

Аномальные магнитные свойства палеопротерозойских железистых кварцитов Курского блока (Воронежский кристаллический массив)

©2025 В. В. Ильин¹✉, В. И. Жаворонкин¹, В. Н. Глазнев^{1,2},
О. М. Муравина¹, С. В. Цыбуляев¹, К. А. Савко^{1,3}, И. В. Федюкин⁴

¹Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, 394018, Воронеж, Российская Федерация

²Геологический институт Кольского научного центра РАН,
ул. Ферсмана, 14, 184209, Апатиты, Российская Федерация

³Институт геологии рудных месторождений, петрографии,
минералогии и геохимии РАН, пер. Старомонетный, 35,
119017, Москва, Российская Федерация

⁴Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН,
ул. Б. Грузинская, 10, 123995, г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

Введение: палеопротерозойские железисто-кремнистые формации играют ключевую роль в формировании аномального магнитного поля Курского блока Воронежского кристаллического массива (ВКМ). Целью данного исследования является изучение петромагнитных характеристик железистых кварцитов Курского блока ВКМ, ориентированное на решение задач построения геологически содержательных магнитных моделей литосферы региона.

Методика: изучены образцы керна железистых кварцитов из скважины на фланге Стойленского месторождения КМА. Выполнены измерения величины магнитной восприимчивости, её анизотропии и температурной зависимости. Определялось значение естественной остаточной намагниченности и параметров петель гистерезиса образцов пород. Выполнено петрографическое описание минерального состава рудной компоненты породы для образцов с наиболее контрастными петромагнитными свойствами.

Обсуждение результатов: магнитная восприимчивость образцов варьирует в диапазоне от 0.32 до 1.45 ед. СИ со средним значением 0.87 ед. СИ и анизотропией от 24 до 136%. Естественная остаточная намагниченность характеризуется аномально высокими значениями до 2645 А/м при среднем значении 660 А/м. Отношение Кёнигсбергера для изученных образцов изменяется от 8 до 34. Величина намагниченности насыщения колеблется в пределах от 1.30 до 12.34 мАм². Коэрцитивная сила изменяется в пределах от 2.52 до 21.01 мТл, а остаточная коэрцитивная сила от 10.73 до 62.36 мТл. Термомагнитные определения указывают на преобладание в изученных образцах ферромагнитной фазы с точкой Кюри около 568°C.

Заключение: полученные оценки магнитной восприимчивости показывают, что при моделировании рудных объектов, сложенных железистыми кварцитами, обязательно следует учитывать эффект размагничивания на формирование внешнего магнитного поля. Оценка аномальной величины остаточного намагничивания может выступать как верхнее ограничение на искомые решения обратной задачи



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Ильин Виталий Викторович, e-mail: vitaliy.ilin.2000@bk.ru

магнитометрии, учитывающей индуктивную/остаточную намагниченность и эффект размагничивания. Наличие однодоменных зёрен магнетита и высокое значение коэрцитивной силы способствует консервации вектора естественной остаточной намагниченности пород железисто-кремнистой формации Курского блока.

Ключевые слова: железистые кварциты, петромагнетизм, рудная минералогия, Курский блок, Воронежский кристаллический массив

Источник финансирования: научные исследования выполнены в рамках гранта РНФ № 25-27-00209.

Для цитирования: Ильин В. В., Жаворонкин В. И., Глазнев В. Н., Муравина О. М., Цыбуляев С. В., Савко К. А., Федюкин И. В. Аномальные магнитные свойства палеопротерозойских железистых кварцитов Курского блока (Воронежский кристаллический массив) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2025. № 3. С. 51–64. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/3/51-64>

Введение

Палеопротерозойские железисто-кремнистые формации играют ключевую роль в формировании аномального магнитного поля Курского блока, что было впервые установлено работами Особой комиссии по исследованию Курских магнитных аномалий при Президиуме ВСНХ в 1923 году [1]. Аномалии магнитного поля, обусловленные протяжёнными структурами пород железисто-кремнистой формации, прослеживаются по простиранию на сотни километров на территории Курского блока и чётко картируют положение мощных комплексов пород формации в фундаменте Воронежского кристаллического массива (ВКМ) [2–4]. Максимальная интенсивность аномалий вертикальной компоненты индукции магнитного поля, на уровне рельефа, достигает 160 000 нТл непосредственно над рудными телами с наиболее богатым содержанием магнетита [3]. Для территории КМА установлено наличие специфической литосферной магнитной аномалии с амплитудой до первых тысяч нТл, выявляемой на сводных картах региональных аэромагнитных съёмок [5–8]. Эта аномалия выявляется и по данным спутниковых магнитных наблюдений на высотах 300–450 км [9, 10], где амплитуда поля достигает первых десятков нТл. Природа литосферной аномалии магнитного поля и её связь с интенсивно намагниченными породами железисто-кремнистой формации кристаллического фундамента остаётся пока не выясненной [11–15].

В этом плане, детальное исследование магнитных свойств пород железисто-кремнистых формаций территории ВКМ является одной из важных задач при построении геологически содержательных магнитных моделей литосферы региона. Планомерное изучение петромагнитных характеристик пород региона было начато в 50-х годах прошлого века при выполнении поисково-разведочных геофизических работ [16–23] и продолжаются по настоящее время [24–26]. Сводная петрофизическая база результатов исследований пород кристаллического фундамента содержит около 45000 значений совместных измерений магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности [27], причём более 75 % этих измерений относятся именно к породам железисто-кремнистых формаций Курского блока ВКМ. Полученные результаты позволили дать обоб-

щённую характеристику петромагнитных свойств основных структурно-вещественных комплексов пород региона и успешно использовать эту информацию при создании магнитных моделей железорудных объектов [28–31]. Однако, использовавшаяся ранее аппаратура петромагнитных исследований (астати́ческий магнитометр МА-21 и измеритель магнитной восприимчивости ИМВ-1) не отличалась высокой точностью в силу чего некоторая часть измерений, характеризующих высокие значения магнитных параметров железистых кварцитов, вызвала обоснованные сомнения. Отметим, что именно высокомагнитные комплексы пород железисто-кремнистых формаций вносят наиболее значимый вклад в суммарное аномальное магнитное поле региона [29, 30].

Таким образом, целью нашего исследования является изучение петромагнитных характеристик железистых кварцитов Курского блока ВКМ на современном методическом и техническом уровне с привлечением результатов их минералогического описания. Детальное изучение магнитных свойств железистых кварцитов позволит охарактеризовать верхнюю оценку их магнитных параметров, которая необходима при магнитном моделировании рудных объектов [32] и решении задачи о соотношении роли поверхностных комплексов фундамента и глубинных пород коры при формировании литосферной магнитной аномалии КМА [33].

Геологическая позиция

Воронежский кристаллический массив расположен в юго-восточной части Восточно-Европейского кратона. Докембрийское основание ВКМ сложено палеопротерозойскими террейнами в северо-западной (Брянский террейн) и восточной (Лосевский и Воронцовский террейны) частях. Центр представлен преимущественно архейскими породами Курского блока, в структуре которого выделяется ряд палеопротерозойских синформ (рис. 1 а, б).

Палеопротерозойские образования, включающие в себя полосчатые железисто-кремнистые формации (banded iron formation – BIF), формировались на архейской платформе, в обстановке пассивной континентальной окраины, имели площадное распространение, но сохранились от размыва в узких линейных

структурах северо-западного простирания: Тим-Ястребовской, Михайловской, Белгородской и Вологовской (рис. 1 б). В геодинамическом отношении данные зоны представляют собой внутриконтинентальные рифтогенные структуры [36]. На территории ВКМ железисто-кремнистые формации представлены тремя стратиграфическими уровнями: палеоархейским, мезоархейским и палеопротерозойским [4, 37]. Наиболее распространены палеопротерозойские железистые формации курской серии, к которым приурочены все эксплуатируемые месторождения

железных руд в пределах КМА.

Палеопротерозойская BIF (BIF-PR1) курской серии состоит из хемогенно- и терригенно-осадочных пород, слагающих крылья вышеупомянутых палеопротерозойских синформ [34]. Точный возраст образования курской серии неизвестен. Нижняя граница формирования оценивается в 2612 ± 10 млн лет на основе возраста подстилающих калиевых риолитов [38]. Верхнюю границу следует соотносить с возрастом тимской свиты оскольской серии, сформированной в Тимском задуговом бассейне в период 2100–2070 млн лет [37].

