

Геоэлектрические исследования юга Воронежского кристаллического массива

© И. М. Логвинов¹, В. И. Трегубенко², В. Н. Тарасов¹, 2014

¹Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

²Украинский государственный геологоразведочный институт Министерства экологии и природных ресурсов Украины, Киев, Украина

Поступила 6 июня 2012 г.

Представлено членом редколлегии Э. Д. Кузьменко

Наведено перші результати інтерпретації за допомогою двовимірної інверсії магнітоваріаційних даних, сконцентрованих на трьох профілях у південній частині Воронежського кристалічного масиву. Виділено декілька об'єктів зниженого опору, покрівля яких розміщується на глибинах менше 10 км. Найдостовірніший об'єкт просторово корелює з Белгородсько-Михайлівським зеленокам'яним поясом (і поширенням залістистих кварцитів Курської магнітної аномалії).

Ключові слова: електропровідність, земна кора, Воронежський масив.

Введение. В 80-х годах прошлого века в рамках выполнения геотраверса «Гранит» [Геотраверс..., 2002] под руководством В. И. Трегубенко [Слоницкая, Трегубенко, 1993] с помощью цифровой станции ЦЭС-2 были проведены наблюдения магнитотеллурического (МТ) поля в южной части Воронежского кристаллического массива (ВКМ). В результате обработки получены кривые МТЗ в направлениях измерительных линий и значения типперов в диапазоне от 25 до 2500—3600 с. В сезоны 2009—2011 гг. сотрудниками Института геофизики НАН Украины [Тарасов и др., 2012] в северо-восточной части Украины в зоне сочленения северного склона Днепровско-Донецкой впадины (ДДВ) и ВКМ выполнены наблюдения вариаций МТ-поля в 14 пунктах (рис. 1).

Район исследований находится (рис. 1, а) в пределах Курского мегаблока (КМА) Воронежского кристаллического массива и ограничен с востока Лосевской шовной зоны. В пределах КМА выделены два позднеархейских зеленокаменных пояса [Чернышев, 2007] — Белгородско-Михайловский и Орловско-Тимский. Старооскольский рудный район пространственно сопряжен с Орловско-Тимским зеленокаменным поясом. Из пород с пониженным удельным электрическим сопротивлением (ρ), способствующих образованию аномалий электропроводности, наряду с породами железисто-кремнистой формации выделено два типа углеродистых сланцев:

- внутрирудные золото-платиносодержащие слюдяные и хлоритовые сланцы курской серии (мощностью до 30—40 м) с содержанием углеродистого вещества до 22 % [Пономарева, Боброва, 2009] (с ними ассоциируется комплекс рудных минералов (пирит, пирротин, халькопирит, сфалерит, галенит));
- терригенно-углеродистая черносланцевая формация нижнетимской подсветы оскольской серии, перекрывающая курскую серию.

В настоящей статье представлены первые результаты интерпретации с помощью численного двумерного моделирования (обратная задача) с использованием магнитовариационных данных, сконцентрированных на трех профилях.

Результати обробки. В результате обработки наблюдаемых вариаций МТ-поля получены магнитотеллурические (импедансы) и магнитовариационные (типперы) параметры в диапазоне периодов от 16—25 до 2500—10800 с. Обработка магнитотеллурических наблюдений в ИГФ НАН Украины проводилась с помощью комплекса программ [Wieladek, Ernst, 1977; Egbert, Booker, 1986; Ладанивский, 2003; Varentsov, 2007]. Несмотря на использование программ, подавляющих помехи, магнитотеллурические параметры на пунктах, расположенных вблизи электрифицированных железных дорог, получены с большими погрешно-

