

Корреляция аномалий постоянного магнитного поля и коровых геоэлектрических структур на западном склоне Воронежского массива

© Д. Ю. Абрамова¹, Л. М. Абрамова², Ив. М. Варенцов², В. А. Куликов³,
И. Н. Лозовский^{2,3}, Рабочая группа KIROVOGRAD, 2012

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН,
Москва, Россия

²Центр геоэлектромагнитных исследований, Институт физики Земли РАН,
Москва, Россия

³Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
Поступила 8 мая 2012 г.

Представлено членом редколлегии В. В. Гордуенко

Синхронні магнітотелуричні та магнітоваріаційні зондування, які виконано на західному схилі Воронежського кристалічного масиву в межах міжнародного проекту KIROVOGRAD, виявили три яскраві квазілінійні аномалії електропровідності в нижній частині земної кори, які складно зчленовуються південніше м. Брянськ. Для в'яснення природи цих аномалій розглянуто кореляцію електромагнітних (насамперед горизонтальних магнітоваріаційних) відкликів і відповідних їм геоелектричних моделей з аномаліями постійного магнітного поля за результатами наземних, супутникових спостережень та аероспостережень. Обговорено можливості виділення відносно низькочастотних літосферних магнітних аномалій, зумовлених нижньокоровими джерелами.

Simultaneous magnetotelluric and magnetovariation soundings carried out recently at the western slope of the Voronezh Massif in the network of the international project KIROVOGRAD outlined bright quasi-linear conductivity anomalies in the lower crust, having a complex junction southwards from Bryansk. The nature of these anomalies is clarified in the correlation study of electromagnetic (primarily, horizontal magnetovariation) responses and related geoelectrical models with anomalies of the permanent magnetic field resulted from the ground and satellite observations. The approaches for distinction of relatively low frequency lithosphere magnetic anomalies produced by low-crustal sources are further discussed.

Введение. Синхронные электромагнитные (ЭМ) зондирования международного проекта KIROVOGRAD обеспечили новый уровень детальности и точности определения магнитотеллурических (МТ) и магнитовариационных (МВ) передаточных операторов при высоком уровне промышленных ЭМ шумов. Последующее применение современных методов их совместной интерпретации позволило получить обоснованные 2D и 3D геоэлектрические модели в пределах обширной территории исследований на западном склоне Воронежского массива (ВМ) от южного борта Московской синеклизы до Днепровско-Донецкой впадины (ДДВ) [Варенцов и др., 2012]. Эти исследования позволили установить северное продолжение известной Кировоградской коровой аномалии электропроводности (КрВА)

с Украинского щита (УЩ) под ДДВ до широты г. Брянска, выявить Курскую коровую аномалию электропроводности (КурА), простирающуюся вдоль оси Курской магнитной аномалии (КМА) на северо-запад и примыкающую к КрВА несколько южнее г. Брянска, а также проследить дальнейшее, менее контрастное северное продолжение КурА до г. Кирова и с. Барятино, получившее название Кирово-Барятинской коровой аномалии (КбрА).

Наиболее наглядно выявленные коровые аномалии электропроводности проявляются в горизонтальных МВ откликах на картах их максимальной амплитуды [Varentsov, 2007]. Эти данные явно картируют зоны с доминирующими квазилинейными субгоризонтальными токами, текущими по системе коровых аномалий электропроводности. На рис. 1, а

