в районе р. Белая очень крупной и четко проявленной разломной зоной с сопротивлением ниже 50 Ом·м. Восточнее нее в верхней части разреза хорошо выделяется высокоомный (700—3000 Ом·м и более) блок, соответствующий карбонатному разрезу верхнего палеозоя, который венчается рифовыми известняками ассельского возраста (так называемыми шиханами). Полученные нами данные четко отбивают нижнюю границу карбонатного разреза на глубине 4 км. Еще два крутых крупных проводника (разлома) выделяются в восточной части Предуральского краевого прогиба и на его границе с Западно-Уральской зоной складчатости.

Получены новые данные о строении архейско-протерозойского фундамента восточной части ВЕП, фиксируемого на глубинах от 3—10 км и более. Отметим главную особенность. В области сочленения платформы с Предуральским прогибом выделяется очень крупная и прослеживающаяся до больших глубин (не менее 100—120 км) Стерлитамакская аномальная зона повышенной электропроводности, по всей видимости, тектонической природы, что находит подтверждение в сейсмических данных по ГСЗ. Подобная закономерность прослежена нами и в среднем сечении Урала по профилю Арти—Байкалово [Дьяконова и др., 2002]. Геологическое значение этой зоны еще предстоит осмыслить. Отметим, что ряд исследователей провели анализ расположения и роли палеозон субдукции в геологической истории Урала с попыткой оценки их количественных характеристик [Коротеев и др., 2001]. В сопоставлении с Уралом анализировались общие закономерности строения современных активных окраин с известными геодинамическими параметрами, составы продуцированных в их пределах магматических и других комплексов. При этом было высказано предположение о наличии в зоне сочленения ВЕП с Предуральским прогибом каменноугольной зоны субдукции андского типа, именно там, где нами позднее и была выявлена мощная электропроводная зона. Совпадение отмеченных двух совершенно независимых результатов исследований позволяет рассматривать данное предположение в качестве рабочей гипотезы. Все же более вероятной нам представляется альтернативная точка зрения, основанная на фактических данных о глубинном и структурно-тектоническом строении Стерлитамакской зоны. Она заключается в том, что выявленная зона — это крупная пограничная структура, отделяющая с востока кристаллический метаморфический цоколь — фундамент ВЕП. По нашему мнению, Стерлитамакскую зону можно трактовать как восточную границу ВЕП в отличие от существующей точки зрения, согласно которой кристаллический фундамент ВЕП постепенно выклинивается в восточном направлении и протягивается вплоть до Главного Уральского глубинного разлома (ГУГР) [Камадетдинов, 1974; Пейве и др., 1977; Иванов и др., 1986; Иванов К., 1998]. Если именно эта гипотеза окажется справедливой, то получится, что предполагаемая по сейсмическим и другим данным [Глубинное..., 2001], под Башкирским мегаантиклинорием и смежными зонами Южного Урала (см. рис. 3, п. 27—66) континентальная сиалическая кора не образует единого массива с ВЕП. По всей видимости, этот блок сиалической коры является микроконтинентом мадагаскарского типа. В пользу данной трактовки достаточно убедительно свидетельствует субвертикальный характер Стерлитамакской зоны и тектонические нарушения, установленные по данным ГСЗ [Дьяконова и др., 1994]. В любом случае, из приведенных материалов электромагнитных зондирований (см. рис. 3) следует, что Предуральский прогиб заложился не просто на утоненном краю ВЕП, как это считалось ранее, а закономерно сформировался над очень крупной разломной зоной, масштабы и значение которой, очевидно, не меньше, чем Главного Уральского глубинного разлома.

*Сектор III* — Уральская складчатая система с полным набором структур, сложенных допалеозойскими и палеозойскими комплексами: Башкирский антиклинорий, Зилаирская зона с надвинутыми на нее ультрабазитовыми массивами хр. Крака, метаморфическая мегазона хр. Урал-Тау, ГУГР, Магнитогорская мегазона, Восточно-Уральское поднятие, Восточно-Уральский прогиб и Зауральское поднятие. Границы зон на геоэлектрическом разрезе указаны согласно карте структурно-тектонического районирования Урала под редакцией И.Д. Соболева и др. [Тектоническая..., 1983]. Все выделенные на земной поверхности геологические зоны находят свое выражение в геоэлектрическом разрезе и характеризуются рядом специфических особенностей. Не останавливаясь на деталях строения коры, которые имеют самостоятельное значение, отметим лишь главные из них.

Для осадочных комплексов Башкирского мегаантиклинория характерны очень высокие сопротивления (1500—10 000 Ом·м и более), которые прослеживаются до глубин примерно 7 км в западной части структуры и лишь до глубин 2—3 км — в восточной. Глубже в разрезе, включая западный палеоконтинентальный сектор Урала, четко выделяется протяженная наклонная поверхность восточного падения (~45°), разделяющая высокоомные и относительно проводящие образования.