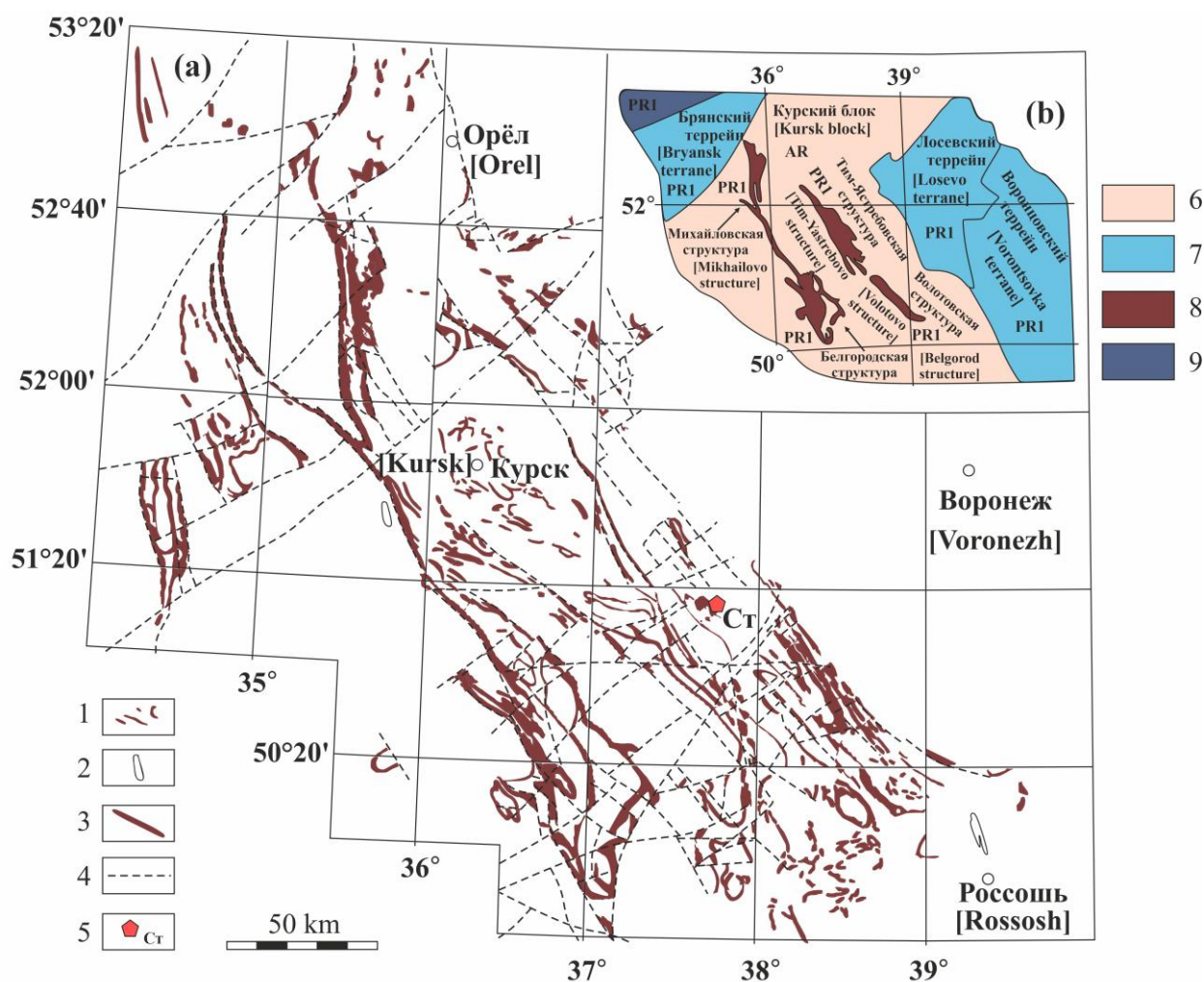


Рис. 1. а – Схема распространения BIF на территории ВКМ по [34]: 1 – мезоархейские BIF; 2 – неоархейские BIF; 3 – палеопротерозойские BIF; 4 – разрывные нарушения; 5 – Стойленское месторождение; б – Схема структурного районирования ВКМ по [35]: 6 – архейский домен; 7 – палеопротерозойские террейны; 8 – палеопротерозойские структуры архейского домена, вмещающие породы курской серии; 9 – Осницко-Микашевский пояс.

[Fig. 1. (a) - Scheme of BIF distribution in the VCM area according to [34]: (1) - Mesoarchean BIF; (2) - Neoarchean BIF; (3) - Paleoproterozoic BIF; (4) - discontinuous faults; (5) - Stoilenskoye deposit; (b) - Scheme of structural zoning of the VCM according to [35]: (6) - Archean domain; (7) - Paleoproterozoic terranes; (8) - Paleoproterozoic structures of the Archean domain, containing rocks of the Kursk series; (9) - Osnitko-Mikashovsky belt.]

Методика

С целью комплексного изучения палеопротерозойской BIF ВКМ было отобрано 16 образцов керна из разведочной скважины на фланге Стойленского месторождения в 700 м к юго-западу от юго-западного борта

карьера (рис. 2 а). Глубина отбора образцов составляет 160 – 210 метров и в этом интервале выбирались типичные породы разреза, представленные железистыми кварцитами. Отметим, что аномальное магнитное поле вертикальной компоненты индукции на устье скважины

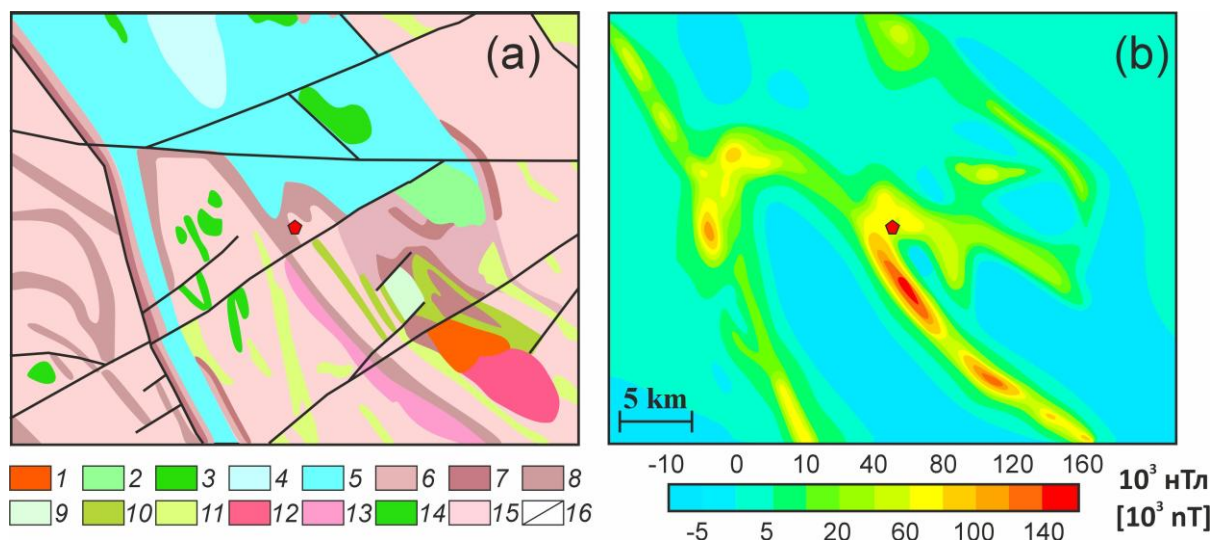


Рис. 2. *a* - Геологическая схема строения фундамента в районе Стойленского месторождения КМА по [39]: 1 – субщелочные граниты; 2 – гранодиориты; 3 – габброиды; 4 – сланцы кварц-биотитовые; 5 – известняки и доломиты; 6 – кварциты маложелезистые; 7 – сланцы и кварциты; 8 – железистые кварциты; 9 – дациты и риолиты; 10 – ортоамфиболиты; 11 – мигматиты, кварциты; 12 – граниты субщелочные; 13 – плагиограниты; 14 – габбропироксениты; 15 – гнейсы, мигматиты; 16 – разрывные нарушения; *b* - Сглаженная схема аномальной вертикальной компоненты магнитного поля.

[Fig. 2. *(a)* - Geological scheme of the basement structure in the area of the Stoilenskoye deposit of the KMA according to [39]: (1) – subalkaline granites; (2) – granodiorites; (3) – gabbroids; (4) – quartz-biotite schists; (5) – limestones and dolomites; (6) – quartzites are low-ferruginous; (7) – schists and quartzites; (8) – ferruginous quartzites; (9) – dacites and rhyolites; (10) – orthoamphibolites; (11) – migmatites, quartzites; (12) – subalkaline granites; (13) – plagiogranites; (14) – gabbropyroxenites; (15) – gneisses, migmatites; (16) – discontinuous faults; *(b)* - Smoothed map of the anomalous vertical component of magnetic field.]

составляет около 48 000 нТл (рис. 2 *b*), являющееся характерным значением для аномалий над пластами железистых кварцитов КМА.

Место бурения скважины не затронуто горными работами с использованием мощных электроустановок, однако вся верхняя часть разреза подвергалась многократному сейсмическому воздействию ближайших карьерных взрывов. С целью исключения влияния последнего фактора [40, 41] для дальнейших исследований отбирались наиболее монолитные участки керна. Из каждого образца керна вырезался куб с ребром 2 см для петромагнитных исследований, а оставшийся материал использовался при изготовлении порошка для определения температуры Кюри. После выполнения петромагнитных исследований проводилась полировка трёх ортогональных кубических граней образцов и эти аншлифы использовались для описания минерального состава рудной компоненты породы.

Определение петромагнитных свойств производилось согласно стандартной методике [42] в лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН, ЦКП ИФЗ РАН. Измерение величины магнитной восприимчивости, анизотропии магнитной восприимчивости и температурной зависимости магнитной восприимчивости осуществлялось посредством каппабриджа MFK1-FA (AGICO, Чехия). Величина естественной остаточной намагниченности определялась на спин-магнитометре JR-6 (AGICO, Чехия). Оценка параметров петель гистерезиса выполнялась вибромагнитометром MicroMag VSM 3900 (PMC, Великобритания). Плотность образцов определялась методом гидростатического взвешивания с использованием высокоточных

весов HIGHLAND HCB-1502 (ADAM, Великобритания) в петрофизической лаборатории ВГУ.

Обсуждение результатов Изотермические магнитные характеристики и плотность

В рамках изученной выборки магнитная восприимчивость (χ) варьирует в диапазоне от 0.32 до 1.45 ед. СИ со средним значением 0.87 ед. СИ и анизотропией (λ_χ) от 24 до 136 %. Естественная остаточная намагниченность (I_n) характеризуется аномально высокими значениями, которые изменяются в границах от 14.85 до 2645 А/м, среднее значение – 660.5 А/м. Магнитная восприимчивость обладает заметной корреляционной связью (коэффициент корреляции $R = 0.61$) с естественной остаточной намагниченностью (рис. 3 *a*). Фактор Кенигсберга ($Q_n = I_n/\chi H_r$, где $H_r = 79.6$ А/м) в среднем по выборке составляет 8 при минимальном значении 0.5 и максимальном 34. Высокие значения Q_n указывают на решающую роль естественной остаточной намагниченности в продуцировании аномального магнитного поля над областями развития палеопротерозойской BIF Курского блока.

Плотность (σ) пород рассматриваемой группы изменяется в пределах от 2.27 до 4.41 г/см³, среднее значение – 3.55 г/см³. Наблюдаемые вариации обусловлены различным содержанием ферромагнитных минералов с высокой плотностью в объеме изучаемого образца. Плотность характеризуется высокой степенью связи с магнитной восприимчивостью ($R = 0.68$) (рис. 3 *b*). Все изученные петрофизические параметры сведены в таблицу (табл. 1).

