

УДК 550.372

БАРЯТИНСКАЯ КОРОВАЯ АНОМАЛИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПЛОЩАДНЫХ МТ-ИССЛЕДОВАНИЙ

В.А. Куликов^{1,2}, Е.Д. Алексанова², Ив.М. Варенцов³, С.А. Зайцев¹, И.Н. Лозовский³,
Н.В. Лубнина¹, П.Ю. Пушкарев¹, Н.Л. Шустов¹, А.Г. Яковлев^{1,2}, А.П. Ионичева¹

¹ Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова. 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1; e-mail: vic@nw-geo.ru

² ООО «Северо-Запад». 108811, Россия, г. Москва, пос. Московский, 22-й км Киевского ш., домовладение 4, стр. 1, корп. А, офис 412а; e-mail: mail@nw-geophysics.ru

³ ЦГЭМИ ИФЗ РАН. 108840, Россия, г. Москва, г. Троицк, а/я 30; e-mail: gemri@igemi.troitsk.ru

Аннотация. В статье представлены результаты работ методом глубинного магнитотеллурического зондирования, которые были проведены в 2007–2014 гг. на северо-западном склоне Воронежского кристаллического массива для изучения Бяратинской и Курской коровых аномалий электропроводности. В проекте принимали участие ученые геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, Центра геоэлектроманнитных исследований ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, ООО «Северо-Запад». Выполнена трехмерная инверсия данных в программе ModEM на суперкомпьютере «Ломоносов» (НИВЦ МГУ им. М.В. Ломоносова). По результатам трехмерной инверсии уточнены границы Бяратинской и Курской коровых аномалий, их глубинное строение и связь с хорошо изученными ранее областями высокой электропроводности на Украинском щите.

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

RESISTIVITY IMAGE OF BARYATINSKAYA CRUSTAL HIGH-CONDUCTIVE ANOMALY BASED ON THE RESULTS OF AREAL MT-SURVEY

V.A. Kulikov^{1,2}, E.D. Aleksanova², Iv.M. Varentsov³, S.A. Zaytsev¹, I.N. Lozovsky³,
N.V. Lubnina¹, P.Yu. Pushkarev¹, N.L. Shustov¹, A.G. Yakovlev^{1,2}, A.P. Ionicheva¹

¹ Geological Faculty. Moscow, State University. 1 Leninskie Gory, Moscow, GSP-1, Russia, 119991; e-mail: vic@nw-geo.ru

² Nord-West Ltd. Business Park Rumyantsevo, housing estate 4, 22 km of the Kievskoe highway, Moscovskiy settlement, Moscow, Russia, 108811; e-mail: mail@nw-geophysics.ru

³ Geoelectromagnetic Research Centre, Institute of Physics of the Earth. Moscow, Troitsk, P.O.B. 30, Russia, 108840; e-mail: gemri@igemi.troitsk.ru

Abstract. This paper presents the results of interpretation of MT data acquired on north-west slope of Voronezh crystalline core-area in 2007–2014. It was a part of the international project, which main issue was survey of Baryatinskaya and Kurskaya crustal high-conductive anomalies. 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. 3D inversion of MT data was carried out using ModEM software and supercomputer «Lomonosov» (Research Computing Center of Lomonosov Moscow State University). Resistivity image obtained from 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.

Key words. Magnetotellurics, MT-surveys, crustal high-conductive anomalies, resistivity image, 3D inversion.

ВВЕДЕНИЕ. Геофизические исследования Бяратинской коровой аномалии электропроводности магнитотеллурическими методами начались в конце 90-х годов прошлого столетия по инициативе сотрудников кафедры геофизики геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова [1]. На первом этапе работ, с 1998 по 2006 г., измерения выполнялись преимущественно со станциями ЦЭС-М, которые, по сути, являлись модернизированным вариантом серийной отечественной электроразведочной станции ЦЭС-2. Данная аппаратура не позволяла получить надежные результаты, особенно в низкочастотной области. В основном это было связано с тем, что регистрация МТ-поля проводилась без синхронных измерений на базовой точке (что при обработке позволяет существенно снизить влияние промышленных помех), записи осуществлялись в режиме МТЗ (длительность записи 15–18 часов), без регистрации вертикальной компоненты магнитного поля.

Начиная с 2007 г. работы по изучению Бяратинской аномалии проводились совместно МГУ им. М.В. Ломоносова и Центром геоэлектроманнитных исследований (ЦГЭМИ ИФЗ РАН). Техническую и аппаратурную поддержку осуществляла компания ООО «Северо-Запад». Работы были поддержаны грантами РФФИ (№ 07-05-00437а, 08-05-00327а, 08-05-10004, 11-05-00491, 13-05-12094, 13-05-91330). Предварительные результаты выполненных работ неоднократно публиковались и докладывались на различных конференциях и семинарах [3–5, 8, 10–12, 33].

Пятикомпонентные измерения МТ-поля (Ex, Ey, Hx, Hy, Hz) осуществлялись в синхронном режиме станциями MTU (Phoenix Geophysics). Минимальное время записи составляло 48 часов (глубинное МТЗ – ГМТЗ). Базовая станция располагалась на учебном полигоне геологического факультета МГУ в д. Александровка Калужской области [26].

В период с 2007 по 2014 г. измерения методом ГМТЗ были выполнены в 142 точках по 12 субширотным профилям, пересекающим коровую аномалию электропроводности и расположенным в нескольких областях Центральной России (рис. 1). Каждому профилю зондирования было присвоено имя (по порядку с севера на юг): Световка («С»), Бетлица («В»), Жиздра («Z»), Брянск («R»), Навля («N»), Суземка («S2»), Шостка («S»), Курск («K»), Курск-2 («K2»), Обоянь («O»), Дмитриевка («D»), Белгород («E»). Длина профилей от 130 до 260 км. Среднее расстояние между точками зондирования по профилю составило 15–20 км. Общая площадь, покрытая съемками, около 100 000 км². 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), являющегося частью раннедокембрийского сегмента Сарматия Восточно-Европейского кратона (ВЕК) [32].

Мощность осадочных отложений в пределах площади работ изменяется от 100 м на юге до 1000 м на севере. Осадочный чехол на 90% представлен отложениями девонской системы. В северной части площади работ развиты породы нижнего карбона и мезозоя. Четвертичные отложения, представленные в основном моренными суглинками, практически повсеместно перекрывают палеозойские и мезозойские осадки. Значения суммарной продольной проводимости осадков (S_{oc}) в пределах площади работ изменяются от 10 до 100 см. Минимальные значения S_{oc} наблюдаются в южной

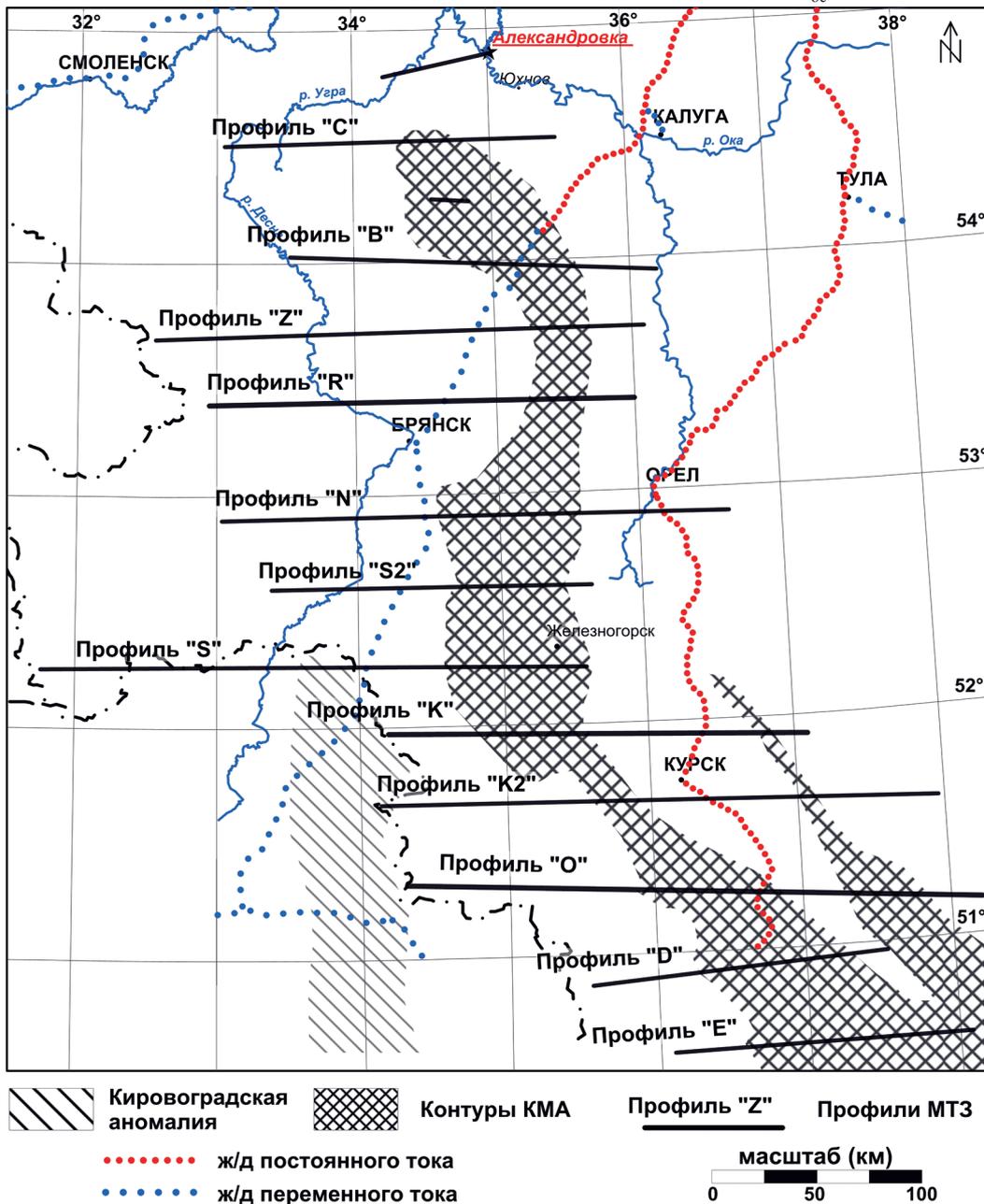


Рис. 1
Расположение профилей ГМТЗ

части площади в сводовой части ВКМ (профиль «Курск»), максимальные – в северо-западной части в Клинцовском грабене (профиль «Жиздра»).

