

НАУЧНЫЕ
СООБЩЕНИЯ

УДК 550382.3+551.242.055(470.32)

ПЕТРОМАГНИТНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПОРОД ФУНДАМЕНТА
ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА

© 1997 г. Ю. С. Геншафт¹, А. В. Лыков², Н. А. Миронова¹,
А. Я. Салтыковский¹, Н. С. Афанасьев³

¹Институт сейсмологии ОИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

²Институт планетарной геофизики ОИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

³Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 09.01.96 г.

Воронежский кристаллический массив (ВКМ) располагается в центре Восточно-Европейской платформы и представляет собой сравнительно неглубоко опущенный (от 0 до 600 м) выступ докембрийского кристаллического фундамента, в состав которого входят сложно дислоцированные метаморфические и магматические породы архея и протерозоя. Основные сведения о геологическом строении, структуре, составе пород и характере тектонических движений дают данные бурения и результаты геофизических исследований. На тектонической схеме строения ВКМ (рис. 1)

выделяются наиболее жесткие архейские массивы - Росошанский, Брянский, Ливненко-Касторинский, Сумской, разделенные линейными грабенсинклиналями, заложенными в позднем архее и раннем протерозое и претерпевшими активизацию в более позднее время.

Отмеченные структурные элементы ВКМ достаточно четко выделяются в геофизических полях, прежде всего в гравитационном и магнитном [1]. По гравитационным данным выделены "легкие" (Северо-Западный и Центральный) и "тяжелые" (Западный и Восточный) мегаблоки