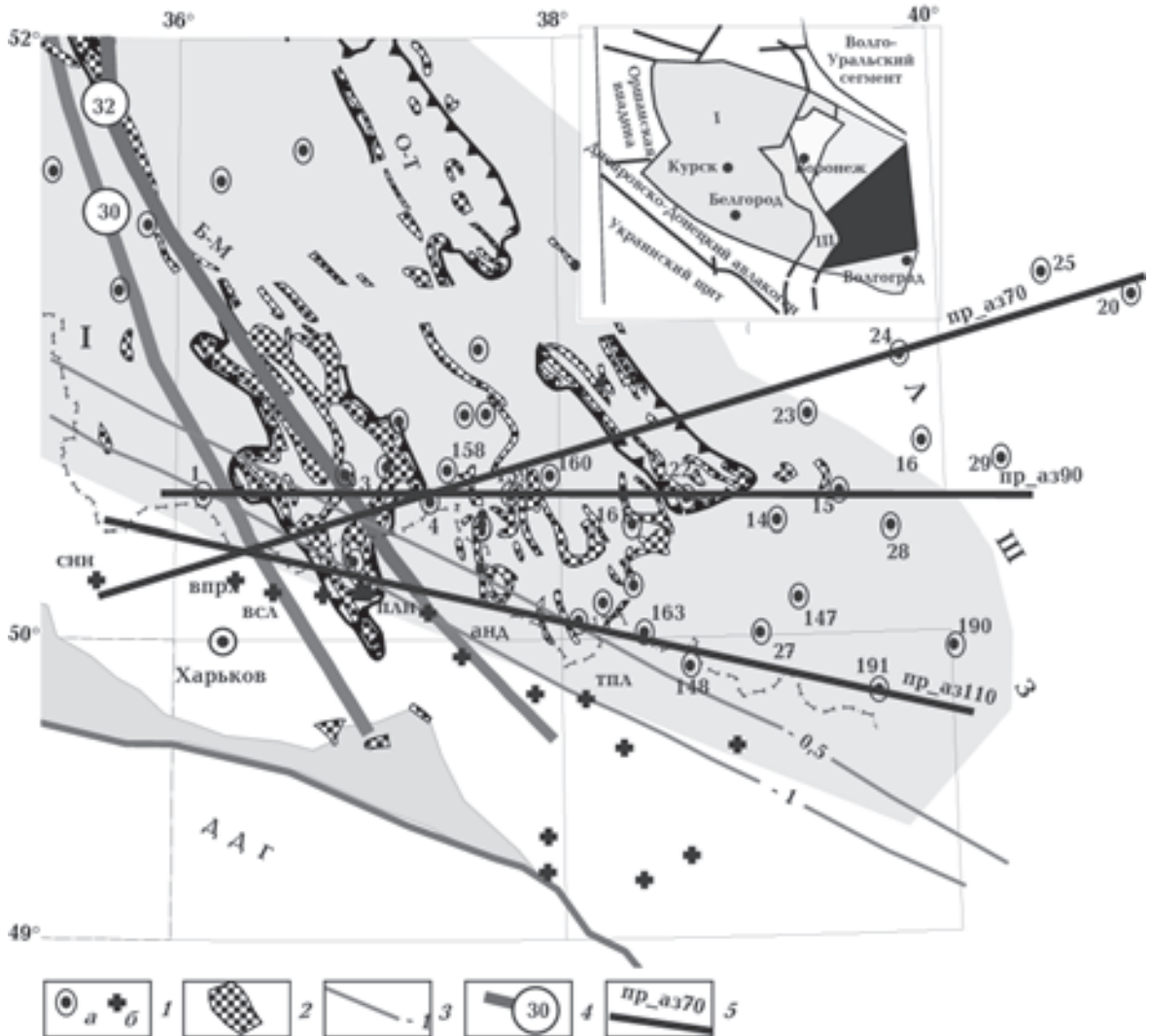


Рис. 1. Расположение пунктов наблюдений (1) выполненных под руководством В. И. Трегубенко (а), сотрудниками ИГФ НАН Украины (б), железистые кварциты (2), изогипсы поверхности дорифейского фундамента [Національний ..., 2007] (3), региональные разломы [Геология ..., 1992] (Волчанско-Шаблыкинский (30) и Новооскольско-Воронцовский (32)) (4), линии интерпретационных профилей (5). Б-М — Белгородско-Михайловский, О-Т — Орловско-Тимский зелено-каменные пояса. На врезке — схематическая тектоническая карта ВКМ, по [Чернышов, 2011]: I — Курский мегаблок, III — Лосевская шовная зона (ЛШЗ).

стями. Амплитуды реальных (C_u) и мнимых (C_v) частей индукционных векторов определены с точностью до 0,01—0,03, а их азимуты — до 5°.

Рассмотрим поведение типшеров и магнитотеллурических параметров на примере данных вдоль профиля, проходящего вблизи 50° с.ш. (пр_аз110 на рис. 1). Направление реальных частей (AZ_{C_u}) индукционных векторов в диапазоне периодов, меньших 1000 с, изменяется почти на 180° (рис. 2) на пунктах, расположенных в промежутке между 36 и 38° в.д. В пунктах, где азимут C_u составляет около 270°, величина C_u в диапазоне периодов от 70 до 400 с почти в два раза больше, чем на остальных пунктах профиля.

Приблизительно в 100 км южнее рассматриваемого района протягивается Днепровско-Донецкий грабен (ДДГ), суммарная продольная проводимость осадочных пород (S_{oc}) которого в осевой части, в интервале между 35 и 38° в.д., достигает 1000 См [Ингерев, 1989]. Реальные части индукционных векторов в этом случае должны быть направлены перпендикулярно простиранию линий S_{oc} , т. е. под углом 20—30° (ноль направлен на север), а их величины должны быть близкими на профилях, параллельных оси ДДГ.

В результате суперпозиции аномальных полей от проводящих неоднородностей квази-меридионального простирания и осадков ДДГ

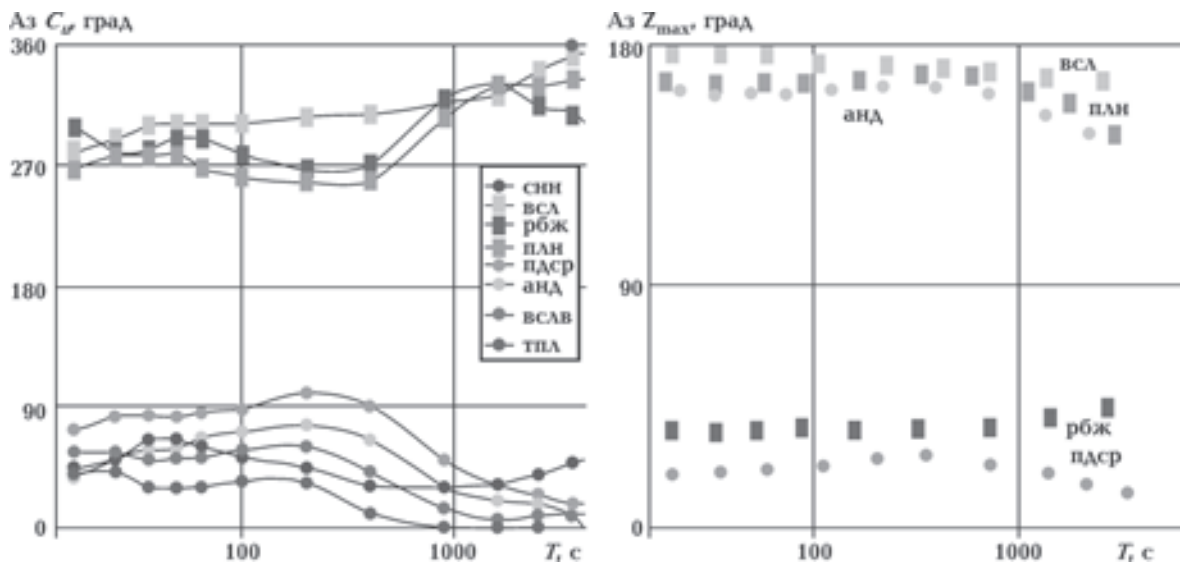


Рис. 2. Распределение AzC_u и AzZ_{max} вдоль профиля пр_аз110.

