

**КАРТЫ ПЕТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ДОКЕМБРИЙСКОГО ФУНДАМЕНТА
ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА:
МЕТОДИКА ИХ ПОСТРОЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА**

© 2025 О.М. Муравина¹, В.Н. Глазнев^{1,2}, А.А. Сотников¹, И.Ю. Антонова¹, О.С. Жидких¹

¹Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, 394018;

²Геологический институт КНЦ РАН, Анапты, Россия, 184209;

e-mail: muravina@geol.vsu.ru

Поступила в редакцию 26.05.2025; после доработки 14.10.2025; принята в печать 25.12.2025

Рассматривается методика обобщения данных о магнитных свойствах пород докембрийского фундамента Воронежского кристаллического массива, которая была использована с целью формирования карт магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности, отражающих пространственное распределение магнитных свойств пород различных структурно-вещественных геологических комплексов региона. Создание карт потребовало систематического исследования магнитных свойств пород фундамента, которое включало статистический и корреляционный анализ данных, оценку магнитных свойств отдельных возрастных групп с учетом представительности пород различных литологических типов. Полученная цифровая модель пространственного распределения петромагнитных параметров, визуализирована в виде карт магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности. Пространственное распределение магнитных свойств горных пород докембрийского фундамента Воронежского кристаллического массива в комплексе с новыми изотопно-геохимическими данными о возрасте пород является важным источником информации для понимания геодинамического развития региона. Синтезированное представление петроплотностных и петромагнитных данных в едином ГИС-проекте фактически представляют петрофизическую модель кристаллического фундамента, что расширяет новые возможности количественной комплексной интерпретации магнитного и гравитационного полей для создания трехмерных геологических моделей глубинного строения региона.

Ключевые слова: Воронежский кристаллический массив, петрофизика, магнитные свойства горных пород.

ВВЕДЕНИЕ

Работа по созданию петромагнитной карты является продолжением систематического изучения петрофизических свойств пород Воронежского кристаллического массива (ВКМ). Фактическими данными для выполнения исследований послужили результаты масштабных петрофизических измерений образцов керна около 5000 скважин, выполненных с конца 1960-х гг., представленные в геологических отчетах и открытых публикациях (Афанасьев, 1982; Глазнев и др., 2020). Были использованы также новые данные, полученные в петрофизической лаборатории геологического факультета Воронежского государственного университета за последнее

десятилетие (Глазнев и др., 2020; Муравина, 2016; Муравина и др., 2016; Муравина, Жаворонкин, 2015). Объем использованной первичной информации является уникальным по своему охвату: для создания сводной базы петрофизических данных были использованы более 250000 лабораторных измерений физических свойств горных пород. Объем сведений о магнитных свойствах керна пород кристаллического фундамента составляет — 55000 значений магнитной восприимчивости и 46000 значений остаточной намагниченности. База данных организована в формате геоинформационного проекта (ГИС-проекта), что позволяет формировать различные выборки данных по отдельным структурно-вещественным комплексам (СВК), выполнять

обобщение информации и визуализировать ее в виде петрофизических карт. Породы региона представлены 54 СВК, из них 30 — супракрустальные образования, 24 — интрузивные комплексы. В петрофизической базе данных (БД) имеются репрезентативные (свыше 100 значений) данные для 21 СВК супракрустальных пород и для 16 интрузивных комплексов. Применение петрофизических карт в процедуре интерпретации геофизических полей для формирования референтных моделей при решении обратных задач и для наложения ограничений на искомое решение, позволяет в полном объеме использовать априорную петрофизическую информацию и тем самым существенно повысить геологическую содержательность результатов (Глазнев и др., 2016; Минц и др., 2017; Терентьев и др., 2024; Glaznev et al., 2015; Muravina et al., 2024). В 2020 г была создана и опубликована Петроплотностная карта докембрийского фундамента ВКМ масштаба 1 : 1 000 000 и объяснительная записка к ней (Глазнев и др., 2020). Карта сформирована на принципиально новом уровне, поскольку опирается на пространственную привязку петрофизических данных в среде ГИС ArcView и на геологическую карту ВКМ масштаба 1 : 500 000 (Глазнев и др., 2020; Муравина, 2016; Муравина и др., 2016; Муравина, Жаворонкин, 2015). При создании карт петромагнитных параметров (магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности) был реализован аналогичный подход. Особенности петромагнитных данных, такие как широкий диапазон изменения петромагнитных характеристик, существенная вариативность магнитных свойств пород различных литологических типов в пределах одной возрастной группы, изменение магнитных параметров в зависимости от пространственного местоположения, потребовали разработки методических приемов обобщения петромагнитных данных с учетом их специфики.

МЕТОДИКА ОБОБЩЕНИЯ ПЕТРОМАГНИТНЫХ ДАННЫХ

Методика обработки и обобщения петромагнитных параметров включала несколько этапов. На первом этапе для каждого СВК был выполнен статистический анализ петромагнитных параметров всех представленных литологических типов пород. Деление параметров на интервалы значений осуществлялось на основе логарифмической шкалы. По результатам анализа данных по выборкам различного объема наиболее робастной осредненной статистической характеристикой была принята оценка медианы. В результате все СВК были ранжированы по

соотношению магнитных свойств отдельных типов пород, входящих в группу. По результатам выполненного анализа все СВК были разделены на три типа: слабоконтрастные — значения магнитных параметров различных пород в рамках одного СВК находятся в пределах одного интервала; контрастные — магнитные свойства пород находятся в пределах двух смежных интервалов, т.е. различия не превышают одного порядка; сильноконтрастные — магнитные параметры пород различаются на два и более порядка.

Далее методика оценки обобщенного значения петромагнитных параметров определялась типом СВК.

Очевидно, что получение корректных значений осредненных петромагнитных параметров невозможно без привлечения дополнительной геологической информации о количественном соотношении пород с различными магнитными свойствами в составе одного СВК и расчета соответствующих весовых коэффициентов. Это в наибольшей степени относится к СВК второго и третьего типа. Для СВК первого типа (слабоконтрастные) достаточно оценить медианное значение по всей выборке данных.

К сильноконтрастным были отнесены свыше трети СВК супракрустальных пород. Существенное различие магнитных свойств магнитных свойств, характерное для пород железисто-кремнистой формации, обусловлено присутствием в них значимого содержания магнетита. Эти группы пород хорошо изучены (Афанасьев, 1982; Бибикова и др., 2009; Крестин, 1980) и наиболее полно представлены в петрофизической базе данных, что позволило выполнить достаточно достоверную оценку количественного соотношения сильномагнитных железистых кварцитов и остальных типов пород.