Качественный анализ магнитотеллурических данных

На первом этапе качественного анализа магнитотеллурических данных была выполнена статистическая нормализация кривых ρ_k , направленная на устранение гальванических искажений, связанных с влиянием локальных приповерхностных неоднородностей. Для определения коэффициентов проводилось площадное сглаживание значений модулей импеданса на периоде 0,3 с. Этот период для большинства кривых ρ_k отвечает началу восходящей ветви (рис. 2), т.е. нормализация делалась в предположении о плавном изменении суммарной продольной проводимости осадочного чехла.

Основной тип кривых кажущегося сопротивления над фоновым разрезом – «КНК» (рис. 2, а). Элемент «Н» определяется мощностью и суммарной проводимостью осадочных пород чехла. На восходящей ветви на некоторых точках наблюдает-

ся перегиб, обусловленный боковым влиянием корового проводника. Непосредственно над коровым проводником на кривых ρ_k появляется еще один элемент «Н» на низких частотах, или просто нисходящая ветвь (рис. 2, б).

Площадные границы проводящего слоя хорошо читаются на картах кажущегося сопротивления для периода 300 с и фазы импеданса для периода 50 с. Севернее 53° с.ш. (г. Орел) проводник имеет простое строение и проявляется на магнитотеллурических данных в виде узкой аномалии низких значений ρ_k и ϕ вдоль меридиана 35° в.д. Положение оси проводника практически совпадает с границами аномалии магнитного поля, являющейся северным окончанием КМА (рис. 3).

В южной части площади работ проводник характеризуется более сложной морфологией. Южнее 53° с.ш. можно выделить два направления проводника. Одно направление имеет юго-восточное простирание и совпадает с КМА, ось проводника проходит несколько западнее г. Курска. Второе направление имеет меридиональное простирание, ось проводника проходит примерно вдоль 34° в.д. и со-

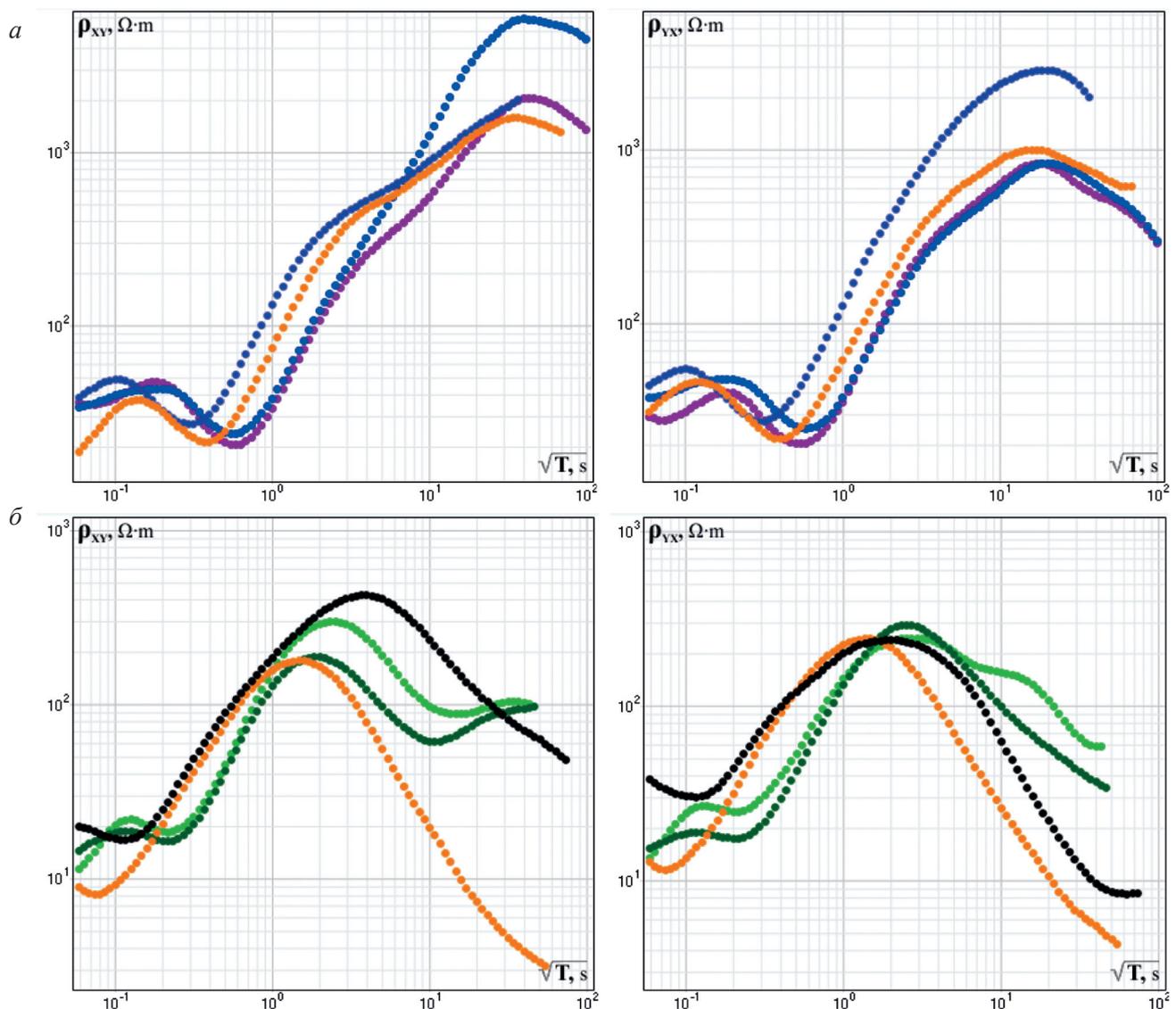


Рис. 2

Кривые кажущегося сопротивления над фоновым разрезом (а), над Барятинской аномалией (б) (ρ_{xy} – широтная, ρ_{yx} – меридиональная)

