

Синхронные магнитотеллурические и магнитовариационные зондирования на западном склоне Воронежского массива

© *Ив. М. Варенцов*¹, *С. Ковачикова*², *В. А. Куликов*^{3,4}, *И. М. Логвинов*⁵,
*В. И. Трегубенко*⁶, *А. Г. Яковлев*^{3,4}, *Рабочая группа KIROVOGRAD, 2012*

¹Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли РАН,
Москва, Россия

²Геофизический институт Чешской АН, Прага, Чехия

³Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴ООО «Северо-Запад», Москва, Россия

⁵Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

⁶УкрГГРИ, Киев, Украина

Поступила 8 мая 2012 г.

Представлено членом редколлегии В. В. Гордиенко

У статті видається міжнародний проект синхронного електромагнітного зондування KIROVOGRAD, що ставить своєю метою вивчення геоелектричної будови літосфери західного схилу Воронежського кристалічного масиву та суміжних територій Росії і України за допомогою передових схем глибинного площадкового зондування з природними полями, а також геолого-геофізичне тлумачення виявлених в його межах корових аномалій електропровідності. Обговорюються передісторія, цілі, завдання і організаційна структура проекту, методичні і технологічні інновації в ході його виконання, дається огляд отриманих на цьому етапі результатів і обговорюються перспективи подальших досліджень. Представлені карти найважливіших інваріантів магнитотеллуричних і магнітоваріаційні передатних операторів в регіоні від Московської синеклізи до Дніпровсько-донецької западини і від кордонів з Білорусією до ж/к Москва—Харків. Показані геоелектричні розрізи уздовж серії широтних профілів і карти сумарної подовжньої провідності осадового чохла і земної кори території досліджень за результатами 2D+ і квазі-3D інтерпретацій отриманих даних. Демонструється складне зчленування трьох квазілінійних корових аномалій — Кіровоградської, Курської і Кірово-Барятинської.

This paper presents the international project KIROVOGRAD studying the geoelectrical structure of the western slope of the Voronezh Massive in Russia and Ukraine by means of the advanced simultaneous deep electromagnetic sounding array with natural field excitation and geological and geophysical analysis of the nature of the revealed crustal conducting anomalies. We discuss the history, goals, tasks and organizing structure of the project, methodical and technological innovations applied, the achieved results and perspective plans. Maps of the most important invariants of magnetotelluric and magnetovariational transfer functions are presented in the area from the Moscow Syncline to the Dnepr-Donetsk Trough and from Belorussian borders to the railway Moscow-Kharkov. Geoelectrical sections along the series of profiles and maps of sedimentary and crustal conductance obtained from 2D+ and quasi-3D data interpretations are shown. The complex junction of three quasi-linear crustal anomalies – Kirovograd, Kursk and Kirov-Bariatino is demonstrated.

Введение. Проект KIROVOGRAD был начат в 2006 г. по инициативе И. М. Варенцова, И. М. Логвинова и А. Г. Яковлева и первоначально ставил ограниченную задачу прослеживания на территории юго-западной России северного продолжения Кировоградской коровой аномалии электропроводности (КрВА). Кировоградская аномалия выявлена на Украинском щите (УЩ) по результатам многолетних магнитова-

риационных (МВ) исследований [Рокитянский и др., 1969; Рокитянский, 1975; Rokityansky et al., 1999]. Она прослежена вдоль меридианов 33-34° в.д. на протяжении ~600 км от Черного моря до Днепро-Донецкой впадины (ДДВ) и далее по северу Украины как отчетливая линейная структура на глубине ниже 15 км шириной свыше 50 км с сопротивлением <10 Ом·м. Известна целая серия геоэлектрических моделей

этой зоны по результатам 2D [Баглаенко и др., 1996; Логвинов, Тарасов, 2005] и 3D [Бурахович, Кулик, 1999; Азаров и др., 2006; Гордиенко и др., 2005] интерпретации МВ данных. КрВА попадает в зону сочленения палеопротерозойского Кировоградского и архейского Приднепровского мегаблоков УЩ [Карта ..., 1992; Bogdanova et al., 2006]. Аномальные объекты такого масштаба свидетельствуют о трансрегиональных геодинамических процессах, ассоциируемых с целым рядом месторождений полезных ископаемых (железных и полиметаллических руд, графита и др.). Природа аномальной электропроводности КрВА связывается [Баглаенко и др., 1996; Белявский и др., 2001; Гордиенко и др., 2002; 2005; 2006; Азаров и др., 2006; Логвинов, Гордиенко, 2011] как с присутствием на средне- и нижнекоровых глубинах графитизированных и (или) сульфидизированных метаосадков, так и с процессом современной платформенной активизации, приводящим к флюидизации нижней коры.

Возможность северного продолжения КрВА вдоль Западно-Ингулецко-Белопольско-Навлинской и Криворожско-Крупецкой разломных зон (рис. 1) предполагалась рядом исследователей [Рокитянский, 1975; Гордиенко и др., 2005; Кулик, 2009], однако изученность российской части западного склона Воронежского массива (ВМ) методами электромагнитного (ЭМ) зондирования долгие годы оставалась крайне низкой. Ситуация изменилась с созданием в 1990-х годах в Калужской области в окрестности г. Юхнова (д. Александровка) геофизической базы Геологического факультета МГУ и геофизической компании ООО «Северо-Запад». Эта база стала центром не только геофизических практик МГУ, но и разносторонних региональных геофизических исследований, прежде всего, ЭМ зондирований [Хмелевской и др., 1999]. В ходе геофизических практик южнее Юхнова в зоне Барятинской магнитной аномалии (БМА) была выявлена Кирово-Барятинская аномалия коровой электропроводности (КбрА) с сопротивлением в десятки омметров на глубине 15—25 км [Александрова и др., 2010], а при геофизических работах в окрестности Курской АЭС (г. Курчатова) — Курская аномалия (КурА). Ограниченный масштаб данных исследований не позволял делать предположения о линейной структуре КбрА и КурА, однако, они были расположены в зоне возможного продолжения КрВА.

Проект KIROVOGRAD объединил усилия ученых ЦГЭМИ ИФЗ РАН, ИГФ НАН Украины, Геологического факультета МГУ и ООО

«Северо-Запад» по интеграции магнитотеллурических (МТ) и МВ данных, имевшихся на территории 49—55° в.д. и 30—37° в.д. (рис. 1, малые черные кружки) [Слоницкая, Трегубенко, 1993; Baysarovich et al., 1998; Хмелевской и др., 1999; Rokityansky et al., 1999; Гордиенко и др., 2005; 2006; Александрова и др., 2010]. По мере накопления и анализа этих данных была поставлена более амбициозная *главная задача* проекта — систематическое исследование глубинного геоэлектрического строения западного склона ВМ и комплексное изучение природы аномальных структур. Летом 2007 г. российскими участниками проекта был начат первый субширотный профиль синхронного ЭМ зондирования НАВЛЯ (по ~53,0° с.ш.), выявивший коровые геоэлектрические структуры северного простирания в зоне предполагаемого продолжения КрВА. Началось планирование дальнейших зондирований на серии российских и российско-украинских профилей. К проекту подключились ученые из УкрГГРИ и Геофизического института Чешской АН, работы приобрели масштаб многостороннего международного сотрудничества. Рабочая группа KIROVOGRAD объединила участников проекта, внесших существенный вклад в его успешную реализацию: Геологический факультет МГУ и ООО «Северо-Запад» (В. А. Куликов, А. Г. Яковлев, Е. Д. Александрова, М. И. Верещагина, И. Н. Лозовский, Е. В. Мойланен, П. Ю. Пушкарев, В. К. Хмелевской, Н. Л. Шустов, Д. В. Яковлев), ГФИ Чешской АН (С. Ковачикова, Й. Пек), ИГФ НАНУ (И. М. Логвинов, В. В. Гордиенко, И. В. Гордиенко, В. Н. Тарасов, И. И. Рокитянский, А. В. Терешин), УкрГГРИ (В. И. Трегубенко, О. А. Марченко), ЦГЭМИ ИФЗ РАН (Ив. М. Варенцов, Л. М. Абрамова, Н. В. Баглаенко, Е. Ю. Соколова). Финансирование исследований осуществлялось за счет бюджетов организаций-участников проекта, российских, российско-украинских и чешских грантов, экспедиционных программ НАНУ и РАН, а также межакадемических программ научного обмена.

Область исследований очень сложна для проведения зондирований, поскольку характеризуется разнообразными по природе и весьма интенсивными индустриальными ЭМ шумами. Они порождаются электрифицированными ж/д, трансъевропейской системой магистральных трубопроводов, мощными электростанциями (включая Смоленскую и Курскую АЭС) и высоковольтными ЛЭП. Особенно вредоносны регионально коррелируемые шумы вдоль ж/д и трубопроводов. Труд-

ности исследований усугубляются сложным геоэлектрическим строением региона, прежде всего, существенной интерференцией МТ и МВ откликов от разнонаправленных токовых систем в КрВА и осадках ДДВ, затрудняющей применение в его южной части наиболее развитых схем 2D интерпретации данных. В этой связи *второй задачей* проекта KIROVOGRAD стала реализация передовых синхронных методов и технологий проведения комплексных МТ и МВ зондирований, обеспечивающих существенное подавление ЭМ шумов (в том числе регионально коррелируемых) и надежное оценивание сразу трех передаточных операторов: МТ импеданса, МВ типпера (векторов индукции) и горизонтального МВ отклика с последующей их совместной интерпретацией с помощью методов устойчивого решения обратных задач, учитывающих трехмерность получаемых МТ/МВ данных. Такой подход последовательно развивался в ЦГЭМИ ИФЗ РАН [Varentsov, 2005; 2007a, b; Варенцов, 2006; 2011] и получил практическую реализацию в крупных европейских проектах синхронного ЭМ зондирования BEAR на Балтийском щите [Varentsov et al., 2002; Варенцов и др., 2003; 2006] и EMTESZ-Pomerania в пределах Балтийского сегмента зоны TESZ [Varentsov, 2005; Varentsov et al., 2005; Ernst et al., 2008; Dehkordi et al., 2010]. Проект KIROVOGRAD стал первым примером масштабного применения современных методов синхронного МТ/МВ зондирования на постсоветском пространстве. До этого технологии синхронного МТ зондирования применялись на территории Украины в единичных случаях и только при разведочных исследованиях. Здесь имелся значительный опыт проведения синхронных МВ зондирований с интерпретацией горизонтальных откликов [Рокитянский и др., 1969; Рокитянский, 1975; Баглаенко и др., 1996], однако он был ограничен экспериментами с аналоговой аппаратурой 1960—1980-х годов.