Несмотря на то, что достоверность аналогичных оценок для СВК второго типа более низкая, погрешность от приближенного определения вещественного состава не столь критична, как для СВК третьего типа и в дальнейшем при интерпретации может быть учтена увеличением минимаксного диапазона изменения параметров.

В качестве примера рассмотрим процедуру оценки магнитной восприимчивости для интрузивных пород относящихся к дубравинскому комплексу (Savko et al., 2023) (табл. 1). В базе данных комплекс представлен петрофизическими определениям для 256 образцов, среди которых метасоматиты, пироксениты, карбонатиты и породы щелочно-амфибол-карбонат-биотитового состава. Обобщенное значение медианы магнитной восприимчивости для совокупности пород дубравинского комплекса составило $(2500 \pm 300) \cdot 10^{-5}$ ед. СИ.

Таблица 1. Данные для расчета обобщенного значения магнитной восприимчивости пород дубравинского комплекса**Table 1.** Data for calculating the generalized value of the magnetic susceptibility of the Dubravinsky complex rocks

Литотип	Объем выборки	Медиана магнитной восприимчивости ($n \cdot 10^{-5}$) ед. СИ	Представительность в СВК (%)
Метасоматиты	176	249	5±5
Пироксениты	40	3560	70±10
Карбонатиты	40	189	20±10
Породы щелочно-амфибол-карбонат-биотитовые	9	73	5±5

В результате статистического анализа данных по отдельным СВК были рассчитаны медианы, как обобщенные значения магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности, и установлены диапазоны их изменения. Для более точного учета пространственной изменчивости петромагнитных параметров, что важно при формировании петромагнитной карты, территория исследования была разделена на 14 участков в зависимости от геолого-тектонических особенностей (Лебедев и др., 1999; Минц и др., 2017; Ненахов и др., 2007; Савко и др., 2017; Glaznev et al., 2015). Шесть участков охватывали грабен-синклинали, к которым приурочены пояса железистых кварцитов, два участка были локализованы в

пределах Лосевского террейна, два — захватывали северную и южную часть Воронцовского террейна, остальные были расположены на северных и южных окраинах ВКМ (рис. 1). Для каждого участка были сформированы выборки данных по возрастным группам. Далее для всех локальных геологических объектов (полигонов), обозначенных на геологической карте, были рассчитаны значения медиан магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности с использованием весовых коэффициентов. Весовые коэффициенты вычислялись на основе геологической информации о представительности различных пород в СВК в пределах полигона, зафиксированной в атрибутивной таблице геологической карты.

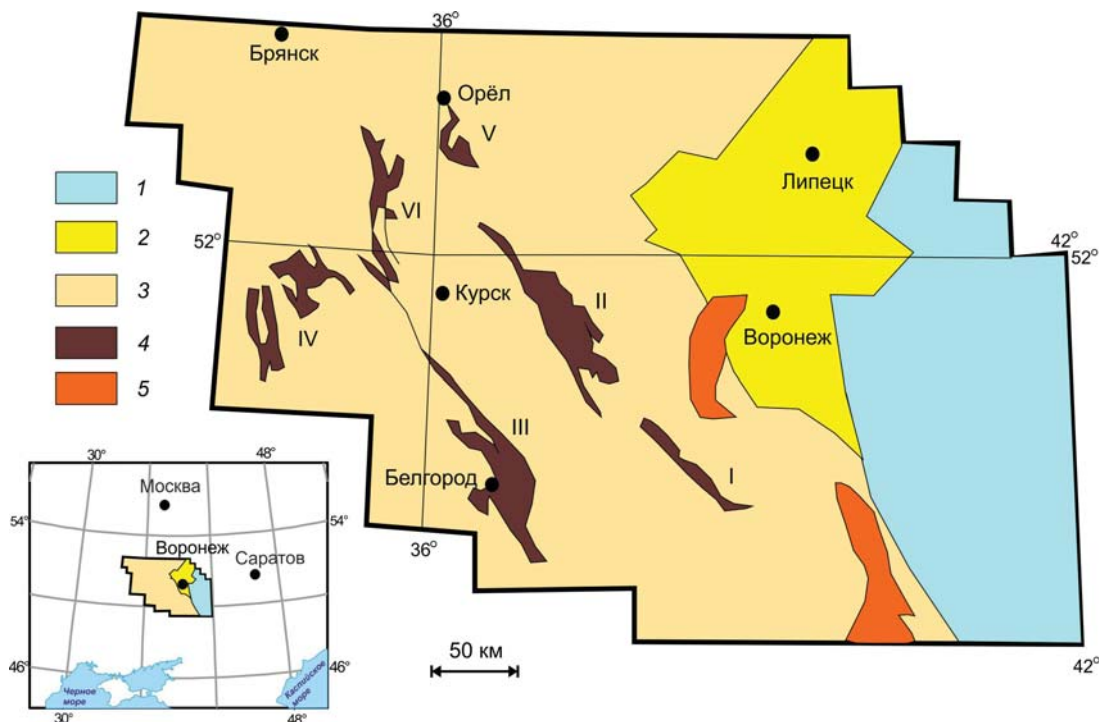


Рис. 1. Схема тектонического районирования фундамента ВКМ по (Савко и др., 2023): 1 — Воронцовский террейн (Pr_1); 2 — Лосевский террейн (Pr_1); 3 — Курский мегабок (Ar); 4 — Грабен-синклинали (Pr_1): римскими цифрами обозначены структуры — Волотовская (I); Тим-Ястребовская (II); Белгородская (III); Рылско-Крупецкая (IV); Орловская (V); Михайловская (VI); 5 — Павловский гранитоидный комплекс (Pr_1).

Fig. 1. Scheme of tectonic zoning of the VKM basement according to (Savko et al., 2023): 1 — Vorontsovsky terrane (Pr_1); 2 — Losevsky terrane (Pr_1); 3 — (Ar) Kursk megaside; 4 — Graben-synclines (Pr_1): roman numerals indicate the structures — Volotovskaya (I); Tim-Yastrebovskaya (II); Belgorodskaya (III); Rylsko-Krupetskaya (IV); Orlovskaya (V); Mikhailovskaya (VI); 5 — Pavlovsky granitoid complex (Pr_1).

Такой подход позволил учесть пространственную неоднородность данных (рис. 2–6). Так, субщелочные граниты атаманского комплекса (рис. 2) встречаются в 9 участках из 14, при этом значения магнитной восприимчивости изменяются от первых десятков до нескольких сотен $n \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Вариативность свойств СВК, отнесенных к сильноконтрастным (рис. 4), еще более высокая.