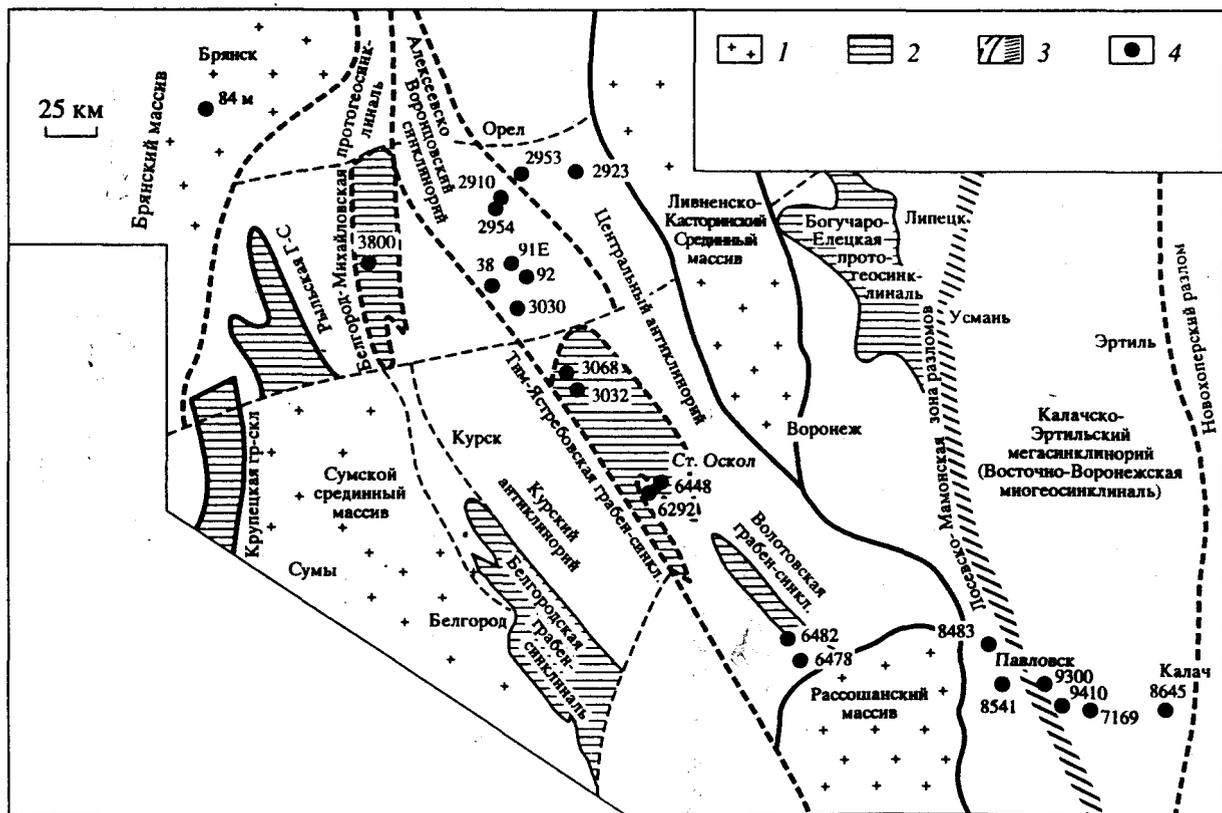


Рис. 1. Схема тектонического строения Воронежского кристаллического массива и расположение скважин, из которых отобраны образцы: 1 – архейские срединные массивы, 2 – синклинальные структуры, 3 – шовные зоны и разломы, 4 – скважины.

литосферы. В терминах классической тектоники ВКМ состоит из массивов архейской консолидации и раннепротерозойских протогеосинклинальных структурных зон, представленных разноранговыми линейными синклиналями и антиклиналями. В раннем протерозое наступает субплатформенный этап консолидации фундамента всей структуры массива [2]. Линейные зоны ВКМ сложены в разной степени метаморфизованными вулканогенноосадочными и магматическими породами, которые можно объединить в сопряженные ряды вулканогенно-осадочных и плутонических формаций.

Анализ магнитного поля ВКМ показал, что магнитные аномалии вызваны разноглубинными источниками и, как правило, связаны с распределением ультраметаморфических и магматических тел [1]. В этой связи естественен интерес к характеру распределения петромагнитных характеристик пород фундамента ВКМ в зависимости от их генетической природы и петрологической специализации. В общих чертах известно, что нижнеархейские формации характеризуются пониженными и слабо меняющимися значениями магнитных характеристик (восприимчивость, остаточная намагниченность).

Нижнепротерозойские эвгеосинклинальные (или, по другим представлениям, рифтогенные [2]) образования более дифференцированы по физическим свойствам и характеризуются более высокими параметрами. В позднем протерозое формируются различные по составу породы с контрастными физическими свойствами. Таким образом в течение протерозоя наблюдается усложнение петротипов пород по разнообразию и контрастности физических свойств, состава и условиям постмагматических преобразований [3].

Образцы для исследований были отобраны из кернов картировочных и разведочных скважин, причем большая их часть характеризует состав фундамента в линейных структурах (рис. 1). Изучались магнитные характеристики, отражающие содержание магнитных минералов в породах: **магнитная восприимчивость (Кар) и намагниченность насыщения (I_s).** Состав ферримагнитных фаз оценивался по точкам Кюри (T_c) методом термомангнитного анализа (ТМА) I_s .

Кроме того проводилась оценка анизотропии магнитной восприимчивости: оценивались параметры A и K_a , отражающие величину и тип магнитной анизотропии [4]. Химический состав минералов и структурные особенности образцов изучались методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа на электронном микроанализаторе "Самебах" в Геофизической обсерватории "Борок" ОИФЗ РАН.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБРАЗЦОВ

Для данной работы было отобрано 45 образцов, составы которых варьировали в широких пределах - от кислых до ультраосновных (табли-

ца). Породы кислого, среднего и основного состава, за исключением 6 образцов, характеризуются явными протемагматическими структурами и относятся к ортопородам. Отмеченные 6 образцов обладают метаморфическими структурами и содержат такие метаморфические индекс-минералы, как кордиерит, альмандиновый гранат. Среди изученных образцов два представлены девонскими базальтами из восточной части ВКМ (зона девонского рифтогенеза вдоль Новохоперского разлома): образцы 8645 и 9410.

Среди рудных фаз методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа установлены низкопримесный магнетит, ильменит, сульфиды, близкие по составу к пириту и троилиту (пирротины?), изредка титаномагнетиты с достаточно высоким содержанием титана (образцы 3032/2, Б-12-14, 3030/20, 6645, 8645, 9410). Нередко встречаются зерна низкопримесного магнетита с ламеллями ильменита или зернистые сростки этих минералов.