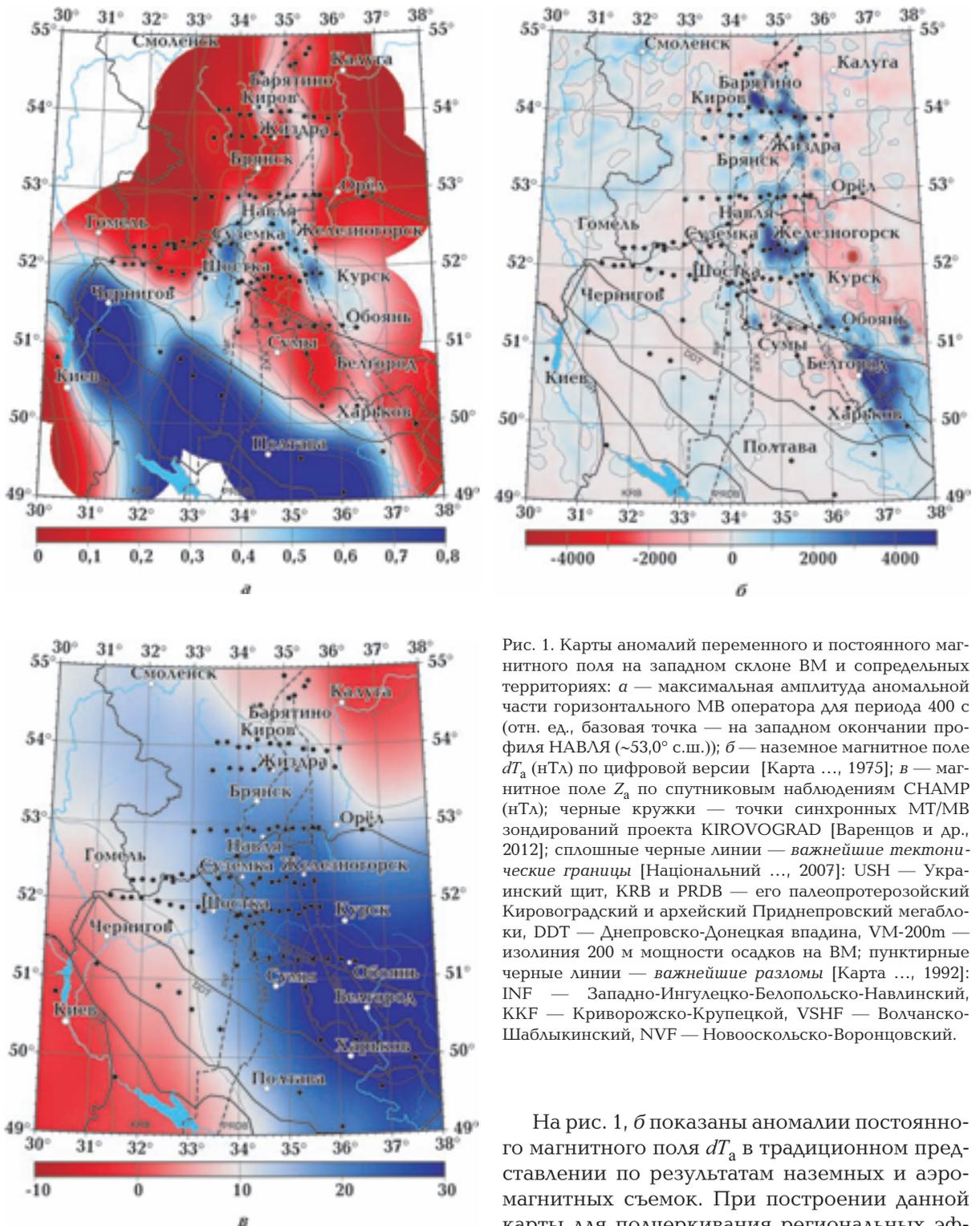


Рис. 1. Карты аномалий переменного и постоянного магнитного поля на западном склоне ВМ и сопредельных территориях: а — максимальная амплитуда аномальной части горизонтального МВ оператора для периода 400 с (отн. ед., базовая точка — на западном окончании профиля НАВЛЯ (~53,0° с.ш.)); б — наземное магнитное поле dT_a (нТл) по цифровой версии [Карта ..., 1975]; в — магнитное поле Z_a по спутниковым наблюдениям CHAMP (нТл); черные кружки — точки синхронных МТ/МВ зондирований проекта KIROVOGRAD [Варенцов и др., 2012]; 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, KKF — Криворожско-Крупецкой, VSHF — Волчанско-Шаблинский, NVF — Новооскольско-Воронцовский.

представлена карта максимальной амплитуды аномальной части горизонтального МВ оператора для периода 400 с, рассчитанного относительно базовой точки, выбранной на западном окончании профиля НАВЛЯ (~53,0° с.ш.) вдали от коровых аномалий.

На рис. 1, б показаны аномалии постоянного магнитного поля dT_a в традиционном представлении по результатам наземных и аэромагнитных съемок. При построении данной карты для подчеркивания региональных эффектов выполнено медианное сглаживание данных по блокам размером 10 км. Характер магнитного поля определяется в первую очередь областями интенсивных положительных аномалий, связанных с железистыми кварцитами (средние значения магнитной восприимчивости $\chi=1,5 \div 2$ ед. СИ). Уровень аномаль-