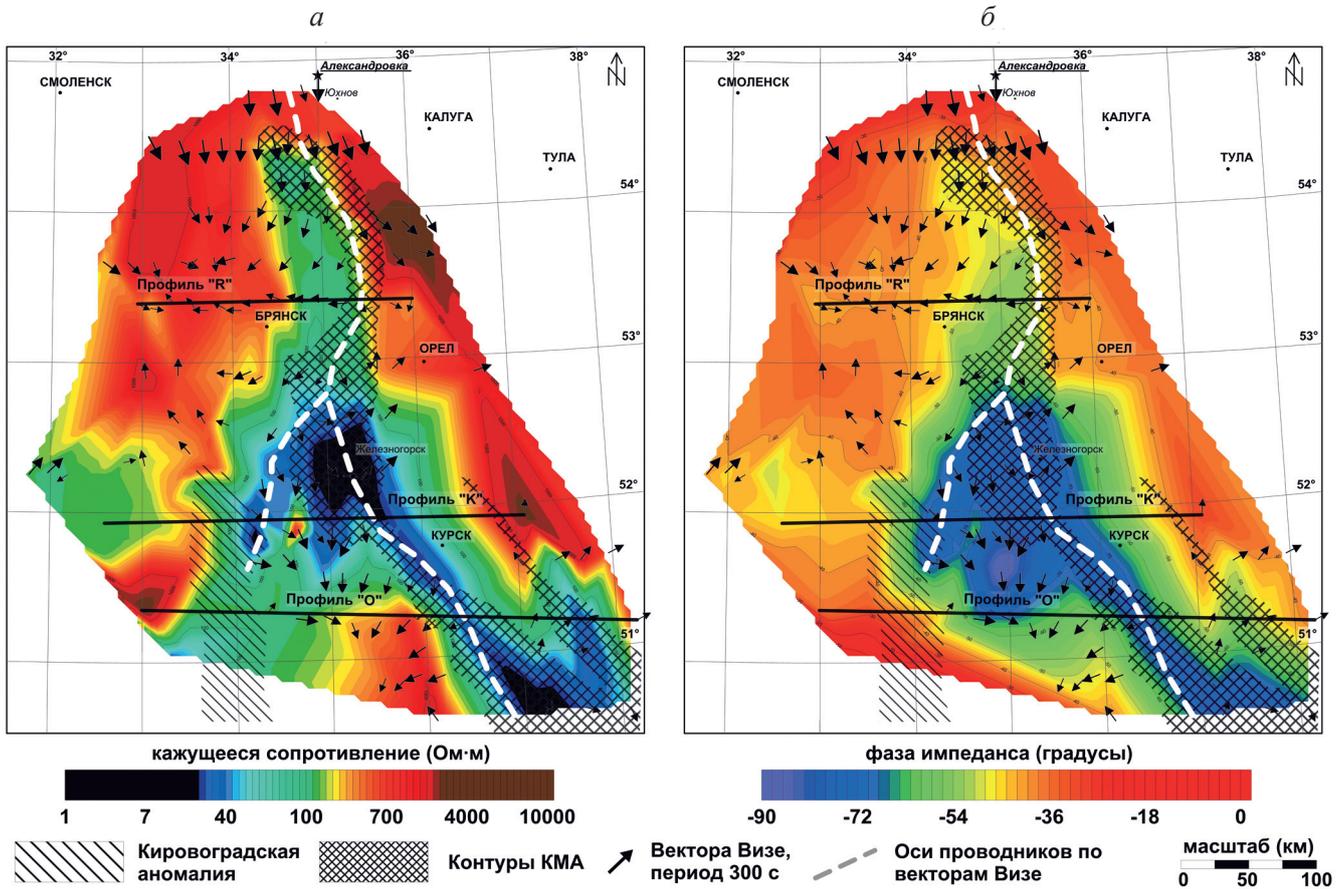


Рис. 3
 Карты ρ_{κ}^{xy} на периоде 300 с (а) и ϕ^{xy} на периоде 50 с (б)

впадает с положением Кировоградской аномалии электропроводности [14].

На карты кажущегося сопротивления и фазы импеданса нанесены действительные индукционные стрелки (векторы Визе) для периода 300 с, которые подтверждают положение проводящих зон в коре. Линия, на которой происходит изменение азимута индукционных векторов с восточного на западное, показана на картах ρ_{κ} и ϕ пунктирной белой линией. Примечательно, что эта линия в точности повторяет контуры магнитной аномалии ΔT_a .

Анализ инвариантов тензора импеданса также подтверждает положение выделенных аномальных зон. На высоких частотах (10^2 – 10^4 Гц) параметры неоднородности N и β характеризуются низкими значениями (менее $0,2$ и 10° соответственно). Это говорит о том, что геоэлектрическую модель осадочного чехла в первом приближении можно рассматривать как горизонтально-слоистый разрез. На низких частотах (период > 30 с), отвечающих верхним коровым горизонтам, значения N и β возрастают. Параметр N практически на всей площади работ превышает значение $0,3$, параметр β изменяется от 0 до 20° . Примечательно, что и на карте параметра N , и на карте параметра β выделяется субмеридиональная линейная зона минимальных значений, которая в плане практически совпадает с положением корового проводника (рис. 4). Осо-

бенно ярко эта зона проявляется на фазовом параметре β , где значения не превышают 5° , что говорит о малом различии широтных и меридиональных фазовых кривых в области влияния Бяратинской аномалии.

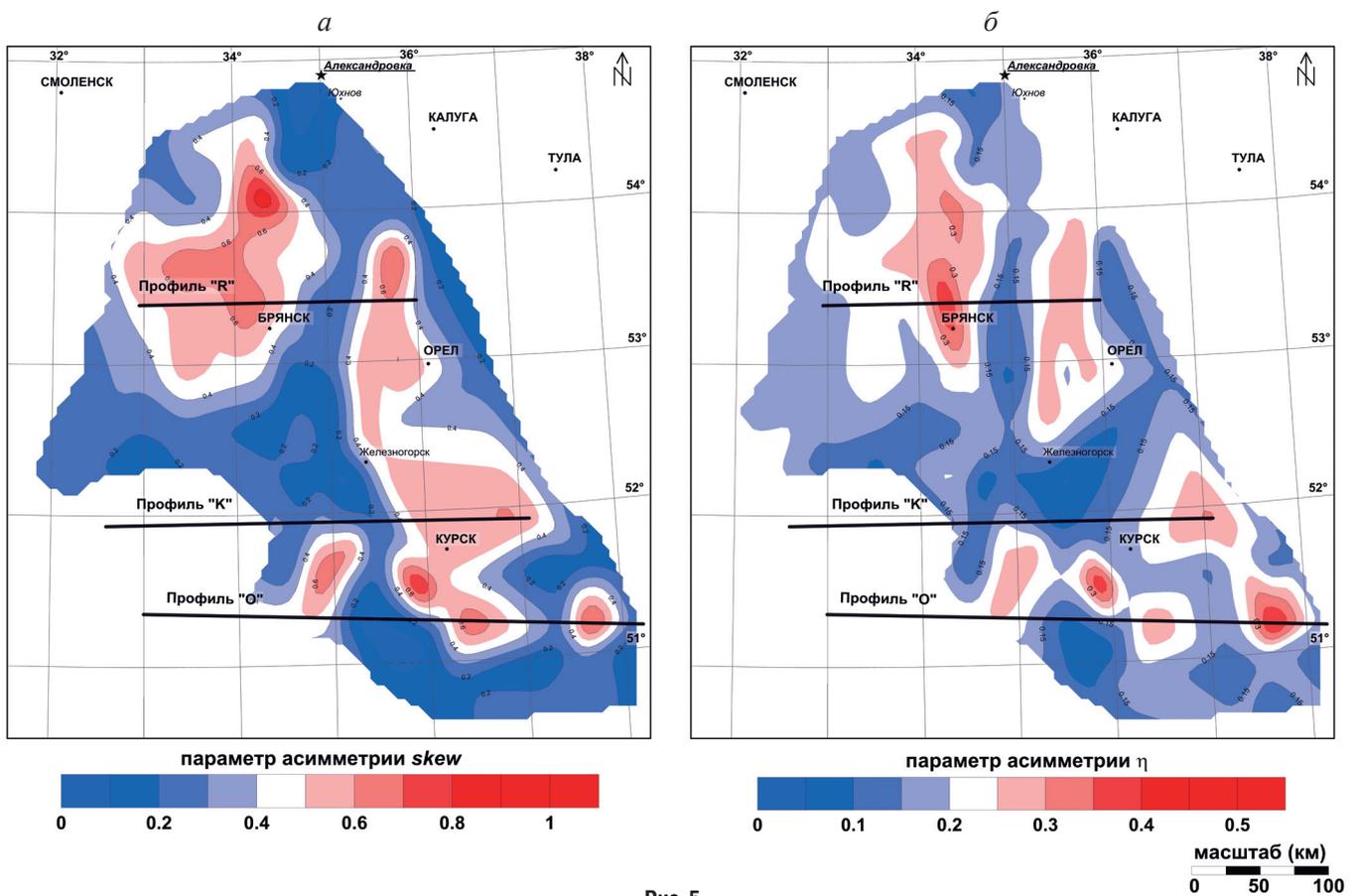
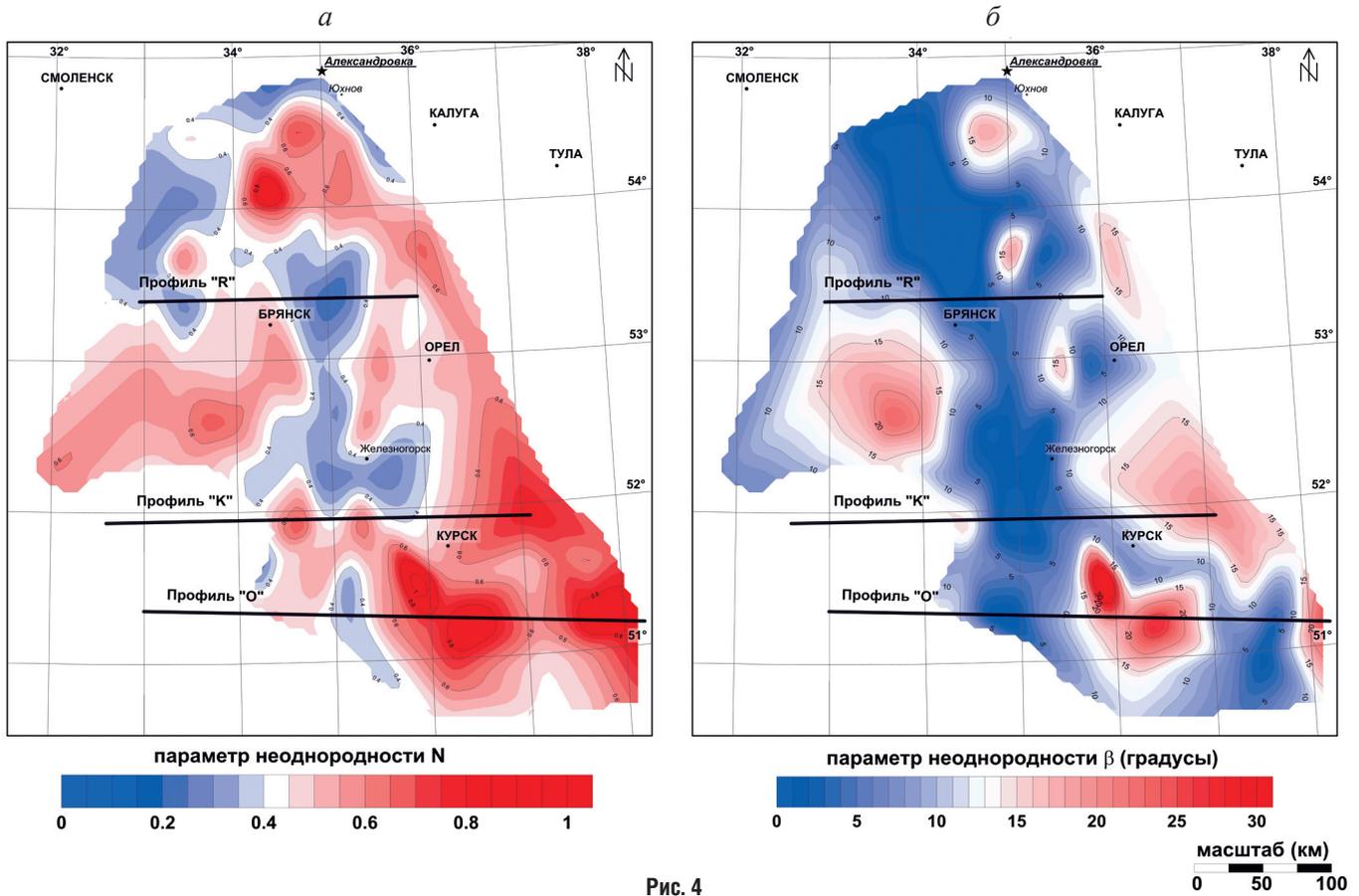
Низкие значения параметра асимметрии $skew$ и фазочувствительного параметра асимметрии η характерны для северной части зоны Бяратинской аномалии (рис. 5), что говорит о слабом проявлении в МТ-данных трехмерных неоднородностей и позволяет проводить на этом участке интерпретацию в рамках двумерных моделей [6].