AzC_u должен отклоняться от направления 20—30° (см. рис. 2). Указанные признаки отмечаются четко. По частотному диапазону максимума C_u можно судить об относительно неглубоком залегании аномалеобразующего объекта (в верхних частях земной коры).

Еще одним доказательством наличия аномальных проводников квазимеридионального простирания может служить ориентация полярных диаграмм импеданса (Z). На рис. 2 представлены азимуты главного направления полярных диаграмм импедансов (для Z_{max}) в пунктах, где происходит смена AzC_u . Видно, что AzZ_{max} в указанных пунктах практически перпендикулярны AzC_u .

Таким образом, и индукционные векторы, и импедансы свидетельствуют о наличии аномалии проводимости квазимеридионального простирания.

Двумерная инверсия. Для инверсии использовалась программа REBOCC [Siripunvaraporn, Egbert, 2000] на основе алгоритма ОССАМ. Суть инверсии ОССАМ состоит в поиске максимально гладкой (минимально структурированной) модели, которая удовлетворяет экспериментальным данным и точности их определения. При моделировании стремятся получить среднеквадратическую невязку по всем периодам и точкам между модельными и экспериментальными данными (rms), близкую к 1 (обычно rms порядка 2 считается удовлетворительной).

Программа REBOCC достаточно формализована — моделирование можно начинать с наиболее простой модели полупространства, а после получения модели, удовлетворяющей

исходным данным, менять параметры самой модели и ключи программирования. Особенностью применения методики программы REBOCC в данной работе было использование ключей программы инверсии, которые позволяли учитывать реальные экспериментальные данные для каждого параметра, в каждом пункте и на каждом периоде.

Построение интерпретационной модели.

Для составления первоначальной интерпретационной модели на всех профилях использовалась априорная геолого-геофизическая информация о строении региона, которая заключается в следующем. Простирание изолиний мощности и суммарной продольной проводимости осадочных пород с удалением от ДДГ к северу приближается к широтному. Мощность пород осадочного чехла на территории Украины взята из работы [Національний..., 2007], России — из работ [Очерки ..., 1957; Максимов и др., 1976]. Значения суммарной продольной проводимости осадков взяты для территории Украины из работы [Ингерев, 1989], для территории России — по данным исследований на постоянном токе [Максимов и др., 1976].

По оси x шаг моделирования для всех профилей составлял 3 км, по оси y — 100—500 м для верхних 20 км, ниже увеличивался до 1000—4000 м до глубины 50 км. Для верхней мантии шаг изменялся с глубиной от 8 до 30 км. Такие геометрические параметры модели полностью удовлетворяют условиям распространения МТ-поля в среде. Учитывая частотный диапазон экспериментальных данных и длину профилей (порядка 300 км), максимальная глубина

модели, для которой искалось распределение геоэлектрических параметров, не превышала 50 км, т. е. результаты моделирования получены для всей мощности земной коры региона. Разрез вмещающей среды взят по результатам инверсии кривой зондирования на геомагнитной обсерватории «Киев» [Semenov et al., 2008].

На данном этапе интерпретации, когда недостаточно данных для определения простирания аномальных объектов в земной коре, моделирование выполнялось для разных направлений интерпретационных профилей. Наиболее представительный материал получен на профиле, который может быть проведен почти параллельно простиранию ДДГ (пр_аз110). Мощность осадочных пород вдоль профиля изменяется от 1000 м на западе до 300 м на востоке (см. рис. 1). Таким образом, проектируя компоненты типпера на линию профиля, практически убирается влияние проводимости ДДГ. Следующий профиль выбран по пунктам, образующим наиболее плотную и равномерную сеть на территории южного борта Курского блока. Его простирание соответствует азимуту 90° (пр_аз90). Третий профиль выбран таким образом, чтобы он проходил, по возможности, перпендикулярно Белгородско-Михайловскому и Орловско-Тимскому зеленокаменным поясам. Наличие экспериментальных данных позволило выполнить моделирование вдоль профиля под азимутом 70° (пр_аз70). Компоненты типперов и расстояния между пунктами были спроектированы соответственно на эти направления.

Результаты инверсии. При моделировании оказалось, что пункты, расположенные вблизи электрифицированной железной дороги (впрх и 2), сильно влияют на результаты. Устранение их из анализа в 2 раза улучшает расхождение экспериментальных и расчетных данных как по геометрическому признаку, так и по периодам.

На рис. 3 показан результат 2D инверсии вдоль профилей (без включения искажающих пунктов). Поскольку основное влияние на параметры МТ-поля оказывают мощные по интегральной проводимости проводники, на рисунке не показаны участки с $\rho > 100$ Ом·м. Исключение сделано для обособленного объекта со значением $\rho > 10^4$ Ом·м. Выбраны модели, для которых наблюдаются наименьшие значения rms по всем параметрам. Количественная оценка сходимости результатов моделирования и экспериментальных данных в этих моделях приведена в табл. 1.