Наконец, *третья задача* проекта KIROVOGRAD была педагогической и заключалась в углублении программы учебных практик на Александровской геофизической базе, вовлечении студентов в реальный научный эксперимент, опирающийся на передовые аппаратные разработки и методические решения, обеспечении их дальнейших курсовых и дипломных работ актуальными темами и высококачественными геофизическими данными.

При дальнейшем изложении мы последовательно остановимся на деталях построения

массива зондирований KIROVOGRAD, стратегии оценивания и анализа передаточных операторов МТ и МВ полей, площадной структуре их важнейших инвариантов, методике и результатах построения 2D и квази-3D геоэлектрических моделей и заключительных замечаниях о природе выявленных аномалий электропроводности и перспективах дальнейших исследований. Первые результаты проекта KIROVOGRAD уже были представлены в материалах крупных конференций [Александрова и др., 2011; Варенцов и др., 2011a—b], тем не менее настоящая статья — первая публикация, затрагивающая всю его методическую проблематику и охватывающая важнейшие результаты.

Массив синхронных МТ/МВ зондирований KIROVOGRAD. Зондирования массива KIROVOGRAD в достаточно законченном виде проведены на серии из пяти субширотных профилей: трех российских — КИРОВ (по 54,0° с.ш.), ЖИЗДРА (по 53,7° с.ш.) и НАВЛЯ (по 53,0° с.ш.) и двух российско-украинских: СУЗЕМКА (по 52,3° с.ш.) и ШОСТКА (по 51,9° с.ш.). Еще один совместный профиль ОБОЯНЬ (по 51,2° с.ш.) отработан только с российской стороны. Массив дополнен первыми украинскими синхронными зондированиями 2006 г. на профиле ДДВ вдоль оси впадины, а также отдельными пунктами, находящимися вне упомянутых выше профилей и выполненными как в период эксперимента, так и в течение двух предшествующих лет (2004—2005). Профиль ЖЕЛЕЗНОГОРСК (по ~53,4° с.ш.) был начат в 2011 г. и должен быть закончен осенью 2012 г.; самый северный российский профиль БАРЯТИНО (по ~54,5° с.ш.) также начат в 2011 г. и должен быть завершен в 2013 г. Новый российский профиль БРЯНСК (по ~53,4° с.ш.) отработан в июне 2012 г. Украинский профиль ХАРЬКОВ (к юго-востоку от этого города) выполнен в 2011 г., однако обработка данных на нем еще не закончена и в настоящей статье на нем представлены только горизонтальные МВ отклики. В целом, массив KIROVOGRAD включает более 130 МТ/МВ зондирований (рис. 1, большие черные кружки).

Регистрация ЭМ полей велась синхронно по отдельным группам полевых точек и базовых пунктов с помощью разнородного парка цифровой аппаратуры. В качестве базовых МВ пунктов, используемых как удаленные при помехоподавляющей многоточечной обработке данных и для синхронизации данных по всему массиву, использовались геомагнитная обсер-

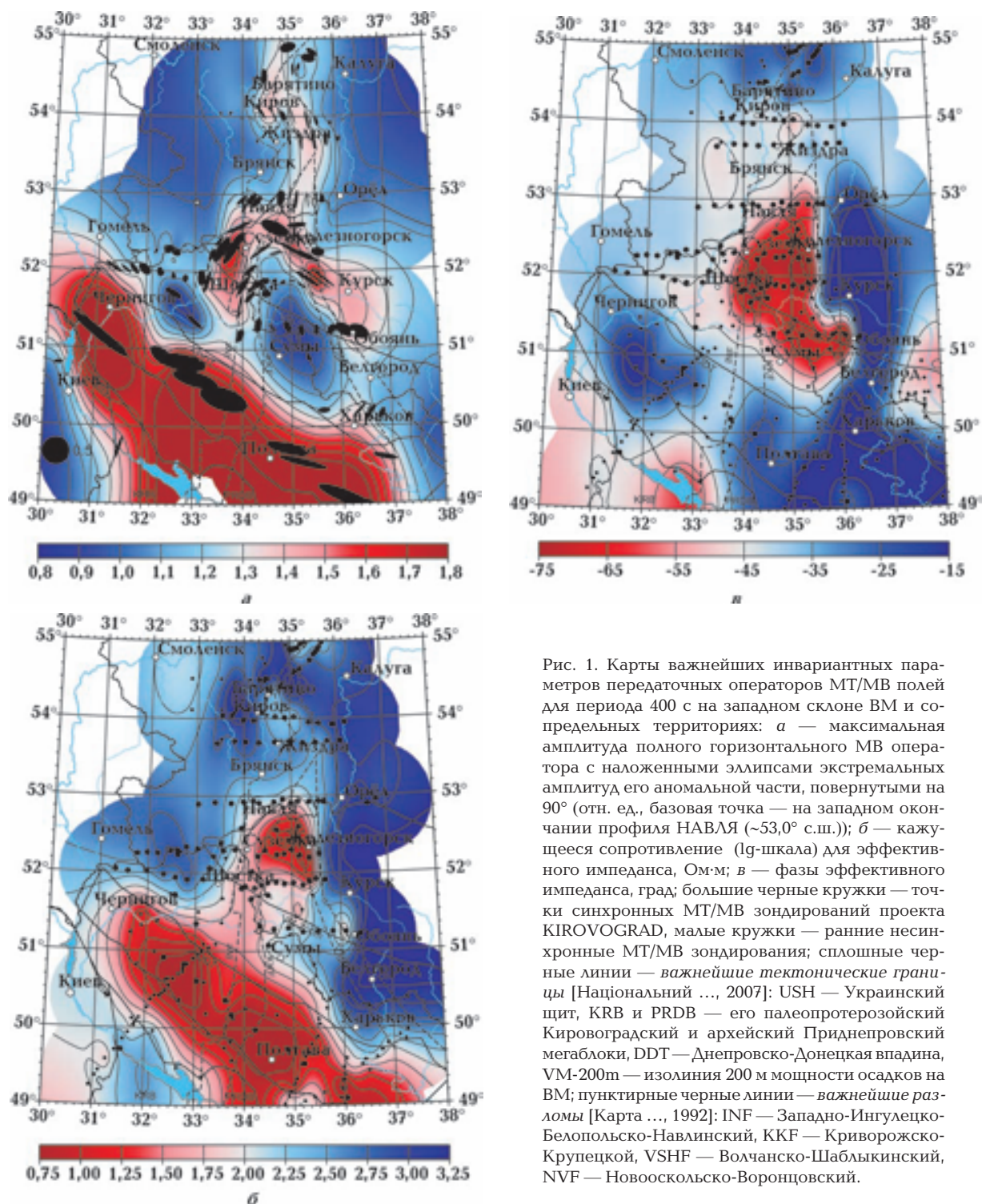


Рис. 1. Карты важнейших инвариантных параметров передаточных операторов МТ/МВ полей для периода 400 с на западном склоне ВМ и сопредельных территориях: а — максимальная амплитуда полного горизонтального МВ оператора с наложенными эллипсами экстремальных амплитуд его аномальной части, повернутыми на 90° (отн. ед., базовая точка — на западном окончании профиля НАВЛЯ (~53,0° с.ш.)); б — кажущееся сопротивление (lg-шкала) для эффективного импеданса, Ом·м; в — фазы эффективного импеданса, град; большие черные кружки — точки синхронных МТ/МВ зондирований проекта KIROVOGRAD, малые кружки — ранние несинхронные МТ/МВ зондирования; сплошные черные линии — важнейшие тектонические границы [Национальный ..., 2007]; USH — Украинский щит, KRB и PRDB — его палеопротерозойский Кировоградский и архейский Приднепровский мегаблоки, DDT — Днепровско-Донецкая впадина, VM-200m — изолиния 200 м мощности осадков на ВМ; пунктирные черные линии — важнейшие разломы [Карта ..., 1992]: INF — Западно-Ингулецко-Белопольско-Навлинский, ККФ — Криворожско-Крупецкой, VSHF — Волчанско-Шаблыкинский, NVF — Новооскольско-Воронцовский.

ватория «Киев» (KIV, ИГФ НАНУ) и стационарные пункты МВ наблюдений в г. Балаклея (BLK, УкрГГРИ) и д. Александровке (ALX, геофизическая база МГУ). Наблюдения в них были востребованы в течение всех (KIV), большинства (ALX) и ряда (BLK) полевых сезонов.

Российской стороной применялась канадская аппаратура Phoenix MTU5 с индукционными магнитными датчиками, наблюдения в полевых точках продолжались 2—3 суток, расстояния между точками вдоль профилей составляли 10—20 км. Измерительные оси ори-