Анализ МТ-данных показал, что широтная компонента отвечает поперечному направлению (ТМ), а меридиональная – продольному (ТЕ).

3D-инверсия в программе ModEM

Трехмерная инверсия магнитотеллурических данных была выполнена с помощью программы ModEM [31]. Программа представляет собой модульную систему, в которой реализованы все необходимые методы и объекты для решения обратной задачи электромагнитных методов геофизики в частотной области, в том числе и магнитотеллурических.

Основным алгоритмом решения обратной задачи является градиентная минимизация функционала невязки, заданного в формуле (1), для восстано-



ния распределения M -мерного вектора параметров модели m по вектору данных d с размерностью N :

$$\Phi(m, d) = (d - f(m))^T C_d^{-1} (d - f(m)) + v(m - m_0)^T C_m^{-1} (m - m_0), \quad (1)$$

где C_d – вектор ошибок данных, $f(m)$ – оператор прямой задачи, m_0 – стартовая модель или априорная модель, v – стабилизатор, коэффициент, отвечающий за вклад априорной модели в общий функционал невязки, C_m – регуляризатор.

Программа ModEM позволяет решать в автоматическом режиме обратную трехмерную задачу МТЗ в последовательном или параллельном варианте с использованием технологии MPI по различным наборам магнитотеллурических параметров.

Нами был осуществлен подбор 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 (три точки на декаду).

Стартовая модель 3D-инверсии – однородное полупространство с УЭС 1000 Ом·м. Веса для данных Z были выбраны как 3% от $\sqrt{|Z_{xy} \cdot Z_{yx}|}$ и 10% для дополнительных компонент (процент ошибки вычислялся на каждом периоде отдельно). Для матрицы Визе веса были взяты как 2% от абсолютной величины W_{zx} или W_{zy} .

Параметры сглаживающего регуляризатора (C_m) выбраны стандартные: по направлению X – 0,3; Y – 0,3; Z – 0,3. Сглаживание по направлениям XY выбирается между каждой ячейкой, по оси Z общее для всей модели. Стартовым значением стабилиза-

тора, отвечающего за вклад стартовой или априорной модели, было выбрано 10 у.е.

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. 6), а также в виде глубинных геоэлектрических моделей для трех профилей ГМТЗ (рис. 7).

Южнее 52° с.ш. проводник представлен двумя линейными зонами. Как отмечено выше, одна ветвь проводника имеет субмеридиональное простирание и совпадает с контурами Кировоградской аномалии, выделенной еще в 50-х годах прошлого столетия и хорошо изученной украинскими геофизиками [1, 14, 18]. Вторая ветвь проводника, простирание которой СЗ-ЮВ, в верхней части распадается на две узкие зоны, которые в плане точно совпадают с двумя линиями Курской магнитной аномалии (рис. 6, а). На глубине эти две зоны образуют одну проводящую область шириной около 80 км (рис. 6, б).

Севернее 53° с.ш. две ветви проводника сливаются, образуя единую проводящую структуру шириной около 70 км. В плане контуры корового

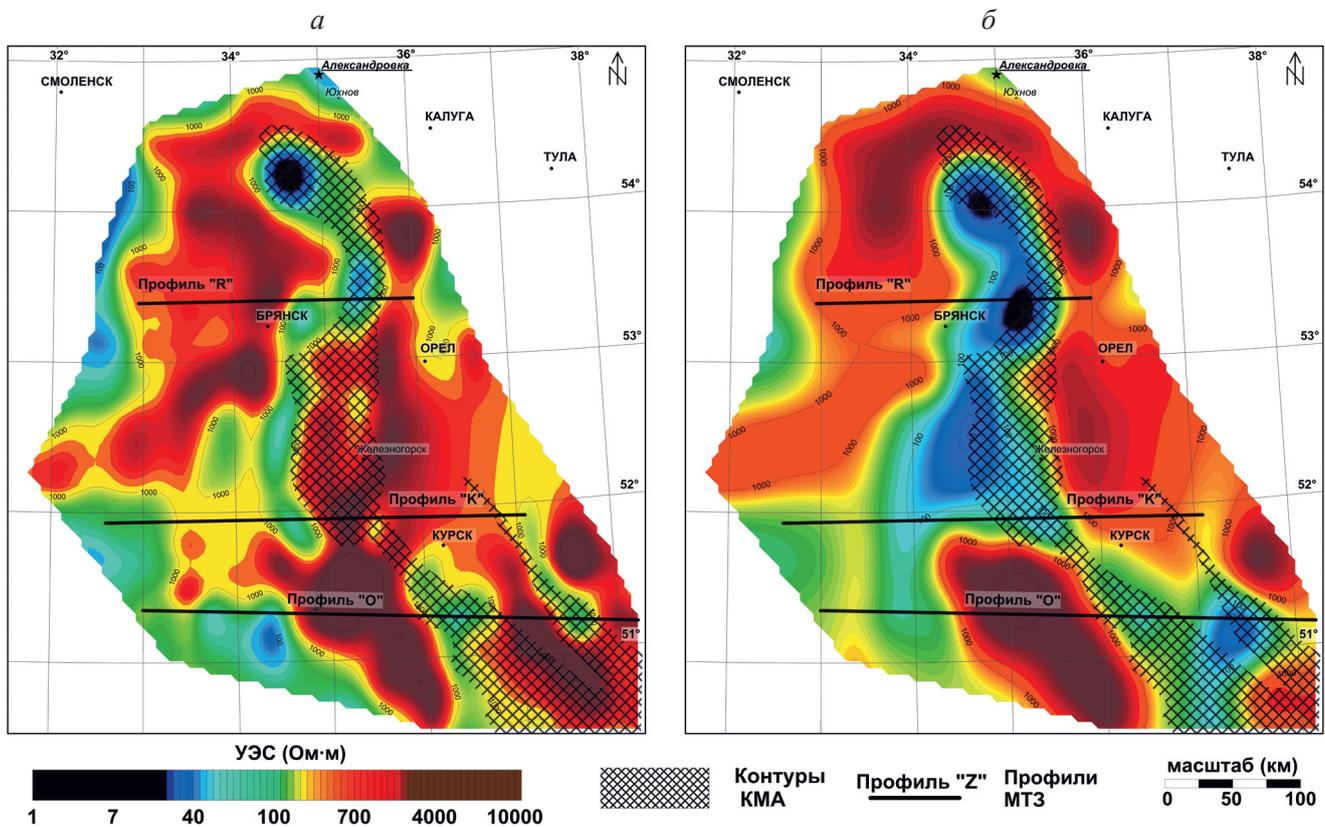


Рис. 6
Карты-срезы УЭС по результатам 3D-инверсии для глубин 10 км (а) и 25 км (б)

проводника повторяют контуры северного окончания Курской магнитной аномалии, однако ось проводника располагается несколько западнее максимума магнитных аномалий (рис. 6, б). УЭС пород в пределах аномальной области снижается до первых десятков Ом·м.