Как следует из табл. 1, все выбранные модели имеют практически одинаковые невязки

по всем параметрам. Общие невязки менее 3, что является достаточно удовлетворительным результатом. Такую же невязку имеют и параметры компонент типпера на большинстве пунктов наблюдений и по периодам.

На всех профилях может быть выделено одинаковое количество локальных объектов. Высокоомный объект расположен в зоне пунктов с наиболее искаженными значениями типперов и, вероятно, связан с влиянием электрифицированной железной дороги. Остальные объекты обладают пониженными сопротивлениями (O1—O4).

Положение объектов пониженного сопротивления (ОПС) мало изменяется в зависимости от направления профиля моделирования, но изменяются их геоэлектрические характеристики. Особенно сильные изменения происходят в зоне объекта O1, поэтому он разбит на два объекта O1 и O1a. Выделение объекта O4 на профиле пр_аз110 проблематично, так как его основная проводящая часть, согласно данным моделирования, располагается восточнее экспериментальных пунктов и может быть обусловлена методическими особенностями программы моделирования. Существование объекта O4 подтверждается выделением его по нескольким пунктам на профилях пр_аз90 и пр_аз70.

И. И. Рокитянским [Рокитянский, 1975] предложен параметр $G_i = Q_i \rho_i$, определяющий интегральную характеристику проводящего объекта, где Q_i — поперечная площадь блока пород постоянного сопротивления, m^2 ; ρ_i — сопротивление блока пород, Ом·м. Если объект аномалии состоит из нескольких блоков различного сопротивления, то суммарное значение G объекта будет определяться суммой $Q_i \rho_i$. Поскольку плотность пунктов наблюдений и качество интерпретационных параметров на профилях различны, геометрические параметры и ρ отдельных объектов могут изменяться от профиля к профилю. В то же время интегральная характеристика проводящего объекта будет постоянной.

В табл. 2 приведены основные характеристики каждого проводящего объекта. Глубина кровли объектов (H_k) бралась по изолинии 20 Ом·м, а глубина залегания центра ($H_{ц}$) — внутри изолинии 10 Ом·м. При вычислении G учитывались блоки с $\rho < 20$ Ом·м, так как вклад блоков с большим сопротивлением составляет менее 5 % от величины G объектов.

Проанализируем изменение геоэлектрических характеристик каждого объекта в за-

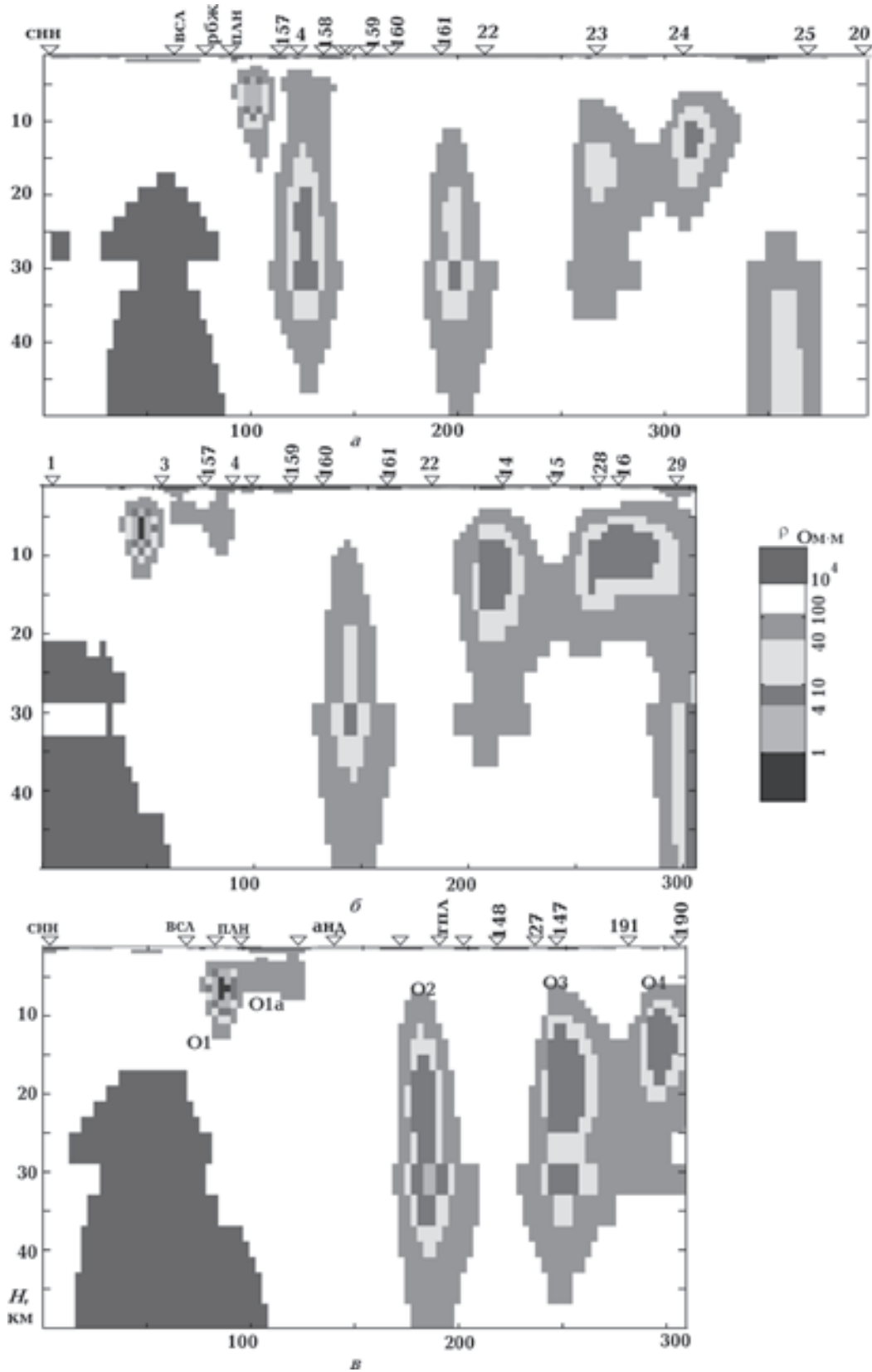


Рис. 3. Геоэлектрические модели вдоль интерпретационных профилей с различными азимутами: *а* — пр_аз70 (m13), *б* — пр_аз90 (m04), *в* — пр_аз110 (m06).

