

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ
ПО ИЗУЧЕНИЮ БАРЯТИНСКОЙ КОРОВОЙ АНОМАЛИИ
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ**

*Куликов В. А.^{1,2}, Алексанова Е. Д.², Зайцев С. А.¹, Пушкарев П. Ю.¹,
Шустов Н. Л.¹, Яковлев А. Г.^{1,2}, Ярославцева А. П.¹*

¹Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,

²ООО «Северо-Запад»

**THE RESULTS OF EM STUDY OF BARYATINSKAYA CRUSTAL
HIGH-CONDUCTIVE ANOMALY**

*Kulikov V. A.^{1,2}, Aleksanova E. D.², Zaytsev S. A.¹, Pushkarev P. Yu.¹,
Shustov N. L.¹, Yakovlev A. G.^{1,2}, Yaroslavtseva A. P.¹*

¹Geological Faculty, Moscow State University, Moscow, Russia;

²Nord-West Ltd., Moscow, Russia;

Abstract

This study presents the results of interpretation of MT data acquired on north-west slope of Voronezh craton. It is a part of the international KIROVOGRAD project. Scientists from Lomonosov Moscow State University, Center of geoelectromagnetic researches of The Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine and Nord-West Ltd. took part in this project.

Resistivity image of lithosphere for area more than 100 000 km² obtained from ModEM 3D inversion shows the boundaries of the Baryatinskaya and Kurskaya crustal high-conductive anomalies, their deep resistivity structure and their connection with well-known high-conductive areas of Ukrainian craton.

Ключевые слова: Магнитотеллурические зондирования, коровые аномалии электропроводности, 3D обратные задачи.

Keywords: MT-surveys, crustal high-conductive anomalies, resistivity image, 3D inversion.

Введение

Геофизические исследования Бярятинской коровой аномалии электропроводности методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ) начались в конце 90-х годов прошлого столетия по инициативе сотрудников кафедры геофизики Геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова [4].

С 2007 года работы по изучению Бярятинской аномалии проводились совместно МГУ им. М. В. Ломоносова и Центром геоэлектромагнитных исследований (ЦГЭМИ ИФЗ РАН). Техническую и аппаратурную поддерж-

ку осуществляла компания ООО «Северо-Запад». Пятикомпонентные измерения МТ-поля осуществлялись в синхронном режиме со станциями МТУ («Phoenix Geophysics»). Базовая станция располагалась на учебном полигоне Геологического факультета МГУ в д. Александровка Калужской области.

В период с 2007 г. по 2014 г. измерения методом глубинного МТЗ (ГМТЗ) были выполнены в 142 точках по 12 субширотным профилям, пересекающим коровую аномалию электропроводности и расположенным в нескольких областях центральной России (рис. 1).