Формальная оксотермометрия этой пары минералов дает низкие температуры равновесия (менее 600°C) при pO_2 , близком к буферу QFM (рис. 2).

По петрографическим данным изученные образцы составляют следующие группы пород. Гранитоиды и гранодиориты (38-1, 6326-1, 6326-2, 84, 6292, 6293в). Породы преимущественно среднезернистые, представлены биотитовыми и амфиболсодержащими разностями (до 20 объемных %). Амфибол часто замещается биотитом. Рудный минерал (не более 3%) обычно ассоциирует с темноцветными. Магнетит встречается в сростках с ильменитом и количественно преобладает над ним. Размер зерен до и более 200 мкм. Часто встречаются сульфиды. Наблюдаются деформированные разновидности гранитоидов (№№ 84, 6292, 6292в) с бластокластической структурой. Деформациям подверглись все составляющие породы минералы.

Габброиды (габбро-нориты, габбро-долериты, габбро-диориты) в основном мамонского и смородинского комплексов и девонские базальты (36, 312а, 2910-3, 3030-20, 2954-6, 2923-14, 3800, 6482, 7169-24, 7169-37, 7169-45, 7169-46, Б12-14, Б-12-20, 8483-1, 8645-3, 9410). Габброиды состоят из плагиоклаза (дт 20 до 58%), амфибола (10-68%), клинопироксея (15-30%), ортопироксена (5-35%), биотита (5-1%), спорадически - оливин. Пироксен замещается актинолит-тремолитом, а амфибол-хлоритом. В разных количествах встречается высокотемпературный биотит (1-2%, в отдельных случаях более 10%). Из рудных для габброидов характерны ильменит, магнетит и часто - мелкие сульфиды.

Содержаний минералов далее приведено в объемных %.