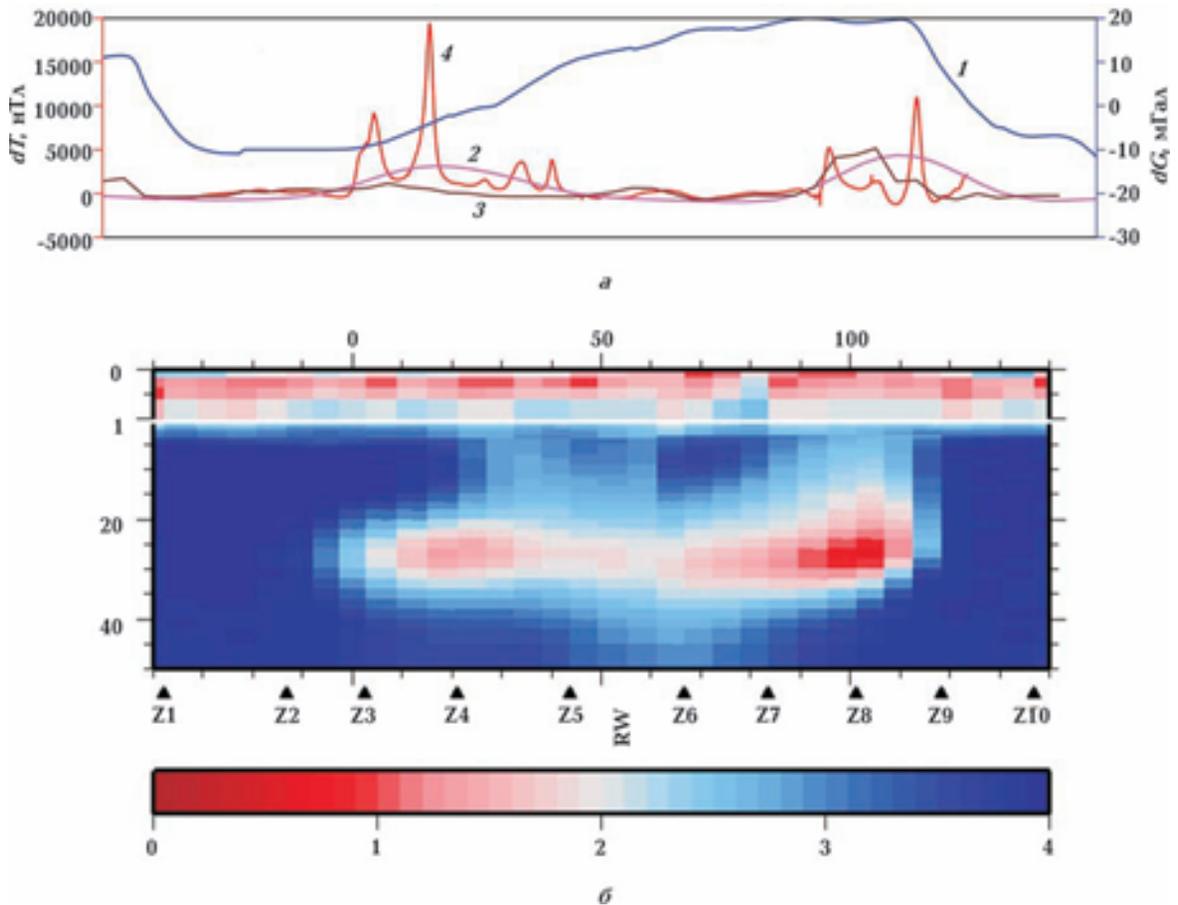


Рис. 2. Графики потенциальных полей для профиля ЖИЗДРА (а): 1 — гравитационная аномалия Буге dG , мГал, 2—4 — магнитные аномалии dT , нТл (2 — по [Карта ..., 1975]; 3 — с ее цифровой версии, показанной на рис. 1, 4 — по детальной магнитной съемке, выполненной в рамках проекта KIROVOGRAD); б — геоэлектрический разрез, Ом·м (lg-шкала, в верхней части модели другой вертикальный масштаб) вдоль профиля ЖИЗДРА (см. рис. 1) по результатам 2D+инверсии 8-компонентного ансамбля МТ/МВ данных [Варенцов и др., 2012].

ного поля в этих зонах превышает 2000 нТл. В юго-восточной части области исследования наблюдаются узкие линейные зоны КМА северо-западного простирания. По мере движения на север к границе Московской синеклизы вместо полосовых магнитных аномалий возникают более сложные высокоинтенсивные положительные аномалии разного размера и конфигурации, составляющие Бярятинскую магнитную аномалию (БМА). Существует предположение [Бродовой, Новиков, 2000; Бродовой и др., 2001], что при развитии структур КМА на север они натолкнулись на жесткое основание Московской синеклизы, образуя разрывы и оторванные промежуточные блоки БМА. К северо-востоку от КМА в магнитном поле фиксируется сопряженная отрицательная аномалия. Другими наиболее распространенными магнитоактивными образованиями в фундаменте являются кристал-

лические сланцы и гнейсы с магнитной восприимчивостью порядка $(20—100) \times 10^{-5}$ ед. СИ. Магматизм в данной области представлен преимущественно габброидами ($\chi \approx 700 \times 10^{-5}$ ед. СИ), порождающими умеренные положительные аномалии (500—2000 нТл).