Магнитогорская вулканогенная (зеленокаменная) мегазона характеризуется наибольшим количеством проводящих объектов, поэтому может быть названа мегапроводником, содержащим блоки средне- и высокоомных комплексов пород, количество которых увеличивается в верхней части коры (см. рис. 3). Символично, что в низах коры в диапазоне глубин 30—50 км, там, где по геотермическим данным температура может достигать 450 °С и более [Щапов, 2003], наблюдается протяженный коровый проводящий слой, что позволяет предположить наличие здесь надкритических флюидов, обладающих высокой проникающей способностью. В боковых частях проводящего слоя прослеживаются его структурные связи с ГУГР на западе, а на востоке — с региональным разломом вблизи границы с Восточно-Уральским поднятием, где на поверхности он совпадает с Западно-Джабыкской зоной серпертинитового меланжа и милонитов зеленосланцевой фации метаморфизма.

Следующая на восток мегазона, Восточно-Уральское поднятие, вмещает позднепалеозойскую „главную гранитную ось“ Урала, которая является одним из наиболее крупных и ярко выраженных структурных элементов региона. Она представлена цепью крупных гранитных батолитов, протягивающейся в субмеридиональном направлении в пределах Восточно-Уральского поднятия более чем на 1000 км. Для этой мегазоны очень характерны локальные купольные структуры с гранитными плутонами в их центрах и гнейсово-сланцевым обрамлением, залегающим согласно с границами гранитных массивов. Эти купольные структуры, как свидетельствуют структурно-тектонические и изотопные данные, возникли в результате пластичных деформаций при внедрении самих гранитных массивов. В обрамлении плутонов развиты мощные зоны апогранитных милонитов, сформированных в результате интенсивных пластических сдвиговых (преимущественно левосдвиговых) деформаций. Плутоны в целом представляют собой гигантские „пузыри“ вязкой кислой магмы, пластически деформированные совместно с окружением в ходе подъема гранитов. Водонасыщенные магмы при этом теряют воду и другие флюиды и, вследствие этого, затвердевают. По геоэлектрическим данным глубинная структура Восточно-Уральского поднятия представляет собой в целом достаточно монолитный, тектонически не нарушенный мегаблок, с не очень отчетливо выраженным восточным падением „слоистости“ внутри самого мегаблока, что совпадает с сейсмическими и геологическими данными. Пологая зона локального повышения электропроводности на глубинах 12—16 км предположительно может отождествляться с нижней кромкой гранитогнейсового блока, вмещающего в его верхней части Джабыкский гранитный массив. Ограничивающая Восточно-Уральское поднятие с востока Карталинская проводящая зона пространственно совпадает с изученным на поверхности крупным разломом, где отмечаются серпентиниты, зеленые сланцы, другие деформированные офиолиты, очень интенсивно рассланцованные граниты и плагиограниты и др. Интересно, что по геоэлектрическим данным эта зона субвертикальна и достаточно уверенно прослеживается до глубины почти 60 км, т. е. до поверхности Мохоровичича. Восточнее этой зоны отмечается присутствие еще нескольких проводников, коррелируемых с зонами разломов, выделяемых по сейсмическим и геологическим данным.

В восточной части профиля (п. 106—108) на глубинах 70—120 км выделяется глубинный мантийный проводник, по всей видимости, не выходящий в пределы коры. Именно здесь же сейсмопрофиль Уралсейс-95 зафиксировал глубинную так называемую Николаевскую зону отражателей. Выше нее этим профилем было обнаружено несогласное утыкание коровых структур в границу Мохо [Echtler et al., 1996]. Это дает основания предполагать, что граница Мохо является более молодой, например, новообразованной в результате фазовых переходов, либо по ней прошел мощный тектонический срыв во время позднепалеозойской коллизии [Иванов К., 1998]. Выявленные здесь сейсмопрофилем Уралсейс-95 в коре мощные четкие отражатели падают на запад под углами 30—40° и прослеживаются до глубин 40 км и более. В случае их выходов на земную поверхность они идентифицируются как крупные региональные разломные зоны, сложенные преимущественно милонитами, бластомилонитами, меланжированными серпентинитами и др. Здесь установлены следы дислокационного метаморфизма повышенных давлений [Иванов и др., 1993], возраст меланжа позднепалеозойский. По геохронологическим и геологическим данным, разломные зоны этого восточного сектора моложе ГУГР. В крупных разломных зонах востока Урала устанавливаются неоднократные дислокации, причем наиболее ярко обычно бывают проявлены левые сдвиги, что связывается с косым (северо-западным) характером субдукции и последующей коллизии террейнов востока Урала с ВЕП.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных электромагнитных исследований получен принципиальный результат, который показывает, что Уральская складчатая система в южном сечении представляет собой в разрезе симметричную чашеобразную структуру до глубин 70—80 км, маркируемую мозаичным распределением участков с пониженным удельным электрическим сопротивлением и уходящую своими корнями в области Магнитогорской мегазоны и Восточно-Уральского поднятия на большие глубины. Горизонтальный размер этой зоны на глубине 120 км составляет около 150 км. Подобная структура отчетливо намечается