Химические составы (мас. %) и магнитные характеристики изученных пород

| Образец | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | FeO* | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | ппп | Cr ₂ O ₃ | Кар, 10 ⁻⁶ emu/g | I _s , emu/g | A | Ka | T _c , °C |
|-----------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------|-------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------|------|-------|---------------------|
| группа 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6326B | 70.99 | 0.29 | 13.42 | | 2.42 | 0.03 | 1.43 | 2.28 | 1.69 | 0.37 | 6.13 | 1.34 | 0.28 | 6 | 0.01 | 1.05 | 0.00 | 350h |
| 102A | 69.60 | 0.33 | 10.08 | | 9.32 | 0.58 | 2.72 | 1.03 | 1.40 | 2.86 | 0.22 | 1.08 | 0.03 | 34 | 0.25 | 1.34 | -0.30 | |
| 6292B | 69.24 | 0.66 | 12.02 | | 4.27 | 0.07 | 2.87 | 2.46 | 3.27 | 2.04 | 0.10 | 1.88 | 0.02 | 16 | 0.16 | 1.13 | -0.08 | |
| 84 | 68.45 | 0.42 | 13.97 | | 0.38 | 0.04 | 2.11 | 1.13 | 0.98 | 4.40 | 0.11 | 2.87 | 0.03 | 36 | 0.15 | 1.37 | -0.05 | |
| группа 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 38/322 | 66.99 | 0.66 | 13.84 | | 5.86 | 0.10 | 0.94 | 2.20 | 4.21 | 3.54 | 0.21 | 0.59 | 0.02 | 240 | 2.12 | 1.02 | -0.02 | 580 |
| 38/356 | 63.64 | 1.36 | 12.79 | | 7.94 | 0.15 | 1.93 | 3.57 | 4.05 | 2.53 | 0.44 | 0.73 | 0.02 | 985 | 1.98 | 1.04 | 0.02 | 580 |
| 8541-1 | 62.03 | 0.76 | 14.62 | | 5.21 | 0.08 | 5.12 | 4.23 | 2.52 | 3.34 | 0.29 | 0.79 | 0.05 | 991 | 1.26 | 1.06 | 0.00 | |
| 38/356m | 61.52 | 0.90 | 17.32 | 3.80 | 2.90 | 0.08 | 1.14 | 3.85 | 3.75 | 3.90 | 0.08 | 0.70 | 0 | 1356 | 2.75 | 1.20 | 0.10 | |
| 6475 | 60.30 | 0.45 | 13.08 | 4.72 | 15.30 | 0.11 | 3.27 | 1.74 | 0.10 | 0.10 | 0.18 | 0.94 | 0 | 131 | 0.56 | 1.16 | -0.10 | |
| 84M | 59.16 | 1.03 | 15.44 | | 10.19 | 0.12 | 4.44 | 0.78 | 0.67 | 2.38 | 0.09 | 4.56 | 0.05 | 924 | 1.66 | 1.15 | 0.07 | 580 |
| группа 3a | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| G-11-10 | 55.06 | 0.67 | 14.07 | 3.03 | 5.18 | 0.14 | 9.06 | 7.02 | 3.82 | 1.43 | 0.17 | 0.00 | 0 | 347 | 0.80 | 1.06 | -0.10 | 570 |
| B-12-14 | 54.82 | 0.73 | 13.14 | | 8.93 | 0.16 | 7.89 | 7.88 | 2.81 | 2.00 | 0.29 | 0.45 | 0.06 | 914 | 1.65 | 1.07 | 0.06 | 580 |
| B-12-20 | 54.66 | 0.81 | 13.78 | | 8.98 | 0.13 | 6.08 | 7.98 | 3.13 | 1.47 | 1.06 | 0.98 | 0.04 | 896 | 1.86 | 1.06 | -0.03 | |
| 3030/34 | 53.06 | 0.56 | 16.72 | | 9.42 | 0.15 | 8.38 | 7.90 | 2.69 | 0.49 | 0.11 | 0.18 | 0.04 | 695 | 1.83 | 1.47 | -0.29 | |
| 2910/3 | 51.90 | 2.60 | 16.56 | | 11.73 | 0.15 | 3.46 | 8.72 | 3.58 | 1.36 | 0.35 | 0.00 | 0.03 | 1300 | 2.47 | 1.07 | -0.04 | |
| 2954/6 | 50.01 | 0.61 | 15.39 | | 11.37 | 0.18 | 6.77 | 9.57 | 3.12 | 0.22 | 0.13 | 0.71 | 0.30 | 377 | 1.14 | 1.14 | -0.06 | |
| 36 | 48.92 | 3.33 | 12.24 | | 15.70 | 0.21 | 3.89 | 8.80 | 3.07 | 1.75 | 1.78 | 0.36 | 0.02 | 1456 | 2.42 | 1.10 | 0.03 | 570 |
| 3032/2 | 48.73 | 1.09 | 16.75 | | 11.98 | 0.19 | 6.89 | 11.34 | 2.33 | 0.49 | 0.17 | 0.01 | 0.04 | 553 | 1.51 | 1.06 | 0.03 | |
| 3030/20 | 48.12 | 1.72 | 13.24 | | 14.23 | 0.23 | 6.64 | 10.51 | 2.27 | 0.59 | 0.24 | 1.35 | 0.04 | 961 | 2.06 | 1.02 | 0.01 | |
| 312a/12 | 46.91 | 1.11 | 16.87 | | 10.97 | 0.17 | 6.71 | 8.23 | 3.60 | 2.62 | 0.77 | 1.11 | 0.02 | 490 | 0.92 | 1.12 | -0.01 | 580 |
| 3800 | 44.41 | 1.32 | 15.56 | | 13.16 | 0.14 | 8.61 | 10.92 | 2.79 | 1.11 | 0.22 | 0.78 | 0.05 | 684 | 1.13 | 1.31 | -0.26 | 580 |
| 2179 | 43.94 | 3.60 | 15.58 | 5.67 | 12.57 | 0.19 | 5.94 | 8.58 | 2.40 | 0.48 | 0.27 | 0.10 | 0 | 2826 | 4.33 | 1.15 | 0.06 | |
| группа 3б | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6292 | 43.71 | 1.47 | 12.31 | | 16.99 | 0.19 | 7.99 | 11.28 | 1.76 | 1.13 | 0.17 | 1.68 | 0.03 | 300 | 0.88 | 1.18 | -0.02 | |