Таким образом, методика обобщения петромагнитных данных представляет следующую последовательность процедур:

- статистический анализ петромагнитных параметров и разделение всех СВК региона на группы в зависимости от контрастности магнитных свойств отдельных пород;

- оценка представительности отдельных литотипов пород в полигонах, принадлежащих определенному СВК, в соответствии с геологической картой и данными атрибутивной таблицы;
- вычисление обобщенных медианных значений петромагнитных параметров полигонов с учетом весовых коэффициентов;

- вычисление уточненных медианных значений петромагнитных параметров для локальных геологических объектов с большим объемом информации;
- формирование цифровой петромагнитной модели кристаллического фундамента.

Рассмотрим далее некоторые результаты статистического анализа и сформированные петромагнитные карты.

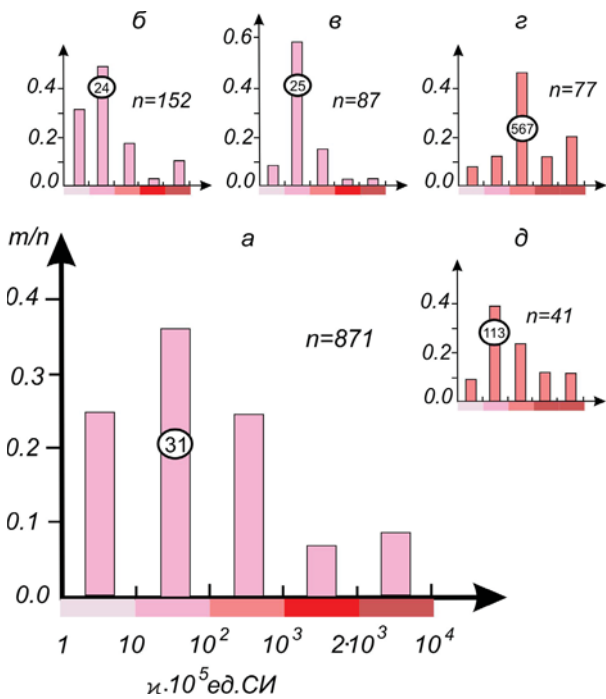


Рис. 2. Гистограммы распределения магнитной восприимчивости гранитов: *a* — по всей БД; верхнеархейских комплексов Курского блока: *б* — атаманского (2528 ± 4 — 2615 ± 15) млн лет, *в* — салтыковского (3029 ± 14) млн лет; палеопротерозойских комплексов Лосевского террейна: *г* — павловского (2081 ± 12) млн лет, *д* — малиновского (2042 ± 45) млн лет. Цифрами в овалах обозначены медианные значения магнитной восприимчивости $n \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Возраст пород в рис. (2–6) приводится по публикациям из открытых источников (Бибикина и др., 2009; Савко и др., 2015, 2023, 2014, 2017, 2021; Терентьев, 2013; Холина, 2018; Terentiev et al., 2025, 2020, 2016, 2017)

Fig. 2. Histograms of distribution of magnetic susceptibility of granites: *a* — for the entire database; upper Archean complexes of the Kursk block: *б* — atamansky (2528 ± 4 — 2615 ± 15) million years, *в* — saltykovsky (3029 ± 14) million years; Paleoproterozoic complexes of the Losevsky terrane: *г* — pavlovsky (2081 ± 12) million years, *д* — malinovsky (2042 ± 45) million years. The numbers in ovals indicate the median values of magnetic susceptibility $n \cdot 10^{-5}$ SI units. The age of the rocks in Fig. (2–6) is based on publications from open sources (Bibikova et al., 2009; Savko et al., 2015, 2023, 2014, 2017, 2021; Terentyev, 2013; Kholina, 2018; Terentiev et al., 2025, 2020, 2016, 2017).

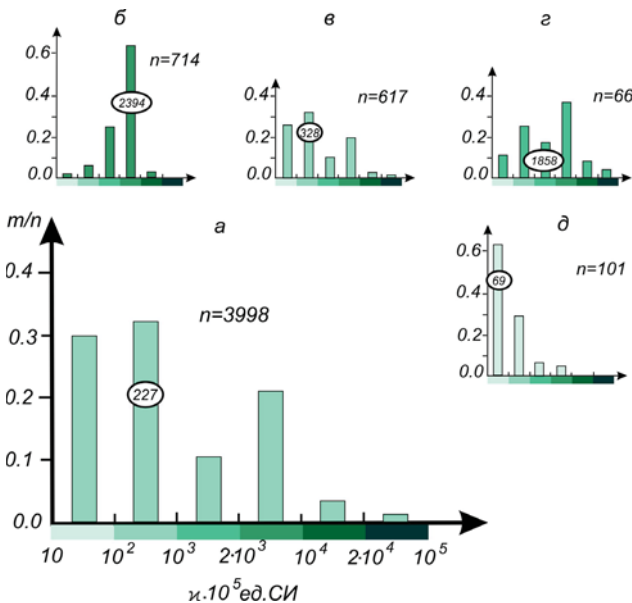


Рис. 3. Гистограммы распределения магнитной восприимчивости габброидов: *a* — по всей БД; палеопротерозойских комплексов Курского блока: *б* — смородинского (2.05–2.06) млрд лет, *в* — золотухинского (2.07–2.11) млрд лет, *г* — стойло-николаевского (2.04–2.05) млрд лет; Воронцовского террейна: *д* — мамонского комплекса (2068–2073) млн лет. Цифрами в овалах обозначены медианные значения магнитной восприимчивости $n \cdot 10^{-5}$ ед. СИ.

Fig. 3. Histograms of distribution of magnetic susceptibility of gabbroids: *a* — for the entire database; Paleoproterozoic complexes of the Kursk block: *б* smorodinsky (2.05–2.06) billion years, *в* — zolotukhinsky (2.07–2.11) billion years, *г* — stoilo-nikolaevsky (2.04–2.05) billion years; Vorontsovsky terrane: *д* — mamonsky complex (2068–2073) million years. The numbers in ovals indicate the median values of magnetic susceptibility $n \cdot 10^{-5}$ SI units.