по данным МОВ—ОГТ в коре. Здесь же наблюдается и увеличение глубины границы М примерно до 60 км по сравнению с прилегающими областями, где она прослеживается на глубине около 40 км. По-существу, все построения по сейсмопрофилю Уралсейс-95 ограничиваются рубежом М. Между тем закономерности в формировании земной коры являются во многом следствием тех процессов, которые происходят или происходили в прошлом на больших глубинах верхней мантии. Ранее по результатам ГМТЗ, выполненных в наиболее благоприятных для магнитотеллурических зондирований условиях, нами установлено положение границы С (слой Голицина), который разделяет мантию по электрическим свойствам на две оболочки: верхнюю, геологически неоднородную, и нижнюю, обладающую хорошей проводимостью. Был обнаружен значительный перепад глубин до этой границы в среднем сечении Урала от 470 км под Западно-Сибирской плитой до 600 км под ВЕП. На Южном Урале она обнаружена на глубине порядка 500 км. Эти данные позволили предположить, что Урал сформировался в градиентной зоне на стыке двух структур, отличающихся по электропроводности и плотности (согласно картам геопотенциала по спутниковым данным) мантийного вещества. Верхняя мантия окраины ВЕП характеризуется повышенной плотностью и на порядок большим удельным электрическим сопротивлением, чем мантия на том же срезе Западно-Сибирской плиты [Савельев и др., 1988; Дьяконова, 1994]. Можно предполагать, что эти различия в особенностях глубинного строения и электропроводности ВЕП и Западно-Сибирской плиты обусловлены внедрением Сибирского пермско-триасового суперплюма [Добрецов, 1997]. Западная граница распространения траппов, которые и являются проявлением этого суперплюма, как раз и совпадает с границей Урала и Западной Сибири и проходит вдоль Челябинского и других угленосных триасовых грабен восточного склона Урала.

В геоэлектрическом разрезе прослеживаются структурно-тектонические связи геологических зон, выделенных на картах Урала на земной поверхности, с глубинными особенностями распределения электропроводности вещества.

Наиболее важным результатом проведенных исследований мы считаем выявление в области сочленения платформы с Предуральским прогибом очень крупной аномальной Стерлитамакской зоны повышенной электропроводности, корнями уходящей на большие глубины. Наиболее вероятная трактовка природы Стерлитамакской зоны состоит в том, что она является восточной границей ВЕП. Открытие Стерлитамакской зоны, равно как и обнаружение глубинных „корней“ в области Магнитогорской мегазоны и Восточно-Уральского поднятия, вынуждает существенно корректировать представления о глубинном строении и развитии Урала.

Построенный геоэлектрический разрез наглядно показывает, что электропроводность вещества следует рассматривать в качестве индикатора геологических процессов в палеозое. Наличие проводящих участков литосферы, обусловленных, вероятно, влиянием флюидного фактора, следы которых отражены в модели, за время геологической истории являлись каналами внедрения и насыщения пород телами основных и ультраосновных интрузий с последующим метаморфизмом и осложненными сдвиговыми перемещениями по разломам.

Таким образом, геоэлектрика дает новую, независимую от других методов изучения недр, информацию, которую необходимо учитывать при построении комплексной геолого-геофизической геодинамической модели развития Урала как крупной структуры планетарного характера.

Исследования проводились при поддержке РФФИ (гранты 01-05-64190 и 04-05-64101).

#### ЛИТЕРАТУРА

**Глубинное строение** и геодинамика Южного Урала (проект Уралсейс) / Ред. А.Ф. Морозов. Тверь, Герс, 2001, 286 с.

**Добрецов Н.Л.** Пермско-триасовые магматизм и осадконакопление в Евразии как отражение суперплюма // Докл. РАН, 1997, т. 354, № 2, с. 220—223.

**Дьяконова А.Г.** Особенности строения тектоносферы Уральского региона по электромагнитным данным // Физика Земли, 1994, № 6, с. 97—102.

**Дьяконова А.Г., Годнева Г.С., Файнберг Э.Б.** Электропроводность верхней мантии Уральского региона // Методы решения прямых и обратных задач геоэлектрики. М., ИЗМИРАН СССР, 1987, с. 108—123.