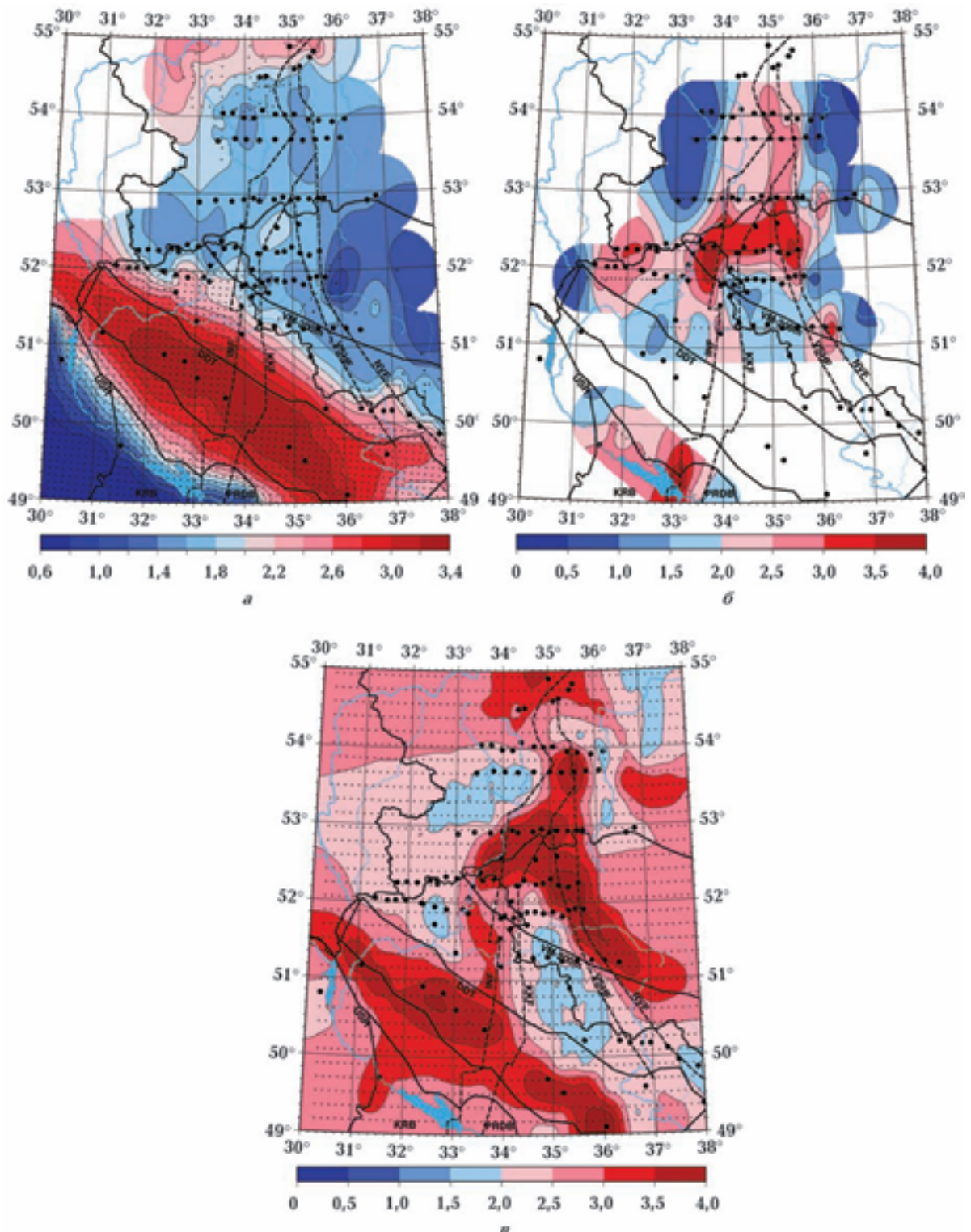


Рис. 4. Карты суммарной продольной проводимости (lg-шкала) на западном склоне ВМ и сопредельных территориях. См: *а* — осадочный чехол по эффективным оценкам в точках синхронных зондирований KIROVOGRAD (черные кружки) и результатам комплексного анализа ранее полученных электроразведочных данных (крестики); *б* — земная кора в диапазоне глубин 15—50 км по результатам 2D+ инверсии 8-компонентных ансамблей МТ/МВ данных (крестики — точки оценивания на профилях зондирований KIROVOGRAD); *в* — земная кора в пленочной аппроксимации (глубина пленки — 20 км) по результатам квази-3D инверсии данных горизонтального МВ отклика для синхронных зондирований KIROVOGRAD (крестики — центры ячеек инверсии). Легенда тектонических границ (черные линии) дана на рис. 1.

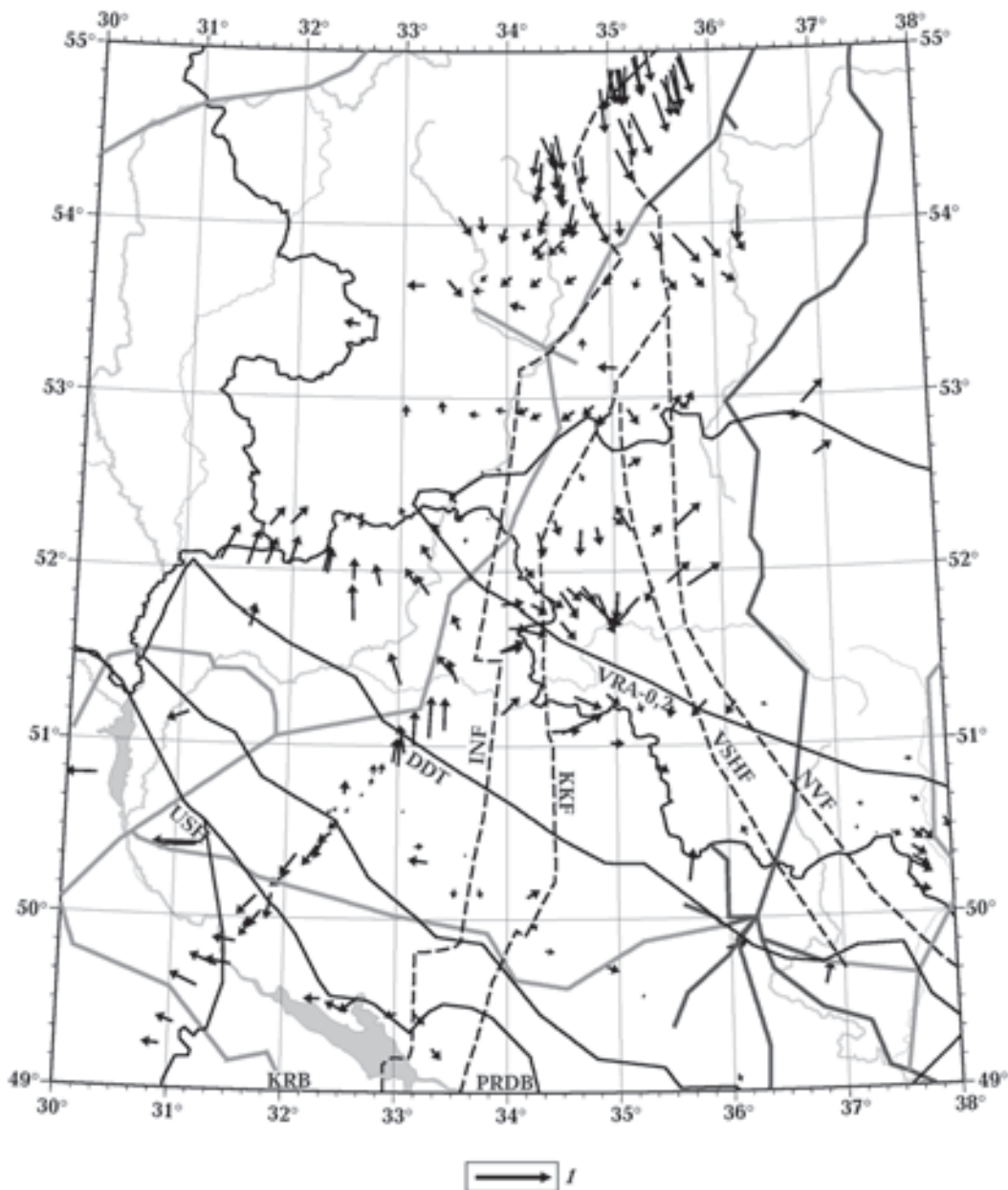


Рис. 2. Карта действительных векторов индукции для периода 400 с, собранных в базе данных эксперимента KIROVOGRAD: I — вектор единичной длины показан ниже карты, серые линии — электрифицированные железные дороги (светлые — на переменном токе, более темные — на постоянном). Легенда тектонических границ (черные линии) дана на рис. 1.

ентировались по GPS: x — на географический север, y — на географический восток. Аналогичная аппаратура использовалась в базовом пункте ALX. Частота дискретизации в режиме непрерывной записи составляла 15 Гц. Одновременно работало до четырех станций. Перед началом и в конце каждой полевой кампании выполнялись тесты идентичности участвовав-

ших инструментов. Летом 2011 г. в четырех самых восточных точках профиля КИРОВ и в пункте ALX велась параллельная регистрация (с такой же продолжительностью и частотой дискретизации 1 Гц) длиннопериодными украинскими станциями LEMI-417 с феррозондовыми магнетометрами [Корепанов, Трегубенко, 2009]. Точность сопоставления результатов