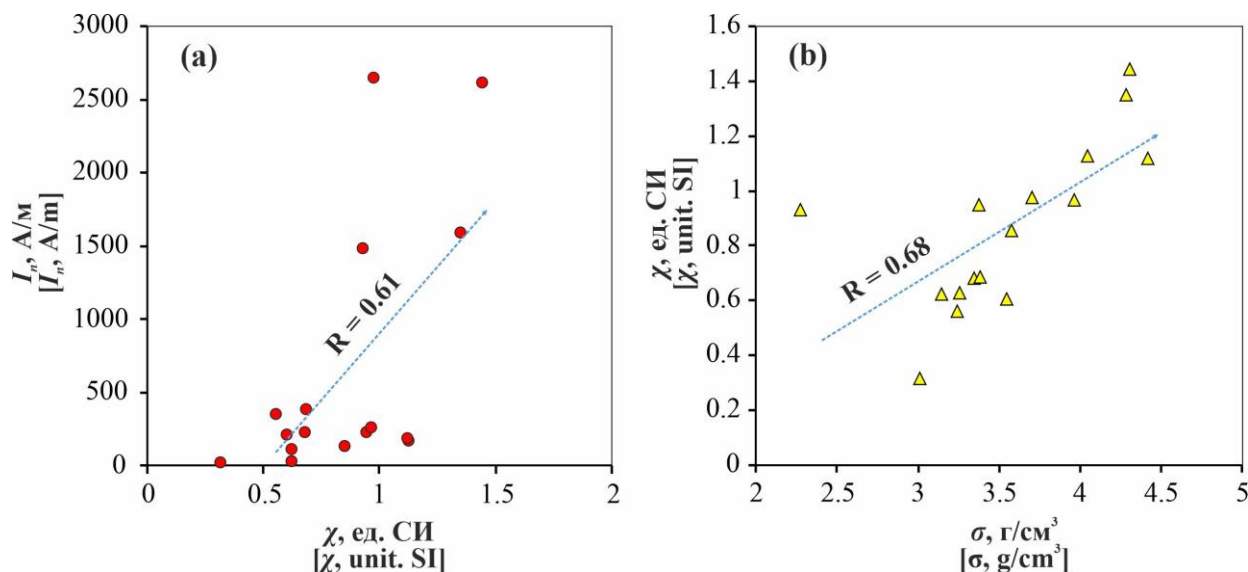


Рис. 3. *a* – Соотношение магнитной восприимчивости (χ) и естественной остаточной намагниченности (I_n); *b* – Соотношение магнитной восприимчивости и плотности (σ).

[Fig. 3. (*a*) – The ratio of magnetic susceptibility (χ) and natural residual magnetization (I_n); (*b*) – Ratio of magnetic susceptibility to density (σ).]

Табл. 1. Изотермические магнитные параметры и плотность BIF-PR1
[Table 1. Isothermal magnetic parameters and density of BIF-PR1]

Образец [Sample]	χ ед. СИ [χ , unit. SI]	λ_χ , %	I_n , А/м [I_n , A/m]	Q_n	σ , г/см ³ [σ , g/cm ³]
11-34-1	0.98	91	2645	34	3.70
11-34-2	0.93	99	1476	20	2.27
11-35-1	0.95	127	225.1	3	3.37
11-35-2	0.68	131	224.8	4	3.34
11-35-21	0.63	125	24.95	0.5	3.14
11-35-22	0.32	128	14.85	0.6	3.01
11-37-1	0.56	130	346.9	8	3.24
11-37-2	1.12	35	182.5	2	4.41
12-17-1	1.45	24	2608	23	4.30
12-17-2	1.35	26	1584	15	4.28
12-19-1	0.69	125	381.2	7	3.38
12-19-2	0.61	136	206.2	4	3.54
12-20-1	0.63	41	103.8	2	3.25
12-20-2	0.97	34	254.3	3	3.96
12-21-1	1.13	56	162.7	2	4.04
12-21-2	0.86	95	127.7	2	3.57

Гистерезисные характеристики

Для оценки доменной структуры ферромагнитных зёрен и вклада различных факторов в формирование магнитных свойств палеопротерозойских железистых кварцитов ВКМ были измерены следующие характеристики петли гистерезиса: намагниченность насыщения (M_s), остаточная намагниченность насыщения (M_{rs}), коэрцитивная сила (H_c) и остаточная коэрцитивная сила (H_{cr}) (табл. 2).

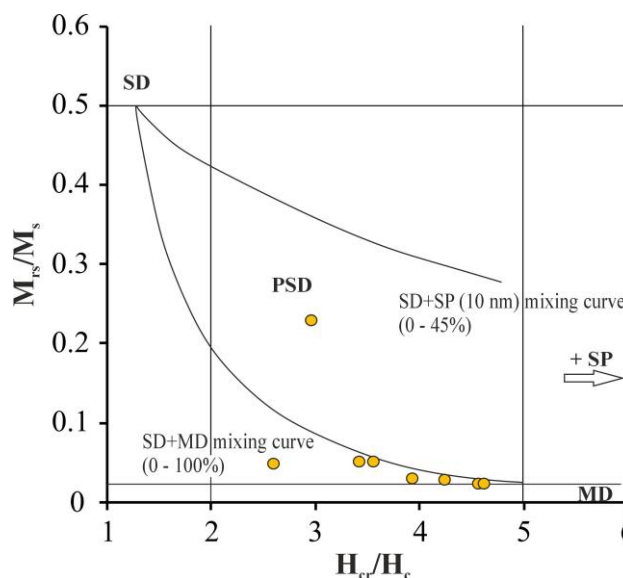
Величина намагниченности насыщения колеблется в пределах от 1.30 до 12.34 мАм². Факт отсутствия взаимосвязи M_s (пропорциональной концентрации ферромагнитной фазы и ее спонтанной намагниченности) с I_n ($R = -0.25$) позволяет предположить, что величина

остаточной намагниченности определяется термодинамическими условиями формирования породы и размером зёрен ферромагнитных минералов.

Коэрцитивная сила исследованных образцов изменяется в широких пределах: $H_c = 2.52 - 21.01$ мТл, $H_{cr} = 10.73 - 62.36$ мТл. Отношения M_{rs}/M_s и H_{cr}/H_c , используемые для оценки доменной структуры зёрен ферромагнитных минералов, варьируют в пределах 0.02 – 0.23 и 2.61 – 4.62 соответственно. На теоретической диаграмме Дзю-Данлопа [43–45] фигуративные точки изученной выборки попадают в поле смешения однодоменных и многодоменных зёрен, исключение составляет образец 11–35 в поле псевдооднодоменных зёрен (рис. 4).

Табл. 2. Параметры петель гистерезиса BIF-PR1
[Table 2. Parameters of BIF-PR1 hysteresis loops]

Образец [Sample]	M_s , мАм ² [M_s , mAм ²]	M_{rs} , мАм ² [M_{rs} , mAм ²]	H_c , нТл [H_c , nT]	H_{cr} , мТл [H_{cr} , mT]
11-34	5.51	162.4	3.60	14.22
11-35	2.23	511.1	21.01	62.36
11-35-2	10.60	230.2	2.78	12.87
11-37	9.09	208.3	3.13	14.31
12-17	4.79	245.8	4.50	16.04
12-19	6.31	297.7	4.20	10.97
12-20	1.30	66.9	4.16	14.28
12-21	12.34	348.8	2.52	10.73

**Рис. 4.** Доменная структура магнитных минералов по [43–45] для пород BIF-PR1 Курского блока: SD – однодоменные зёрна; PSD – псевдооднодоменные зёрна; MD – многодоменные зёрна; SP – суперпарамагнитные зёрна.

[Fig. 4. Domain structure of magnetic minerals according to [43–45] for BIF-PR1 rocks of the Kursk block: SD – single-domain grains; PSD – pseudo-single-domain grains; MD – multi-domain grains; SP – superparamagnetic grains.]

Терромагнитный анализ

Результаты терромагнитного исследования указывают на преобладание в изученных образцах 11–37 и 12–21 ферромагнитной фазы с точками Кюри (T_c) = 566.9 и 568.4°C, величина которых соответствует магнетиту с низким содержанием титана (рис. 5).

Рудная минералогия

Петрографическое описание проведено по 6 образцам с контрастными петромагнитными свойствами. Породы изученной выборки представлены железистыми кварцитами с полосчатой, вкрапленной, прожилково-вкрапленной и полосчато-плойчатой текстурами. Структура аллотриоморфнозернистая, гипидиоморфнозернистая, интерстициальная, замещения. Рудные минералы представлены магнетитом, гематитом, пиритом, пирротин и марказитом

(рис. 6). Обобщенно формирование рудных минералов происходило в следующей последовательности: магнетит → пирит → пирротин → гематит, марказит.

Магнетит является доминирующим рудным минералом, объемное содержание которого изменяется в пределах от 7 до 72 %, среднее – 38.7%. В составе оруденения представлен в виде аллотриоморфных, гипидиоморфных кристаллов размером от 0.005 до 0.9 мм, собранных в полосчатые выделения мощностью от 0.15 до 10 мм. Содержит единичные включения пирита и пирротина. Отдельные кристаллы частично замещены гематитом. В нерудных прослоях наблюдается рудная сыпь (3–7%) состоящая преимущественно из гипидиоморфных кристаллов размером до 0.2 мм. Незначительная часть магнетитовой минерализации представлена червеобразными прожилками мощностью до 0.005 мм.

Пирит в составе оруденения представлен единичными гипидиоморфными и ксеноморфными кристаллами размером от 0.001 до 0.4 мм спорадически рассеянными в поле магнетита, а также редкими интерстиционными вкрапленниками среди нерудных минералов. Отдельные кристаллы частично замещены марказитом, размер зерен которого варьирует в пределах от 0.005 до 0.015 мм, с единичными срастаниями до 0.15 мм.