На двух представленных картах отчетливо прослеживается отмеченная в нашей предшествующей работе [Алексанова и др., 2011] явная корреляция магнитовариационной аномалии КурА и положительной линейной структуры КМА, а далее на север — аномалии КбрА и Бярятинской магнитной аномалии. При этом вдоль северного окончания КрВА уровень магнитных аномалий заметно ниже и столь явная корреляция отсутствует.

В разрезах по результатам совместной 2D инверсии МТ и МВ данных исследованные аномалии электропроводности имеют вид субгоризонтальных структур шириной поряд-

ка 100 км с верхней кромкой ниже 15—20 км и продольной проводимостью 1000—5000 См. На рис. 2, б показан геоэлектрический разрез вдоль профиля ЖИЗДРА (~53,7° с.ш.). На этом профиле решение обратной задачи получено с максимальной точностью и устойчивостью [Варенцов и др., 2012]. В приведенной модели на глубине 20—30 км удельное электрическое сопротивление падает до уровня 5—10 Ом·м. Ширина субгоризонтальной проводящей зоны на этих глубинах превышает 100 км. Выше, на верхнекоровых глубинах 5—15 км, выделяются две менее контрастные проводящие зоны с сопротивлением первых сотен омметров. Мощность проводящих осадков не превышает 500 м, а их суммарная продольная проводимость — десятков сименсов. Вмещающая среда имеет сопротивление выше $3 \cdot 10^3$ Ом·м.

На рис. 1, а приведены графики различных аномалий гравитационного и магнитного поля вдоль профиля ЖИЗДРА. Субгоризонтальная коровая аномалия на всем своем протяжении сопровождается положительной аномалией Буге, достигающей уровня 30 мГл над ее восточной, наиболее проводящей частью. Результаты детальной магнитной съемки, выполненной в ходе проекта KIROVOGRAD, представляют собой две серии высокочастотных аномалий интенсивностью до 1000—2000 нТл над наиболее интенсивными зонами в западной и восточной частях проводящей структуры. Более гладкие региональные магнитные аномалии также достигают максимума в этих зонах, но на уровнях менее 500 нТл. Зоны максимумов магнитных аномалий хорошо совпадают с положением рассмотренных выше малоконтрастных верхнекоровых аномалий электропроводности на глубине 5—15 км. Можно предположить, что эти зоны содержат метаосадки, обогащенные электронно-проводящими и магнитными породами.

На самом северном профиле КИРОВ (~54,0° с.ш.) геоэлектрическая структура весьма близка к структуре, показанной на профиле ЖИЗДРА, а на более южных профилях наблюдается тенденция погружения субгоризонтальных проводящих структур. Таким образом, наиболее яркие аномалии электропроводности расположены глубже 20 км. В то же время наиболее интенсивные источники КМА и БМА, связанные с массивами железистых кварцитов, лежат в верхней части фундамента на глубинах первых километров [Геншафт и др., 1997; Бродовой и др., 2001].

Следовательно, выявленная корреляция аномальных МВ откликов и наземных магнитных аномалий отражает не наложение аномалиеобразующих тел, а лишь генетическую связь процессов формирования верхнекоровых магнитоактивных тел и нижнекоровых аномально проводящих структур.

Области интенсивных верхнекоровых магнитных аномалий должны характеризоваться аномальными свойствами магнитной проницаемости, обычно не учитываемыми при интерпретации аномалий переменного ЭМ поля, в том числе МТ и МВ откликов. Возможные при этом искажения результатов интерпретации обсуждаются в работах [Доброхотова, Юдин, 1980; Алексанова и др., 2010]. Модельные расчеты МТ полей для 2D тел простой формы и повышенной магнитной проницаемости указывают на эффекты повышения кажущегося сопротивления. В этом случае интерпретация МТ данных без учета аномальной магнитной проницаемости не порождает ложных проводящих структур, но может несколько уменьшить контраст электропроводности в пределах магнитоактивных и проводящих структур. Впрочем, более сложные распределения магнитной проницаемости и электропроводности заслуживают явного совместного моделирования.