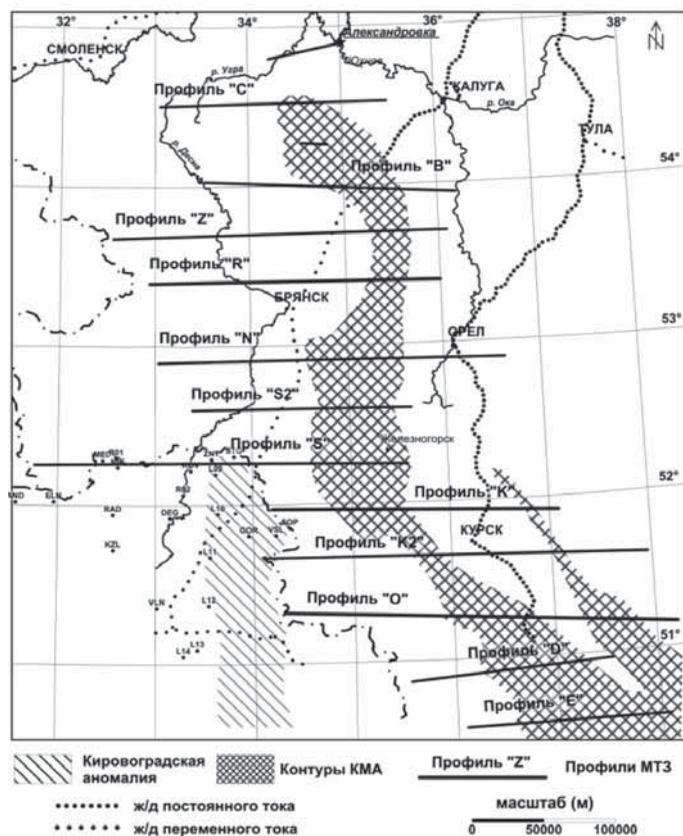


Рис. 1. Положение профилей ГМТЗ

Fig. 1. MT survey area

Среднее расстояние между точками зондирования по профилю составило 15–20 км. Измерения преимущественно проводились в рамках студенческих учебно-производственных практик преподавателями и студентами кафедры геофизики Геологического факультета МГУ.

С точки зрения тектонического районирования, площадь работ расположена в пределах северо-западного склона Воронежского кристаллического массива (ВКМ). В пределах площади мощность осадочных отложений изменяется от 100 м на юге до 1 000 м на севере, а значения суммарной продольной проводимости осадков (S_{oc}) от 10 до 100 См.

Предварительные результаты выполненных работ неоднократно публиковались и докладывались на различных конференциях и семинарах сотрудниками ЦГЭМИ ИФЗ РАН и Геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова [4, 3, 6, 7].

Интерпретация магнитотеллурических данных

Анализ МТ данных показал, что широтная компонента отвечает поперечному (ТМ), а меридиональная – продольному (ТЕ) направлению. Перед инверсией выполнена статистическая нормализация для подавления влияния локальных приповерхностных неоднородностей.

Трехмерная инверсия магнитотеллурических данных была выполнена в программе ModEM [15] по реальной и мнимой частям полного тензора импеданса (Z_{xx} , Z_{xy} , Z_{yx} , Z_{yy}) и компонентам матрицы Визе (W_{zx} , W_{zy}). Диапазон периодов – от $4.6 \cdot 10^{-3}$ до 10^3 секунд (3 точки на декаду).

Стартовая модель 3D инверсии – однородное полупространство с УЭС 1 000 Ом·м. Инверсия выполнялась на суперкомпьютере «Ломоносов» (НИВЦ МГУ им. М.В. Ломоносова) на 64 вычислительных узлах. Итоговая невязка для совместной инверсии компонент тензора импеданса и матрицы Визе по результатам 40 итераций составила 4.2.

Геоэлектрическая модель северной части ВКМ по результатам 3D инверсии

Результаты 3D-инверсии представлены в виде карт-срезов геоэлектрической модели для глубин 10 и 25 км (рис. 2), а также в виде глубинных геоэлектрических моделей для нескольких профилей ГМТЗ (рис. 3).

Южнее 52° с.ш. проводник представлен двумя линейными зонами. Одна ветвь проводника имеет субмеридиональное простирание и совпадает с контурами Кировоградской аномалии (рис. 4), выделенной еще в 50-х годах прошлого столетия и хорошо изученной украинскими геофизиками [9, 1, 5].