На разрезах по южным профилям («Обоянь» и «Курск») хорошо проявились две ветви корового проводника, разделенные высокоомным блоком (рис. 7, б, в). На профиле «Брянск» они полностью сливаются, образуя единую проводящую область в коре (рис. 7, 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 каналы 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 Сарматии

Территория наших исследований относится к северо-западному склону Воронежского кристаллического массива (ВКМ) – Курскому блоку, который вместе с Украинским щитом образует один из трех сегментов (рис. 8) докембрийского фундамента Восточно-Европейского кратона (ВЕК) – Сарматия [15, 29].

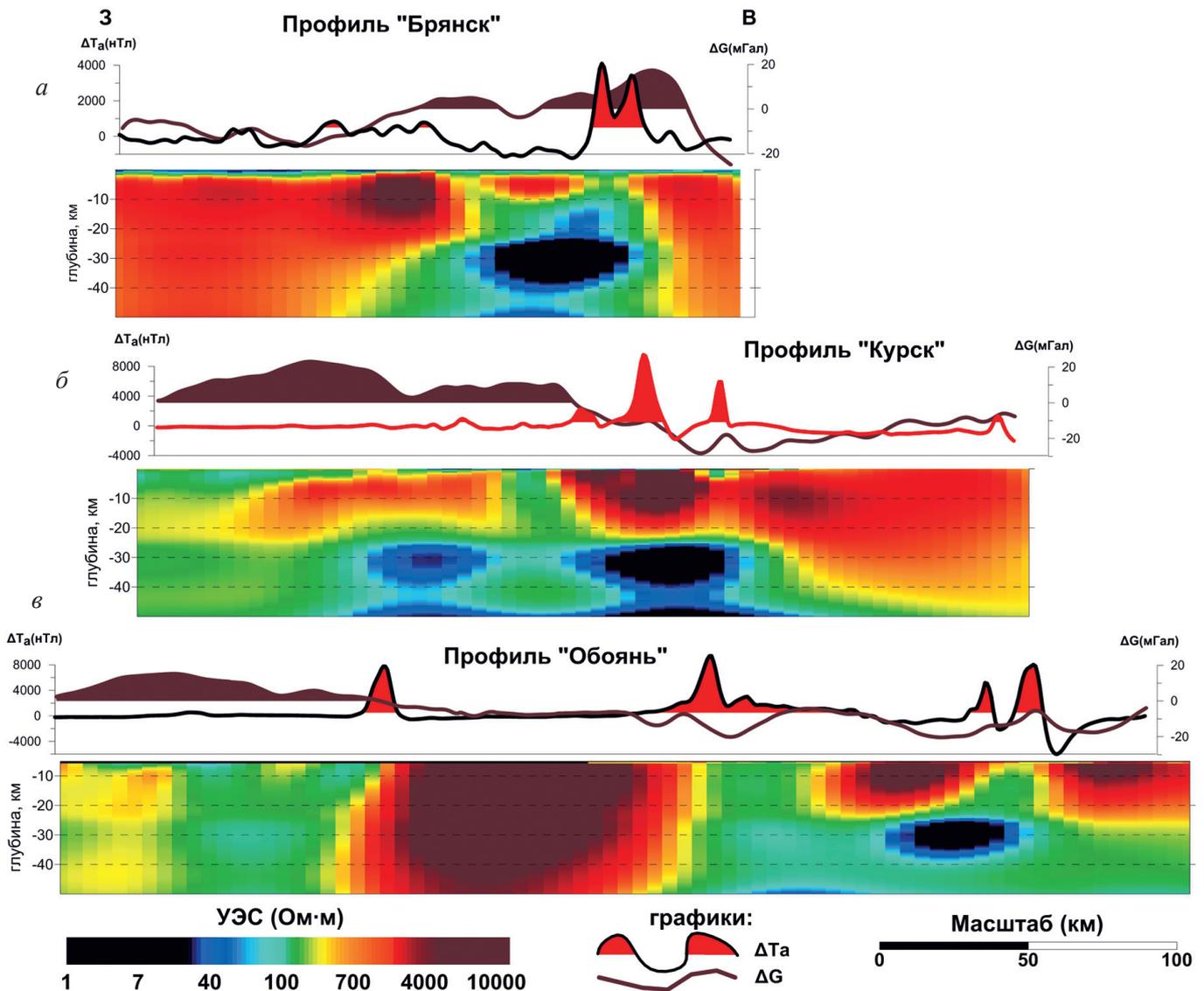


Рис. 7

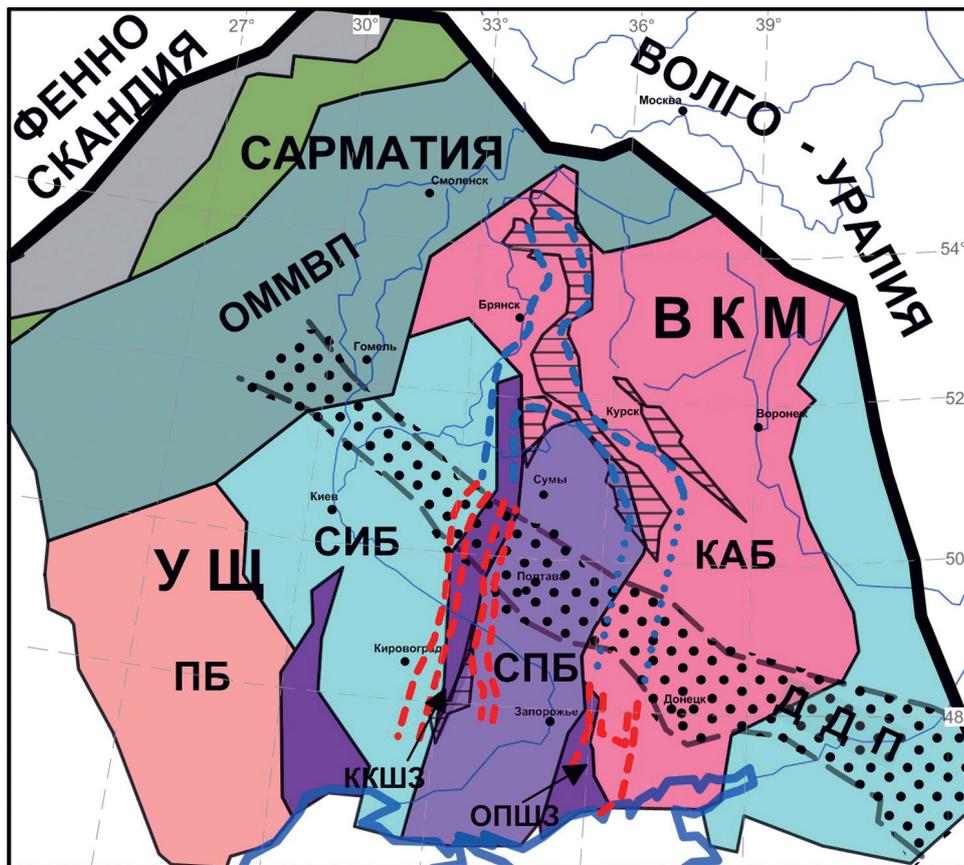
Геoeлектрические модели по результатам 3D-инверсии и графики аномального магнитного поля и поля силы тяжести: профили «Брянск» (а), «Курск» (б), «Обоянь» (в)

В позднем девоне Украинский щит был отделен от расположенного на северо-востоке Воронежского массива Днепровско-Донецким авлакогеном.

Строение докембрийского фундамента в границах Сарматии лучше изучено на Украинском щите и Курском блоке, где породы архея и протерозоя выходят на поверхность. Украинский щит и Воронежский массив имеют блоковое строение (рис. 8). Украинский щит подразделяется на шесть блоков архейского и палеопротерозойского возраста. В строении Воронежского массива различают три блока, из которых западный – Брянский – и центральный – Курский – довольно легко коррелируются с центральной частью Украинского щита [36, 32].

По современной классификации в восточной части Украинского щита выделяются Ингульский, Среднеприднепровский и Приазовский мегаблоки, которые разделены Криворожско-Кременчугской и Орехово-Павлоградской шовными зонами [17, 21]. Все эти структуры Украинского щита имеют субмеридиональное простирание. По мнению многих исследователей докембрия ВЕК, меридиональное простирание палеопротерозойских поясов, которыми разделены архейские микроконтиненты, характерно для всего кратона Сарматия [29, 32].

Архейская кора Сарматии включает два крупных палеоархейских (> 3,2 млрд лет) блока, «сшитых» палеопротерозойским Севско-Ингулецким ороге-



- а) б) Архейская кора: а) 3.8-2.7 млрд лет; б) 3.2-2.7 млрд лет.
- а) б) с) Палеопротерозойская кора: а) 2.3-2.1 млрд лет, б) 2.0-1.95 млрд лет, континентальная, с) 2.0-1.95 млрд лет, океаническая
- Шовные зоны (2.05-2.0 млрд лет)
- Железистые кварциты Курской и Кировоградской зон (2.3-2.2 млрд лет)
- Границы Барятинской и Курской аномалий;
- Возможное продолжение Курской аномалии;
- Границы коровых аномалий на Украинском щите

Рис. 8

Тектоническая схема южной части ВЕП с границами коровых проводников.