висимости от направления профиля моделирования. Для объекта О1 при практически одинаковых геометрических параметрах происходит уменьшение G с изменением направления профиля от 110 до 70°. Для объекта О1а резко изменяются все параметры на профиле пр_аз70. Объект О2 имеет близкие геометрические характеристики на всех профилях, но величина G на пр_аз110 в 3 раза больше, чем на

данным моделирования, располагается восточнее экспериментальных пунктов и может быть обусловлена методическими особенностями программы моделирования; на втором объекте выделен по результатам одного пункта. Возможно, наиболее объективные значения G получены на профиле пр_аз70, поскольку здесь объект О4 определен по наибольшему количеству пунктов наблюдений.

Т а б л и ц а 1. Распределение невязок экспериментальных и расчетных данных

Профиль	Шифр модели	Всей модели	C_u			C_v		
			max в пункте	количество		max в пункте	Количество	
				пунктов с rms<3	периодов с rms<3		пунктов с rms<3	периодов с rms<3
пр_аз110	m06	2,9	5,9	11	7	7,3	11	7
пр_аз90	m04	2,2	5,7	11	10	3,3	10	10
пр_аз70	m07	2,9	6	13	8	6	13	11
	m13	2,6	4,5	13	8	5,6	15	10

Т а б л и ц а 2. Геоэлектрические параметры проводящих объектов

Объект		О1	О1а	О2	О3	О4
пр_аз110						
Глубина, км	кровли	3	3	12	9	7
	центра	6	4	23	19	14
Ширина, км		18	24	21	27	21
$G \cdot 10^8$, См·м		0,38	0,015	0,59	0,62	0,28
пр_аз90						
Глубина, км	кровли	3	3	20	5	5
	центра	7	5	30	12	9
Ширина, км		16	10	15	21	46 ?
$G \cdot 10^8$, См·м		0,26	0,06	0,2	0,34	0,53 ?
пр_аз70						
Глубина, км	кровли	3/4	4/14	14/18	10/10	7/7
	центра	6/8	5/24	22/24	16/16	12/12
Ширина, км		13/15	12/13	11/18	20/15	17/18
$G \cdot 10^8$, См·м		0,15	0,05/0,36	0,1/0,19	0,06/0,1	0,15/0,15

остальных профилях. Для объекта О3 наблюдается аналогичная ситуация — максимальная величина G на профиле пр_аз110. Как показывают результаты моделирования по трем профилям, объекты О3 и О4 могут представлять части одного более крупного проводящего образования, окруженного изолинией 100 Ом·м. Наиболее проблематично выделение объекта О4 на профилях пр_аз110 и пр_аз90. На первом основная проводящая часть объекта, согласно

Обсуждение результатов. Необходимо отметить, что информация о полученных моделях носит предварительный характер, так как простирание аномальных объектов точно неизвестно. Можно предположить, что наиболее правильному простиранию интерпретационного профиля (по отношению к простиранию аномалеобразующего объекта) должно соответствовать максимальное значение G объекта. В этом случае проекции интерпретационных