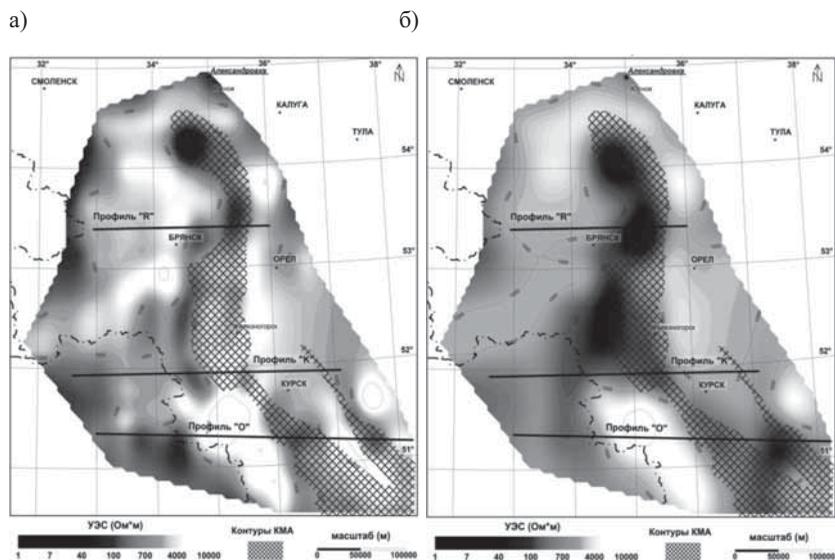


Рис. 2. Карты-срезы УЭС по результатам 3D-инверсии для глубин 10 км (а) и 25 км (б)

Fig. 2. Horizontal slices of resistivity image obtained from 3D inversion at depths of 10 km (a) and 25 km (b)

Вторая ветвь проводника с простираем СЗ-ЮВ в верхней части коры распадается на две узкие зоны, которые в плане точно совпадают с двумя линиями Курской магнитной аномалии (рис. 2 а). На глубине, эти они образуют одну проводящую область шириной около 80 км (рис. 2 б).

Севернее 52°с.ш. две ветви проводника сливаются в единую проводящую зону шириной около 70 км. В плане контуры корового проводника повторяют контуры северного окончания Курской магнитной аномалии, однако, ось проводника располагается несколько западнее максимума магнитных аномалий. УЭС пород в пределах аномальной области снижаются до первых десятков Ом·м.

На рисунке 3 а, б, в приведены модели по профилям «Брянск», «Курск» и «Обоянь» («R», «K» и «O» на рис. 2). Над глубинными геоэлектрическими разрезами приведены графики аномального магнитного поля и локального поля силы тяжести.

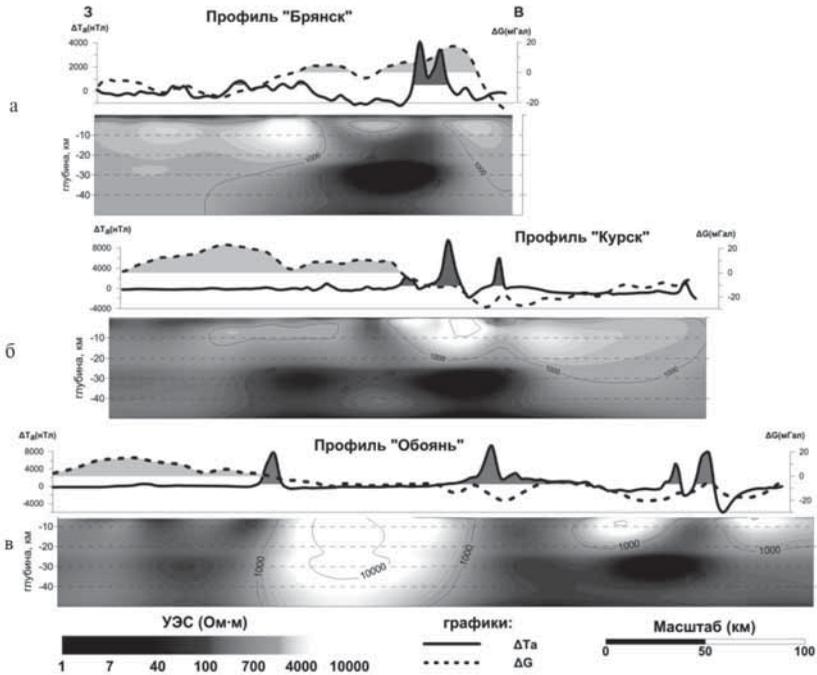


Рис. 3. Геоэлектрические модели, полученные в результате 3D инверсии и графики аномального магнитного поля и поля силы тяжести. Профили «Брянск» (а), «Курск» (б), «Обоянь» (в)