Пирротин в составе рудной минерализации представлен единичными округлыми и эллипсовидными выделениями размером от 0.01 до 0.05 мм спорадически рассредоточенными в поле магнетита и пирита.

Гематит представлен двумя видами. Первый – удлиненные, спутанно-игольчатые выделения, сконцентрированные главным образом среди магнетита в рудных полосчатых скоплениях, второй – ксеноморфные, как правило, изометричные либо слабоудлиненные выделения, замещающие магнетит (мартитизация) по периферии кристаллов. Размер кристаллов от 0.001 до 0.2 мм.

Закключение

1. Величина магнитной восприимчивости палеопротерозойских BIF Курского блока, установленная в результате высокоточных измерений на образцах керна пород, варьирует в пределах от 0.32 до 1.45 ед. СИ. Такие значения являются типичными для докембрийских комплексов пород железисто-кремнистой формации различных регионов мира [46–48]. Полученные новые значения магнитной восприимчивости пород BIF Курского блока хорошо согласуются с данными для таких же пород, представленными в сводной петрофизической базе по территории ВКМ [27]. Здесь средняя величина магнитной восприимчивости сильномагнитных рудных железистых кварцитов коробковской свит курской серии составляет 1.29 ед. СИ (1084 образца) при максимальной величине 20.6 ед. СИ. Совокупность этих данных, подтвержденная новыми измерениями магнитной восприимчивости железистых кварцитов, показывает, что в процедуре моделирования региональной литосферной аномалии КМА

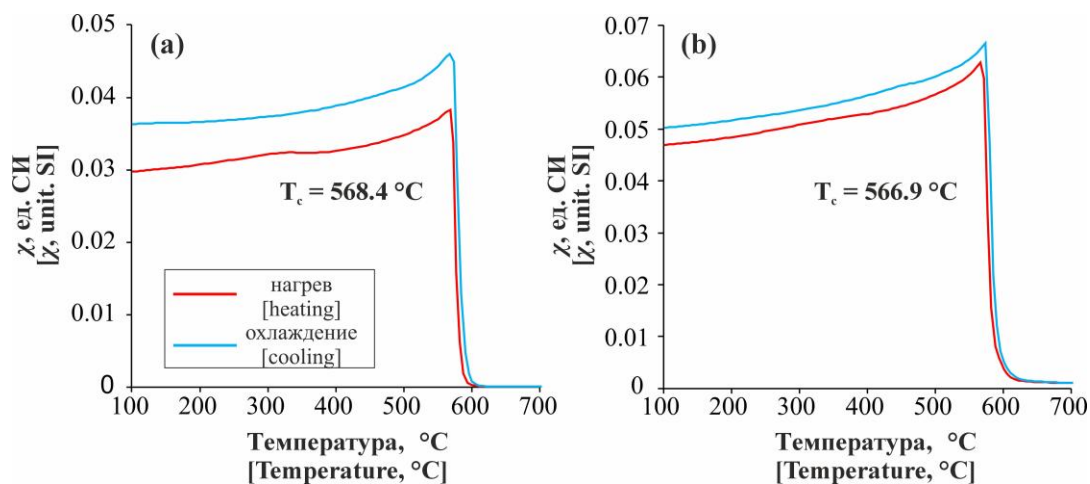


Рис. 5. Зависимость магнитной восприимчивости (χ) от температуры в BIF-PR1: *a* – образец 11-37; *b* – образец 12-21.
[Fig. 5. Dependence of magnetic susceptibility (χ) on temperature in BIF-PR1: (*a*) – sample 11-37; (*b*) – sample 12-21.]

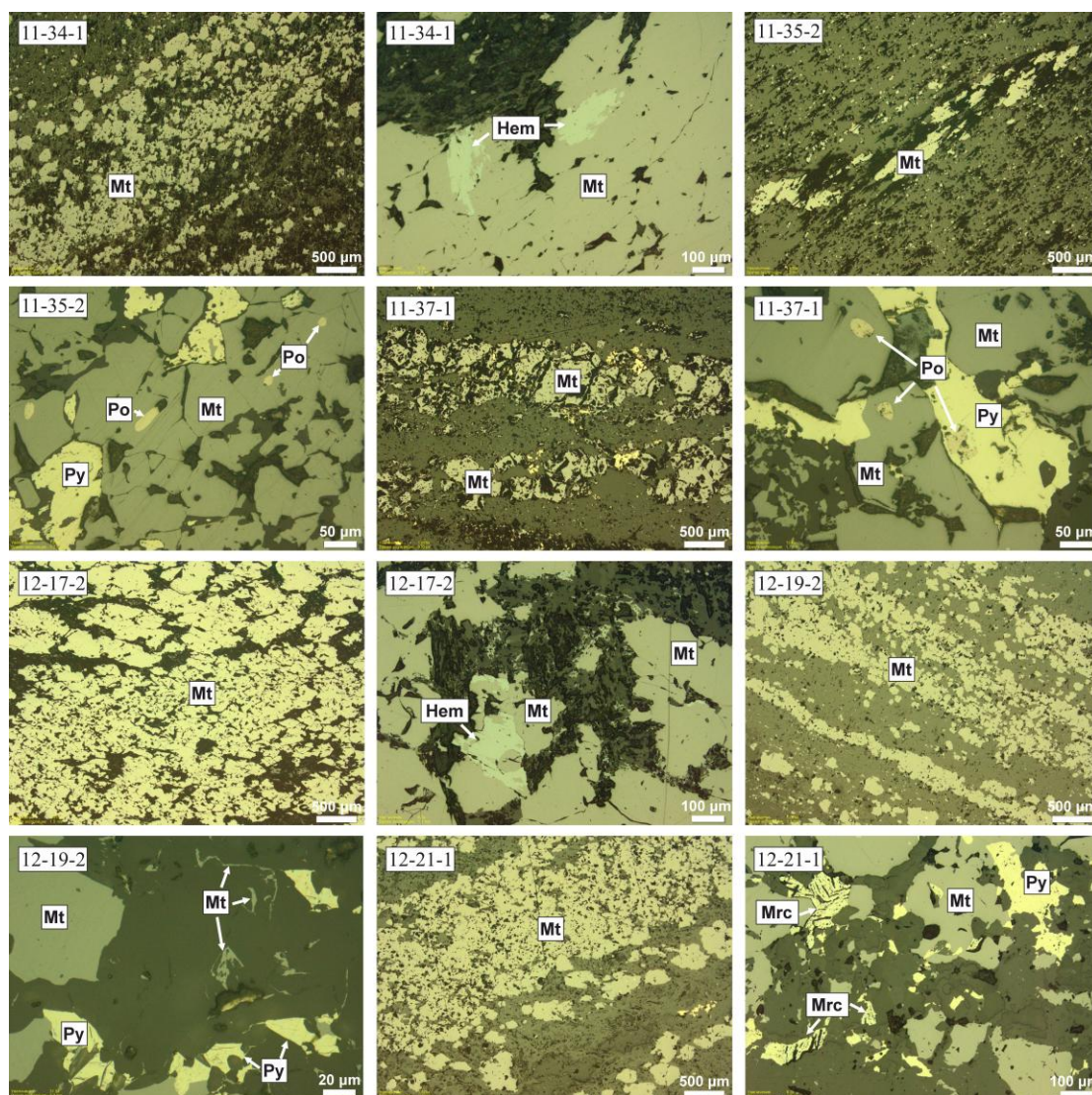


Рис. 6. Фотографии аншлифов BIF-PR1: *Mt* – магнетит; *Hem* – гематит; *Py* – пирит; *Po* – пирротин; *Mrc* – марказит. В левом верхнем углу указаны номера образцов.

[Fig. 6. Photos of BIF-PR1 full sections: *Mt* – magnetite; *Hem* – hematite; *Py* – pyrite; *Po* – pyrrhotite; *Mrc* – marcasite. In the upper left corner are the sample numbers.]

и детальном моделировании рудных объектов, сложенных железистыми кварцитами, обязательно следует учитывать эффект размагничивания на формирование внешнего магнитного поля [32, 48, 49]. Кроме того, полученные оценки магнитной восприимчивости следует принимать во внимание при решении обратных задач магнитотеллурики для районов развития железисто-кремнистой формации, как это убедительно показано на 2D модельных примерах в [50].

2. Естественная остаточная намагниченность изученных образцов палеопротерозойских BIF Курского блока в среднем составляет 528 А/м, при этом для двух образцов она достигает уникальных значений более 2600 А/м. Такие значения остаточной намагниченности ранее не отмечались в опубликованных результатах петромагнитных исследований [11, 17, 23, 46–49], где для высокомагнитных железистых кварцитов характерны максимальные значения в десятки и первые сотни единиц А/м. Известны только две области развития формации BIF с установленными величинами максимальной остаточной намагниченности поверхностных пород до 1500 А/м, которые приурочены к региональным магнитным аномалиям Западной Африки [14] и Западной Австралии [51]. Следует отметить, что полученные аномально высокие значения остаточной намагниченности пород BIF Курского блока в целом согласуются с данными сводной петрофизической базы по территории ВКМ [27], где наличествуют 39 образцов железистых кварцитов коробковской свиты курской серии с намагниченностью свыше 1000 А/м, из которых 6 образцов имеют остаточную намагниченность от 2000 до 2900 А/м. Разумеется вклад этих высокомагнитных образцов в общую картину остаточной намагниченности не столь велик, исходя их общего количества данных, составляющих тысячи измерений для отдельных свит и серий пород фундамента ВКМ. Тем не менее, представленные материалы по аномальным величинам остаточного намагничивания должны выступать как верхнее ограничение на искомые решения обратной задачи магнитометрии [32, 52], учитывающей индуктивную/остаточную намагниченность и эффект размагничивания. Кроме того, оценки величины максимальной намагниченности железистых кварцитов Курского блока ВКМ следует использовать для определения вклада приповерхностных комплексов в наблюдаемую литосферную магнитную аномалию КМА [8–10, 33].