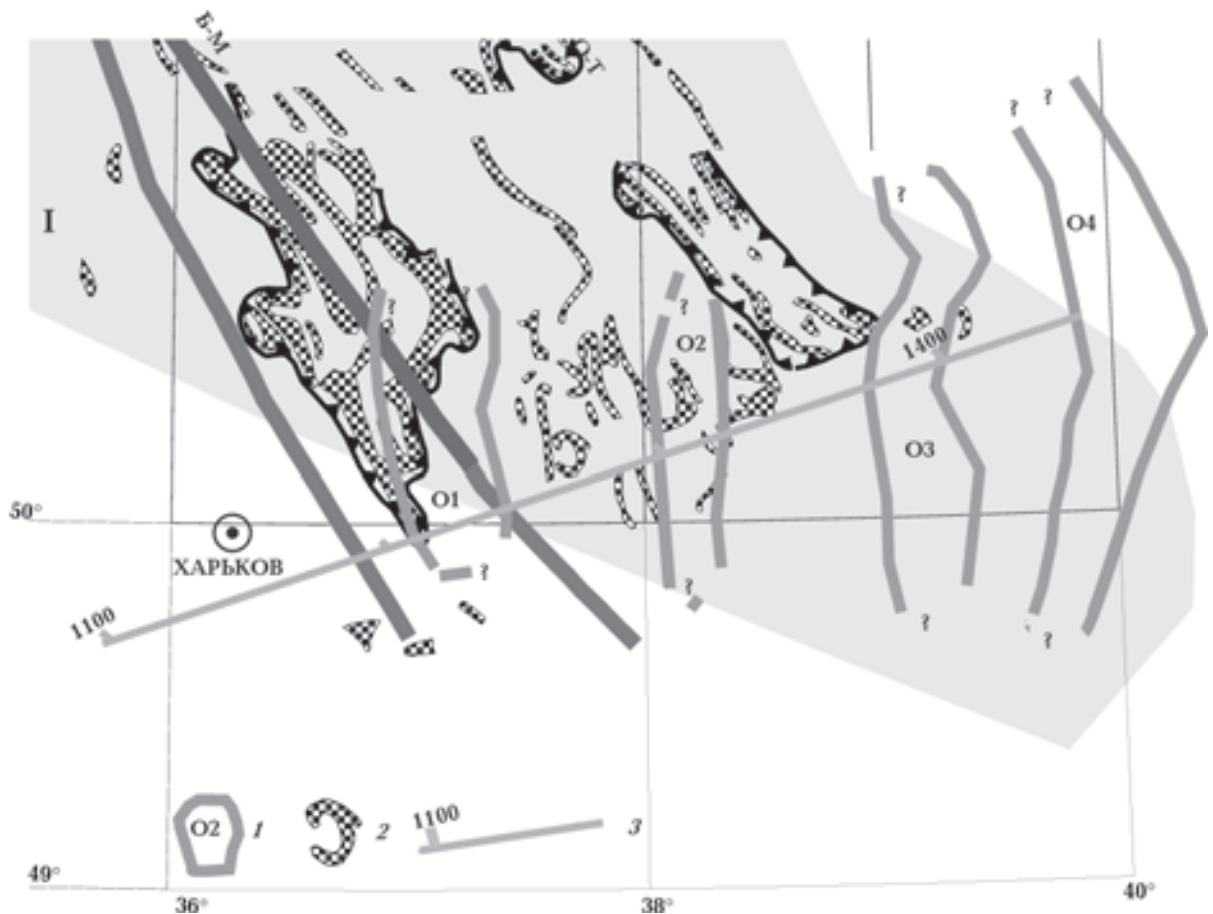


Рис. 4. Основные тектонические структуры ВКМ и объекты пониженного сопротивления (1), железистые кварциты (2) и положение геотраверса «Гранит» (3). Остальные обозначения см. на рис. 1.

параметров будут максимально отражать геоэлектрические характеристики объекта. Исходя из таких предположений, наиболее реальные результаты получены на профиле пр_аз110.

На рис. 4 представлено согласование полученных ОПС (объекты O1 и O1а объединены) с геологическими данными. Объект O1 коррелирует со всеми характерными элементами Белгородско-Михайловского зеленокаменного пояса и Новооскольско-Воронцовского регионального разлома. Отметим, что на севере этой тектонической структуры выделена Курская аномалия электропроводности [Алексанова и др., 2011; Варенцов и др., 2011]. Область объекта O1 располагается в зоне повышенного содержания как железистых кварцитов, так и других рудных элементов [Геология ..., 1992].

Объект O2 коррелирует с железистыми кварцитами, развитыми между Белгород-Михайловским и Орловско-Тимским зеленокаменными поясами. В его северной части находится много рудных месторождений [Геология ..., 1992]. Объект O4 пространственно согласует-

ся с границей между Курским мегаблоком и Лосевской шовной зоной. Для объекта O3 не наблюдается корреляции с известными тектоническими структурами и рудными месторождениями.

Сопоставление ОПС с другими геофизическими данными показывает, что выделенные геоэлектрические объекты коррелируют с объектами, определяющими наблюдаемое постоянное магнитное поле [Геотраверс..., 2002]. Три ОПС (O1, O3 и O4) попадают в область глубинных магнитных объектов, намагниченность которых превышает 4 А/м (рис. 5). Объект O2 намагниченностью 1—4 А/м располагается в краевой части блока пород. Таким образом, предварительный анализ, указывающий на тесную связь ОПС с магнитными объектами, может свидетельствовать о том, что природа этих объектов определяется повышенным содержанием рудных.

Выводы. В результате двумерной инверсии по профилям, расположенным в южной части ВКМ, выделено четыре объекта пониженно-

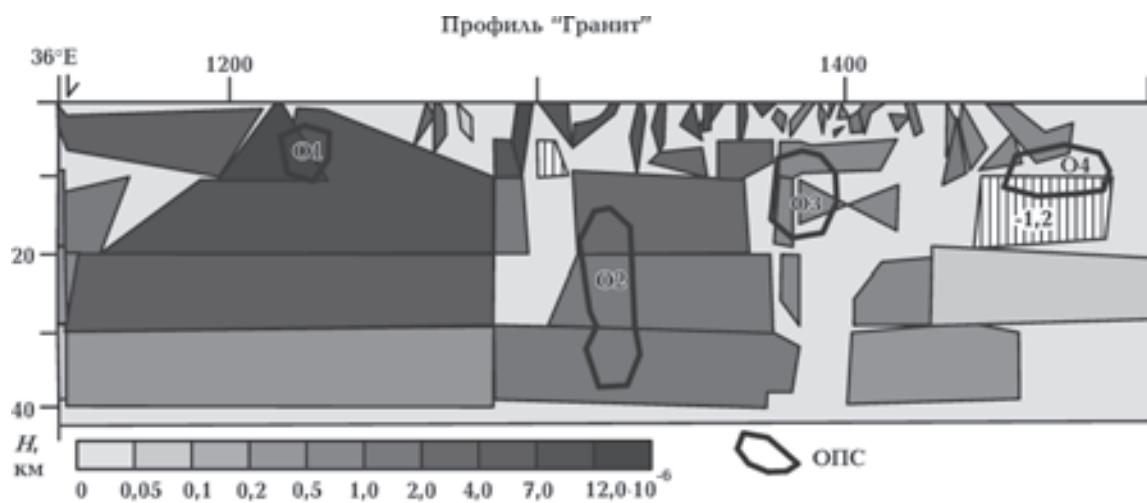


Рис. 5. Сопоставление объектов пониженного сопротивления с объектами магнитных аномалий.