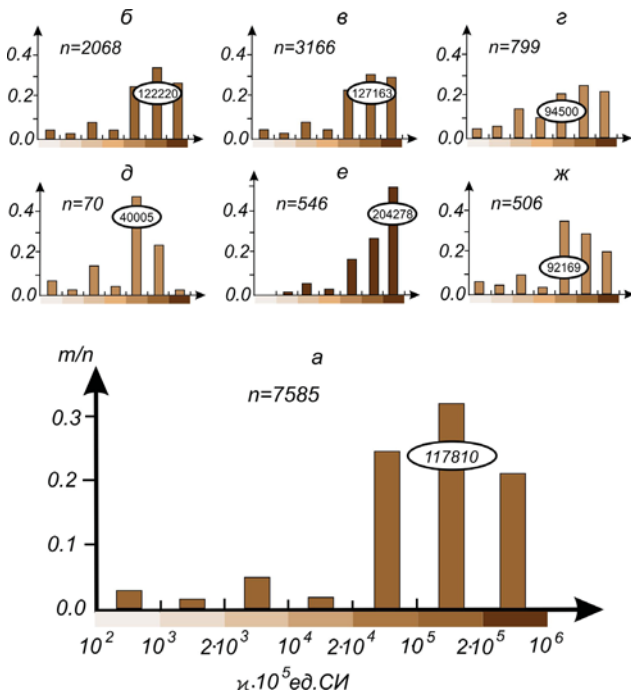


Рис. 4. Гистограммы распределения магнитной восприимчивости железистых кварцитов (2612 ± 10) млн лет: *a* — по всей БД; *б* — Волотовской структуры; *в* — Тим-Ястребовской структуры; *г* — Белгородской структуры; *д* — Рыльско-Крупецкой структуры; *е* — Орловской структуры; *ж* — Михайловской структуры. Цифрами в овалах обозначены медианные значения магнитной восприимчивости $n \cdot 10^{-5}$ ед. СИ.

Fig. 4. Histograms of distribution of magnetic susceptibility of ferruginous quartzites (2612 ± 10) million years: *a* — for the entire database; *б* — Volotovskaya structure; *в* — Tim-Yastrebovskaya structure; *г* — Belgorodskaya structure; *д* — Rylsko-Krupetskyaya structure; *е* — Orlovskaya structure; *ж* — Mikhailovskaya structure. The numbers in ovals indicate the median values of magnetic susceptibility $n \cdot 10^{-5}$ SI units.

Рис. 5. Гистограммы распределения магнитной восприимчивости амфиболитов: *a* — по всей БД; архейских: *б* — обоянского комплекса 3.48 млрд лет, *в* — александровской свиты 3.03 млрд лет, *г* — нерасчлененной михайловской серии 3.12 млрд лет; палеопротерозойских: *д* — тимской свиты 2.6 млрд лет. Цифрами в овалах обозначены медианные значения магнитной восприимчивости $n \cdot 10^{-5}$ ед. СИ.

Fig. 5. Histograms of magnetic susceptibility distribution of amphibolites: *a* — for the entire database; Archean: *б* — oboyansky complex 3.48 billion years, *в* — aleksandrovskaaya suite 3.03 billion years, *г* — undifferentiated mikhailovskaya series 3.12 billion years; Paleoproterozoic: *д* — timskaaya suite 2.6 billion years. The numbers in ovals indicate the median values of magnetic susceptibility $n \cdot 10^{-5}$ SI units.

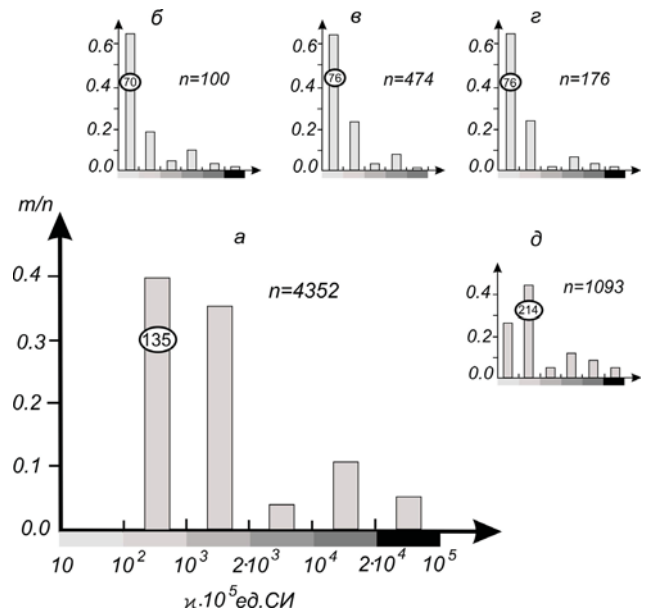


Рис. 6. Гистограммы распределения магнитной восприимчивости сланцев различного состава: *a* — по всей БД; *б* — биотитовые; *в* — хлоритовые и серицит-хлоритовые; *г* — филлитовидные; *д* — карбонат-хлоритовые; *е* — двуслюдистые карбонатные. Цифрами в овалах обозначены медианные значения магнитной восприимчивости $n \cdot 10^{-5}$ ед. СИ.

Fig. 6. Histograms of magnetic susceptibility distribution of shales of different composition: *a* — for the entire database; *б* — biotite; *в* — chlorite and sericite-chlorite; *г* — phyllitic; *д* — carbonate-chlorite; *е* — two-micaceous carbonates. The numbers in ovals indicate the median values of magnetic susceptibility $n \cdot 10^{-5}$ SI units.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе выполненного статистического анализа определены обобщенные величины, характеризующие магнитные параметры пород интрузивных и метаморфических комплексов, а также супракристалльных образований кристаллического фундамента ВКМ.

Для выполнения статистического анализа были сформированы различные выборки петромагнитных параметров: пород одного литологического типа без учета возрастной группы (по всей БД); пород, принадлежащих определенному СВК, независимо от пространственного местоположения, например (рис. 2–4); пород одного типа и возраста, расположенных в пределах различных геологических структур (рис. 5).

Для некоторых групп пород большой объем имеющихся данных позволил выполнить более детальное разделение в пределах одного литологического типа, например, оценить магнитные свойства сланцев различного состава (рис. 6). Сопоставление статистических данных, полученных на различных типах выборок, позволило снизить вероятность недостоверных оценок.

Были рассчитаны обобщенные значения петромагнитных характеристик литологических типов пород, представленных в БД наиболее полно, а также предельные значения, полученные для выборок, сформированных или для разных СВК, или для пород одной возрастной группы, но локализованных на различных участках (табл. 2).

Таблица 2. Обобщенные значения петромагнитных характеристик основных групп пород

Table 2. Generalized values of the petromagnetic characteristics of the main rock groups