3. Главным ферромагнитным минералом является магнетит с низким содержанием титана ($T_c = 566.9$ и 568.4°C). Установлены также единичные зерна пирротина, однако их вклад в магнитные характеристики рассматриваемых пород незначителен ввиду малого содержания, на что указывает наличие только одной ферромагнитной фазы в результатах термомагнитных исследований. Доменная структура магнетита в рамках изученной выборки представлена смещением однодоменных и многодоменных зёрен, включая один образец с псевдооднодоменным размером зёрен. Наличие однодоменных зёрен способствует

консервации вектора естественной остаточной намагниченности [53]. Коэрцитивная сила изученных образцов колеблется в диапазоне от 2.5 до 21.0 мТл, что делает практически невозможным перемагничивание пород BIF PR1 Курского блока нормальным геомагнитным полем Земли [43, 54]. То есть можно считать, что вектор естественной остаточной намагниченности соответствует вектору геомагнитного поля времени формирования пород или последней термической чистки, если таковая имела место. Справедливость этого утверждения так же усиливается наличием однодоменных зёрен в доменной структуре магнетита. Вместе с тем, присутствие многодоменного магнетита способствует проявлению вязкой остаточной намагниченности [45], которая может частично искажать первичную намагниченность.

Благодарности

Авторы благодарят заведующего лабораторией главного геомагнитного поля и петромагнетизма доктора физико-математических наук. В. Э. Павлова за предоставленную возможность проведения петромагнитных исследований в ЦКП ИФЗ РАН и оказанную помощь в процессе их выполнения. Авторы благодарны Н. А. Корабельникову за предоставленные образцы пород из новой разведочной скважины на фланге Стойленского месторождения КМА. Отдельная благодарность приносится Ю. И. Блоху и А. Б. Равескому, замечания которых ориентировали авторов на проведение исследований петромагнитных характеристик пород BIF Курского блока на современном техническом уровне.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Труды Особой комиссии по исследованию Курских магнитных аномалий при Президиуме ВСНХ. Ред. А. Д. Архангельский. Вып. V. М.: Государственное издательство, 1924. 246 с.
2. Шмидт Н. Г. Опыт применения геофизических методов для целей геологического картирования кристаллического фундамента КМА // *Советская геология*. 1957. № 58. С. 138–139.
3. Железорудные формации докембрия КМА и их перспективная оценка на железные руды / Ред. Н. И. Голивкин. М.: Недра, 1982. 227 с.
4. Щеголев И. Н. Железорудные месторождения докембрия и методы их изучения. М.: Недра, 1985. 197 с.
5. Копаев В. В. О региональных магнитных аномалиях КМА и прилегающих районов // *Материалы по геологии и полезным ископаемым Центральных районов Европейской части СССР*. Калуга. 1959. С. 214–221.
6. Эринчек Ю. М., Литвинова Т. П. Карта аномального магнитного поля России, увязанная с картами по территории стран СНГ. Масштаб 1:2500000. СПб.: ВСЕГЕИ, 2008.
7. Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., Bournas N., Brozena J., Childers V., Dostaler F., Fairhead J. D., Finn C., von Frese R. R. B., Gaina C., Golynsky S., Kucks R., Lühr H., Milligan P., Mogren S., Müller R. D., Olesen O., Pilkington M., Saltus

- R., Schreckenberger B., Thébault E., Tontini F. C. EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2009. 10 (8). Q08005. DOI: 10.1029/2009GC002471
8. Meyer B., Saltus R., Chulliat A. EMAG2v3: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution). Version 3. NOAA National Centers for Environmental Information. 2017. DOI: 10.7289/V5H70CVX
9. Sabaka T. J., Olsen N., Purucker M. E. Extending comprehensive models of the Earth's magnetic field with Ørsted and CHAMP data // *Geophysical Journal International*. 2004. 159. pp. 521–547. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2004.02421.x
10. Thebault E., Vigneron P., Langlais B., Hulot G. A Swarm lithospheric magnetic field model to SH degree 80 // *Earth Planets Space*. 2016. 68. № 126. pp. 1–13. DOI: 10.1186/s40623-016-0510-5
11. McEnroe S. A., Langenhorst F., Robinson P., Bromiley G., Shaw C. What is magnetic in the lower Crust? // *Earth and Planetary Science Letters*. 2004. 226. № 1–2. pp. 175–192. DOI: 10.1016/j.epsl.2004.07.020
12. McEnroe S. A., Fabian K., Robinson P., Gaina C., Brown L. L. Crustal magnetism, lamellar magnetism and rocks that remember // *Elements*. 2009. Vol. 5. pp. 241–246. DOI: 10.2113/gselements.5.4.241
13. Brown L. L., McEnroe S. A., Peck W. H., Nilsson L. P. Anorthositic Sources of Magnetic Anomalies / In: E. Petrovsk et al. (eds.). *The Earth's Magnetic Interior*. IAGA Special Sopron Book Series 1. 2011. DOI: 10.1007/978-94-007-0323-0_23
14. Launay N., Quesnel Y., Rochette P., Demory F. Iron formations as the source of the West African magnetic crustal anomaly // *Frontiers in Earth Science*. 2018. Vol. 6:32. DOI: 10.3389/feart.2018.00032
15. Maat G. W., Church N. S., Oda H., Pastore Z., McEnroe S. A. Characterization and imaging magnetic minerals from ultramafic roots of a LIP: implication for deep crustal magnetic sources // *Geophysical Journal International*. 2024. 236. № 3. pp. 1577–1595. DOI: 10.1093/gji/ggad479
16. Копяев В. В., Мартынова Т. А. О магнитной восприимчивости железистых кварцитов Старооскольского железорудного района КМА // *Изв. АН СССР. Сер. Геофизика*. 1960. № 7. С. 988–997.
17. Крутиховская З. А., Завойский В. Н., Подоляно С. М., Савенко Б. Я. Намагниченность пород железорудных формаций Большого Кривого Рога и КМА. Киев: Наукова Думка, 1964. 158 с.
18. Афанасьев Н. С., Павловский В. И. Физические свойства пород фундамента ВКМ. Петрография докембрия Русской платформы. Киев: Наукова думка, 1970. С. 421–427.
19. Жаворонкин И. А., Крамовицкая Р. С., Кривцов И. И., Филаретов Г. И., Афанасьев Н. С., Павловский В. И. Петрофизическая характеристика пород докембрия Воронежского кристаллического массива и ее использование при составлении геолого-геофизических схем // *Петрофизическая характеристика Советской части Балтийского щита*. Апатиты: Изд. КФАН СССР. 1976. С. 28–29.
20. Антонов Ю. В., Слюсарев С. В. Изучение магнитных свойств железистых кварцитов при разведке железорудных месторождений // *Геофизические исследования на Курской магнитной аномалии*. Воронеж: ВГУ, 1981. С. 117–124.
21. Афанасьев Н. С. Петрофизика докембрийских образований и геологическое строение Воронежского кристаллического массива: дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Воронеж. ВГУ, 1982. 310 с.
22. 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.
23. Афанасьев Н. С. Петрофизика земной коры ВКМ. Литосфера Воронежского кристаллического массива по геофизическим и петрофизическим данным. Воронеж: ИПЦ Научная книга, 2012. С. 21–88.
24. Жаворонкин В. И., Терентьев Р. А., Кондаурова К. А. Петрофизические и петрологические особенности елкинского интрузивного массива (ВКМ). *Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле*: материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН, 2019. С. 108–111.
25. Жаворонкин В. И., Кондаурова К. А. Петрофизические характеристики магматитов еланского интрузивного комплекса (Воронежский кристаллический массив). *Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей*: материалы 47 сессии Международного семинара им. Д. Г. Успенского. Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2020. С. 121–123.
26. Муравина О. М., Жаворонкин В. И., Харин А. Ю., Пономаренко И. А. Петрофизические параметры габброидеритов новогольского комплекса (Воронежский кристаллический массив) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия Геология*. 2023. № 4. С. 134–139. DOI: 10.17308/geology/1609-0691/2023/4/134-139
27. Muravina O. M., Glaznev V. N., Zhavoronkin V. I., Mints M. V. Reflection of the Petrophysical Basement Rocks Models in Geophysical Fields // *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences: Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields*. Eds. D. Nurgaliev, N. Khairullina. Springer Nature Switzerland AG, 2019. pp. 49–54. DOI: 10.1007/978-3-319-97670-9_6
28. Жаворонкин И. А., Страхов В. Н. Об интерпретации сложных магнитных аномалий Белгородского района КМА // *Прикладная геофизика*. Вып. 31. М.: Гостоптехиздат, 1961. С. 248–256.
29. Страхов В. Н., Лапина М. И., Жаворонкин И. А. Современная методика интерпретации магнитных и гравитационных аномалий типа КМА // *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1971. № 3. С. 49–66.
30. Бойдаченко В. Н., Вассерман И. С., Жаворонкин И. А., Зальцманович И. И. Геофизические методы при прогнозировании, поисках и разведке железорудных месторождений КМА. Киев: ИГФМ, 1986. 53 с.
31. Глазнев В. Н., Жаворонкин В. И., Муравина О. М., Антонова И. Ю., Воронова Т. А., Черешинский А. В., Холин П. В. Строение верхней коры елецкого участка Лосевского террейна (Воронежский кристаллический массив) по данным плотностного моделирования // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия Геология*. 2019. №3. С. 74–83. DOI: 10.17308/geology.2019.3/1815
32. Блох Ю. И. Теоретические основы комплексной магнито-разведки. М., 2012. 160 с.
33. Teknik V. Estimation of the depth to the magnetic basement in Europe using the spectral method // *Pure and Applied Geophysics*. 2024. 181 (4). P. 1259–1279. DOI: 10.1007/s00024-024-03459-3
34. Савко К. А., Базиков Н. С., Артеменко Г. В. Геохимическая эволюция железисто-кремнистых формаций Воронежского кристаллического массива в раннем докембрии: источники вещества и геохронологические ограничения // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*. 2015. Т. 25. № 5. С. 3–21.
35. Савко К. А., Самсонов А. В., Кориш Е. Х., Базиков Н. С., Ларионов А. Н. Палеопротерозойские дайки дацитов Воронцовского террейна Волго-Донского орогена: геохимия, возраст и петрогенезис // *Петрология*. 2024. Т. 32. № 2. С. 139–

153. DOI: 10.31857/S0869590324020018

36. Холин В. М. Геология, геодинамика и металлогеническая оценка раннепротерозойских структур КМА: автореф. дисс. ... канд. геол. мин. наук. Воронеж, 2001. 24 с.