Для изучения магнитных свойств нижнекоровых проводящих зон необходимо снять влияние интенсивных пространственно-высокочастотных верхнекоровых источников и выделить относительно низкочастотные литосферные аномалии. Для достижения этой цели возможно применение алгоритмов частотной фильтрации и аналитического продолжения вверх наземных данных. В настоящей же работе реализуется другой подход, и задача решается с привлечением спутниковых магнитных наблюдений миссии CHAMP.

С запуском магнитометрических спутников появилась возможность по-новому взглянуть на крупномасштабные магнитные аномалии. Анализ пространственного распределения магнитного поля на спутниковых высотах показал [Bogdanova et al., 1996; Heman, Maus, 2005; Marchenko, Orliuk, 2010], что высокочастотные аномалии существенно уменьшаются, а низкочастотные региональные аномалии с характерными размерами порядка сотен километров и интенсивностью порядка первых десятков нанотесла остаются. Пространственная структура низкочастотных аномалий магнитного поля отражает

изменения локальных магнитных свойств и положения нижней кромки магнитоактивных структур, определяемой изотермой Кюри магнитных минералов. Крупномасштабные тектонические структуры — кратоны, щиты и зоны субдукции характеризуются положительными аномалиями, вызванными повышенной магнитной восприимчивостью, а бассейны и абиссальные равнины — отрицательными аномалиями, объясняемыми утонением коры и поднятием изотермы Кюри [Nemant, Maus, 2005].

Авторы настоящей работы накопили опыт выделения и анализа литосферных магнитных аномалий по спутниковым данным CHAMP в различных регионах [Абрамова и др., 2009; 2010; 2011].

Спутниковые литосферные аномалии постоянного магнитного поля CHAMP. Миссия спутника CHAMP, продолжающаяся с 2000 г., обеспечивает надежные измерения скалярных и векторных параметров геомагнитного поля, равномерно покрывающие с высокими разрешением и точностью поверхность всего земного шара [Reigber et al., 2002]. От своей начальной высоты (~460 км) за 8 лет работы спутник снизился до 330 км, что позволяет анализировать поведение поля на разных высотах. На спутнике были установлены: магнитометр OVM, регистрирующий модуль полного вектора геомагнитного поля (T), и трехкомпонентный феррозондовый магнитометр FGM, измеряющий три ортогональных векторных компоненты (X , Y , Z). Экспериментальные данные имеют секундное временное разрешение, а пространственное разрешение составляет ~7 км.

Обработка спутниковых данных CHAMP для целей настоящего исследования заключается в выделении из измеренных значений геомагнитного поля аномальной части, связанной с намагниченностью литосферы [Абрамова и др., 2009; 2011]. Поле, измеренное на спутниковых высотах, является сложной функцией пространства и времени и состоит из частей, обусловленных внешними и внутренними по отношению к поверхности Земли источниками. Главная проблема — корректное разделение суммарного магнитного поля на связанные с различными физическими источниками части, включающие:

- главное магнитное поле, создаваемое источниками магнитогидродинамической природы в жидкой части земного ядра;
- низкочастотные поля, возбуждаемые

магнитосферно-ионосферными токовыми системами;

- поля, возбуждаемые аномалиями электропроводности структур земной коры и верхней мантии;

- аномальное поле, обусловленное намагниченностью горных пород литосферы.

Для выделения указанного последним поля литосферных аномалий из первичных данных, наблюдаемых на каждом витке, исключались модельные значения главного поля, относящиеся именно к этому временно-му отрезку [Головков и др., 2007]. Эффекты магнитосферных токовых систем снимались в аппроксимации первой зональной гармоникой в сферическом разложении, а ионосферных — линейными или параболическими трендами. Спутниковые данные анализировались только для спокойных в магнитном отношении дней ($k_p \leq 2$, Dst -индекс ≤ 20 нТл). Для уменьшения искажающего влияния солнечно-суточной вариации Sq к рассмотрению принимались лишь витки, выполненные в ночное время (LT от 22 до 6 ч).

С помощью специально разработанной программы выделения из общего объема записей со спутника CHAMP геомагнитных полей, благоприятных для изучения литосферных аномалий [Абрамова и др., 2009; 2011], сформирована база данных измерений модуля и компонент геомагнитного поля на разных высотах полета. В пределах рассматриваемой в настоящей работе территории отобраны и обработаны витки, равномерно покрывающие сектор 30—40° в.д. и 48—56° с.ш. Для построения карт литосферных магнитных аномалий использовано порядка трех тысяч точек наблюдений. В процессе построения карт вертикальной компоненты Z_a были сопоставлены независимые определения за 2005 и 2008 г. с высотой полета спутника 300—350 км. Близкое совпадение этих данных позволило выполнить их медианное осреднение по блокам размером 40 км и представить сводную карту по результатам двухлетних наблюдений (рис. 1, в).