Fig. 3. Resistivity images obtained from 3D inversion and plots of anomalous magnetic and gravity fields along MT lines «Bryansk» (a), «Kursk» (b), «Oboyan» (c)

На разрезах по южным профилям («Обоянь» и «Курск») хорошо проявились две ветви корового проводника, разделенные высокоомным блоком (рис. 3 б и в). На профиле «Брянск» они полностью сливаются, образуя единую проводящую область в коре (рис. 3 а). Верхняя кромка проводника находится на глубине 22–25 км, ядро проводника, характеризующееся минимальными значениями УЭС – на глубине 30–40 км. Положение нижней границы проводника по результатам ГМТЗ определяется неуверенно.

В верхней части земной коры над глубинными проводящими зонами существуют узкие субвертикальные зоны пониженных сопротивлений, которые прослеживаются практически до земной поверхности. На профиле

«Обоянь» и «Брянск» их положение совпадает в плане с максимумами ΔT_a Курской магнитной аномалии.

Юго-западная ветвь проводника, характеризуется более высокими значениями УЭС, чем восточная, а центр проводящей структуры совпадает с локальным низкочастотным максимумом поля силы тяжести. На северных профилях ось корового проводника совпадает с максимумами как магнитного, так и гравитационного полей.

Барятинская аномалия и шовные зоны Украинского щита

Территория наших исследований относится к северному склону Воронежского кристаллического массива (ВКМ), который вместе с Украинским щитом образует один из трех коровых сегментов (рис. 4) докембрийского фундамента Восточно-Европейского кратона – Сарматия [14].

Строение докембрийского фундамента в границах Сарматии лучше изучено на Украинском щите, где докембрийские породы выходят на поверхность. По современной классификации в восточной части Украинского щита выделяются Ингульский, Среднеприднепровский и Приазовский блоки (рис. 4), которые разделены Криворожско-Кременчугский и Орехово-Павлоградской шовными зонами [11, 12]. По мнению многих исследователей докембрия ВЕП [13], блоки, выделенные на Украинском щите, продолжают севернее Днепровско-Донецкого прогиба (ДДП) на ВКМ: Крупецко-Знаменский пояс [10] является продолжением Криворожско-Кременчугский шовной зоны, а Белгородско-Михайловский зеленокаменный пояс (ЗКП) трассирует северное протяжение Орехово-Павлоградской шовной зоны (рис. 4).

По результатам глубинных электроразведочных работ методами МТЗ и ГМТЗ на Украинском щите, все шовные зоны, в той или иной степени, сопровождаются аномалиями высокой электропроводности в земной коре на разных глубинах [5].

Большая часть Кировоградской аномалии электропроводности охватывает Криворожско-Кременчугскую шовную зону и совпадает с Криворожским железорудным бассейном. Минимальные значения УЭС – единицы Ом·м в отмечаются на глубинах 25–30 км. В Приазовском мегаблоке проводящие зоны в коре по данным МТЗ прослеживаются до глубины 25 км в его центральной части и до 50 км в восточной [5].

Существуют два основных варианта истолкования природы коровых аномалий электропроводности. Первый вариант – флюидная модель элек-

тропроводности литосферы [2], согласно которой в глубинных слоях земной коры предполагается существование связанных систем поровых пространств, заполненных соляными растворами. Данная модель применима к тектонически активным областям и практически исключена для континентальной коры древних платформ.