го сопротивления квазимеридионального простирания. Верхняя кромка объекта О1, пространственно связанного с Белгородско-Михайловским зеленокаменным поясом (и распространением железистых кварцитов Курской магнитной аномалии), располагается на глубине 3 км. Объект О2 прослеживается вдоль западного борта Орловско-Тимского зеленокаменного пояса в зоне распространения железистых кварцитов и залегает на глубине 10—35 км. Объект О3 пространственно расположен восточнее

Орловско-Тимского зеленокаменного пояса, не имеет четкой корреляции с тектоническими структурами, глубина залегания кровли составляет около 10 км. Объект О4 пространственно коррелирует с зоной сочленения Курского блока ВКМ с Лосевской шовной зоной и залегает в интервале глубин 7—15 км. Все объекты имеют приблизительно равную ширину около 20 км.

Характеристики аномальных объектов могут быть скорректированы при использовании новых экспериментальных данных.

Список литературы

- Алексанова Е. Д., Баглаенко Н. В., Варенцов И. М., Куликов В. А., Логвинов И. М., Лозовский И. Н., Орлюк М. И., Пушкарев П. Ю., Соколова Е. Ю., Соколов Н. С., Тарасов В. Н., Шустов Н. Л., Яковлев А. Г., Яковлев Д. В., Рабочая группа KIROVOGRAD. Сопоставление геофизических полей в зоне Кировоградской и Курской аномалий электропроводности. В кн.: *Современное состояние наук о Земле*. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 2011. С. 33—37.
- Варенцов Ив. М., Ковачикова С., Куликов В. А., Логвинов И. М., Пушкарев П. Ю., Соколова Е. Ю., Яковлев А. Г., Рабочая группа KIROVOGRAD. Коровые аномалии электропроводности на западном склоне Воронежской антеклизы. В кн.: *Современное состояние наук о Земле*. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 2011. С. 290—295.
- Геология и металлогения юго-западной части Восточно-Европейской платформы (Украинский щит, Воронежский и Белорусский массивы). Масштаб 1:1 000 000. Киев: Геопрогноз, 1992.
- Геотраверс «ГРАНИТ»: Восточно-Европейская платформа — Урал — Западная Сибирь (строение земной коры по результатам комплексных геолого-геофизических исследований). (Ред. С. Н. Кашубин). Екатеринбург: Главное управление природных ресурсов и охраны окружающей среды МПР России по Свердловской области, ФГУГП «Баженовская геофизическая экспедиция», 2002. 312 с.
- Ингеров А. И. Результаты изучения кристаллического фундамента Украинского щита электромагнитными зондированиями: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Днепропетровск, 1989. 16 с.
- Лаганинский Б. Т. Алгоритм обработки данных МТЗ: Тез. докл. Пярых геофизических чтений им. В. В. Федынского, Москва, 27 февраля — 01 марта, 2003 г. Москва: ГЕОН, 2003. С. 134—135.
- Максимов В. М., Ваньян А. Л., Харин Е. П. Магнитовариационная аномалия на Воронежском кристаллическом массиве. *Геомагнитные исследования*. 1976. № 15. С. 90—102.

- Національний Атлас України. Київ: Держ. наук.-вироб. підприємство «Картографія», 2007. 440 с.
- Очерки по геологии СССР (по материалам опорного бурения). Т. 2. Ленинград: Гостоптехиздат, 1957. 254 с.
- Пономарева М. М., Боброва Е. М. Некоторые черты сходства и различия углеродсодержащих сланцев зеленокаменных поясов КМА (на примере Старооскольского и Михайловского железорудных районов Центральной России). В кн.: *Минералогия Докембрия*. Петрозаводск: Ин-т геологии КарНЦ РАН, 2009. С. 314—315.
- Рокитянский И. И. Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. Киев: Наук. думка, 1975. 279 с.
- Слоницкая С. Г., Трегубенко В. И. Результаты высотной аэромагнитной съемки и электроразведки МТЗ по геотраверсу «Гранит». Киев: УТГФ, 1993. 233 с.
- Тарасов В. Н., Логвинов И. М., Горгуенко И. В. Результаты магнитотеллурических исследований юга Воронежской антеклизы. *Доп. НАН України*. 2012. № 10. С. 115—118.
- Чернышев Н. М. Золото-платинометалльное оруденение черносланцевого типа Курско-Воронежского региона (Центральная Россия). Воронеж: Изд-во ВГУ, 2007. 177 с.
- Чернышев Н. М. Минералогия золото-платинометалльного оруденения железорудных месторождений-гигантов КМА (Центральная Россия). *Доклады научной сессии геологического факультета Воронежского государственного университета (4—29 апреля 2011 г.)*. Вып. 1. Воронеж, 2011. С. 3—23.
- Egbert G. D., Booker J. R., 1986. Robust estimation of geomagnetic transfer function. *Geophys. J. Royal Astron. Soc.* 87, 173—194.
- Semenov V. Yu., Pek J., Adam A., Jozwiak W., Ladanyvskyu B., Logvinov I., Pushkarev P., Vozar J., 2008. Electrical structure of the upper mantle beneath Central Europe: Results of the CEMES project. *Acta Geophysica* 56(4), 957—981.
- Siripunvaraporn W., Egbert G., 2000. An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data. *Geophysics* 65(3), 791—803.
- Varentsov Iv. M., 2007. Joint robust inversion of MT and MV data. In: Spichak V. V. (Ed.), *Electromagnetic sounding of the Earth's interior (Methods in geochemistry and geophysics, 40)*. Elsevier. P. 189—222.
- Wieladek R., Ernst T., 1977. Application of the method of least squares to determining impulse responses and transfer functions. *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci.* G-1(110), 3—11.