Порода	Магнитная восприимчивость α , $n \cdot 10^{-5}$ ед. СИ		Остаточная намагниченность, J_n , А/м		Объем данных n_1/n_2
	α	$(\alpha_{\min} - \alpha_{\max})$	J_n	$(J_{n_{\min}} - J_{n_{\max}})$	
1	2	3	4	5	6
Магматические интрузивные и эффузивные породы					
Нориты	1745	(1544-2545)	1.750	(1.135-2.325)	116/116
Перидотиты	4410	(1558-13140)	3.400	(0.170-4,665)	373/372
Пироксениты	2174	(454-4851)	3.700	(0.700-31,250)	581/579
Серпентиниты	8946	(3623-12203)	7.500	(148.200-0.280)	1426/1384
Габброиды	227	(32-4725)	0.280	(0.001-11,25)	3998/3902
Гранодиориты и тоналиты	586	(12-5040)	0.034	(0.001-0.390)	578/528
Метабазальты	95	(25-1544)	0.016	(0.001-2,335)	235/224
Диориты	290	(32-2520)	0.120	(0.001-0.670)	259/2337
Диориты кварцевые	693	(29-10710)	0.070	(0.001-16.950)	218/216
Сиениты	737	(21-4158)	0.160	(0-0.585)	389/371
Граниты	31	(2-693)	0.001	(0-0.140)	871/706
Лейкограниты	18	(4-1040)	0.001	(0.001-0.120)	372/295
Граносиениты	605	(29-3969)	0.052	(0.001-0.310)	235/210
Метавулканиты кислого состава	18	(11-567)	0.001	(0.001-0.040)	335/298
Метавулканиты основного и среднего состава	101	(32-2917)	0.011	(0.001-1.975)	480/475
Метаморфические породы					
Сланцы разного состава	50	(20-441)	0.002	(0.001-1,975)	9090
1	2	3	4	5	6
Амфиболиты	135	(214-70)	0.070	(0.001-0.280)	4352
Актинолиты	161	(69-592)	0.110	(0.001-0.190)	344/343
Гнейсы	38	(15-3087)	0.001	(0.001-1.025)	1314/118

Таблица 2. Окончание

Table 2. Continued

1	2	3	4	5	6
Плагииогнейсы	42	(15-737)	0.001	(0-0.190)	3160/2741
Гнейсо-граниты	38	(9-365)	0.001	(0-0.030)	567/484
Гранито-гнейсы	25	(15-1449)	0.001	(0.001-0.009)	804/777
Брекчии	1436	(22-7434)	0.480	(0.001-1.650)	312/300
Гранулиты	36540	(5-91035)	22.100	(0.001-83.500)	53/53
Карбонатиты	945	(189—1449)	4.550	(0.120-8.800)	215/215
Плагииограниты	14	(8-114)	0.001	(0.001-0.028)	668/614
Мигматиты	50	(17-1475)	0.001	(0.001-0.670)	1508/1272
Плагииомигматиты	63	(11-1084)	0.001	(0.001-0.105)	971/729
Железистые кварциты	120960	(40005-204278)	61.050	(23.700-136)	7585/6033
Кварцитопесчаники	10	(1-882)	0.001	(0.001-0.790)	1658/1468
Известняки мраморизованные	14	(7-315)	0.001	(0.001-0.003)	728/748
Метапесчаники	25	(1-958)	0.001	(0-0.445)	808/736
Метасоматиты	819	(0-9274)	2,100	(0.001-50.425)	1770/1642
Фениты	63	(7-290)	0.010	(0.001-0.123)	673/669
Тремолититы	416	(133-13816)	0.540	(0.001-76.855)	173/164

Примечание. κ — медиана магнитной восприимчивости по всей БД; κ_{\min} , κ_{\max} — минимальные и максимальные значения медиан магнитной восприимчивости, полученные для различных групп данных; J_n — медиана остаточной намагниченности по всей БД; $J_{n_{\min}}$, $J_{n_{\max}}$ — минимальные и максимальные значения медиан остаточной намагниченности, полученные для различных групп данных; n_1 , n_2 — объемы выборок данных, представленных в БД, магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности, соответственно.

Note. κ — median of magnetic susceptibility for the entire database; κ_{\min} , κ_{\max} — minimum and maximum values of median of magnetic susceptibility for different groups of data; J_n is the median of residual magnetization for the entire database; $J_{n_{\min}}$, $J_{n_{\max}}$ are the minimum and maximum values of the medians of residual magnetization obtained for different groups of data; n_1 , n_2 are the volumes of data samples presented in the database, magnetic susceptibility and residual magnetization, respectively.

По данным статистического анализа с учетом геологической информации о представительности пород в каждом СВК, а также на основе геологической карты масштаба 1:500 000 (Молотков и др., 1999) в системе ГИС ArcView 3.2 обобщенные значения петромагнитных характеристик были присвоены всем локальным геологическим объектам, зафиксированным на геологической основе. В итоге были сформированы карты распределения магнитной восприимчивости (рис. 7) и остаточной намагниченности верхней части докембрийского кристаллического фундамента ВКМ (рис. 8).

Таким образом, на основе разработанной методики обобщения петромагнитных параметров, получена цифровая модель пространственного распределения магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности, визуализированная в виде карт петромагнитных параметров.

ВЫВОДЫ

Пространственное распределение магнитных свойств горных пород докембрийского фундамента ВКМ, тесно связанных с характером магматических и метаморфических процессов, в комплексе с новыми изотопно-геохимическими данными является важным источником информации для понимания геодинамического развития региона.

Синтезированное представление петроплотностных и петромагнитных данных в едином ГИС-проекте фактически представляют петрофизическую модель кристаллического фундамента, что раскрывает новые возможности количественной комплексной интерпретации магнитного и гравитационного при создании трехмерных геологических моделей глубинного строения региона.

Научные исследования выполнены в рамках гранта РНФ № 25-27-00209.