На этой карте, прежде всего, выделяется положительная аномалия северо-западного простираения в зоне КМА шириной порядка 200 км, центром в окрестности г. Белгорода и интенсивностью до 40 нТл. На северо-западе за пределами массива ЭМ зондирований KIROVOGRAD интенсивность этой аномалии падает и не превышает 15 нТл. Положительная аномалия сопровождается меньшими

по амплитуде отрицательными аномалиями северо-восточнее г. Калуги на границе Московской синеклизы и на юго-западе в пределах УЩ.

Спутниковая аномалия следует общей структуре положительной магнитной аномалии КМА и ее Барятинского продолжения, выделяемым по наземным данным (рис. 1, б), но характеризуется существенно большей шириной и предполагает более глубинную средненижнекоровую природу. Глубинное залегание источников спутниковых магнитных аномалий подтверждается и предшествующими построениями, базирующимися на использовании данных спутника MAGSAT [Bogdanova et al., 1996]. Рассматриваемой территории соответствует обширная положительная аномалия (более 14 нТ), также вытянутая в северо-западном направлении и обусловленная, по мнению авторов, наложением эффектов коровых и, возможно, верхнемантийных источников. Краевые градиентные зоны этой аномалии T располагается вблизи границ ВМ с ДДВ и Московской синеклизой, что согласуется с нашими построениями по магнитным данным спутника CHAMP. Следует отметить, однако, некоторые различия в контурах и интенсивности полученных аномалий, связанные, в частности, с тем, что аномалии магнитного поля MAGSAT даны для модуля полного поля T , в то время как карты по спутниковым наблюдениям CHAMP строились для вертикальной компоненты поля Z_a , пространственное распределение которой, на наш взгляд, более простое и информативное.

Курская коровая аномалия электропроводности попадает в зону максимальной аномалии спутникового вертикального магнитного поля. Вдоль продолжающей ее на север менее интенсивной КбрА положительная аномалия вертикального магнитного поля последовательно снижается до уровня 10 нТл на широте с. Барятино. Зона КрвА, продолжающейся с УЩ под ДДВ на ВМ до широты г. Брянска, попадает на склон спутниковой магнитной аномалии.

Таким образом, практически все яркие коровые аномалии электропроводности, исследуемые в эксперименте синхронного МТ/МВ зондирования KIROVOGRAD, попадают в область значимых положительных аномалий спутникового вертикального магнитного поля, что может указывать на общие черты природы повышенной электропроводности этих структур.

Следует, однако, отметить, что представленное спутниковое поле имеет чрезвычайно гладкую структуру, обусловленную достаточно редкой сетью выбранных первичных наблюдений (реже 25 км) и медианным усреднением результатов по двум годам наблюдений. Предстоит повысить плотность используемых спутниковых данных. Целесообразно также рассмотреть возможность сопоставления аномалий для различных высот спутника, а также их аналитического продолжения вниз на меньшие высоты. На этом пути представляется важным и рассмотрение результатов аналитического продолжения вверх наземных аномалий магнитного поля, а также применения других подходов выделения его низкочастотных компонент.

Геолого-геофизическая природа литосферных аномалий магнитного поля. Источники аномалий магнитного поля континентальной литосферы сконцентрированы в объеме ее магнитоактивного слоя. Его верхняя граница может совпадать с земной поверхностью либо находиться в осадочном чехле или в фундаменте, в том числе на глубине свыше 10 км. Нижняя граница магнитоактивного слоя определяется прежде всего положением поверхности температуры Кюри магнетита и других магнитных минералов [Arkani-Hamed et al., 1994; Tanaka et al., 1999].

Анализ магнитных спутниковых аномалий указывает на их связь с двумя основными факторами. Они могут быть вызваны как изменением средней эффективной намагниченности крупных блоков литосферы в соответствии с латеральными изменениями состава и концентрации магнитных минералов, так и изменением мощности ее магнитоактивного слоя в соответствии с изменениями геотермической обстановки в однородном слое литосферы, вызывающими изменение глубины до поверхности Кюри [Крутиховская, 1986; Arkani-Hamed, Strangway, 1986; Пашкевич, Печерский, 1994; Печерский, Геншафт, 2001]. Источником большинства выявленных крупномасштабных аномалий, скорее всего, является совместное действие обоих факторов.