Geoelectric studies of the south Voronezh crystalline massif

© I. M. Logvinov, V. I. Tregubenko, V. N. Tarasov, 2014

The first results of interpretation of magnetic variation data, focused on the three profiles in the southern part of the Voronezh crystalline massif by the two-dimensional inversion have been presented. Several objects of low resistance, the roof of which is located at the depth of less than 10 km have been subdivided. The most reliable object spatially correlates with the Belgorod-Mikhailovsk greenstone belt (and the spread of ferruginous quartzites of the Kursk Magnetic Anomaly).

Key words: electrical conductivity, the crust Voronezh Massif.

References

- Aleksanova E. D., Baglaenko N. V., Varencov I. M., Kulokov V. A., Logvinov I. M., Lozovskiy I. N., Orluk M. I., Pushkarev P. Yu., Sokolova E. Yu., Tarasov V. N., Shustov N. L., Yakovlev A. G., Yakovlev D. V., Working Group KIROVOGRAD, 2011. The comparison of geophysical fields in the Kirovograd region and Kursk conductivity anomalies. In: *The current state of Earth Sciences*. Moscow: MSU Publ. P. 33—37. (in Russian).
- Varencov Iv. M., Kovachikova S., Kulokov V. A., Logvinov I. M., Pushkarev P. Yu., Sokolova E. Yu., Yakovlev A. G., Yakovlev D. V., Working Group KIROVOGRAD, 2011. Crustal conductivity anomaly on the western slope of the Voronezh antecline. In: *The current state of Earth Sciences*. Moscow: MSU. Publ. P. 290—295. (in Russian).
- Geology and metallogeny of the southwestern part of the East European Platform (Ukrainian Shield and Voronezh, and the Belarusian massifs), 1992. 1:1 000 000. Kiev: Geoprognoz (in Russian).
- Geotraverse «GRANIT»: East European platform — Ural

- Western Siberia (the crustal structure on the results of complex geological and geophysical studies). Ed. S. N. Kashubin, 2002. Yekaterinburg: Main Department of Natural Resources and Environmental Protection, Ministry of Russia in Sverdlovsk region, FGUGP «Bazhenov Geophysical Expedition», 312 p. (in Russian).
- Ingepov A. I., 1989. Results of the study of the crystalline basement of the Ukrainian shield electromagnetic soundings: Cand. geol. and min. sci. diss. Dnipropetrovsk, 16 p. (in Russian).
- Ladanivsky B. T., 2003. MTS data processing algorithm: *Abstracts of the 5th geophysical readings name after V. V. Fedynskiy*. Moscow, February 27 — March 1, 2003. Moscow: GEON, P. 134—135 (in Russian).
- Maksimov V. M., Van'yan L. L., Kharin E. P., 1976. Magnetic variation anomaly in the Voronezh crystalline massif. *Geomagnitnye issledovaniya* (15), 90—102. (in Russian).
- National Atlas of Ukraine, 2007. Kyiv: State research and production enterprise «Cartography», 440 p. (in Ukrainian).
- Essays on the Geology of the USSR (based on the support of drilling). V. 2, 1957. Leningrad: Gostoptehizdat, 254 p. (in Russian).
- Ponomarev M. M., Bobrova E. M., 2009. Some similarities and differences of carbonaceous shale greenstone belts KMA (for example, Staroskol'sky and Mikhailovsky iron ore regions of Central Russia) In: *Minerageniya Precambrian*. Petrozavodsk: Institute of Geology, Karelian Research Centre RAS Publ., P. 314—315. (in Russian).
- Rokityanskiy I. I., 1975. Investigation of the electrical conductivity anomalies by magnetovariational profiling. Kiev: Naukova Dumka, 175 p. (in Russian).
- Slonitskaya S. G., Tregubenko V. I., 1993. Results altitudinal aeromagnetic and electrical MTZ Geotraverse «Granite». Kiev: UTGF, 233 p. (in Russian).
- Tarasov V. N., Logvinov I. M., Gordienko I. V., 2012. Results magnetotelluric investigations south of Voronezh anticline. *Dopovidi NAN Ukraine* (10), P. 115—118. (in Russian).
- Chernyshev N. M., 2007. Gold-PGE mineralization in black shale type Kursk, Voronezh Region (Central Russia). Voronezh: Publishing House Voronezh State University, 177 p. (in Russian).
- Chernyshev N. M., 2011. Mineralogy of gold-PGE mineralization of iron ore deposits giant CMA (Central Russia). *Reports of the Scientific Session of the Geology Department of the Voronezh State University (April 4—29 2011)*. Is. 1. Voronezh: Publishing House VSU, P. 3—23. (in Russian).
- Egbert G. D., Booker J. R., 1986. Robust estimation of geomagnetic transfer function. *Geophys. J. Royal Astron. Soc.* 87, 173—194.
- Semenov V. Yu., Pek J., Adam A., Jozwiak W., Ladanyvskyy B., Logvinov I., Pushkarev P., Vozar J., 2008. Electrical structure of the upper mantle beneath Central Europe: Results of the CEMES project. *Acta Geophysica* 56(4), 957—981.
- Siripunvaraporn W., Egbert G., 2000. An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data. *Geophysics* 65(3), 791—803.
- Varentsov Iv. M., 2007. Joint robust inversion of MT and MV data. In: Spichak V. V. (Ed.), *Electromagnetic sounding of the Earth's interior (Methods in geochemistry and geophysics, 40)*. Elsevier. P. 189—222.
- Wieladek R., Ernst T., 1977. Application of the method of least squares to determining impulse responses and transfer functions. *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci.* G-1(110), 3—11.