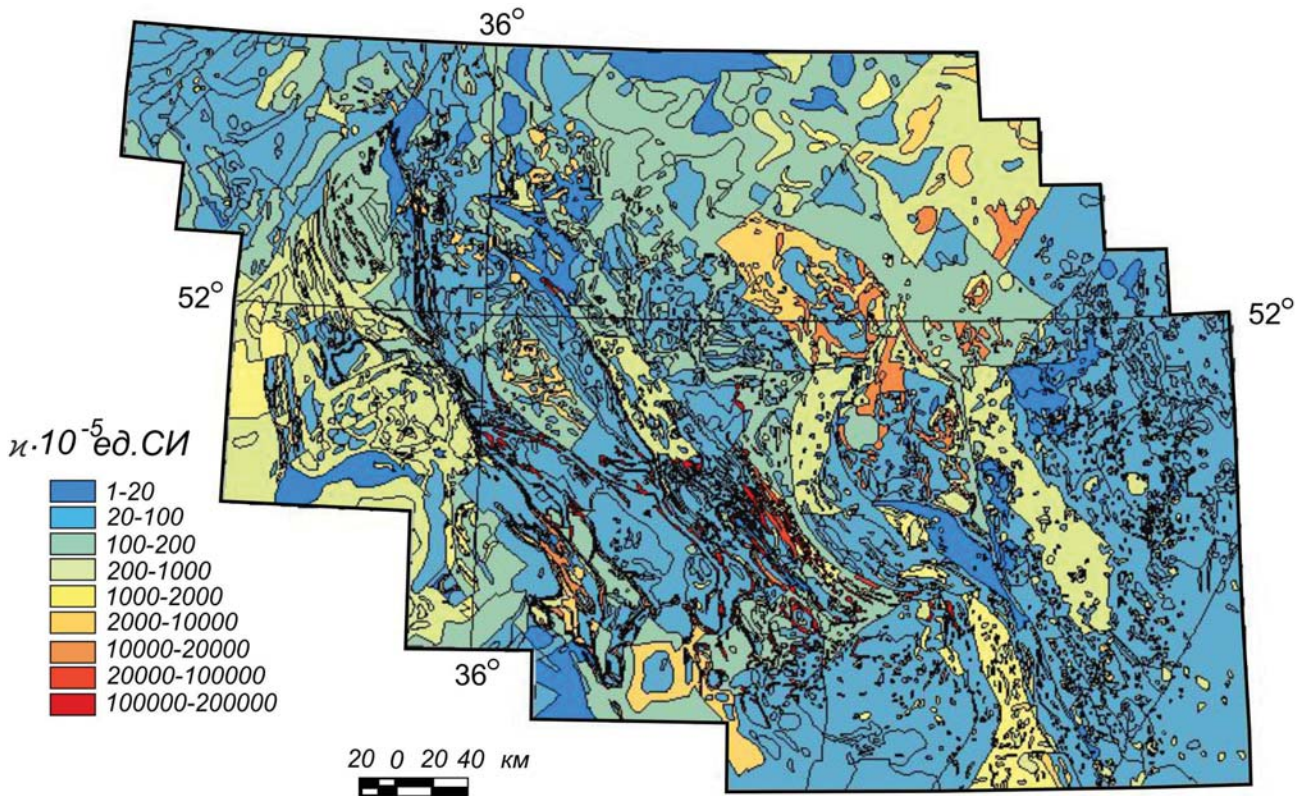


Рис. 7. Карта магнитной восприимчивости докембрийского фундамента ВКМ.

Fig. 7. Map of magnetic susceptibility of the Precambrian basement of the VCM.

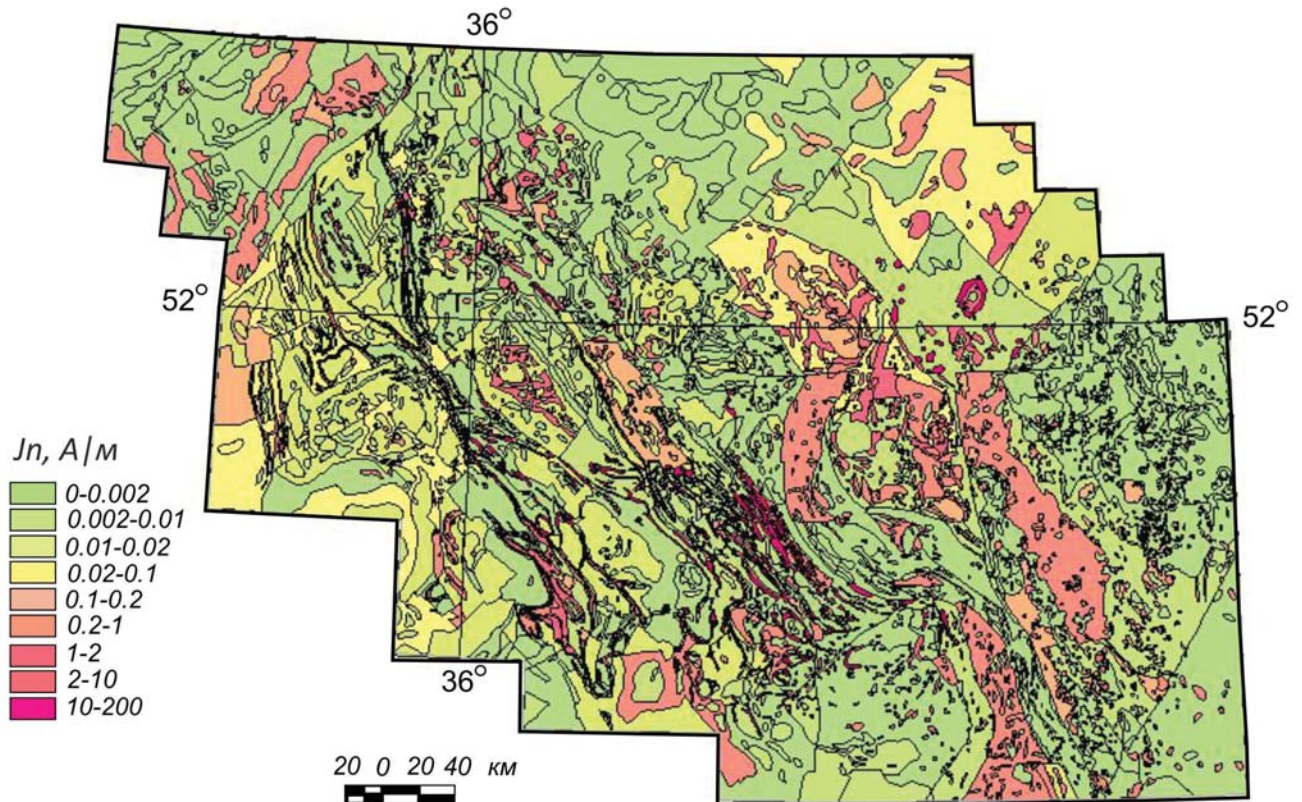


Рис. 8. Карта остаточной намагниченности докембрийского фундамента ВКМ.

Fig. 8. Map of residual magnetization of the Precambrian basement of the VCM.

Авторы выражают искреннюю благодарность В.И. Жаворонкину и И.П. Лебедеву за усилия, обеспечившие сохранность исходных фактических данных, а также многочисленные консультации и обсуждение дискуссионных вопросов.

Список литературы [References]