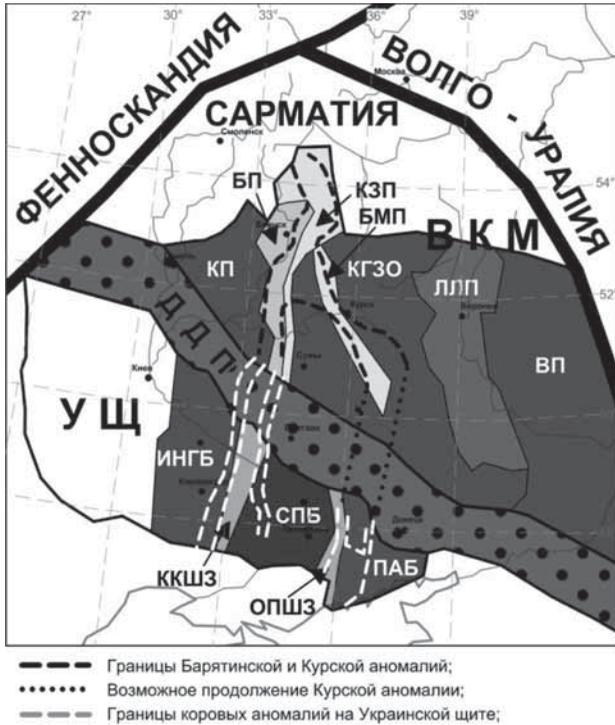


Рис. 4. Тектоническая схема южной части ВЕП с границами коровых проводников **ВКМ** – Воронежский кристаллический массив (по [10]): Пояса: КП – Кулажинский, БП – Брянский, КЗП – Крупецко-Знаменский, БМП – Белгород-Михайловский, ЛЛП – Липецко-Лосевский, ВП – Воронцовский; КГЗО – Курская гранит-зеленокаменная область; **УЩ** – Украинский щит (по [5]): Блоки: ИНГБ – Ингульский, СПБ – Среднеприднепровский, ПАБ – Приазовский; Шовные зоны: ККШЗ – Криворожско-Кременчужская; ОПШЗ – Орехово-Павлоградская; ДДП – Днепрово-Донецкий прогиб

Fig. 4. Schematic tectonic map of the southern part of East-European craton with boundaries of the high-conductive zones

Для стабильных кратонов больше подходит второй вариант объяснения повышенной электропроводности – электронно-проводящая природа коровых аномалий, впервые обоснованная профессором Санкт-Петербургского университета А. С. Семеновым.

Эта концепция основана на экспериментально установленной распространности в земной коре аномалий проводимости, обусловленных наличием графита и сульфидно-углеродистых образований биогенно-осадочного происхождения [8].

На Украинском щите графитизированные породы имеют очень широкое распространение. На отдельных участках месторождений и рудопроявлений графита его концентрация достигает 30 %. Распространение зон графитизации на глубину неясно. Однако, данные о величине эрозионного среза УЩ показывают, что графитизация продолжается (вероятно, с перерывами по вертикали) и на значительных глубинах [9].

Альтернативой рассмотренным вариантам может быть представление о связи глубинных проводящих объектов со скоплениями рудных минералов.

Тектоника позднеархейского этапа развития зеленокаменных областей характеризуется заложением рифтогенных структур на раннеархейском гранито-гнейсовом основании, в которых формировалась мафит-ультрамафитовая вулканоплутоническая ассоциация [13]. Такие обстановки обычно способствуют быстрой доставке мантийных магм в земную кору. В результате, рифтовые магмы имеют тенденцию быть менее чувствительными к дифференциации, ассимиляции и потере сульфидов во время прохождения через мантийную литосферу и нижние уровни коры и, как следствие, быть более богатыми металлами при внедрении в верхнюю кору. С мафит-ультрамафитовыми породными ассоциациями, сформированными в обстановках рифтогенеза, связаны залежи магматических медно-никелевых сульфидных руд, которые, обычно находятся в основании лавовых потоков коматитов или коматитовых базальтов [12].

Мы предполагаем, что высокая электропроводность Кировоградско-Брятинской и Курской коровых аномалий связана с сульфидными залежами и областями сульфидной минерализации в вулканогенных и осадочно-вулканогенных формациях, типичных для зеленокаменных поясов ВЕП (Конская и Михайловская серии). Корреляция Кировоградско-Брятинской зоны с локальным максимумом поля силы тяжести (рис. 4) говорит в поддержку этой гипотезы.