37. Цыбуляев С. В., Савко К. А., Самсонов А. В., Кориш Е. Х. Палеопротерозойские рифтогенные вулканы ОИВ- и MORB-типа Курского блока восточной Сарматии: петрология и геодинамика // *Петрология*. 2021. Т. 29. № 2. С. 136–171. DOI: 10.31857/S0869590321020060

38. Савко К. А., Холина Н. В., Холин В. М., Ларионов А. М. Возраст неоархейских ультракалийевых риолитов – важный геохронологический репер эволюции раннедокембрийской коры Воронежского кристаллического массива. *Изотопное датирование геологических процессов: новые результаты, подходы и перспективы*: материалы конференции. СПб.: Springer, 2015. С. 247–249.

39. Молотков С. П., Костюков В. И., Лосицкий В. И., Кривцов И. И., Золототрубова Э. И., Пономарёва Р. Н. Геологическая карта Воронежского кристаллического массива масштаба 1:500 000. Министерство природных ресурсов РФ, ГПП «Воронежгеология», ОАО «Белгородгеология», ВГУ, НКПР «Хорс». Воронеж, 1999.

40. Тюремнов В. А., Глазнев В. Н., Осипенко Л. Г. Исследование влияния техногенных нагрузок и акустических колебаний на намагниченность железистых кварцитов // *Геофизический журнал*. 2006. Т. 28. № 5. С. 190–195.

41. Тюремнов В. А., Глазнев В. Н., Осипенко Л. Г. Магнитоупругие эффекты в хромсодержащих породах массива Падос-тундра (Кольский полуостров) // *Геофизический журнал*. 2008. Т. 30. № 6. С. 141–147.

42. Tauxe L., Banerjee S. K., Butler R. F., van der Voo R. Essentials of Paleomagnetism, 5th Web Edition. 2021. Электронный ресурс <https://ltauxe.github.io/Essentials-of-Paleomagnetism/WebBook3.html>

43. Day R., Fuller M., Schmidt V. A. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1977. Vol. 13. P. 260–267. DOI: 10.1016/0031-9201(77)90108-X

44. Dunlop D. J. Theory and application of the Day plot (Mrs / Ms versus Hcr / Hc) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data // *Journal of Geophysical Research*. 2002. Vol. 107(B3). 2056. DOI: 10.1029/2001JB000487

45. Dunlop D. J. Theory and application of the Day plot (Mrs /

Ms versus Hcr / Hc) 2. Application to data for rocks, sediments, and soils // *Journal of Geophysical Research*. 2002. Vol. 107(B3). 2057. DOI: 10.1029/2001JB000486

46. Петрофизика. Справочник (в трёх книгах). Книга первая. Горные породы и полезны ископаемые. Ред. Н. Б. Дортман. М.: Недра, 1992. 391 с.

47. Hunt C. P., Moskowitz B. M., Banerjee S. K. Magnetic properties of rocks and minerals. In T. J. Ahrens (Ed.) // *Rock Physics and Phase Relations*. 1995. P. 189–204. DOI: 10.1029/RF003p0189

48. Clark D. A. Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys // *Journal of Australian Geology and Geophysics*. 1997. Vol. 17. No. 2. P. 83–103.

49. Clark D. A., Schmidt P. W. Magnetic properties and magnetic signatures of BIFs of the Hamersley Basin and Yilgarn Block, Western Australia. In: Dentith M. E., Frankcombe K. F., Ho S. E., Shepherd J. M., Groves D. L., Trench A. (editors) // *Geophysical signatures of Western Australian mineral deposits*. 1994. No. 26. P. 343–354.

50. Лозовский И. Н., Варенцов И. М. Влияние неоднородности магнитной проницаемости на магнитотеллурические отклики: 1D- и 2D-модели // *Физика Земли*. 2022. № 5. С. 14–25. DOI: 10.31857/S0002333722050209

51. Patterson B., Austin J., Pearce M. Constrained 3D modelling and geochemical analyses of the Horseshoe Range BIF: tools for evaluating magnetic signatures under cover // *ASEG Extended Abstracts*. 2018. No. 1. P. 1–8. DOI: 10.1071/ASEG2018abW8_1E

52. Zhang Y., Shikun Dai S., Zhang Q., Ling J. Iterative algorithm for computing magnetic field considering remanent magnetization and demagnetization // *Geophysical Journal International*. 2025. Vol. 240. P. 362–385. DOI: 10.1093/gji/ggae385

53. Butler R. F. Paleomagnetism. Magnetic domains to geologic terranes / Boston. Blackwell Scientific. 1992. 288 p. Электронный ресурс https://www.academia.edu/21187588/PALEOMAGNETISM_Magnetic_Domains_to_Geologic_Terranes

54. Paterson G. A., Zhao X., Jackson M., Heslop D. Measuring, processing, and analyzing hysteresis data // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2018. Vol. 19. P. 1925–1945. DOI: 10.1029/2018GC007620

Anomalous magnetic properties of Paleoproterozoic ferruginous quartzites of the Kursk block (Voronezh crystalline massif)

©2025 V. V. Ilin¹✉, V. I. Zhavoronkin¹, V. N. Glaznev^{1, 2},
O. M. Muravina¹, S. V. Tsybulyaev¹, K. A. Savko^{1, 3}, I. V. Fedukin⁴

¹*Voronezh State University, Universitetskaya sq., 1, 394018, Voronezh, Russian Federation*

²*Geological Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy
of Sciences, Fersmana st., 14, 184209, Apatity, Russian Federation*

³*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of
the Russian Academy of Sciences, Staromonetnyj st., 35, 119017, Moscow, Russian Federation*

⁴*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,
B. Gruzinskaya st., 10, 123995, Moscow, Russian Federation*

Abstract

Introduction: paleoproterozoic ferruginous-siliceous formations play a key role in the formation of the anomalous magnetic field of the Kursk block of the Voronezh crystal massif (VCM). The purpose of this investigation is to study the petromagnetic characteristics of ferruginous quartzites of the Kursk block of the VCM, focused on solving the problems of constructing geologically meaningful magnetic models of the lithosphere of the region.

Methodology: core samples of ferruginous quartzites from a well on the flank of the Stoilenskoye deposit of the KMA were studied. Measurements of the value of magnetic susceptibility, its anisotropy and temperature dependence were carried out. The value of natural residual magnetization and parameters of hysteresis loops of rock samples was determined. A petrographic description of the mineral composition of the ore component of the rock is carried out for samples with the most contrasting petromagnetic properties.

Discussion of the results: the magnetic susceptibility of the samples ranges from 0.32 to 1.45 SI with an average of 0.87 SI and anisotropy from 24 to 136%. Natural residual magnetization is characterized by abnormally high values of up to 2645 A/m with an average value of 660 A/m. Koenigsberger ratio for the studied samples varies from 8 to 34. The value of saturation magnetization ranges from 1.30 to 12.34 mAm². The coercive force varies from 2.52 to 21.01 mT, and the residual coercive force from 10.73 to 62.36 mT. Thermomagnetic determinations indicate the predominance of the ferromagnetic phase with a Curie point of about 568°C in the studied samples.

Conclusions: the obtained estimates of magnetic susceptibility show that when modeling ore objects composed of ferruginous quartzites, it is necessary to take into account the effect of demagnetization on the formation of an external magnetic field. The estimation of the anomalous value of residual magnetization can act as an upper limit on the desired solutions to the inverse magnetic problem, which takes into account inductive/residual magnetization and the demagnetization effect. The presence of single-domain magnetite grains and a high value of coercive force contribute to the conservation of the vector of natural residual magnetization of rocks of the ferruginous-siliceous formation of the Kursk block.

Keywords: Ferruginous quartzites, petromagnetism, ore mineralogy, Kursk block, Voronezh crystalline massif



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Funding: Scientific research was carried out within the framework of the RSF grant No 25-27-00209.

For citation: Ilin V. V., Zhavoronkin V. I., Glaznev V. N., Muravina O. M., Tsybulyaev S. V., Savko K. A., Fedyukin I. V. Anomalous magnetic properties of Paleoproterozoic ferruginous quartzites of the Kursk block (Voronezh crystal massif) *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya* – *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2025, no. 3, pp. 51–64. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/3/51-64>

Conflict of interest: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article