- Афанасьев Н.С.* Петрофизика докембрийских образований и геологическое строение Воронежского кристаллического массива / Диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. Т. 1. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1982. 310 с. [*Afanasyev N.S.* Petrophysics of Precambrian formations and geological structure of the Voronezh crystalline massif / Dissertation for the degree of doctor of geological and mineralogical sciences. V. 1. Voronezh: VSU Publ., 1982. 310 p. (in Russian)].
- Бибикова Е.В., Богданова С.В., Постников А.В. и др.* Зона сочленения Сарматии и Волго-Уралии: изотопно-геохронологическая характеристика супракрустальных пород и гранитоидов // Стратиграфия и геол. корреляция. 2009. Т. 17. № 6. С. 3–16 [*Bibikova E.V., Bogdanova S.V., Postnikov A.V. et al.* The junction zone of Sarmatia and Volga-Uralia: isotope-geochronological characteristics of supracrustal rocks and granitoids // Stratigraphy and geological correlation. 2009. V. 17. № 6. P. 3–16 (in Russian)].
- Глазнев В.Н., Миц М.В., Муравина О.М.* Плотностное моделирование центральной части Восточно-Европейской платформы // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. 29. С. 53–63 [*Glaznev V.N., Mints M.V., Muravina O.M.* Plotnostnoye modelirovaniye central'noj chasti Vostochno-Evropejskoj platformy // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2016. № 1(29). P. 53–63 (in Russian)].
- Глазнев В.Н., Муравина О.М., Жаворонкин В.И. и др.* Петроплотностная карта докембрийского фундамента Воронежского кристаллического массива. Воронеж: «Научная книга», 2020. 101 с. [*Glaznev V.N., Muravina O.M., Zhavoronkin V.I. et al.* Petro-density map of the Precambrian basement of the Voronezh crystalline massif. Voronezh: «Nauchnaya kniga», 2020. 101 p. (in Russian)].
- Крестин Е.М.* Докембрий КМА и основные закономерности его развития // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 1980. № 3. С. 3–18 [*Krestin Ye.M.* Dokembriy KMA i osnovnyye zakonornosti yego razvitiya // Izvestiya VUZov. Geologiya i razvedka. 1980. № 3. P. 3–18 (in Russian)].
- Лебедев И.П., Молотков С.П., Кривцов И.И., Лосицкий В.И.* Структурно-геологические особенности воронцовской серии Воронежского кристаллического массива (ВКМ) // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 1999. № 7. С. 25–30 [*Lebedev I.P., Molotkov S.P., Krivtsov I.I., Lositskiy V.I.* Strukturno-geologicheskiye osobennosti vorontsovskoy serii Voronezhskogo kristallicheskogo massiva (VKM) // Vestnik Voronezh state University. Ser. Geology. 1999. P. 25–30 (in Russian)].
- Миц М.В., Глазнев В.Н., Муравина О.М.* Глубинное строение коры юго-востока Воронежского кристаллического массива по геофизическим данным: геодинамическая эволюция в палеопротерозое и современное состояние коры // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2017. № 4. С. 2–23 [*Mints M.V., Glaznev V.N., Muravina O.M.* Deep structure of the crust in the southeast of the Voronezh crystalline massif according to geophysical data: geodynamic evolution in the Paleoproterozoic and the current state of the crust // Vestnik Voronezh state university. Ser. Geology. 2017. № 4. P. 2–23 (in Russian)].
- Молотков С.П., Костюков В.И., Лосицкий В.И. и др.* Геологическая карта Воронежского кристаллического массива масштаба 1 : 500 000 / Министерство природных ресурсов РФ, ГПП «Воронежгеология», ОАО «Белгородгеология», ВГУ, НКПР «Хорс». Воронеж, 1999. [*Molotkov S.P., Kostyukov V.I., Losickij V.I. et al.* Geologicheskaya karta Voronezhskogo kristallicheskogo massiva masshtaba 1 : 500 000 / Ministerstvo prirodnyh resursov RF, GPP «Voronezhgeologiya», OAO «Belgorodgeologiya», VGU, NKPR «Hors». Voronezh, 1999 (in Russian)].
- Муравина О.М.* Плотностная модель земной коры Воронежского кристаллического массива // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2016. № 1. С. 108–114 [*Muravina O.M.* Density model of the Earth's crust of the Voronezh crystalline massif // Vestnik Voronezh state university. Ser. Geology. 2016. №. 1. P. 108–114 (in Russian)].
- Муравина О.М., Глазнев В.Н., Воронова Т.А., Терентьев Р.А.* Строение центральной части палеопротерозойского Лосевского террейна по данным плотностного моделирования // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2024. № 3. Вып. 63. С. 5–17. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2024-3-63-5-17> [*Muravina O.M., Glaznev V.N., Voronova T.A. Terentiev R.A.* A three-dimensional density model of the upper crust at the junction of the Losevo and Vorontsovka terranes (Voronezh crystalline massif) // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2024. № 3(63). P. 5–17 (in Russian)].
- Муравина О.М., Жаворонкин В.И.* Статистический анализ цифровой основы петроплотностной карты Воронежского кристаллического массива // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2015. № 2. С. 94–99 [*Muravina O.M., Zhavoronkin V.I.* Statistical analysis of the digital basis of the petro-density map of the Voronezh crystalline massif // Vestnik Voronezh State University. Ser. Geology. 2015. № 2. P. 94–99 (in Russian)].
- Ненахов В.М., Стрик Ю.Н., Трегуб А.И. и др.* Минерогенные исследования территорий с двухъярусным строением (на примере Воронежского кристаллического массива) // М.: ГЕОКАРТ-ГЕОС, 2007. 284 с. [*Nenakhov V.M., Strik Yu.N., Tregub A.I. et al.* Mineragenic studies of territories with a two-tiered structure (on the example of the Voronezh crystalline massif). // Moscow: GEOKART-GEOS, 2007. 284 p. (in Russian)].
- 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 // Стратигра-