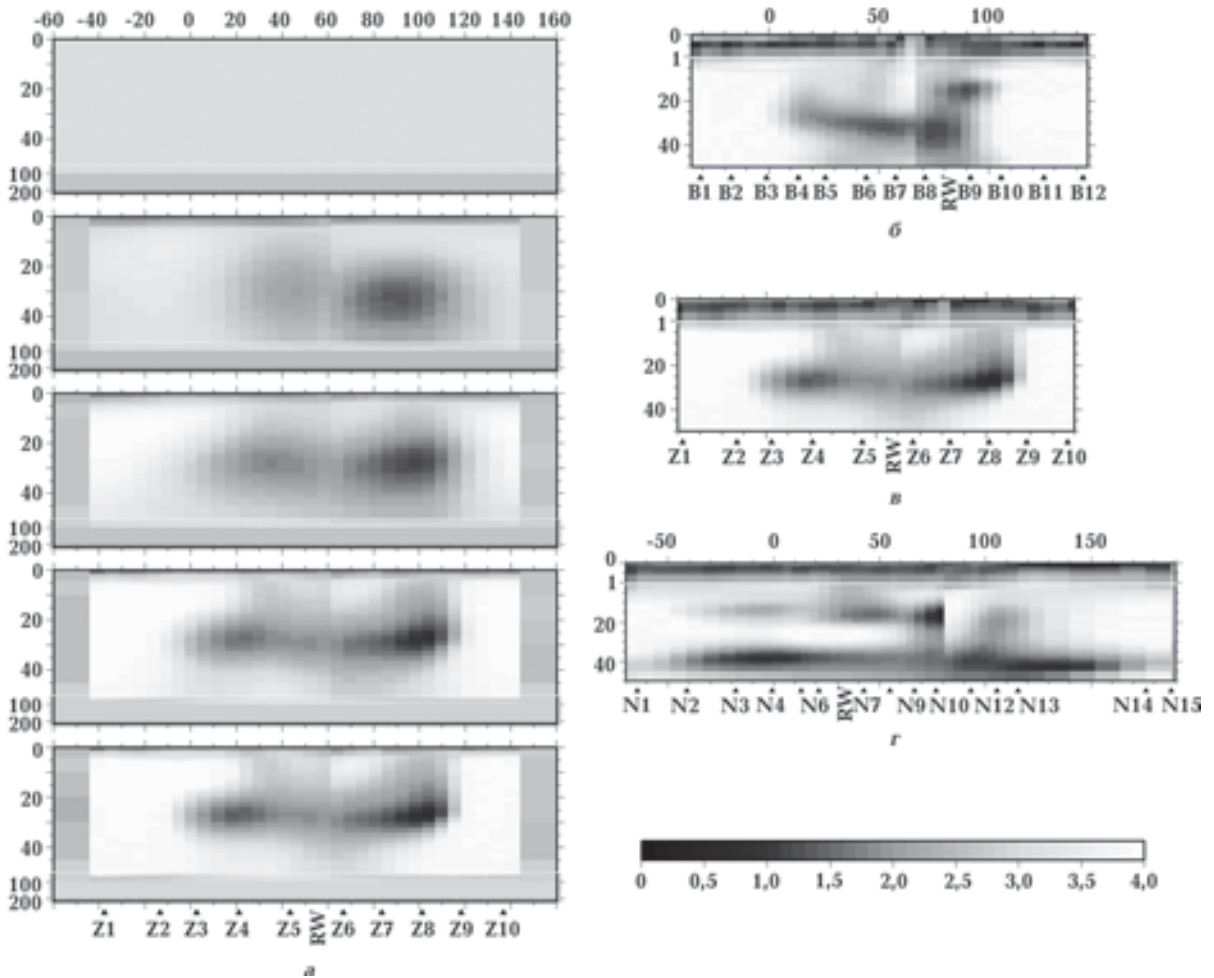


Рис. 3. Результаты 2D+ инверсии 8-компонентного ансамбля МТ/МВ данных на северных профилях эксперимента KIROVOGRAD: *a* — разрезы сопротивления, Ом·м (lg-шкала, в нижней части модели другой вертикальный масштаб) на профиле ЖИЗДРА для различных итераций решения обратной задачи (сверху вниз 0, 22, 38, 58 и 68); *б* — *г* — итоговые разрезы электрического сопротивления, Ом·м (lg-шкала, в верхней части модели мощностью 1 км другой вертикальный масштаб) для профилей КИРОВ (*б*), ЖИЗДРА (*в*) и НАВЛЯ (*г*); начало горизонтальных координат, км — на меридиане 34° в.д.; RW указывает на положение ж/д Москва—Киев.

зондирований Phoenix и LEM1 оказалась весьма высокой и для столь короткого интервала наблюдения ни одна из станций не имела существенного преимущества в длиннопериодном диапазоне от 15 с до 1 ч.

Украинской стороной использовались три длиннопериодные станции (одна производства ИГФ Польской АН с кварцевыми датчиками системы Боброва и две украинские — GEOMAG с феррозондовыми магнетометрами). Регистрация в полевых точках велась примерно одну неделю с интервалами дискретизации 1—10 с. Измерительные оси ориентировались: *x* — на геомагнитный север, *y* — на геомагнитный восток. МВ наблюдения в обсерватории KIV и на

стационарном пункте ВЛК производились украинскими обсерваторскими феррозондовыми магнетометрами LEM1 [Корепанов, Трегубенко, 2009] с дискретизацией 1 с.

Процедуры синхронного оценивания передаточных операторов МТ/МВ полей. В подавляющем большинстве пунктов наблюдения получены кондиционные 5-компонентные записи ЭМ поля, синхронные еще с 1—3 полевыми точками и 1—2 базисными МВ пунктами (обычно KIV и ALX). По этим данным осуществлялось оценивание двух локальных передаточных операторов — МТ импеданса \hat{Z} и МВ типпера W_z :

$$E_h(\mathbf{r}_i) = \hat{Z}(\mathbf{r}_i) H_h(\mathbf{r}_i), \quad H_z(\mathbf{r}_i) = W_z H_h(\mathbf{r}_i), \quad (1)$$

и синхронных горизонтальных МВ операторов — полного \hat{M} и аномального \hat{M}^a :

$$\mathbf{H}_h(\mathbf{r}) = \hat{M}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_b) \mathbf{H}_h(\mathbf{r}_b), \quad \hat{M}^a = \hat{M} - \hat{I}, \quad (2)$$

здесь \mathbf{r}_i и \mathbf{r}_b — полевая и базовая точки наблюдения, \hat{I} — единичный оператор, а индексы h и z указывают на горизонтальные и вертикальные ЭМ поля.

Оценивание во всех пунктах зондирования приоритетно велось в рамках многоточечной схемы [Varentsov, 2007a], в которой алгоритмы когерентностной отбраковки и многоуровневого робастного осреднения частных оценок передаточных операторов (многооконного и multi-RR) [Варенцов и др., 2003] усилены дополнительными средствами отбраковки искаженных оценок на основе критериев ограниченной пространственной и частотной изменчивости горизонтальных МВ откликов между точкой зондирования и имеющимися синхронными удаленными (RR) точками. Такой подход позволяет эффективно подавлять как локальные, так и регионально коррелируемые шумы и, кроме того, концентрировать оценивание на отрезках записей с благоприятной — «планарной» структурой возбуждения естественного ЭМ поля. Он успешно применен при обработке данных эксперимента BEAR [Варенцов и др., 2003; 2006] и особенно в эксперименте EMTESZ-Pomerania [Varentsov et al., 2005; Varentsov, 2005; 2007a], где характер и интенсивность ЭМ шумов (прежде всего, от ж/д на постоянном токе в Польше и окрестностях г. Берлина) сопоставимы с условиями в проекте KIROVOGRAD.

Представленная схема обработки синхронных МТ/МВ данных массива KIROVOGRAD реализована в ЦГЭМИ ИФЗ РАН и внедрена в ИГФ НАНУ и УкрГГРИ. Ее применение для российских зондирований позволило получить почти везде надежные оценки импеданса для периодов 0,5—3000 с, типперов для 2—2000 с и горизонтальных МВ откликов для 30—4000 с. Проблемы качества оценивания импеданса и типпера имели место в точках, ближайших к ж/д на постоянном токе — на самом западе массива вдоль ж/д Москва—Харьков и на профиле КИРОВ на пересечении с ж/д Москва—Киев (рис. 2), но и в них получены удовлетворительные оценки горизонтального МВ оператора, наиболее иммунного к искажениям от субгоризонтальных возбудителей ЭМ шумов.

Для российских зондирований параллельно выполнялось традиционное двухточечное RR-оценивание импеданса и типпера с помощью фирменной технологии Phoenix с последую-

щим построением сглаживающих сплайнов по технологии Correct ООО «Северо-Запад». Так обрабатывались все три частотных диапазона регистрации Phoenix, результаты представлялись в диапазоне периодов 0,004—2000 с. Для зондирований в точках с умеренным уровнем ЭМ шума оценки по двум различным схемам в диапазоне 0,5—2000 с практически не различались, в этом случае строились средние оценки, обеспечивающие расширенный диапазон периодов. Однако при вхождении в «шумные» зоны преимущества многоточечной схемы ЦГЭМИ ИФЗ РАН становились очевидными как в интервале низкой энергетики естественного ЭМ поля (0,5—50 с), так и на длинных периодах (после 500 с). Кроме того, только методика ЦГЭМИ ИФЗ РАН позволяла оценить горизонтальные МВ отклики.

Для украинских зондирований последовательно применялась лишь схема обработки ЦГЭМИ ИФЗ РАН. Здесь в каждой полевой точке дополнительно анализировались синхронные записи с двух других точек зондирования и с 1-2 базовых пунктов (обычно KIV и ALX, но иногда и BLK). Почти во всех точках надежные оценки импеданса получены для периодов 15—10000 с, типперов для периодов 30—8000 с и горизонтальных МВ откликов для периодов 60—15000 с.

Первоначально все оценки горизонтального МВ оператора были представлены относительно обсерватории KIV. Однако все МВ поля в ней имеют заметную аномальную часть, обусловленную токами в осадках ДДВ и в ближайших коровых аномалиях УЩ. Поэтому горизонтальные МВ отклики пересчитывались относительно точек (интерпретационных баз), расположенных на большем удалении от геоэлектрических неоднородностей — относительно самой западной точки на профиле НАВЛЯ или самой восточной на профиле КИРОВ:

$$\hat{M}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_a) = \hat{M}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_b) \hat{M}(\mathbf{r}_b, \mathbf{r}_a), \quad (3)$$

здесь \mathbf{r}_a и \mathbf{r}_b — новая и старая базовые точки. «Транзитивное» соотношение (3) также использовалось для контроля качества горизонтальных МВ откликов [Варенцов и др., 2003], например, путем сравнения оценок, полученных относительно ALX или BLK и затем пересчитанных относительно KIV, с прямыми определениями относительно KIV.

Интеграция результатов локальных МТ/МВ зондирований прошлых лет. В массив KIROVOGRAD включены точки зондирований, в которых имелись *полные* и достаточно надежные

оценки операторов импеданса и (или) типпера. Подобные зондирования (с учетом отсутствия горизонтальных МВ откликов) могли анализироваться и интерпретироваться так же, как и новые синхронные зондирования. Прежде всего, массив пополнился оценками импеданса и типпера в 22 точках на профиле УкрГГРИ, выполненном в 1995—1996 гг. и проходящем с УЩ поперек центральной части ДДВ и далее на север до российской границы (рис. 1 и 2). Здесь применялись ранние модификации длиннопериодных станций LEMI, а обработка данных велась с помощью односточечных процедур ЦГЭМИ ИФЗ РАН [Варенцов и др., 2003]. Кроме того, включены оценки импеданса и типпера в нескольких десятках точек зондирований со станциями ЦЭС-2, выполненных УкрГГРИ в 1991 г. [Слоницкая, Трегубенко, 1993] в ходе работ на южном сегменте геотраверса ГРАНИТ [Геотраверс ..., 2002], идущего с УЩ от Кировограда на северо-восток в Россию по южному склону ВМ. Эти данные в связи с развалом СССР не получили должной интерпретации до начала проекта KIROVOGRAD.

Наряду с данными, перечисленными выше, в пределах региона исследований имелось много локальных зондирований прошлых лет, полученных, в основном, в разведочном диапазоне периодов, для которых либо отсутствовали данные о полной структуре операторов импеданса и типпера, либо вызывала сомнения информация об ориентации измерительных осей. Это большой массив украинских разведочных зондирований 1970—1980-х годов со станциями ЦЭС-2 [Baysarovich et al., 1998; Rokityansky et al., 1999], зондирования ООО «Северо-Запад» 1990-х годов в окрестности Александровской геофизической базы и вокруг Смоленской и Курской АЭС с аппаратурой ЦЭС-М [Хмелевской и др., 1999; Алексанова и др., 2010] и результаты первых экспериментов со станциями Phoenix в окрестности геофизической базы в начале 2000-х годов. Для всех перечисленных зондирований мы ограничились каталогизацией эффективных импедансных данных (кажущихся сопротивлений и фаз), не зависящих от положения измерительных осей, а также возможных оценок индукционных векторов — в большинстве случаев действительных векторов или близких к ним векторов максимальной индукции. Такие же оценки индукционных векторов рассматривались в пунктах МВ зондирований с аналоговой аппаратурой ИЗМИРАН. Все эти данные, как правило, не исполь-

зовались при решении интерпретационных задач (за исключением профиля ДНЕПР), но служили для повышения плотности информации на картах соответствующих инвариантов импеданса и типпера.