ВКМ – Воронежский кристаллический массив, УЩ – Украинский щит, ПБ – Подольский блок, СИБ – Севско-Ингулецкий блок, СПБ – Сумско-Приднепровский блок, КАБ – Курско-Азовский блок, ОММВП – Осницко-Микашевичи-Московский вулканический пояс, ККШЗ – Криворожско-Кременчугская шовная зона, ОПШЗ – Орехово-Павлоградская шовная зона, ДДП – Днепровско-Донецкий прогиб

ном, и обширные мезоархейские (3,2–2,8 млрд лет) гранит-зеленокаменные и гранитогнейсовые ареалы [34, 35, 30].

Как для Украинского щита, так и для Воронежского массива характерно чередование блоков эpiarхейской консолидации, подвергнутых переработке и гранитизации в конце палеопротерозоя, с узкими, вытянутыми в меридиональном направлении подвижными поясами или шовными зонами того же возраста. В пределах Украинского щита Северо-западный, Днестрово-Бугский и Росинско-Тикичский блоки сочленяются с Ингульским блоком по Голованевской шовной зоне, тогда как Ингулецко-Криворожская и Орехово-Павлоградская зоны отделяют Среднеприднепровский блок от Ингульского и Приазовского, соответственно.

Центральную часть Сарматии, ее ядро, образует Сумско-Приднепровская гранит-зеленокаменная область (ГЗО), состоящая из двух блоков – Среднеприднепровского на Украинском щите и Сумского в пределах ВКМ (рис. 8). Эти блоки представляют собой фрагменты типичной ГЗО мезоархейского возраста – 3,2–3,0 млрд лет [35].

Мощность осадочно-вулканогенного выполнения гранит-зеленокаменных поясов (ГЗП) может достигать 15 км. Обычно они имеют трехчленное строение. Нижняя часть разреза ГЗП слагается преимущественно основными, отчасти ультраосновными лавами. Среди последних характерны коматиты. В средней части разреза присутствуют главным образом эффузивы среднего и кислого состава, содержание осадочных пород повышается. В верхней части разреза ГЗП обломочные породы занимают господствующее положение [24], в том числе метатерригенные породы железисто-кремнистой формации, вмещающей крупные месторождения богатых железных руд [27].

Эволюцию коры позднеархейского этапа развития можно объяснить либо заложением рифтогенных структур на раннеархейском гранитогнейсовом Подолско-Курско-Азовском континенте с последующим образованием мезоархейского океана, либо закрытием ранее существовавшего палеомезоархейского океана [29].

В позднем архее – раннем палеопротерозое в интервале 2,5–2,45 млрд лет в Сарматии происходило интенсивное осадконакопление в обширном мелководном морском бассейне на карбонатной платформе в условиях пассивной континентальной окраины, включая формирование железисто-кремнистых формаций (BIF). Отложения имели площадное распространение, но сохранились вследствие размыва только в узких линейных зонах юго-восточно-северо-западного простирания. Эти структуры представляют собой внутриконтинентальные рифты, заложившиеся в середине палеопротерозоя на архейской платформе [19]. Палеопротерозойские осадочные толщи залегают в тех же протяженных структурах, где ранее сформировались гранит-зеленокаменные пояса.

Палеопротерозойские железисто-кремнистые формации (BIF) Сарматии состоят из хомогенных и терригенно-осадочных пород. В их строении вы-

деляют чередование горизонтов железистых кварцитов и сланцев. Разрезы железисто-кремнистых формаций Кременчугского района Украинского щита схожи с разрезами железисто-кремнистых формаций Курского блока.

В интервале 2,45–2,2 млрд лет происходит регрессия морского бассейна, высокое стояние континента и длительный перерыв в осадконакоплении. В это время происходило заложение континентальных грабенообразных рифтогенных впадин в центральной части сводового поднятия [19].

После закрытия рифтогенных структур слагающие их породы претерпели метаморфизм и складкообразование, и в результате коллизионных процессов между Сарматией и Волго-Уралией 2,10–2,05 млрд лет назад [28] образовались сутурные (шовные) зоны. Некоторые из этих зон оконтуривают пассивные окраины архейских блоков, другие контролируются палеорифтами во внутренней части Курско-Азовского блока [29].

По результатам глубинных электроразведочных работ методами МТЗ и ГМТЗ, выполненных на территории Украинского щита, было показано, что шовные зоны в той или иной степени сопровождаются аномалиями высокой электропроводности на разных глубинах в земной коре [2, 9, 14, 18].

Криворожская аномалия электропроводности охватывает Криворожско-Кременчугскую шовную зону, разделяющую протерозойский Севско-Ингулецкий блок и архейский Сумско-Приднепровский блок. Минимальные значения УЭС – единицы Ом·м – в пределах аномалии отмечаются на глубинах 25–30 км [1, 9].

На границе Сумско-Приднепровского и Курско-Азовского блоков проводящие зоны в коре по данным МТЗ прослеживаются до глубины 25–50 км. Аномалии повышенной электропроводности имеют тенденцию к затуханию от Орехово-Павлоградской шовной зоны через Западное Приазовье к Восточному Приазовью [1, 9].

Северное продолжение Криворожской аномалии, установленное в результате наших работ, позволяет предположить, что граница между Севско-Ингулецким и Сумско-Приднепровским блоками не заканчивается на широте г. Курска, а продолжается практически вплоть до границы Сарматии и Волго-Уралии. Курская аномалия электропроводности, возможно, является северным продолжением Орехово-Павлоградской шовной зоны и оконтуривает границу между Сумско-Приднепровским и Курско-Азовским блоками (рис. 8).

Причины повышенной электропроводности в коре

Существуют два основных варианта истолкования природы коровых аномалий электропроводности.

Первый вариант – флюидная модель электропроводности литосферы, согласно которой в глубинных слоях земной коры предполагается существование связанных систем поровых пространств, заполненных соляными растворами.

Образование флюидов на глубине обычно связывают с дегидратацией, наблюдаемой при температурах 500–600 °С для пород низких степеней метаморфизма типа серпентинитов или амфиболовых сланцев [13]. Однако дегидратация (освобождение воды из кристаллической решетки) может происходить только в условиях тектонически активных зон. Такой механизм практически исключен для континентальной коры древних платформ.

Для стабильных кратонов больше подходит второй вариант объяснения повышенной электропроводности – электронно-проводящая природа коровых аномалий.

Идея об электронно-проводящей природе коровых аномалий впервые была обоснована профессором Санкт-Петербургского университета А.С. Семеновым [20]. Она основана на экспериментально установленной исключительной распространенности в земной коре аномалий проводимости, обусловленных наличием графита и сульфидно-углеродистых образований.

Существуют различные концепции появления электронных проводников в коре. Одна из них предполагает первичное биогенно-осадочное происхождение сульфидно-углеродистых толщ. Согласно этой концепции, они образовались за счет процессов глубокого метаморфизма богатых сероводородом органических осадков, накопленных в мелководных бассейнах [13].

На Украинском щите и Курском блоке графитизированные породы имеют 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 Украинского щита показывают, что на отдельных участках могут встречаться графитизированные породы с разной степенью метаморфизма, образованные в средней части коры на глубинах до 35 км. Поэтому не исключено, что наблюдаемая в приповерхностном слое графитизация продолжается и на значительных глубинах [14].

В ряде работ аномалии электропроводности, выявленные на Украинском щите, объясняются нали-

чием области глубинного тектонического накопления (как бы соскабливания с пододвигаемой плиты в ходе субдукции) железистых и других электропроводящих пород на глубину не менее 30 км [1, 9].

Глубинные проводящие объекты могут быть связаны также и со скоплениями рудных минералов.

Тектоника позднеархейского этапа развития гранит-зеленокаменных областей характеризуется заложением рифтогенных структур, в которых формировались мафит-ультрамафитовая вулканоплутоническая ассоциация и вулканогенно-осадочная толща.

Рифтовые магмы имеют тенденцию быть менее чувствительными к дифференциации, ассимиляции и потере сульфидов во время прохождения через мантийную литосферу и нижние уровни коры и быть более богатыми металлами при внедрении в верхнюю кору [25].

С мафит-ультрамафитовыми породными ассоциациями, сформированными в обстановках рифтогенеза, связаны залежи магматических медно-никелевых сульфидных руд, которые обычно находятся в основании лавовых потоков коматиитов или коматиитовых базальтов [22].

Сульфидная минерализация ранее редко рассматривалась как причина аномалий коровой проводимости. Однако в последние годы модификации магнитотеллурических методов прочно вошли в комплект рудной геофизики и полученный нами опыт показал, что даже при незначительных концентрациях сульфидных минералов в изверженных породах по результатам интерпретации МТ-данных выделяются обширные аномалии электропроводности.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Азаров Н.Я., Анциферов А.В., Шеремет Е.М. и др. Геолого-геофизическая модель Криворожско-Кременчугской шовной зоны Украинского щита. Киев: Наук. 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: Наук. думка, 2005. 190 с.
3. 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.
4. 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.
5. Алексанова Е.Д., Баглаенко Н.В., Варенцов И.М. и др. Сопоставление геофизических полей в зоне Кировоградской и Курской аномалий электропроводности // Материалы международной конференции: Современное состояние науки о Земле. М.: МГУ, 2011. С. 33–37.
6. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. С. 680.
7. Бибикина Е.В., Богданова С.В., Постников А.В., Попова Л.П. и др. Зона сочленения Сарматии и Волго-Уралии: изотопно-геохронологическая характеристика супракрупных пород и гранитоидов // Стратиграфия и геологическая корреляция. 2009. № 6. С. 3–16.
8. Бойченко Д.А., Пушкарев П.Ю., Алексанова Е.Д. и др. Одномерная и двумерная инверсия магнитотеллурических данных на западном склоне Воронежской антеклизы // Электронное научное издание ГЕОразрез. 2014. № 1-2014 (14).