- фия. Геологическая корреляция. 2015. Т. 23. № 5. С. 3–21 [Savko K.A., Bazikov N.S., Artemenko G.V. Geochemical evolution of the banded iron formations of the Voronezh crystalline massif in the early Precambrian: sources of matter and geochronological constraints // Stratigraphy and Geological Correlation. 2015. V. 23. № 5. P. 451–467].
- Савко К.А., Кориш Е.Х., Базиков Н.С. и др. Редкие и редкоземельные элементы и изотопный состав Hf в цирконе из палеопротерозойских диорит-грано-диоритовых интрузий Курского блока Сарматии как индикаторы их петрогенезиса // Вестник Воронежского Государственного университета. Сер. Геология. 2023. № 1. С. 4–17. <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/1/4-17> [Savko K.A., Korish Ye.H., Bazikov N.S. et al. Trace and Rare Earth elements and Hf isotopic composition of zircons from the Paleoproterozoic diorite-granodiorite plutons of the Kursk block, Sarmatia as their petrogenesis indicators // Vestnik Voronezh State University. Ser. Geology. 2023. № 1. P. 4–17 (in Russian)].
- Савко К.А., Самсонов А.В., Ларионов А.Н. и др. Палеопротерозойские граниты А- и S-типа востока Воронежского кристаллического массива: геохронология, петрогенезис и тектоническая обстановка формирования // Петрология. 2014. Т. 22. № 3. С. 235–264 [Savko K.A., Samsonov A.V., Larionov A.N. et al. Paleoproterozoic A- and S-granites in the eastern Voronezh Crystalline Massif: Geochronology, petrogenesis, and tectonic setting of origin // Petrology. 2014. V. 22. № 3. P. 205–233].
- Савко К.А., Самсонов А.В., Холин В.М., Базиков Н.С. Мегаблок Сарматия как осколок суперкратона Ваалбара: корреляция геологических событий на границе архея и палеопротерозоя // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2017. Т. 25. № 2. С. 3–26 [Savko K.A., Samsonov A.V., Kholin V.M., Bazikov N.S. Megablock The Sarmatia Megablock as a Fragment of the Vaalbara Supercontinent: Correlation of Geological Events at the Archean-Paleoproterozoic Transition Stratigraphy and Geological correlation. 2017. V. 25. № 2. P. 123–145. <https://doi.org/10.1134/S0869593817020058>].
- Терентьев Р.А. Геология, вещественный состав и палеогеодинамические условия формирования Лосевской серии (Воронежский кристаллический массив) // Серия Геология докембрия ВКМ. Вып. 1. Воронеж, 2013. 222 с. [Terentiev R.A. Geology, material composition and paleogeodynamic conditions of the formation of Losevo series (Voronezh crystalline massif) // Series Geology of the Precambrian VKM. Iss. 1. Voronezh, 2013. 222 p.].
- Терентьев Р.А., Воронова Т.А., Муравина О.М., Глазнев В.Н. Расшифровка тектонических элементов и внутренней структуры палеопротерозойского Лосевского террейна (Волго-Донской ороген) по данным плотностного моделирования // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2024. № 3. С. 79–95. <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/3/79-95> [Terentiev R.A., Voronova T.A., Muravina O.M., Glaznev V.N. Deciphering of the tectonic elements and internal structure of the Paleoproterozoic Losevo terrane (Volga-Don orogen) using density modeling data // Vestnik Voronezh State University. Ser. Geology. 2024. № 3. P. 79–95 (in Russian)].
- Чернышов Н.М., Ненахов В.М., Стрик Ю.Н., Лебедев И.П. Модель геодинамического формирования Воронежского кристаллического массива // Геотектоника. 1997. № 3. С. 21–30 [Chernyshov N.M., Nenakhov V.M., Strik Yu.N., Lebedev I.P. Geodynamic model of the formation of the Voronezh crystalline massif // Geotectonics. 1997. № 3. P. 21–30 (in Russian)].
- Щипанский А.А., Самсонов А.В., Петрова А.Ю., Ларионова Ю.О. Геодинамика восточной окраины Сарматии в палеопротерозое // Геотектоника. 2007. № 1. С. 43–70 [Shchipansky A.A., Samsonov A.V., Petrova A.Yu., Larionova Yu.O. Geodynamics of the eastern margin of Sarmatia in the Paleoproterozoic // Geotektonika. 2007. № 1. P. 43–70 (in Russian)].
- Холина Н.В. Геохимические особенности и источники расплавов неархейских ультракалиевых риолитов курского блока Воронежского кристаллического массива // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2018. № 1. С. 46–57 [Holina N.V. Geochemical typization and sources of melts of the Neoproterozoic ultra-potassic rhyolites of the Kursk block, Voronezh crystalline massif // Vestnik Voronezh State University. Ser. Geology. 2018. № 1. P. 46–57 (in Russian)].
- Глазнев В.Н., Минтс М.В., Муравина О.М. et al. Complex geological-geophysical 3D model of the crust in the southeastern Fennoscandian Shield: Nature of density layering of the crust and crust-mantle boundary // Geodynamics & Tectonophysics. 2015. V. 6. № 2. P. 133–170. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-2-0176>
- Савко К.А., Самсонов А.В., Ларионов А.Н. et al. A buried Paleoproterozoic core of the Eastern Sarmatia, Kursk block: U-Pb, Lu-Hf and Sm-Nd isotope mapping and paleotectonic application // Precambrian Research. 2021. 353. 106021. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.106021>
- Терентьев Р.А., Савко К.А., Кориш Е.Х. The Rossosh domain is a fragment of the mesoarchean granite-greenstone area of Sarmatia: results of geochronological and isotopic studies of felsic volcanic rocks // Doklady Earth Sciences. 2025. V. 521. № 1. P. 1–9.
- Терентьев Р.А., Савко К.А., Петракова М.Е. et al. Paleoproterozoic granitoids of the Don terrane, East-Sarmatian Orogen: age, magma source and tectonic implications // Precambrian Research. 2020. V. 346. P. 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105790>
- Терентьев Р.А., Савко К.А., Сантош М. Paleoproterozoic crustal evolution in the East Sarmatian Orogen: Petrology, geochemistry, Sr-Nd isotopes and zircon U-Pb geochronology of andesites from the Voronezh massif, Western Russia // Lithos. 2016. V. 246–247. P. 61–80. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.12.025>
- Терентьев Р.А., Савко К.А., Сантош М. Paleoproterozoic evolution of the arc-back-arc system in the east Sarmatian Orogen (East European Craton): Zircon SHRIMP geochronology and geochemistry of the Losevo volcanic suite // American Journal of Science. 2017. V. 317. № 6. P. 707–753. <https://doi.org/10.2475/06.2017.03>

МУРАВИНА и др.

**THE MAPS OF ROCK MAGNETIC PARAMETERS
OF THE PRECAMBRIAN BASE OF THE VORONEZH CRYSTALLINE MASSIF:
FORMATION METHODOLOGY AND ANALYSIS RESULTS**

O.M. Muravina¹, V.N. Glaznev^{1,2}, A.A. Sotnikov¹, I.Yu. Antonova¹, O.S. Zhidkih¹

¹Voronezh State University, Voronezh, Russia, 394018;

²Geological Institute KSC RAS, Apatity, Russia, 184209

Received May 26, 2025; revised October 14, 2025; accepted December 25, 2025

The article discusses a method for summarizing data on the magnetic properties of the Precambrian basement rocks of the Voronezh crystalline massif, which was used to create maps of magnetic susceptibility and residual magnetization that reflect the spatial distribution of the magnetic properties of rocks from various structural and material geological complexes in the region. The creation of these maps required a systematic study of the magnetic properties of the basement rocks, which included statistical and correlation analysis of the data, as well as an assessment of the magnetic properties of individual age groups based on the representation of rocks from different lithological types. The resulting digital model of the spatial distribution of petromagnetic parameters is visualized as maps of magnetic susceptibility and residual magnetization. The spatial distribution of the magnetic properties of the rocks of the Precambrian basement of the Voronezh crystalline massif, in combination with new isotope-geochemical data on the age of the rocks, is an important source of information for understanding the geodynamic development of the region. The synthesized representation of density and petromagnetic data in a single GIS project effectively represents a petrophysical model of the crystalline basement, which opens up new possibilities for quantitative and complex interpretation of the magnetic and gravitational fields in order to create three-dimensional geological models of the deep structure of the region.

Keywords: Voronezh crystal massif, petrophysics, petrophysics, magnetic properties of rocks.