**Дьяконова А.Г., Шестаков А.Ф., Варданыц И.Л., Годнева Г.С.** Результаты глубинного магнитотеллурического зондирования в Уральском регионе // Изв. АН СССР, Физика Земли, 1990, № 2, с. 79—90.

**Дьяконова А.Г., Дружинин В.С., Тиунова А.М., Вишнев В.С.** Характеристика нарушенности земной коры Уральского региона по электромагнитным и сейсмическим данным // Геология и геофизика, 1994, т. 35 (11), с. 118—125.

**Дьяконова А.Г., Вишнев В.С., Астафьев П.Ф., Коноплин А.Д., Иванов Н.С., Порохова Л.Н.** Новые данные о геологическом строении Предуральского прогиба и природе Манчажской аномалии (по результатам электромагнитных исследований) // Уральский геофизический вестник, 2002, № 4, с. 10—22.

**Иванов С.Н.** О реологических моделях земной коры: критическое рассмотрение. Екатеринбург, Изд-во УрО РАН, 1998, 40 с.

**Иванов С.Н., Пучков В.Н., Иванов К.С., Полтавец Ю.А., Русин А.И., Самаркин Г.И., Дымкин А.М.** Формирование земной коры Урала. М., Наука, 1986, 248 с.

**Иванов К.С.** Основные черты геологической истории (1.6—0.2 млрд лет) и строения Урала. Екатеринбург, Изд-во УрО РАН, 1998, 252 с.

**Иванов К.С., Карстен Л.А.** Амфиболы Na-Ca ряда из зоны дислокационного метаморфизма Зауралья и их тектоническое значение // Ежегодник ИГиГ-1992. Екатеринбург, УрО РАН, 1993, с. 71—74.

**Камалетдинов М.А.** Покровные структуры Урала. М., Наука, 1974, 230 с.

**Коноплин А.Д., Человечков А.И.** Аппаратурное обеспечение методов индуктивной разведки в диапазоне частот 10 Гц—160 кГц // Геофизика XXI столетия: 2001 год. М., Научный мир, 2001, с. 301—302.

**Коноплин А.Д., Человечков А.И.** Цифровая аппаратура магнитотеллурического зондирования // Практика приборостроения, 2003, № 2(3), с. 34—40.

**Коротеев В.А., Язева Р.Г., Иванов К.С., Бочкарев В.В.** Палеозоны субдукции в геологической истории Урала // Отечественная геология, 2001, № 6, с. 50—58.

**Патент 2207596 (Россия).** МКИ G 01 V 3/08. Измерительное устройство для геоэлектроразведки / А.И. Человечков, А.Д. Коноплин, Н.С. Иванов, П.Ф. Астафьев, В.С. Вишнев, А.Ф. Дьяконова. Опубл. 2003, Бюл. № 18.

**Пейве А.В., Иванов С.Н., Нечухин В.М., Перфильев А.С., Пучков В.Н.** Тектоника Урала. М., Наука, 1977, 120 с.

**Рокитянский И.И.** Индукционное зондирование Земли. Киев, Наук. думка, 1981, 296 с.

**Савельев А.А., Дьяконова А.Г., Вишнев В.С.** Новые данные об электропроводности земной коры Среднего Урала // Докл. АН СССР, 1988, т. 300, № 2, с. 334—337.

**Смирнов М.Ю.** Обработка магнитотеллурических данных с использованием робастных статистических процедур // Вопросы геофизики (Ученые записки СПбГУ № 433) / Под ред. В.Н. Трояна, Л.Н. Пороховой, А.К. Сараева. СПб., 1998, вып. 35, с. 198—205.

**Тектоническая карта** Урала (домезозойский складчатый фундамент) м-ба 1:1 000 000 / Ред. И.Д. Соболев. Свердловск, ПГО „Уралгеология“, 1983.

**Файнберг Э.Б.** Глобальное электромагнитное зондирование // Математическое моделирование геомагнитных полей. М., ИЗМИРАН, 1983, с. 79—121.

**Щапов В.А.** Геотермия и глубинное строение Урала // Материалы Вторых научных чтений памяти Ю.П. Булашевича: Ядерная геофизика. Геофизические исследования литосферы. Геотермия / Ред. В.И. Уткин. Екатеринбург, ИГф УрО РАН, 2003, с. 138—140.

**Echtler H.P., Stiller M., Steinhoff F., Krawzyk C., Suleimanov A., Spiridonov V., Knapp J.H., Men-shikov Y., Alvarez-Marron J., Yunusov N.** Preserved collisional crustal structure of the Southern Urals revealed by vibroseis profiling // Science, 1996, v. 274, p. 224—225.

*Рекомендована к печати 3 февраля 2006 г.  
М.И. Этовым*

*Поступила в редакцию  
2 ноября 2005 г.*