Низкие УЭС в приповерхностной части коры могут быть связаны также с наличием графитизированных пород, а в местах развития железистых кварцитов, с зонами их окисления.

В Киворожско-Кременчугской провинции сосредоточены все крупнейшие железорудные месторождения Украинского щита, присутствуют метасоматические месторождения урана, золоторудные месторождения и крупные месторождения графита. Северное продолжение этой структуры, трасируемое Бяратинской аномалией коровой электропроводности, может характеризоваться высоким минерагеническим потенциалом, а ее дальнейшее изучение имеет важное промышленное значение.

Список литературы

1. Азаров Н. Я., Анциферов А. В., Шеремет Е. М. и др. Геолого-геофизическая модель Криворожско-Кременчугской шовной зоны Украинского щита. Киев: Наукова думка, 2006. 196 с.

2. Азаров Н. Я., Анциферов А. В., Шеремет Е. М. и др. Геолого-геоэлектрическая модель Орехово-Павлоградской шовной зоны Украинского щита. Киев: Наукова думка, 2005. 190 с.

3. Алексанова Е. Д., Варенцов И. М., Верещагина М. И. и др. ЭМ зондирование осадочного чехла и консолидированной земной коры в зоне перехода от Московской синеклизы к Воронежской антеклизе: проблемы и перспективы // Физика Земли. 2010, № 8. С. 62–71.

4. Алексанова Е. Д., Варенцов И. М., Куликов В. А. и др. Глубинные аномалии электропроводности в северной части Воронежской антеклизы // Геофизика. 2013, № 2. С. 32–38.

5. Бурахович Т. К., Николаев И. Ю., Шеремет Е. М., Ширков Б. И. Геоэлектрические аномалии Украинского щита и их связь с рудопроявлениями полезных ископаемых // Геофизический журнал. 2015. Т. 37, № 6. С. 42–63.

6. Варенцов И. М., Лозовский И. Н. и др. Массив МТ/МВ зондирования $k_0\text{vovograd}$: совместная $2d+$ инверсия на профиле ЖИЗДРА // Материалы VI Всероссийской школы-семинара по ЭМ зондированиям им. М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна. ИНГГ СО РАН Новосибирск, 2013. С. 1–4.

7. Глубинная геоэлектрическая структура западного склона Воронежского массива: на пути от $2d$ к $3d$ моделям / И. М. Варенцов, П. В. Иванов, С. Ковачикова и др. // Материалы VI Всероссийской школы-семинара по ЭМ зондированиям им. М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. С. 1–4.

8. Жамалетдинов А. А., Кулик С. Н. Крупнейшие аномалии электропроводности мира // Геофиз. журнал. 2012. Т. 34. № 4. С. 22–39.

9. Логвинов И. М., Гордиенко И. В., Тарасов В. Н. Новые результаты геоэлектрических исследований Кировоградской аномалии электропроводности на севере Украины // Доклады НАН Украины, 2009, № 6. С. 135–142.

10. Морозов А. Ф. и др. Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: М.: ГЕОКАРТ: ГЕОС, 2010. Т. 1. 408 с.

11. Пигулевский П. И. Строение верхней сантии юго-восточной части украинского щита по геолого-геофизическим данным // Вестник ВГУ, серия: геология. 2011, № 1. С. 193–200.

12. Турченко С. И. Раннедокембрийская геология и металлогения Украинского щита – корреляция с Балтийским щитом // Региональная геология и металлогения. 2014, № 59. С. 21–45.

13. Чернышов Н. М., Ненахов В. М., Лебедев И. П. и др. Модель геодинамического развития Воронежского кристаллического массива в раннем докембрии // Геотектоника. 1997, № 3. С. 21–30.

14. Bogdanova S. V., Bingen B., Gorbatschev R. et al. The East European Craton (Baltica) before and during the assembly of Rodinia // Precambrian Res. 2008. V. 160. P. 23–45.

15. Egbert G. and Kelbert A. Computational recipes for electromagnetic inverse problems // Geophysical Journal International. 2012. V. 189. P. 251–267.