Стратегии определения инвариантов передаточных операторов. В проекте KIROVOGRAD при анализе главных направлений и размерности среды приоритетное значение имеют новые схемы инвариантов фазового тензора импеданса [Caldwell et al., 2004; Бердичевский, Дмитриев, 2009] и горизонтального МВ оператора [Varentsov, 2005; 2007a; Varentsov et al., 2005], иммунные к приповерхностным гальваническим искажениям данных.

Метод СВВ ортогонализации фазового тензора импеданса [Caldwell et al., 2004]:

$$\hat{\Phi} = [\text{Re } \hat{Z}]^{-1} \cdot [\text{Im } \hat{Z}], \quad (4)$$

представляющего тензорный аналог фазы комплексного скаляра, позволяет просто и элегантно получить для импедансного тензора оценки главных направлений и относительно [Бердичевский, Дмитриев, 2009] параметра трехмерности $\text{skew}_{\Phi} = \sqrt{|\text{Im}(Z_{xy}Z_{yy}^* + Z_{xx}Z_{yx}^*)| / |Z_{xy} - Z_{yx}|}$. Эти оценки свободны от гальванических искажений, описываемых частотно-независимой действительной матрицей, и получены при самых общих предположениях о структуре неискаженного импеданса. Соответствующие диагональные элементы фазового тензора в 2D средах совпадают с фазами главных компонент импеданса, а в квази-3D обстановке во многих модельных и практических примерах оказываются предпочтительнее первичных импедансных фаз [Varentsov et al., 2005; Бердичевский и др., 2010]. Важную роль играет и самый простой эффективный инвариант импеданса, определяемый корнем из его определителя. Эффективные фаза и кажущееся сопротивление позволяют визуализировать свойства импеданса с учетом большого числа зондирований прошлых лет. На рис. 1, б, в карты этих инвариантных параметров показаны для периода 400 с.

Простая и прагматичная система инвариантов вращения для горизонтального МВ тензора строится по аналогии с классической схемой диагонализации Свифта тензора импеданса. В процессе вращения минимизируется амплитуда внедиагональных элементов горизонтального МВ оператора [Varentsov, 2005; 2007b]. Азимуты главных направлений (максимального и минимального) выбираются из значений угла γ_M :

$$\gamma_M = \frac{1}{4} \operatorname{arctg} \frac{2 \operatorname{Re}(M_1 M_3^*)}{|M_3|^2 - |M_1|^2}, \quad (5)$$

$$M_1 = (M_{xy} + M_{yx})/2, \quad M_2 = (M_{xy} - M_{yx})/2,$$

$$M_3 = (M_{xx} - M_{yy})/2, \quad M_4 = (M_{xx} + M_{yy})/2,$$

определяемых с периодом $\pi/4$, и соответствуют максимальным и минимальным амплитудам — экстремумам $|M_{xx}|$ при повороте на углы $\gamma_M + k\pi/4$, $k=0,1,2,3$ [Varentsov, 2007a]. Экстремальные фазы определяются как фазы значений M_{xx} в полученных главных направлениях, а параметр трехмерности имеет вид

$$\operatorname{skew}_M = \frac{|M_2|}{|M_4|}. \quad (6)$$

Аналогично получают инварианты Свифта (азимуты и амплитуды) для аномального оператора \hat{M}^a . С их помощью строятся эллипсы «пертурбации» горизонтального МВ поля [Schmucker, 1970; Varentsov et al., 2005], существенно расширяющие возможности визуализации геоэлектрических неоднородностей по МВ данным. При построении эллипса пертурбации экстремальные амплитуды откладываются вдоль ортогональных экстремальных направлений, на эту конструкцию натягивается эллипс, который затем поворачивается на 90° , чтобы большая ось над проводниками указывала на их простирание. Простая интерпретация структуры эллипсов пертурбации возможна [Varentsov et al., 2005], когда геоэлектрическая структура вокруг базовой точки близка к одномерной, тогда эллипсы стягиваются в точку в окрестности базы, преобразуются в круги в пределах 1D структур с другими параметрами, стягиваются в отрезки над 2D проводниками (ориентированными по простиранию проводника и имеющими тем большую длину, чем выше его аномальная электропроводность) и сохраняют эллиптическую форму в областях трехмерности среды.

На рис. 1, а для периода 400 с представлена карта максимальной амплитуды полного горизонтального МВ оператора (относительно самой западной точки на профиле НАВЛЯ) с наложенными пертурбационными эллипсами. Самый яркий объект на ней — аномалия в пределах ДДВ, порождаемая токами в осадочном чехле. Максимальная амплитуда полного поля превышает здесь уровень 2,0 (200% от уровня нормального поля). На этом фоне отчетливо выделяются превышающие величину 1,6 субмеридианальные глубинные аномалии электропроводности

(КрвА на юго-западе, КурА на юго-востоке и КбрА на севере). Между профилями СУЗЕМКА и НАВЛЯ наблюдается весьма сложная ориентация эллипсов пертурбации, указывающая на перетекание глубинных токов между КрвА и КурА. Севернее профиля НАВЛЯ аномалии КрвА и КурА сливаются в единую аномалию КбрА северного простирания с максимальной амплитудой менее 1,5.

Интерференция поверхностных и глубинных откликов на карте важнейших инвариантов типпера — действительных индукционных векторов, построенной для того же периода 400 с (см. рис. 2), выглядит намного сложнее. Радиус влияния осадочных бассейнов (ДДВ и Московской синеклизы) здесь значительно больше, чем для горизонтальных МВ откликов. Эффекты осадочных токовых систем доминируют на профилях ШОСТКА и КИРОВ и существенны на следующих по удалению профилях СУЗЕМКА и ЖИЗДРА. Тем не менее оси коровых аномалий достаточно уверенно выделяются на всех профилях по инверсии широтных проекций векторов индукции. Находит подтверждение в векторах индукции и сложная структура коровых токов между профилями СУЗЕМКА и НАВЛЯ.

На картах эффективных импедансных данных (рис. 1), наряду с образами трех квазилинейных коровых аномалий, между центральными частями профилей СУЗЕМКА и ШОСТКА проявляется новая глубинная (возможно даже корово-мантийная) аномалия электропроводности изометричной формы, шунтирующая токи в КрвА и КурА. На рис. 4, а показана карта продольной проводимости осадков, построенная на основе асимптотических оценок (для периода 4 с) по эффективному кажущемуся сопротивлению в точках массива KIROVOGRAD (черные кружки и нерегулярные крестики) и дополненная на территории Украины ее оценками по комплексу электроразведочных данных (регулярная сеть крестиков). Западный склон ВМ в пределах от профиля КИРОВ на севере до профиля ОБОЯНЬ на юго-востоке характеризуется низкой продольной проводимостью осадков — 20—80 См. В этих условиях глубинность российских зондирования со станциями Phoenix превышает мощность земной коры, оцениваемую величиной ~45 км. В прибортовых зонах ДДВ продольная проводимость осадков составляет сотни сименсов, а в ее центре превышает 3000 См. Длиннопериодные украинские зондирования здесь также обеспечивают глубинность, достаточную для изучения всей земной коры и прилегающей литосферной верхней мантии.

Совместная 2D инверсия МТ/МВ данных.

Широтная профильная структура основной части массива синхронных ЭМ зондирований KIROVOGRAD и предполагаемое северное продолжение КрвА открывали на начальном этапе исследований широкие перспективы применения методов 2D интерпретации МТ и МВ данных. Синхронность зондирований позволила повысить точность анализируемых локальных передаточных операторов (импеданса и типпера) и дополнить ансамбль интерпретируемых данных синхронными горизонтальными МВ откликами. Однако пространственный анализ инвариантов полученных передаточных операторов (см. рис. 1, 2) указал на их очевидные 3D искажения. Двумерность максимальна для горизонтальных МВ откликов, но и по ним простирание отдельных сегментов коровых аномалий (прежде всего, КурА) заметно отличается от доминирующего северного. В этой ситуации очевидными стали два требования к применяемым методам 2D инверсии — необходимость совместного анализа всей совокупности МТ и МВ данных, а также учет в ходе инверсии 3D искаженности инвертируемых данных.

В полном объеме этим требованиям соответствует робастная процедура совместной 2D+ инверсии МТ/МВ данных, разработанная в ЦГЭМИ РАН [Варенцов, 2002; 2006; 2011; Varentsov, 2007b]. Ее эффективность определяется рациональным сочетанием различных средств стабилизации решения, защищающих от воздействия внешних и внутренних источников погрешностей разной природы: *рациональной параметризации среды* (выделения нормальной и аномальной структур модели, использования финитных функций и корреляционно связанных параметров); *линейного* (в соответствии с априорными весовыми матрицами) и *нелинейного* (подбор \log -параметров по \log -амплитудам данных) *масштабирования параметров и данных*; *тихоновской регуляризации* (с адаптивным уменьшением параметра регуляризации по мере сходимости итераций инверсии); *робастной метрики функционалов* (для защиты от редких, но больших отскоков с адаптивностью к медианным статистикам невязок); *стабилизированной прямой факторизации ньютоновских систем* (адаптивной к уровню функционала невязки данных); *линейных ограничений «здравого смысла»* (отсекающих неправдоподобные модели при выборе ньютоновского скалярного шага). На синтетических тестах продемонстрирована сопоставимо высокая точность решения 2D обратных задач

отдельно по данным импеданса, типпера и горизонтального МВ отклика и преимущества их совместной инверсии [Варенцов, 2002; 2006]. Наиболее сложный синтетический набор данных, имитирующий реальную среду зоны TESZ с аномалиями в осадочном чехле, земной коре и верхней мантии [Ernst et al., 2008], исследован в работе [Varentsov et al., 2007].