9. Бухарович 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.
10. Варенцов Ив.М., Иванов П.В., Ковачикова С. и др. Глубинная геоэлектрическая структура западного склона Воронежского массива: на пути от 2d- к 3d-моделям // Материалы VI Всероссийской школы-семинара по ЭМ-зондированиям им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна. ИНГГ СО РАН. Новосибирск, 2013. С. 1–4.
11. Варенцов Ив.М., Ковачикова С., Куликов В.А. и др. Синхронные МТ- и МВ-зондирования на западном склоне Воронежского массива // Геофизический журнал. 2012. Т. 34, № 4. С. 90–107.
12. Варенцов И.М., Лозовский И.Н., Рабочая Г.К. Массив МТ/МВ-зондирований kirovograd: 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.
13. Жамалетдинов А.А., Кулик С.Н. Крупнейшие аномалии электропроводности мира // Геофизический журнал. 2012. Т. 34, № 4. С. 22–39.
14. 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.
15. Лубнина Н.В., Богданова С.В., Шумлянский Л.В. Восточно-Европейский кратон в палеопротерозое: новые палеомагнитные определения по магматическим комплексам Украинского щита // Геофизика. 2009. № 5. С. 18–27.
16. Морозов А.Ф. и др. Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: М.: ГЕОКАРТ: ГЕОС, 2010. Т. 1. 408 с.
17. Пигулевский П.И. Строение верхней сантии юго-восточной части Украинского щита по геолого-геофизическим данным // Вестник ВГУ, серия: Геология. 2011. № 1. С. 193–200.
18. Рокитянский И.И. Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. Киев: Наук. думка, 1975. 279 с.
19. Савко К.А., Самсонов А.В., Холин В.М., Базилов Н.С. Мегаблок Сарматия как осколок суперкратона Ваалбара: корреляция геологических событий на границе архея и палеопротерозоя // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2017. Т. 25, № 2. С. 3–26.
20. Семенов А.С. Природа электрической проводимости древнего кристаллического фундамента // Вестн. ЛГУ. 1970. № 12. С. 19–26.
21. Турченко С.И. Раннедокембрийская геология и металлогения Украинского щита – корреляция с Балтийским щитом // Региональная геология и металлогения. 2014. № 59. С. 21–45.
22. Турченко С.И. Особенности формирования сульфидно-никелевых и платиноносных (Ni-PGE) руд в архейских провинциях // Региональная геология и металлогения. 2016. № 66. С. 91–94.
23. Фельдман И.С., Жамалетдинов А.А. Флюидная и тепловая модели электропроводности литосферы по лабораторным данным // Комплексные геолого-геофизические модели древних щитов: Тр. Всерос. (с междунар. участием) конф. Апатиты: Геол. ин-т КНЦ РАН, 2009. С. 100–107.
24. Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики: Учебник – 2-е изд., испр. и доп. М.: КДУ, 2005. 560 с.
25. 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.
26. Шустов Н.Л., Куликов В.А., Мойланен Е.В. и др. Создание геофизической обсерватории на Александровской базе геофизических практик геологического факультета МГУ // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2012. № 4. С. 44–48.
27. Щербак Н.П., Артеменко Г.В., Пономаренко А.Н. Геохронологические рубежи формирования зеленокаменных ассоциаций пород Среднеприднепровского, Карельского кратонов и зеленокаменных поясов Воронежского массива Восточно-Европейской платформы // Минералогічний журнал. 2009. Т. 31, № 2. С. 3–19.
28. Щипанский А.А., Самсонов А.В., Петрова А.Ю., Ларионова Ю.О. Геодинамика восточной окраины Сарматии в палеопротерозое // Геотектоника. 2007. № 1. С. 43–70.
29. Bogdanova S.V., Gorbatshev R. and Garetsky R.G. Europe/East European Craton, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier, 2016. 17-Oct-16 doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10020-X.
30. Claesson S., Bibikova E.V., Bogdanova S.V., Skobelev V. Archaean terranes, Palaeoproterozoic reworking and accretion in the Ukrainian Shield, East European Craton // European Lithosphere Dynamics. Eds. Gee D.G., Stephenson R.A. Geol. Soc. London. Mem. 2006. № 32. P. 645–654.
31. Egbert G. and Kelbert A. Computational recipes for electromagnetic inverse problems // Geophysical Journal International. 2012. V. 189. P. 251–267.
32. Gorbatshev R., Bogdanova S. Frontiers in the Baltic Shield // Precambrian Research. 1993. V. 64. P. 3–21.
33. Lozovsky I.N., Varentsov I.M. Kirovograd W. Kirovograd experiment: Correlation of geophysical data along mt/mv profiles at the nw slope of the voronezh massive // XXII Workshop on EM Induction in the Earth (Extended Abstracts). GFZ Potsdam, 2014. P. 1–4.
34. Samsonov A.V., Zhuravlev D.Z., Bibikova E.V. Geochronology and petrogenesis of an Archaean acid volcano-plutonic suite of the Verchovtsevo greenstone belt, Ukrainian Shield // International Geological Review. 1993. V. 35. P. 1166–1181.
35. Samsonov A.V., Chernyshev I.V., Nutman A.P., Compston W. Evolution of the Archaean Aulian Gneiss Complex, Ukraine: SHRIMP U-Pb zircon evidence // Precambrian Research. 1996. V. 78. P. 65–78.
36. Shchipansky A.A., Bogdanova S.V., 1996. The Saratian crustal segment: Precambrian correlation between the Voronezh Massif and the Ukrainian Shield across the Dniepr-Donets Aulacogen. Tectonophysics 268 (1–4), 109–125.

REFERENCES

1. Azarov NYa, Anciferov AV, Sheremet EM i dr. Geologo-geofizicheskaja model Krivorozhsko-Kremenchugskoj shovnoy zony Ukrainskogo shita. Kiev: Nauk. dumka, 2006. 196 p. (in Russian).
2. Azarov NYa, Anciferov AV, Sheremet EM i dr. Geologo-geoelektricheskaja model Orehovo-Pavlogradskoj shovnoy zony Ukrainskogo shita. Kiev: Nauk. dumka, 2005. 190 p. (in Russian).
3. Aleksanova ED, Varentsov IM, Kulikov VA i dr. Glubinye anomalii elektroprovodnosti v severnoj chasti Voronezhskoj anteklisy. *Geofizika*. 2013; (2): 32–38 (in Russian).
4. Aleksanova ED, Varentsov IM, Vereshagina MI i dr. EM zondirovanie osadochnogo chehla i konsolidirovannoj zemnoj kory v zone perehoda ot Moskovskoj sineklizy k Voronezhskoj anteklize: problemy i perspektivy. *Fizika Zemli*. 2010; (8): 62–71 (in Russian).