В пределах древних платформ отмечается низкий средний фон теплового потока. Это, в сочетании с большой мощностью коры, определяет глубокое положение поверхности Кюри и приводит к тому, что мощность магнитоактивного слоя древних платформ значительно превышает его мощность в более

молодых тектонических регионах. В них даже при низких глубинных температурах земная кора в целом обладает более слабой намагниченностью, что принято связывать с ее более кислым составом.

Имеются существенные различия между дорифейскими образованиями — главными источниками магнитных аномалий — и менее магнитными фанерозойскими формациями. Самые сильные аномалии на континентах связаны с протерозойскими провинциями [Goodwin, 1996]. Эта закономерность, однако, может нарушаться в зонах современной платформенной активизации по мере подъема поверхности Кюри под воздействием температурного фактора. Остается открытым вопрос, в какой мере процессы современной платформенной активизации с масштабом самых первых сотен километров могут проявляться в спутниковых литосферных аномалиях.

Заключение. Две из трех коровых аномалий электропроводности, КурА и КбрА, выявленных на западном склоне ВМ, отчетливо коррелируются в плановом положении с Курской и Баятинской аномалиями постоянного магнитного поля, однако имеют различную глубинность. Этот факт указывает на связанную природу геодинамических процессов формирования верхнекоровых магнитных и нижнекоровых геоэлектрических аномалий.

На профиле ЖИЗДРА результаты углубленного сопоставления геоэлектрического разреза с магнитными аномалиями (см. рис. 2) позволяют выделить верхнекоровые магнитоактивные блоки с умеренно пониженным электрическим сопротивлением, указывающим на присутствие графито- и/или сульфидосодержащих метаосадков. Эти блоки приурочены к глубинным разломным зонам (см. рис. 1).

Магнитные аномалии, полученные по данным спутника CHAMP, в общих чертах со-

ответствуют структуре регионального магнитного поля по наземным наблюдениям и имеющимся геолого-тектоническим представлениям о структуре западного склона ВМ и прилегающих осадочных бассейнов. Методика построения и анализа этих аномалий требует развития, обеспечивающего, во-первых, повышение их детальности и временной устойчивости, а во-вторых, построения алгоритмов совместной инверсии спутниковых литосферных аномалий и низкочастотных трансформант наземных наблюдений и переход, намеченный в работе [Алексанова и др., 2011], к сопоставлению геоэлектрических моделей с глубинными магнитными [Орлюк, 2000; Marchenko, Orliuk, 2010].

Три коровые аномалии электропроводности, КрвА, КурА и КбрА, выявленные на западном склоне Воронежского массива, характеризуются отчетливыми положительными аномалиями литосферного вертикального магнитного поля CHAMP.

В условиях, когда практически вся территория Восточно-Европейской платформы перекрыта осадочными отложениями, спутниковое литосферное магнитное поле может стать важной компонентой в современном комплексе геолого-геофизических данных для изучения глубинного строения земной коры.

Благодарности. Выполненные исследования частично поддержаны грантами РФФИ 07-05-00437, 11-05-00491, 11-05-00644 и 11-05-12030офим, а также российско-украинским грантом РФФИ-Укр_Ф 09-05-90439. Приведенные в статье карты и разрезы построены с использованием программ GMT [Wessel, Smith, 2007]. Авторы благодарны Е. Д. Алексановой, Н. В. Баглаенко, Е. Ю. Соколовой и всем участникам Рабочей группы KIROVOGRAD [Варенцов и др., 2012] за участие в сборе и анализе данных проекта и полезные обсуждения полученных результатов.

Список литературы

- Абрамова Д. Ю., Абрамова Л. М., Филиппов С. В., Фрунзе А. Х. О перспективах использования спутниковых измерений для анализа региональных магнитных аномалий // Исследование Земли из космоса. — 2011. — № 6. — С. 1—11.
- Абрамова Л. М., Абрамова Д. Ю., Филиппов С. В. Исследования литосферного спутникового поля Западной Сибири // Геофизика. — 2010. — № 6. — С. 45—54.
- Абрамова Д. Ю., Филиппов С. В., Абрамова Л. М. Длинноволновые магнитные аномалии на территории России по измерениям спутника CHAMP // Геофизические исследования. — 2009. — 10, № 2. — С. 48—63.
- 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., Шу-