На профилях массива KIROVOGRAD метод 2D+ инверсии получил самую полную реализацию. Модели с коррелированными изменениями сопротивлений ячеек инверсии [Варенцов, 2002; 2011] строились по 8-компонентному ансамблю профильных данных, включающему две моды (E и H) комплексного импеданса (в каждой моде — кажущееся сопротивление и фазу), комплексную компоненту типпера (Re и Im) и комплексную компоненту горизонтального МВ отклика (модуль и фазу, в нормировке на самую западную точку профиля НАВЛЯ). При этом фазы импеданса брались из фазового тензора (4). Погрешности данных, учитываемые в ходе инверсии и ограниченные снизу пороговыми величинами, увеличивались пропорционально степени 3D искаженности соответствующих элементов данных [Варенцов, 2011], определяемой оценками трехмерности ($skew_{\Phi}$, $skew_M$ и др.) и неадекватной двумерности (неперпендикулярности профилю локальных оценок простирания) соответствующих передаточных операторов. Приоритет в инверсии получали элементы данных с хорошей двумерностью и лишь по мере их подбора начинали учитываться 3D искаженные элементы. Для явного подавления приповерхностных искажений погрешности кажущихся сопротивлений увеличивались в еще большей степени — на начальном этапе итераций нелинейной инверсии принимался во внимание лишь средний уровень кажущихся сопротивлений. На широтных профилях КИРОВ, ЖИЗДРА и НАВЛЯ инверсия 8-компонентных ансамблей МТ/МВ данных велась в диапазоне периодов 0,5—4096 с, а на профилях СУЗЕМКА, ШОСТКА и ОБОЯНЬ — в диапазоне 16—4096 с. Самый южный профиль ДНЕПР был проложен в северо-западном направлении. На нем интерпретировались в основном зондирования прошлых лет и велась лишь 5-компонентная инверсия — для импеданса использовались только эффективные отклики, а для горизонтальных МВ данных — одни амплитуды [Баглаенко и др., 1996] в нормировке на KIV.

Наилучший компромисс разрешения/устойчивости получен на профиле ЖИЗДРА (рис. 3,

а). Здесь 2D структура модели подбиралась до глубины 100 км, соответствующей глубинности выполненных зондирований, оцениваемой по уровню эффективного кажущегося сопротивления на самых длинных периодах. Ниже подбирались лишь сопротивления фоновой слоистой 1D модели. На приведенном рисунке наблюдается надежная сходимость итераций инверсии при отчетливой устойчивости основных геоэлектрических структур в ходе заключительной части итерационного процесса. Нормы абсолютных невязок инвертируемых компонент данных в итоговой модели составляют соответственно 0,05, 0,07 и 0,06 для амплитуды горизонтального МВ отклика и Re , Im частей типпера, 10,3, 4,1, и 4,9 град — для импедансных фаз E -, H -поляризации и фазы горизонтального МВ отклика. В построенной модели выявлен коровый проводник шире 100 км с глубиной верхней кромки ~20 км, мощностью 10—15 км и продольной проводимостью, превышающей 1000 См. Выше этого проводника просматриваются две менее контрастные вертикальные проводящие зоны с сопротивлением первых сотен омметров, приуроченные к глубинным разломам, показанным на рис. 1, 2 и 4. Приповерхностные проводящие осадки с суммарной продольной проводимостью в десятки сименсов проявляются на глубине менее 500 м. Ниже сопротивление вмещающей среды выходит на уровень, превышающий $3 \cdot 10^3$ Ом·м.

На профиле ЖИЗДРА также получены решения 2D обратной задачи с помощью двух других методов [Варенцов и др., 2011а] — выполнены бимодальная инверсия импеданса методом [Rodi, Mackie, 2001] и инверсия типпера методом [Siripunvaraporn, Egbert, 2000]. Три различных метода хорошо согласуются в определении наиболее устойчивых характеристик коровой аномалии — положения ее верхней кромки и величин продольной/интегральной проводимости. При этом результаты, полученные по программе 2D+ инверсии Варенцова, выглядят предпочтительнее по достигнутому уровню невязок данных, устойчивости результатов и в силу возможности вести совместную инверсию всех компонент МТ/МВ данных с подавлением их 3D искажений.

Похожая структура коровых аномалий наблюдается севернее профиля ЖИЗДРА на смежном профиле КИРОВ и южнее — на смежном профиле НАВЛЯ (рис. 3, б, г). 2D+ инверсия здесь велась так же, как и на профиле ЖИЗДРА. На профиле КИРОВ сильнее проявляются искажающие 3D влияния токов

в проводящих осадках Московской синеклизы (особенно в данных типпера, рис. 2) и ЭМ шумов, порождаемых отрезком ж/д Москва—Сухиничи, электрифицированном на постоянном токе (RW на приведенном разрезе). На профиле НАВЛЯ усиливается трехмерность всех компонент данных в результате сложного замыкания токов, текущих в КрВА, КурА и КбрА. В моделях для обоих профилей отмечается некоторое погружение ярких аномалий электропроводности, остающихся тем не менее в пределах земной коры, и их большая вертикальная неоднородность. На профиле КИРОВ латеральная изменчивость проводимости коровой аномалии минимальна, на профиле ЖИЗДРА уже отчетливо проявляются ее восточный и западный максимумы, а на профиле НАВЛЯ очевидно присутствие двух аномалий — КрВА на западе и КурА на востоке.

На южных российско-украинских профилях трехмерность инвертируемых данных увеличивается в еще большей степени, особенно в пределах центральной и восточной частей профиля СУЗЕМКА. Первые модели 2D+ инверсии вдоль профилей СУЗЕМКА и ШОСТКА приведены в работах [Варенцов и др., 2011а, б], однако они далеки от совершенства. Сходимость итераций инверсии на профилях СУЗЕМКА, ШОСТКА и ОБОЯНЬ выглядит сложнее, чем на северных профилях. Заметно меньшие невязки данных здесь достигаются при расширении области подбора 2D структуры до глубины 200 км. При этом на фоне коровых проводящих структур (КрВА на западе и КурА на востоке) возникает связывающая их проводящая область, уходящая в верхнюю мантию. Эта область соответствует в плане ярким изометричным аномалиям импедансных данных (см. 1, б, в). Она может отвечать процессам современной активизации [Гордиенко и др., 2002; 2005; 2006], но также может отражать 3D искажения инвертируемых данных.

3D интеграция результатов 2D+ инверсии МТ/МВ данных. Результаты совместной 2D+ инверсии МТ/МВ данных получены на семи профилях проекта KIROVOGRAD с различной степенью завершенности. Они вполне удовлетворительны на северных профилях КИРОВ и особенно ЖИЗДРА. Не вызывает сомнений и модель вдоль профиля НАВЛЯ, хотя здесь есть ресурсы повышения качества инверсии. Результаты на профилях СУЗЕМКА и ШОСТКА все еще предварительные — здесь структура моделей заметно меняется на заключительном отрезке итераций инверсии под влиянием 3D искажений инвертируемых данных и необхо-

димо улучшить настройку процедур подавления этих искажений и стабилизации решения. На профиле ОБОЯНЬ результаты также предварительные, поскольку недостаточно украинских зондирований на его западном продолжении. Требуются дополнительные зондирования и на северо-западном фланге профиля ДНЕПР. В этих условиях еще рано интегрировать полученные результаты 2D+ инверсий в объемной геоэлектрической модели региона исследований. Но уже возможно проанализировать пространственное распределение наиболее устойчивых параметров — оценок продольной проводимости различных слоев построенных моделей. Такой подход был реализован в проекте BEAR при построении многопленочной геоэлектрической модели, интегрировавшей результаты предшествующих исследований [Varentsov et al., 2002].

По результатам 2D+ инверсий построены сводные карты суммарной продольной проводимости в диапазонах глубин 0—4, 4—15, 15—50 и 10—80 км. На рис. 4, б представлена карта для средне- и нижнекоровых глубин 15—50 км, на которых локализуются самые интенсивные субгоризонтальные аномалии электропроводности (рис. 3). На смежных профилях наблюдается устойчивая корреляция выявленных коровых аномалий, лишь КурА в южной части теряет непрерывность на большом расстоянии между профилями ШОСТКА и ОБОЯНЬ. На осях КрВА и КурА значение продольной проводимости локально достигает 5000 См. Еще одна изометричная коровая аномалия появляется на западных флангах профилей СУЗЕМКА и ШОСТКА — она требует дополнительной верификации, поскольку может объясняться индукционным влиянием прилегающих осадочных бассейнов ДДВ и Оршанской впадины. Карта продольной проводимости для верхнекорового интервала глубин 4—15 км также весьма информативна и позволяет увидеть корреляцию зон повышенной продольной проводимости, достигающей на данном структурном этапе сотен сименсов вдоль Западно-Ингулецко-Белопольско-Навлинского, Криворожско-Крупецкого и Новооскольско-Воронцовского глубинных разломов (положение этих разломов дано на рис. 1, 2 и 4).

Квази-3D инверсия МВ данных. Заключительным этапом интерпретации данных массива зондирований KIROVOGRAD стало построение 3D распределений продольной проводимости различных слоев осадочного чехла и земной коры с помощью алгоритма квази-3D

инверсии МВ данных в классе многопленочных моделей, разработанного С. Ковачиковой (ГФИ Чешской АН). Данный метод широко опробован при инверсии типперов в Центральной Европе [Cerv et al., 2002; Kovacikova et al., 2005] и ряде других областей, в том числе вдоль украинского сегмента КрВА [Гордиенко и др., 2005]. Однако типперы часто проявляют особую чувствительность к геоэлектрическим неоднородностям вне планшета инверсии. Например, существенные искажения индукционных векторов под влиянием удаленной на сотни километров Северо-Германской аномалии электропроводности наблюдаются в пределах польского сегмента зоны TESZ на профилях LT7 и P2 эксперимента EMTESZ-Pomerania [Varentsov et al., 2005; Ernst et al., 2008]. В такой ситуации более перспективна инверсия горизонтальных МВ откликов. В эксперименте EMTESZ-Pomerania получен первый и весьма обнадеживающий опыт такого подхода. Модель суммарной коровой продольной проводимости для зоны TESZ [Kovacikova, Varentsov, 2010], построенная при инверсии горизонтальных МВ данных в полном тензорном представлении, хорошо согласуется с результатами 2D+ построений вдоль отдельных профилей [Varentsov, 2005; Ernst et al., 2008], в то время как результат квази-3D инверсии типпера заметно им противоречит. С учетом данного опыта велась квази-3D инверсия МВ данных эксперимента KIROVOGRAD.