5. *Aleksanova ED, Baglaenko NV, Varentsov IM i dr.* Sopotavljenje geofizicheskih poljev v zone Kirovogradskoj i Kurskoj anomalij elektroprovodnosti // *Materialy mezhdunarodnoj konferencii: Sovremennoe sostojanie nauk o Zemle.* Moscow: MGU. 2011. Pp. 33–37 (in Russian).
6. *Berdichevskij MN, Dmitriev VI.* Modeli i metody magnitotelluriki. Moscow: Nauchnyj mir, 2009. P. 680.
7. *Bibikova EV, Bogdanova SV, Postnikov AV, Popova LP i dr.* Zona sochlenenija Sarmatii i Volgo-Uralii: izotopno-geohronologicheskaja karakteristika suprakrustalnih porod i granitoidov. *Stratigrafija i geologicheskaja korrelyacija*, 2009; (6): 3–16 (in Russian).
8. *Bojchenko DA, Pushkarev PJu, Aleksanova ED i dr.* Odnomernaja I dvumernaja inversija magnitotelluricheskikh dannyh na zapadnom sklone Voronezhskoj anteklisy. *Elektronnoe nauchnoe izdanie GEOrazrez.* 2014. № 1–2014 (14) (in Russian).
9. *Burahovich TK, Nikolaev IYu, Sheremet EM, Shirkov BI.* Geoelektricheskie anomalii Ukrainского shita i ih svyaz s rudoproyavljenijami poleznyh iskopaemyh. *Geofizicheskij zhurnal.* 2015; 37 (6): 42–63 (in Russian).
10. *Varentsov IM, Ivanov PV, Kovachikova S i dr.* Glubinnaja geoelektricheskaja struktura zapadnogo sklona Voronezhskogo massiva: na puti ot 2d k 3d modelyam. *Materialy VI Vserossijskoj shkoly-seminara po EM zondirovanijam im. M.N. Berdichevskogo i L.L. Vanjana – INGG SO RAN Novosibirsk*, 2013. P. 1–4.
11. *Varentsov IM, Kovachikova S, Kulikov VA i dr.* Sinhronnye MT i MV zondirovanija na zapadnom sklone Voronezhskogo massiva. *Geofizicheskij zhurnal.* 2012; 34(4): 90–107 (in Russian).
12. *Varentsov IM, Lozovskij IN, Rabochaja GK.* Massiv MT. MV zondirovanij Kirovograd: sovместnaja 2d+ inversija na profile ZHIZDRA. *Materialy VI Vserossijskoj shkoly-seminara po EM zondirovanijam im. M.N. Berdichevskogo i L.L. Vanjana. INGG SO RAN Novosibirsk*, 2013. Pp. 1–4 (in Russian).
13. *Zhamaletdinov AA, Kulik SN.* Krupnejšie anomalii elektroprovodnosti mira. *Geofizicheskij zhurnal.* 2012; 34 (4): 22–39 (in Russian).
14. *Logvinov IM, Gordienko IV, Tarasov VN.* Novye rezultaty geoelektricheskikh issledovanij Kirovogradskoj anomalii elektroprovodnosti na severe Ukrainy. *Doklady NAN Ukrainy*, 2009, № 6. Pp. 135–142 (in Russian).
15. *Lubnina NV, Bogdanova SV, Shumlyanskij LV.* Vostochno-Evropskij kraton v paleoproterozoe: novye paleomagnetnye opredelenija po magmaticheskim kompleksam Ukrainского shita. *Geofizika.* 2009; (5): 18–27 (in Russian).
16. *Morozov AF i dr.* Glubinnoe stroenie, evolucija i poleznye iskopaemye rannedokembrijskogo fundamenta Vostochno-Evropskoj platformy: Moscow: GEOKART: GEOS, 2010. V. 1. 408 p. (in Russian).
17. *Pigulevskij PI.* Stroenie verhnej mantii jugo-vostochnoj chasti ukrainского shita po geologo-geofizicheskim dannym. *Vestnik VGU, serija: geologija.* 2011; (1): 193–200 (in Russian).
18. *Rokityanskij II.* Issledovanie anomalij elektroprovodnosti metodom magnitovariacionnogo profilirovanija. Kiev: Nauk. dumka, 1975. 279 p. (in Russian).
19. *Savko KA, Samsonov AV, Holin VM, Bazikov NS.* Megablok Sarmatija kak oskolok superkratona Vaalbara: korrelyacija geologicheskikh sobytij na granice arheja i paleoproterozoja. *Stratigrafija. Geologicheskaja korrelyacija.* 2017; 25 (2): 3–26 (in Russian).
20. *Semenov AS.* Priroda elektricheskoy provodimosti drevnego kristallicheskogo fundamenta. *Vestn. LGU.* 1970; (12): 19–26 (in Russian).
21. *Turchenko SI.* Rannedokembrijskaja geologija i metallogenija Ukrainского shita – korrelyacija s Baltijskim shitom. *Regionalnaja geologija i metallogenija.* 2014; (59): 21–45 (in Russian).
22. *Turchenko SI.* Osobennosti formirovanija sulfidno-nikelevyh i platinonosnyh (Ni-PGE) rud v arhejskikh provincijah. *Regionalnaja geologija i metallogenija.* 2016; (66): 91–94 (in Russian).
23. *Feldman IS, Zhamaletdinov AA.* Flyuidnaja i teplovaja modeli elektroprovodnosti litosfery po laboratornym dannym. *Kompleksnye geologo-geofizicheskie modeli drevnih shitov:* Tr. Vseros. (s mezhdunar. Uchastiem) konf. Apatity: Geol. in-t KNC RAN, 2009. Pp. 100–107 (in Russian).
24. *Hain VE, Lomize MG.* Geotektonika s osnovami geodinamiki: Uchebnik – 2-e izd., ispr. i dop. Moscow: KDU, 2005. 560 p.
25. *Chernyshov NM, Nenahov VM, Lebedev IP i dr.* Model geodinamicheskogo razvitija Voronezhskogo kristallicheskogo massiva v rannem dokembrii. *Geotektonika.* 1997; (3): 21–30 (in Russian).
26. *Shustov NL, Kulikov VA, Mojlanen EV i dr.* Sozdanie geofizicheskoy observatorii na Aleksandrovskoj baze geofizicheskikh praktik geologicheskogo fakulteta MGU. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 4: Geologija.* 2012; (4): 44–48 (in Russian).
27. *Sherbak NP, Artemenko GV, Ponomarenko AN.* Geohronologicheskije rubezhi formirovanija zelenokamennyh asociacij porod Srednepridneprovskogo, Karelskogo kratonov i zelenokamennyh pojasov Voronezhskogo massiva Vostochno-Evropskoj platform. *Mineralogichnij zhurnal.* 2009; 31 (2): 3–19 (in Russian).
28. *Shipanskij AA, Samsonov AV, Petrova AYu, Larionova YuO.* Geodinamika vostochnoj okrainy Sarmatii v paleoproterozoe. *Geotektonika.* 2007; (1): 43–70 (in Russian).
29. *Bogdanova SV, Gorbatshev R and Garetsky RG.* EUROPE / East European Craton, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier, 2016. 17-Oct-16 doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10020-X.
30. *Claesson S, Bibikova EV, Bogdanova SV, Skobelev V.* Archaean terranes, Palaeoproterozoic reworking and accretion in the Ukrainian Shield, East European Craton. *European Lithosphere Dynamics.* Eds. Gee D.G., Stephenson R.A. Geol. Soc. London. Mem. 2006. № 32. P. 645–654.
31. *Egbert G and Kelbert A.* Computational recipes for electromagnetic inverse problems. *Geophysical Journal International.* 2012. V. 189. P. 251–267.
32. *Gorbatshev R, Bogdanova S.* Frontiers in the Baltic Shield. *Precambrian Research.* 1993. V. 64. P. 3–21.
33. *Lozovskij IN, Varentsov IM.* Kirovograd W. Kirovograd experiment: Correlation of geophysical data along mt/mv profiles at the nw slope of the voronezh massive. XXII Workshop on EM Induction in the Earth (Extended Abstracts). GFZ Potsdam, 2014. P. 1–4.
34. *Samsonov AV, Zhuravlev DZ, Bibikova EV.* Geochronology and petrogenesis of an Archaean acid volcano-plutonic suite of the Verchovtsevo greenstone belt, Ukrainian Shield. *International Geology Review.* 1993. V. 35. P. 1166–1181.
35. *Samsonov AV, Chernyshev IV, Nutman AP, Compston W.* Evolution of the Archaean Aulian Gneiss Complex, Ukraine: SHRIMP U-Pb zircon evidence. *Precambrian Research.* 1996. V. 78. P. 65–78.
36. *Shchipansky AA, Bogdanova SV.* 1996. The Sarmatian crustal segment: Precambrian correlation between the Voronezh Massif and the Ukrainian Shield across the Dniepr-Donets Aulacogen. *Tectonophysics* 268 (1–4), 109–125.

Положительная рецензия от 30.11.2017
Решение редколлегии о публикации от 28.02.2018

ОБ АВТОРАХ

КУЛИКОВ
Виктор Александрович

Доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геофизики геологического факультета МГУ им. Ломоносова. Окончил геологический факультет МГУ в 1991 г. Автор более 60 научных работ.



АЛЕКСАНОВА
Елена Дмитриевна

Ведущий геофизик ООО «Северо-Запад». Окончила геологический факультет МГУ в 2000 г.



ВАРЕНЦОВ
Иван Михайлович

Кандидат физико-математических наук. Директор Центра геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ЦГЭМИ ИФЗ РАН). Автор более 100 научных работ.



ЗАЙЦЕВ
Сергей Александрович

Аспирант кафедры геофизики геологического факультета МГУ им. Ломоносова. Окончил геологический факультет МГУ в 2017 г.



ЛОЗОВСКИЙ
Илья Николаевич

Геофизик Центра геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ЦГЭМИ ИФЗ РАН). Окончил геологический факультет МГУ в 2012 г.



ЛУБНИНА
Наталья Валерьевна

Доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры динамической геологии геологического факультета МГУ им. Ломоносова. Окончила геологический факультет МГУ в 1994 г. Автор более 90 научных работ.



ПУШКАРЕВ
Павел Юрьевич

Доктор геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики геологического факультета МГУ им. Ломоносова. Окончил геологический факультет МГУ в 1998 г. Автор более 70 научных работ.



ШУСТОВ
Николай Львович

Научный сотрудник кафедры геофизики геологического факультета МГУ им. Ломоносова. Окончил геологический факультет МГУ в 1991 г. Автор 17 научных работ.



ЯКОВЛЕВ
Андрей Георгиевич

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры геофизики геологического факультета МГУ им. Ломоносова. Окончил геологический факультет МГУ в 1981 г. Автор более 90 научных работ.



ИОНИЧЕВА
Анна Павловна

Студентка кафедры геофизики геологического факультета МГУ им. Ломоносова.