REFERENCES

1. *Trudy Osoboj komissii po issledovaniyu Kurskih magnitnyh anomalij pri Prezidiume VSNX* [Proceedings of the Special Commission for the Study of Kursk Magnetic Anomalies under the Presidium of the Supreme Council of National Economy]. Ed. A. D. Arkhangelsky. Moscow, State Publishing House publ., 1924, vol. V, 246 p. (In Russ.)
2. Shmidt N. G. Opyt primeneniya geofizicheskikh metodov dlya celej geologicheskogo kartirovaniya kristallicheskogo fundamenta KMA [Experience in the application of geophysical methods for the purposes of geological mapping of the crystal foundation of the KMA]. *Sovetskaya geologiya – Soviet Geology*, 1957, no. 58, pp. 138–139 (In Russ.)
3. *Zhelezorudnye formacii dokembriya KMA i ih perspektivnaya ocenka na zheleznye rudy* [Iron ore formations of the Precambrian of the KMA and their prospective assessment for iron ores]. Ed. N. I. Golivkin. Moscow, Nedra publ., 1982, 227 p. (In Russ.)
4. Shchegolev I. N. *Zhelezorudnye mestorozhdeniya dokembriya i metody ih izucheniya* [Iron ore deposits of the Precambrian and methods of their study]. Moscow, Nedra publ., 1985, 197 p. (In Russ.)
5. Kopaev V. V. O regional'nyh magnitnyh anomalijah KMA i privileyushchih rajonov [On Regional Magnetic Anomalies of the KMA and Adjacent Areas]. *Materialy po geologii i poleznym iskopaemym Central'nyh rajonov Evropejskoj chasti SSSR – Materials on Geology and Minerals of the Central Regions of the European Part of the USSR*, 1959, pp. 214–221 (In Russ.)
6. Erinchek Yu. M., Litvinova T. P. (Eds.). *Karta anomal'nogo magnitnogo polya Rossii, uvyazannaya s kartami po territorii stran SNG. Masshtab 1:2500000* [Map of the anomalous magnetic field of Russia, linked to maps on the territory of the CIS countries. Scale 1:2500000]. Saint Petersburg, VSEGEI, 2008. (In Russ.)
7. Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., Bournas N., Brozena J., Childers V., Dostaler F., Fairhead J. D., Finn C., von Frese R. B., Gaina C., Golynsky S., Kucks R., Lühr H., Milligan P., Mogren S., Müller R. D., Olesen O., Pilkington M., Saltus R., Schreckenberger B., Thébaud E., Tontini F. C. EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2009, 10 (8), Q08005. DOI: 10.1029/2009GC002471
8. Meyer B., Saltus R., Chulliat A. EMAG2v3: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution). Version 3. NOAA National Centers for Environmental Information, 2017. DOI: 10.7289/V5H70CVX
9. Sabaka T. J., Olsen N., Purucker M. E. Extending comprehensive models of the Earth's magnetic field with Ørsted and CHAMP data. *Geophysical Journal International*, 2004, 159, pp. 521–547. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2004.02421.x
10. Thebaud E., Vigneron P., Langlais B., Hulot G. A Swarm lithospheric magnetic field model to SH degree 80. *Earth Planets Space*, 2016, 68, no. 126, pp. 1–3. DOI: 10.1186/s40623-016-0510-5
11. McEnroe S. A., Langenhorst F., Robinson P., Bromiley G., Shaw C. What is magnetic in the lower Crust? *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 226, no. 1–2, pp. 175–192. DOI: 10.1016/j.epsl.2004.07.020
12. McEnroe S. A., Fabian K., Robinson P., Gaina C., Brown L. L. Crustal magnetism, lamellar magnetism and rocks that remember. *Elements*, 2009, vol. 5, pp. 241–246. DOI: 10.2113/gselements.5.4.241
13. Brown L. L., McEnroe S. A., Peck W. H., Nilsson L. P. Anorthosites as Sources of Magnetic Anomalies. In: E. Petrovsk et al. (eds.). *The Earth's Magnetic Interior. IAGA Special Sopron Book Series*, 2011. DOI: 10.1007/978-94-007-0323-0_23
14. Launay N., Quesnel Y., Rochette P., Demory F. Iron formations as the source of the West African magnetic crustal anomaly. *Frontiers in Earth Science*, 2018, vol. 6:32. DOI: 10.3389/feart.2018.00032
15. Maat G. W., Church N. S., Oda H., Pastore Z., McEnroe S. A. Characterization and imaging magnetic minerals from ultramafic roots of a LIP: implication for deep crustal magnetic sources. *Geophysical Journal International*, 2024, 236, no. 3, pp. 1577–1595. DOI: 10.1093/gji/ggad479
16. Kopaev V. V., Martynova T. A. O magnitnoj vospriimchivosti zhelezistykh kvarcitol Starooskol'skogo zhelezorudnogo rajona KMA [On the magnetic susceptibility of ferruginous quartzites of the Stary Oskol iron ore region of the KMA]. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Geofizika – Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Ser. Geophysics*, 1960, no. 7, pp. 988–997 (In Russ.)
17. Krutikhovskaya Z. A., Zavoisky V. N., Podolyanko S. M., Savenko B. Y. *Namagnichennost' porod zhelezorudnykh formacij Bol'shogo Krivogo Roga i KMA* [Magnetization of Rocks of Iron Ore Formations of Big Krivoy Rog and KMA]. Kiev, Naukova Dumka publ., 1964. 158 p. (In Russ.)
18. Afanasyev N. S., Pavlovsky V. I. *Fizicheskie svoystva porod fundamenta VKM. Petrografija dokembriya Russkoj platformy* [Physical properties of the basement rocks of the VKM. Petrography of the Precambrian of the Russian platform]. Kiev, Naukova Dumka publ., 1970, pp. 421–427 (In Russ.)
19. Zhavoronkin I. A., Krasovitskaya R. S., Krivtsov I. I., Filarov G. I., Afanasyev N. S., Pavlovsky V. I. Petrofizicheskaya harakteristika porod dokembriya Voronezhskogo kristallicheskogo massiva i ee ispol'zovanie pri sostavlenii geologo-geofizicheskikh skhem [Petrophysical characteristics of Precambrian rocks of the Voronezh crystalline massif and its use in the compilation of geological and geophysical schemes]. *Petrofizicheskaja harakteristika Sovetskoj chasti Baltijskogo shhita – Petrophysical characteristics of the Soviet part of the Baltic Shield, Apatity: Kola Branch AS SSSR*, 1976, pp. 28–29 (In Russ.)
20. Antonov Yu. V., Slyusarev S. V. Izuchenie magnitnykh svoystv zhelezistykh kvarcitol pri razvedke zhelezorudnykh mestorozhdenij [Study of the Magnetic Properties of Ferruginous Quartzites in the Exploration of Iron Ore Deposits] *Geophysical Studies at the Kursk Magnetic Anomaly*. Voronezh, VSU publ., 1981, pp. 117–124 (In Russ.)
21. Afanasyev N. S. *Petrofizika dokembrijskikh obrazovanij i*

- geologicheskoe stroenie Voronezhskogo kristallicheskogo massiva. Dis. ... d-ra geol.-min. nauk. [Petrophysics of Precambrian Formations and Geological Structure of the Voronezh Crystal Massif. Diss. Dr. geol. min. sciences]. Voronezh: VSU publ., 1982. 310 p. (In Russ.)
22. Genshaft Yu. S., Lykov A. V., Mironova N. A., Saltykovsky A. Ya., Afanasyev N. S. Petromagnetnoe izuchenie porod fundamenta Voronezhskogo kristallicheskogo massiva [Petromagnetic study of the foundation rocks of the Voronezh crystalline massif]. *Fizika Zemli – Physics of the Earth*, 1997, no. 9, pp. 38–45 (In Russ.)
23. Afanasyev N. S. *Petrofizika zemnoj kory VKM. Litosfera Voronezhskogo kristallicheskogo massiva po geofizicheskim i petrofizicheskim dannym* [Petrophysics of the Earth's crust of the VKM. Lithosphere of the Voronezh crystalline massif based on geophysical and petrophysical data]. Voronezh: Scientific Book, 2012, pp. 21–88 (In Russ.)
24. Zhavoronkin V. I., Terentyev R. A., Kondaurova K. A. Petrofizicheskie i petrologicheskie osobennosti elkinskogo intruzivnogo massiva (VKM) [Petrophysical and Petrological Features of the Elkinsky Intrusive Massif (VKM)]. *Fiziko-himicheskie i petrofizicheskie issledovaniya v naukah o Zemle: materialy konferencii* [Physicochemical and Petrophysical Studies in Earth Sciences: coll. art. conference]. Moscow, IGM RAN publ., 2019, pp. 108–111 (In Russ.)
25. Zhavoronkin V. I., Kondaurova K. A. Petrofizicheskie harakteristiki magmatitov elanskogo intruzivnogo kompleksa (Voronezhskij kristallicheskij massiv) [Petrophysical characteristics of magmatites of the Elan intrusive complex (Voronezh crystal massif)]. *Voprosy teorii i praktiki geologicheskoy interpretacii geofizicheskikh polej: materialy 47 sessii Mezhdunarodnogo seminara im. D. G. Uspenskogo* [Issues of theory and practice of geological interpretation of geophysical fields: materials of the 47th session of the D. G. Uspensky International Seminar]. Voronezh, Scientific Book publ., 2020, pp. 121–123 (In Russ.)
26. Muravina O. M., Zhavoronkin V. I., Kharin A. Yu., Ponomarenko I. A. Petrofizicheskie parametry gabbrodoleritov novogol'skogo kompleksa (Voronezhskij kristallicheskij massiv) [Petrophysical parameters of gabbrodolerites of the Novogol'sky complex (Voronezh crystal massif)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 4, pp. 134–139 (In Russ.). DOI: 10.17308/geology/1609-0691/2023/4/134-139
27. Muravina O. M., Glaznev V. N., Zhavoronkin V. I., Mints M. V. Reflection of the Petrophysical Basement Rocks Models in Geophysical Fields. *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences: Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields*, 2019, pp. 49–54. DOI: 10.1007/978-3-319-97670-9_6
28. Zhavoronkin I. A., Strakhov V. N. Ob interpretacii slozhnykh magnitnykh anomalij Belgorodskogo rajona KMA [On the interpretation of complex magnetic anomalies of the Belgorod region of the KMA]. *Prikladnaya geofizika – Applied geophysics*, 1961, vol. 31, pp. 248–256 (In Russ.)
29. Strakhov V. N., Lapina M. I., Zhavoronkin I. A. Sovremennaya metodika interpretatsii magnitnykh i gravitacionnykh anomalij tipa KMA [Modern methods of interpretation of magnetic and gravitational anomalies of the KMA type]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Fizika Zemli – Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Physics of the Earth*, 1971, no. 3, pp. 49–66 (In Russ.)
30. Boydachenko V. N., Wasserman I. S., Zhavoronkin I. A., Zaltsmanovich I. I. *Geofizicheskie metody pri prognozirovanii, poiskah i razvedke zhelezorudnykh mestorozhdenij KMA* [Geophysical methods in forecasting, search and exploration of iron ore deposits of KMA]. Kiev, IGFM publ., 1986, 53 p. (In Russ.)
31. Glaznev V. N., Zhavoronkin V. I., Muravina O. M., Antonova I. Yu., Voronova T. A., Cheresinsky A. V., Kholin P. V. Stroenie verhnjej kory elektoego uchastka Losevskogo terrejna (Voronezhskij kristallicheskij massiv) po dannym plotnostnogo modelirovaniya [Structure of the upper crust of the Yelets section of the Losev terrain (Voronezh crystal massif) according to density modeling data]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2019, no. 3, pp. 74–83 (In Russ.). DOI: 10.17308/geology.2019.3/1815
32. Blokh Yu. I. *Teoreticheskie osnovy kompleksnoj magnitno-razvedki* [Theoretical Foundations of Complex Magnetic Exploration]. Moscow publ., 2012, 160 p. (In Russ.)
33. Teknik V. Estimation of the depth to the magnetic basement in Europe using the spectral method. *Pure and Applied Geophysics*, 2024, 181 (4), pp. 1259–1279. DOI: 10.1007/s00024-024-03459-3
34. Savko K. A., Bazikov N. S., Artemenko G. V. Geohimicheskaya evolyuciya zhelezisto-kremnistyh formacij Voronezhskogo kristallicheskogo massiva v rannem dokembrii: istochniki veshchestva i geohronologicheskie ogranicheniya [Geochemical evolution of ferruginous-siliceous formations of the Voronezh crystalline massif in the early Precambrian: sources of matter and geochronological limitations]. *Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyaciya – Stratigraphy. Geological correlation*, 2015, vol. 25, no. 5, pp. 3–21 (In Russ.)
35. Savko K. A., Samsonov A. V., Korish E. Kh., Bazikov N. S., Larionov A. N. Paleoproterozojskie dajki dacitov Voroncovskogo terrejna Volgo-Donskogo orogena: geohimiya, vozrast i petrogenesis [Paleoproterozoic dikes of the Vorontsovsky terrane of the Volga-Don orogen: geochemistry, age and Petrogenesis]. *Petrologiya – Petrology*, 2024, vol. 32, no. 2, pp. 139–153 (In Russ.). DOI: 10.31857/S0869590324020018
36. Kholin V. M. *Geologiya, geodinamika i metallogenicheskaya ocenka ranneproterozojskikh struktur KMA*. Avtoref. diss. ... kand. geol. min. nauk. [Geology, geodynamics and metallogenic assessment of the Early Proterozoic structures of the KMA. Avtoref. ... geol. min. sciences]. Voronezh, VSU publ., 2001. 24 p. (In Russ.)
37. Tsybulayev S. V., Savko K. A., Samsonov A. V., Korish E. Kh. Paleoproterozojskie riftogennye vulkanity OIB- i MORB-tipa Kurskogo bloka vostochnoj Sarmatii: petrologiya i geodinamika [Paleoproterozoic rifting volcanoes of the OIB- and MORB-type Kursk block of eastern Sarmatia: petrology and geodynamics]. *Petrologiya – Petrology*, 2021, vol. 29, no. 2, pp. 136–171 (In Russ.). DOI: 10.31857/S0869590321020060
38. Savko K. A., Kholina N. V., Kholin V. M., Larionov A. M. Vozrast neorarhejskikh ul'trakalievnykh riolitov – vazhnyj geohronologicheskij reper evolyucii rannedokembrijskoj kory Voronezhskogo kristallicheskogo massiva [Age of Neorarchean ultrapotassium rhyolites – an important geochronological reference point for the evolution of the Early Precambrian crust of the Voronezh crystalline massif]. *Izotopnoe datirovanie geologicheskikh processov: novye rezul'taty, podhody i perspektivy: materialy konferencii* [Isotope Geochronology: coll. art. all-Russian conference], Saint-Petersburg, Sprinter publ., 2015, pp. 247–249 (In Russ.)
39. Molotkov S. P., Kostyukov V. I., Lositsky V. I., Krivtsov I. I., Zolototrubova E. I., Ponomareva R. N. *Geologicheskaya karta Voronezhskogo kristallicheskogo massiva masshtaba 1:500000* [Geological map of the Voronezh crystalline massif at a scale of 1:500000] Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, AO “Voronezhgeologia”, AO “Belgorodgeologia”, Voronezh State University, “Khors”. Voronezh publ., 1999 (In Russ.)
40. Tyuremnov V. A., Glaznev V. N., Osipenko L. G. Issledovanie vliyaniya tekhnogennykh nagruzok i akusticheskikh kolebanij