В алгоритме квази-3D инверсии исследуется модель горизонтально-однородной слоистой среды с тонкими горизонтально-неоднородными проводящими пленками. Дискретизация пленок — равномерная. Продольная проводимость одной из пленок определяется в ходе инверсии, остальных — фиксируется на основе априорных предположений. Моделирование ЭМ полей ведется в рамках приближенного формализма Прайса [Бердичевский, Жданов, 1981]. Инвертируются массивы МВ передаточных данных (двух комплексных компонент типпера и (или) четырех горизонтального МВ отклика), заданные на произвольной сети для одного или нескольких достаточно длинных периодов. Тихоновский функционал [Kovacikova et al., 2005] с возможностью выбора стабилизатора с фокусирующими свойствами [Portniaguin, Zhdanov, 1999] минимизируется методом взвешенных сопряженных градиентов [Жданов, 2007]. Реализуется выбор оптимального параметра регуляризации. Данный подход позволяет быстро и устойчиво оценить

продольную проводимость субгоризонтальных аномалий электропроводности, однако требует контроля точности приближения Прайса и может вносить большие искажения при «многоэтажной», гальванически связанной структуре аномалий.

Первые модели квази-3D инверсии в эксперименте KIROVOGRAD получены по горизонтальным МВ данным для периодов 900 и 1600 с в одноплочной модели с глубиной пленки 20 км и равномерной дискретизацией 20×10 км [Варенцов и др., 2011в]. В построенное таким образом распределение продольной проводимости вносят вклад как коровые аномалии, так и неоднородности осадочного чехла, при этом продольная проводимость вдоль коровых структур достигает 10000 См и в целом удовлетворительно соответствует 2D+ построениям, в то время как продольная проводимость осадков ДДВ оказывается втроекратно завышенной, также достигая 10000 См.

Более содержательна двухплочная модель — в ее верхней пленке на глубине 2 км зафиксировано априорное распределение продольной проводимости осадков (рис. 4, а), построенное по МТ зондированиям массива KIROVOGRAD и результатам предшествующих исследований. На рис. 4, в показано распределение продольной проводимости в нижней пленке на глубине 20 км, построенное в ходе инверсии горизонтальных МВ данных для периодов 900, 1600 и 2500 с — в нем удалось многократно уменьшить проявление осадочных структур ДДВ, в то время как конфигурация КрвА, КурА и КбрА существенно не изменилась. Единственное заметное отличие от 2D+ построений (рис. 4, б) — слитное представление КурА благодаря учету новых зондирований 2011 г. на профилях ЖЕЛЕЗНОГОРСК и ХАРЬКОВ. В аналогичном решении по типперам [Варенцов, 2011в] теряется субмеридианальная квазилинейная фокусировка проводящих структур, характерная для результатов квази-3D инверсии горизонтальных МВ откликов и 2D+ построений. Здесь сказывается большая искаженность типперов ЭМ шумами и их повышенная чувствительность к проводящим структурам ДДВ и других осадочных бассейнов, лежащих вне планшета инверсии.

Заключение. Эксперимент KIROVOGRAD стал важным этапом внедрения на постсоветском пространстве современных технологий глубинного ЭМ зондирования, отработанных в недавних европейских экспериментах BEAR и EMTESZ-Pomerania. Результаты синхронных МТ/МВ зондирований проекта KIROVOGRAD

показали перспективность применения данной технологии в регионе исследований и в других промышленных областях России и Украины. В рамках данного проекта получил масштабную реализацию метод горизонтального МВ зондирования с опорой на геомагнитную обсерваторию KIV, проведено широкое опробование современных методов совместной 2D инверсии МТ и МВ данных с учетом оценок их трехмерности, а также пленочной квази-3D инверсии МВ данных, актуализированы методы анализа ЭМ данных с учетом аномальных свойств магнитной проницаемости горных пород, наблюдаемых в исследуемом регионе, выполнена углубленная верификации и стандартизации методик обработки и интерпретации ЭМ данных, применяемых в организациях-участниках проекта.

Синхронные МТ/МВ зондирования проекта KIROVOGRAD позволили провести глубинные геоэлектрические построения на западном склоне ВМ в пределах всей земной коры вопреки сильным ЭМ помехам. Установлено северное продолжения КрвА вглубь территории России до широты г. Брянска. Прослежено простираение КурА между профилями ОБОЯНЬ и НАВЛЯ и ее дальнейшее продолжение как КбрА между профилями НАВЛЯ и КИРОВ. Детализировано сочленение коровых аномалий КрвА, КурА и КбрА, показана связанность их токовых систем и продольно-неоднородная [Кулик, Бурахович, 2010] структура их электрических свойств.

Применение новой методики 2D+ инверсии 8-компонентных ансамблей МТ/МВ данных позволило более обосновано получать геоэлектрические модели вдоль профилей и вести их интеграцию в классе многоплочных квази-3D моделей. Показаны преимущества метода квази-3D инверсии горизонтальных МВ данных и продемонстрировано удовлетворительное согласие полученного таким образом корового распределения продольной проводимости с результатами 2D+ построений. Ожидается дальнейшее уточнение геоэлектрических моделей региона, прежде всего, двумерных вдоль российско-украинских профилей СУЗЕМКА, ШОСТКА и ОБОЯНЬ, где предстоит лучше учесть различия в диапазонах периодов российских и украинских данных и их явную трехмерность. Развитие методов 3D инверсии позволит перейти к прямому построению объемных моделей.

Начат новый этап исследования природы выявленных аномалий, характеризующийся

существенной детализацией геоэлектрических построений [Алексанова и др., 2011; Логвинов, Гордиенко, 2011; Абрамова и др., 2012]. Очевидными стали совпадение в плане и генетическая связь проводящих поясов КурА и КбрА с наиболее интенсивными положительными аномалиями КМА и БМА [Абрамова и др., 2012]. На северных профилях КИРОВ м ЖИЗДРА приоритетно рассматривается предположение о широком распространении на средне- и нижнекоровых глубинах проводящих комплексов графитизированных и (или) сульфидизированных палеопротерозойских метаосадков. На южных профилях СУЗЕМКА и ШОСТКА, наряду с присутствием проводящих метаосадков, можно ожидать проявления процессов современной активизации, создающих предпосылки повышенной флюидизации на границе земной коры и верхней мантии. Проведенные геоэлектрические структурные построения в масштабе всей земной коры на значительной части ВМ, выявившие серию коровых аномалий электропроводности и возможное положение зоны современной активизации, могут быть востребованы на новом этапе тектонических обобщений, а также при выработке практических заключений по оценке геодинамических рисков и прогнозу геотермальных, рудных и углеводородных ресурсов в центре и на севере Украине и на юго-западе России.

Следует отметить педагогическое значение проекта KIROVOGRAD: более 100 студентов получили опыт участия в реальном научном эксперименте в ходе учебных практик на гео-

физической базе МГУ, десятки из них использовали материалы проекта при подготовке курсовых работ, защищены первые дипломные работы по данной тематике и ведется подготовка первых диссертаций.

В ближайшие 2—3 года предстоит закончить программу синхронных МТ/МВ зондирований на данной территории и завершить интерпретацию расширенного массива зондирований с выходом на построение объемных геоэлектрических моделей. Далее наступает этап комплексного геолого-геофизического истолкования полученных результатов. Развитие эксперимента синхронного МТ/МВ зондирования представляется перспективным на пограничной российско-украинской территории восточнее ж/д Москва—Харьков в зоне возможного продолжения КурА, а также западнее нынешней конфигурации массива KIROVOGRAD на пограничной белорусско-российской территории.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность всем участникам Рабочей группы международного проекта KIROVOGRAD, а также полевым бригадам ООО «Северо-Запад», выполнившим часть полевых работ по договорам с ЦГЭМИ ИФЗ РАН. Приведенные в статье карты и разрезы построены с использованием программ GMT [Wessel, Smith, 2007]. Представленные исследования частично поддержаны российскими грантами РФФИ 11-05-00491 и 11-05-12030офим, российско-украинским грантом РФФИ-Укр_Ф 09-05-90439 и чешским грантом GACR P210-10-2227.

Список литературы

- Абрамова Д. Ю., Абрамова Л. М., Варенцов Ив. М., Куликов В. А., Лозинский И. Н., Рабочая группа KIROVOGRAD. Корреляция аномалий постоянного магнитного поля и коровых геоэлектрических структур на западном склоне Воронежского массива // Геофиз. журн. — 2012. — 32, № 4. — С. 62—69.
- Азаров Н. Я., Анциферов А. В., Шеремет Е. М., Глевасский Е. Б., Есипчук К. Е., Кулик С. Н., Бурахович Т. К., Пигулевский П. И., Николаев Ю. И., Николаев И. Ю., Сетая Л. Д., Захаров В. В., Курлов Н. К. Геолого-геофизическая модель Криворожско-Кременчугской шовной зоны Украинского щита. — Киев: Наук. думка, 2006. — 196 с.
- Алексанова Е. Д., Баглаенко Н. В., Варенцов Ив. 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 // Современное состояние наук о Земле: Матер. Междунар. конф. памяти В. Е. Хаина). — Москва: Изд-во Моск. ун-та, 2011. — С. 33—37.
- Алексанова Е. Д., Варенцов Ив. М., Верещагина М. И., Куликов В. А., Пушкарев П. Ю., Соколова Е. Ю., Шустов Н. Л., Хмелевской В. К., Яковлев А. Г. 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.
- Баглаенко Н. В., Варенцов Ив. М., Гордиенко В. В., Жганов М. С., Кулик С. Н., Логвинов И. М. Геоэлектрическая модель Кировоградской анома-