- стов 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 (Материалы международной конференции памяти В. Е. Хаина). — Москва: МГУ, 2011. — С. 33—37.
- Александрова 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.
- Броговой В. В., Булатов Б. С., Новицов П. В., Иванов А. А. Новые железорудные объекты в Северо-Калужском районе по результатам магнитных исследований // Изв. вузов. Геология и разведка. — 2001. — № 4. — С. 77—84.
- Броговой В. В., Новицов П. В. Новые данные магнитных исследований о строении и рудоносности Калужского региона // Изв. вузов. Геология и разведка. — 2000. — № 5. — С. 74—80.
- Варенцов Ив. М., Ковачикова С., Куликов В. А., Логвинов И. М., Трегубенко В. И., Яковлев А. Г. Синхронные МТ и МВ зондирования на западном склоне Воронежского массива // Геофиз. журн. — 2012. — 34, № 4. — С. 90—107.
- Геншафт Ю. С., Лыков А. В., Миронова Н. А., Салтыковский А. Я., Афанасьев Н. С. Петромагнитное изучение пород фундамента Воронежского кристаллического массива // Физика Земли. — 1997. — № 9. — С. 38—45.
- Головков В. П., Зверева Т. И., Чернова Т. А. Метод создания пространственно-временной модели главного магнитного поля путем совместного использования методов сферического гармонического анализа и естественных ортогональных компонент // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2007. — 47, № 2. — С. 272—278.
- Доброхотова И. А., Югин М. Н. О влиянии магнитной проницаемости на результаты работ, проводимых методами МТ-поля // Глубинные ЭМ зондирования Дальнего Востока. — Москва: Наука, 1980. — С. 99—104.
- Карта аномального магнитного поля СССР. — 1:1 000 000 / Под. ред. В. Н. Зандер. — Москва: ВСЕГЕИ, 1975.
- Карта структурного районирования докембрия ЮЗ части Восточно-Европейской платформы, масштаб 1:1 000 000 // Комплект карт «Геология и металлогения юго-западной части Восточно-Европейской платформы» / Под. ред. Л. С. Галецкого. — Москва: ВСЕГЕИ, 1992.
- Крутиховская З. А. Глубинные магнитные неоднородности — миф или действительность? // Геофиз. журн. — 1986. — 8, № 5. — С. 3—23.
- Національний атлас України. — Київ: Картографія, 2007. — 118 с.
- Орлюк М. И. Пространственные и пространственно-временные магнитные модели разноранговых структур литосферы континентального типа // Геофиз. журн. — 2000. — 22, № 6. — С. 148—165.
- Пашкевич И. К., Печерский Д. М. Петромагнитная модель литосферы. — Киев: Наук. думка, 1994. — 175 с.
- Печерский Д. М., Геншафт Ю. С. Петромагнетизм континентальной литосферы и природа региональных магнитных аномалий: обзор // Рос. журн. наук о Земле. — 2001. — 3, № 2. — С. 4—36.
- Arkani-Hamed J., Langel R. A., Purucker M. E. Magnetic anomaly maps of Earth derived from POGO and Magsat data // J. Geophys. Res. — 1994. — 99. — P. 24075—24090.
- Arkani-Hamed J., Strangway D. W. Effective magnetic susceptibility anomalies of the oceanic upper mantle derived from Magsat data // Geophys. Res. Lett. — 1986. — 13. — P. 999—1002.
- Bogdanova S. V., Pashkevich I. K., Gorbatshev R., Orlyuk M. I. Riphean rifting and major Palaeoproterozoic crustal boundaries in the basement of the East European Craton: geology and geophysics // Tectonophysics. — 1996. — 268. — P. 1—21.
- Goodwin A. M. Principles of Precambrian Geology. — New York: Academic Press, 1996. — 327 p.
- Hemant K., Maus S. Geological modeling of the new CHAMP magnetic anomaly maps using a geographical information system technique // J. Geophys. Res. — 2005. — 110. — P. 1—23.
- Marchenko A., Orliuk M. 3D magnetic model of the East European Craton and its effect at near-surface and satellite heights // Геофиз. журн. — 2010. — 32, № 4. — С. 96—98.
- Reigber C., Luhr H., Schwintzer P. CHAMP mission status // Adv. Space Res. — 2002 — 30. — P. 129—134.
- Tanaka A., Okubo Y., Matsubayashi O. Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly data in East and Southeast Asia // Tectonophysics. — 1999. — 306. — P. 461—470.
- 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, 2007. — P. 263—277.
- Wessel P., Smith W. H. F. The generic mapping tools. Technical reference and cookbook, ver. 4.2. — 2007. — <http://gmt.soest.hawaii.edu>.