na namagnichennost' zhelezistyh kvarcitov [Study of the effect of technogenic loads and acoustic vibrations on the magnetization of ferruginous quartzites]. *Geofizicheskij zhurnal – Geophysical Journal*, 2006, vol. 28, no. 5, pp. 190–195 (In Russ.).

41. Tyuremnov V. A., Glaznev V. N., Osipenko L. G. Magnitoprugie effekty v hromsoderzhashchih porodax massiva Pados-tundra (Kol'skii poluostrov) [Magnetoelastic effects in chromium-containing rocks of the Pados-tundra massif (Kola Peninsula)]. *Geofizicheskij zhurnal – Geophysical Journal*, 2008, vol. 30, no. 6, pp. 141–147 (In Russ.).

42. Tauxe L., Banerjee S. K., Butler R. F., van der Voo R. Essentials of Paleomagnetism, 5th Web Edition, 2021.

43. Day R., Fuller M., Schmidt V. A. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1977, vol. 13, pp. 260–267. DOI: 10.1016/0031-9201(77)90108-X

44. Dunlop D. J. Theory and application of the Day plot (Mrs / Ms versus Hcr / Hc) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *Journal of Geophysical Research*, 2002, vol. 107(B3), 2056. DOI: 10.1029/2001JB000487

45. Dunlop D. J. Theory and application of the Day plot (Mrs / Ms versus Hcr / Hc) 2. Application to data for rocks, sediments, and soils. *Journal of Geophysical Research*, 2002, vol. 107(B3), 2057. DOI: 10.1029/2001JB000486

46. *Petrofizika. Spravochnik (v tryoh knigah). Kniga pervaya. Gornye porody i polezny iskopaemye* [Petrophysics. Handbook (in three books. Book One. Rocks and minerals)]. Ed. N. B. Dorman. Moscow, Nedra publ., 1992, 391 p. (In Russ.).

47. Hunt C. P., Moskowitz B. M., Banerjee S. K. Magnetic properties of rocks and minerals. In T.J. Ahrens (Ed.). *Rock Physics and Phase Relations*, 1995, pp. 189–204. DOI:

10.1029/RF003p0189

48. Clark D. A. Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. *Journal of Australian Geology and Geophysics*, 1997, vol. 17, no. 2, pp. 83–103.

49. Clark D. A., Schmidt P.W. Magnetic properties and magnetic signatures of BIFs of the Hamersley Basin and Yilgarn Block, Western Australia. *Geophysical signatures of Western Australian mineral deposits. The University of Western Australia*, 1994, no. 26, pp. 343–354.

50. Lozovsky I. N., Varentsov I. M. Vliyanie neodnorodnosti magnitnoj pronicaemosti na magnitotelluricheskie otkliki: 1D- i 2D-modeli [Influence of Magnetic Permeability Inhomogeneity on Magnetotelluric Responses: 1D and 2D Models]. *Fizika Zemli – Physics of the Earth*, 2022, no. 5, pp. 14–25 (In Russ.). DOI: 10.31857/S0002333722050209

51. Patterson B., Austin J., Pearce M. Constrained 3D modelling and geochemical analyses of the Horseshoe Range BIF: tools for evaluating magnetic signatures under cover. *ASEG Extended Abstracts*, 2018, no. 1, pp. 1–8. DOI: 10.1071/ASEG2018abW8_1E

52. Zhang Y., Shikun Dai S., Zhang Q., Ling J. Iterative algorithm for computing magnetic field considering remanent magnetization and demagnetization. *Geophysical Journal International*, 2025, vol. 240, pp. 362–385. DOI: 10.1093/gji/ggae385

53. Butler R. F. Paleomagnetism. Magnetic domains to geologic terranes. *Boston. Blackwell Scientific*, 1992. 288 p.

54. Paterson G. A., Zhao X., Jackson M., Heslop D. Measuring, processing, and analyzing hysteresis data. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, vol. 19, pp. 1925–1945. DOI: 10.1029/2018GC007620

Ильин Виталий Викторович, аспирант, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация, e-mail: vitaliy.ilin.2000@bk.ru;

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2028-043X>

Жаворонкин Валерий Иванович, к.г.-м.н., доцент, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация, e-mail: zhavoronkin@geol.vsu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0648-4117>

Глазнев Виктор Николаевич, д.ф.-м.н., профессор Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; Геологический институт КНЦ РАН г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: glaznev@geol.vsu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1016-1866>

Муравина Ольга Михайловна, д.т.н., профессор, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: muravina@geol.vsu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4772-0825>

Савко Константин Аркадьевич, д.г.-м.н., профессор, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: ksavko@geol.vsu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7291-7024>

Цыбуляев Сергей Владимирович, преподаватель, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация, e-mail: stsybulyaev@bk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0335-5187>

Федюкин Иван Владимирович, н.с., Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Российская Федерация; e-mail: ivan.fedyukin@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1451-047X>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Vitalii V. Ilin, postgraduate student, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: vitaliy.ilin.2000@bk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2028-043X>

Valery I. Zhavoronkin, PhD in Geology and Mineralogy, Associate Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: zhavoronkin@geol.vsu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0648-4117>

Viktor N. Glaznev, Dr. habil in Physical and Mathematical Sciences, Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; Geological Institute of KSC RAS, Apatity, Russian Federation; e-mail: glaznev@geol.vsu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1016-1866>

Olga M. Muravina, Dr. habil. In Techn., Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: muravina@geol.vsu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4772-0825>

Konstantin A. Savko, Dr. habil in Geology and Mineralogy, Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: ksavko@geol.vsu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7291-7024>

Sergey V. Tsybulyaev, Lecturer, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: stsybulyaev@bk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0335-5187>

Ivan V. Fedyukin, researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: ivan.fedyukin@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1451-047X>

Authors have read and approved the final manuscript