- лии по геомагнитным данным // Физика Земли. — 1996. — № 4. — С. 87—98.
- Белявский В. В., Бурахович Т. К., Кулик С. Н., Сухой В. В. ЭМ методы при изучении Украинского щита и Днепровско-Донецкой впадины. — Киев: Знание, 2001. — 228 с.
- Бердичевский М. Н., Соколова Е. Ю., Варенцов Ив. М., Рыбин А. К., Баглаенко Н. В., Баталев В. Ю., Голубцова Н. С., Матюков В. Е., Пушкарев П. Ю. Геоэлектрический разрез Центрального Тянь-Шаня: анализ МТ и МВ откликов вдоль геотраверса НАРЫН // Физика Земли. — 2010. — № 8. — С. 36—53.
- Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И. Модели и методы магнитотеллурики. — Москва: Науч. мир, 2009. — 680 с.
- Бердичевский М. Н., Жганов М. С. Интерпретация аномалий переменного ЭМ поля Земли. — Москва: Недра, 1981. — 327 с.
- Бурахович Т. К., Кулик С. Н. Квазитрехмерная геоэлектрическая модель Кировоградской аномалии электропроводности // Геофиз. журн. — 1999. — 21, № 2. — С. 120—125.
- Варенцов Ив. М. Общий подход к решению обратных задач магнитотеллурики в кусочно-непрерывных средах // Физика Земли. — 2002. — № 11. — С. 11—33.
- Варенцов Ив. М. Прагматическая 2D инверсия синхронных ансамблей МТ/МВ откликов: Матер. V Всерос. школы-семинара им. М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна по ЭМ зондированиям Земли. Т. 2. — Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 2011. — С. 17—21.
- Варенцов Ив. М. Разрешающая способность современных ЭМ геофизических методов с естественным возбуждением поля // Разведка и охрана недр. — 2006. — № 8. — С. 66—71.
- Варенцов Ив. М., Алексанова Е. Д., Баглаенко Н. В., Куликов В. А., Логвинов И. М., Соколова Е. Ю., Рабочая группа KIROVOGRAD. Массив синхронных МТ/МВ зондирования KIROVOGRAD: первые модели 2D инверсии: Матер. V Всерос. школы-семинара им. М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна по ЭМ зондированиям Земли. Т. 1. — Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 2011а. — С. 188—194.
- 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 // Современное состояние наук о Земле: Матер. Междунар. конф. памяти В. Е. Хаина). — Москва: Изд-во Моск. ун-та, 2011б. — С. 290—295.
- Варенцов Ив. М., Ковачикова С., Логвинов И. М., Рабочая группа KIROVOGRAD. Массив синхронных МТ/МВ зондирования KIROVOGRAD: модели квази-3D инверсии: Матер. V Всерос. школы-семинара им. М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна по ЭМ зондированиям Земли. Т. 1. — Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 2011в. — С. 195—200.
- Варенцов Ив. М., Корья Т., Смирнов М. Ю., Соколова Е. Ю., Лахти И., Мартанус Е. Р., Рабочая группа BEAR. Эксперимент BEAR — синхронное ЭМ зондирование Балтийского щита и его передаточные функции // Строение и динамика литосферы Восточной Европы. Результаты исследований по программе EUROPROBE. — Москва: Геокарт, 2006. — С. 79—94.
- Варенцов Ив. М., Соколова Е. Ю., Мартанус Е. Р., Наливайко К. В., Рабочая группа BEAR. Методика построения передаточных операторов ЭМ поля для массива синхронных зондирования BEAR // Физика Земли. — 2003. — № 2. — С. 30—61.
- Геотраверс ГРАНИТ: Восточно-Европейская платформа — Урал — Западная Сибирь (строение земной коры по результатам комплексных геолого-геофизических исследований) / Ред. С. Н. Кашубин. — Екатеринбург: Изд. Баженовской геофиз. экспедиции, 2002. — 312 с.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Усенко О. В. Тепловое поле территории Украины. — Киев: Знание, 2002. — 170 с.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Ковачикова С., Логвинов И. М., Тарасов В. Н., Усенко О. В. Украинский щит (геофизика, глубинные процессы). — Киев: Корвін пресс, 2005. — 210 с.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Ковачикова С., Логвинов И. М., Пек Й., Тарасов В. Н., Усенко О. В. Днепровско-Донецкая впадина (геофизика, глубинные процессы). — Киев: Корвін пресс, 2006. — 142 с.
- Жганов М. С. Теория обратных задач и регуляризации в геофизике. — Москва: Науч. мир, 2007. — 712 с.
- Карта структурного районирования докембрия ЮЗ части Восточно-Европейской платформы. — 1:1 000 000 // Комплект карт «Геология и металлогения юго-западной части Восточно-Европейской платформы»/ Ред. Л. С. Галецкий. — Москва: ВСЕГЕИ, 1992.
- Корепанов В. Е., Трегубенко В. И. Особенности построения и тенденции развития современной аппаратуры для МТ и МВ зондирования // Геофиз. журн. — 2009. — 31, № 4. — С. 181—190.
- Кулик С. Н. Северная ветвь Евразийских аномалий

- электропроводности // Геофиз. журн. — 2009. — **31**, № 4. — С. 168—180.
- Кулик С. Н., Буратович Т. К. МВ и МТ параметры продольно-неоднородных структур // Физика Земли. — 2010. — № 9. — С. 27—34.
- Логвинов И. М., Гордиенко В. В. Электропроводность консолидированной коры и графитизация // Физика Земли. — 2011. — № 2. — С. 43—52.
- Логвинов И. М., Тарасов В. Н. Геоэлектрическая 2D модель Кировоградской аномалии электропроводности // Геофиз. журн. — 2005. — **27**, № 5. — С. 754—769.
- Національний атлас України / Гл. ред. Л. Г. Руденко. — Київ: Картографія, 2007. — 118 с.
- Рокитянский И. И. Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. — Киев: Наук. думка, 1975. — 280 с.
- Рокитянский И. И., Логвинов И. М., Лугинина Н. А. МВ профилирование на Украинском щите // Физика Земли. — 1969. — № 3. — С. 100—111.
- Слоницкая С. Г., Трегубенко В. И. Результаты по высотной аэромагнитной съемки и электроразведки МТЗ по геотраверсу «Гранит»: Отчет Аэрогеофизической и Правобережной геофизических партий за 1988—1993 гг. — Киев: ГНПП «Геоинформ України», 1993. — 233 с.
- Хмелевской В. К., Яковлев А. Г., Могин И. Н., Пушкарев П. Ю., Казурова Н. Р. Комплексные ЭМ исследования в Калужской области при проведении учебно-производственных геофизических практик // Вестн. Моск. ун-та. Сер. Геология. — 1999. — № 5. — С. 64—68.
- Baysarovich M. M., Tregubenko V. Iv., Nasad A. G. Geoelectric heterogeneities of Ukrainés lithosphere // Геол. журн. — 1998. — № 1—2. — С. 23—35.
- Bogdanova S., Gorbatshev R., Grad M., Janik T., Guterch A., Kozlovskaya E., Motuza G., Skridlaite G., Starostenko V., Taran L., EUROBRIDGE and POLONAISE WG. EUROBRIDGE: new insight into the geodynamic evolution of the East European Craton // European lithosphere dynamics/ Eds. D. G. Gee, R. A. Stephenson. — London: Geological Society. Memoirs, 2006. — **32**. — P. 599—625.
- Caldwell T. G., Bibby H. M., Brown C. The MT phase tensor // Geophys. J. Int. — 2004. — **158**. — P. 457—469.
- Cerv V., Kovacikova S., Pek J., Pecova J., Praus O. Modelling of conductivity structures generating anomalous induction at the eastern margin of the Bohemian Massif and the West Carpathians // Acta Geophys. Pol. — 2002. — **50**, № 4. — P. 527—545.
- Dehkordi B. H., Brasse H., Ernst T., Oskooi B., Sokolova E. Yu., Varentsov Iv. M. The conductivity structure across the Trans—European Suture Zone from MT and MV data modeling // Phys. Earth Planet. Int. — 2010. — **183**. — № 3-4. — P. 377—386. — DOI:10.1016/j.pepi.2010.08.005.
- Ernst T., Brasse H., Cerv V., Hoffmann N., Jankowski J., Jozwiak W., Kreutzmann A., Neska A., Palshin N., Pedersen L. B., Smirnov M., Sokolova E., Varentsov Iv. M. EM images of the deep structure of the Trans-European Suture Zone beneath Polish Pomerania // Geophys. Res. Lett. — 2008. — **35**. — P. 15307. — DOI:10.1029/2008GL034610.
- Kovacikova S., Cerv V., Praus O. Modelling of the conductance distribution at the eastern margin of the European Hercynides // Studia Geophys. Geod. — 2005. — **49**. — P. 403—421.
- Kovacikova S., Varentsov Iv. M., EMTESZ and KIROVOGRAD WG. Quasi-3D inversion of horizontal MV responses // EM soundings: theory and applications, Proc. Int. Workshop on EM sounding in memory of Professors Mark N. Berdichevsky and Peter Weidelt. — Moscow: IPE RAS, 2010. — P. 45—46.
- Portniaguine O., Zhdanov M. S. Focussing geophysical inversion images // Geophysics. — 1999. — **64**. — P. 874—887.
- Rodi W., Mackie R. L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2D MT inversion // Geophysics. — 2001. — **66**. — P. 174—187.
- Rokityansky I. I., Ingerov A. I., Tregubenko V. I. Forty years of MTS studies in Ukraine // Earth Planet. Space. — 1999. — **51**. — P. 1127—1133.
- Schmucker U. Anomalies of geomagnetic variations in the south-west United States. — Berkeley: Univ. of California Press, 1970.
- Siripunvaraporn W., Egbert G. An efficient data-subspace inversion method for 2D MT data // Geophysics. — 2000. — **65**. — P. 791—803.
- Varentsov Iv. M. Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing and analysis // EM sounding of the Earth's interior (Methods in geochemistry and geophysics, 40). — New York: Elsevier, 2007a. — P. 263—277.
- Varentsov Iv. M. Joint robust inversion of MT and MV data // EM sounding of the Earth's interior. — New York: Elsevier, 2007b. — P. 189—222.
- Varentsov Iv., Baglaenko N., Sokolova E. 2D inversion resolution in the EMTESZ-Pomerania project: data simulation approach // Protokoll uber das 22 Kolloquium «EM Tiefenforschung» (Eds. O. Ritter, H. Brasse). — Potsdam: Dtsch. Geophys. Ges., 2007. — P. 143—150.
- Varentsov Iv. M., EMTESZ-Pomerania WG. Method of horizontal MV sounding: techniques and applica-

- tion in the EMTESZ-Pomerania project // Protokoll über das 21 Kolloquium «Elektromagnetische Tiefenforschung». — Potsdam: Dtsch. Geophys. Ges., 2005. — P. 111—123.
- Varentsov Iv. M., Engels M., Korja T., Smirnov M. Yu., BEAR WG.* The generalized geoelectric model of Fennoscandia: a challenging database for long period 3D modelling studies within the Baltic EM Array Research (BEAR) // Физика Земли. — 2002. — № 10. — С. 64—105.
- Varentsov Iv. M., Sokolova E. Yu., Martanus E. R., EMTESZ-Pomerania WG.* Array view on EM transfer functions in the EMTESZ-Pomerania project // Study of geological structures containing well-conductive complexes in Poland // Publ. Inst. Geoph., Pol. Acad. Sci. — 2005. — **95** (386). — P. 107—121.
- Wessel P., Smith W. H. F.* The generic mapping tools. Technical reference and cookbook, ver. 4.2. — 2007. — <http://gmt.soest.hawaii.edu>.