Таблица 1. (Окончание)

| Образец | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | FeO* | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | ппп | Cr ₂ O ₃ | Кар, 10 ⁻⁶ emu/g | I ₅ , emu/g | A | Ka | T _c , °C | |
|----------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-------|-------|-------------------|------------------|-------------------------------|-------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------|------|-------|---------------------|--|
| 7169/24 | 50.86 | 0.13 | 9.98 | | 1.53 | 9.34 | 0.06 | 15.43 | 10.94 | 0.70 | 0.20 | 0.09 | 0.14 | 18 | 0.15 | 1.01 | -0.01 | | |
| 7169/45 | 52.12 | 0.27 | 8.70 | 1.52 | 9.34 | 0.19 | 18.61 | 6.49 | 0.97 | 0.18 | 0.28 | 0.00 | 0 | 26 | 0.15 | 1.03 | 0.02 | | |
| 3030/31 | 51.65 | 1.19 | 16.96 | | 10.19 | 0.16 | 7.93 | 7.62 | 2.65 | 0.46 | 0.10 | 0.00 | 0.04 | 269 | 0.53 | 1.03 | -0.02 | 520 | |
| 7169/46 | 51.28 | 0.24 | 9.49 | 2.84 | 8.98 | 0.19 | 16.00 | 6.69 | 0.91 | 0.18 | 0.49 | 0.00 | 0 | 13 | 0.13 | 1.06 | 0.00 | | |
| 8781 | 50.10 | 0.27 | 6.58 | | 9.56 | 0.17 | 19.97 | 7.02 | 0.68 | 0.83 | 0.11 | 3.30 | 0.30 | 11 | 0.03 | 1.80 | -0.65 | | |
| 3068-2 | 49.94 | 0.87 | 18.80 | | 10.13 | 0.16 | 4.96 | 10.14 | 2.10 | 0.45 | 0.16 | 1.41 | 0.03 | 38 | 0.19 | 1.23 | -0.19 | 320 | |
| 7169/41 | 49.93 | 0.92 | 9.47 | | 11.10 | 0.18 | 14.14 | 8.46 | 1.58 | 0.75 | 0.20 | 2.51 | 0.16 | 51 | 0.23 | 1.01 | -0.01 | | |
| 6482 | 49.64 | 0.71 | 11.41 | | 9.90 | 0.16 | 10.38 | 10.60 | 2.20 | 0.60 | 0.23 | 4.60 | 0.06 | 14 | 0.25 | 1.00 | 0.00 | h | |
| 8011/239 | 49.02 | 0.73 | 14.11 | | 20.70 | 0.43 | 5.16 | 1.10 | 0.76 | 3.23 | 0.12 | 3.52 | 0.60 | 28 | 0.17 | 1.02 | 0.00 | | |
| 8645 | 48.97 | 1.81 | 13.19 | | 12.44 | 0.24 | 6.57 | 11.27 | 2.77 | 0.28 | 0.23 | 1.20 | 0.02 | 9 | 0.07 | 1.06 | 0.06 | | |
| 9410/73 | 48.51 | 1.48 | 14.43 | | 11.34 | 0.22 | 7.45 | 11.90 | 2.09 | 0.27 | 0.22 | 2.36 | 0.03 | | 0.35 | | | | |
| 8483/1 | 48.36 | 0.69 | 16.14 | | 6.87 | 0.15 | 7.24 | 7.24 | 3.26 | 1.26 | 0.23 | 7.59 | 0.04 | 16 | 0.16 | 1.09 | 0.00 | | |
| 2953/5 | 47.12 | 1.24 | 15.21 | | 14.63 | 0.36 | 7.33 | 10.76 | 1.29 | 0.48 | 0.21 | 1.54 | 0.03 | 17 | 0.30 | 1.04 | 0.00 | h | |
| 2923/14 | 47.00 | 1.36 | 11.00 | 4.39 | 7.47 | 0.14 | 12.44 | 9.46 | 1.75 | 1.69 | 1.30 | 0.00 | 0 | 16 | 0.13 | 1.02 | 0.00 | | |
| 7169/37 | 46.28 | 0.19 | 16.54 | 2.40 | 8.49 | 0.15 | 9.54 | 9.58 | 2.90 | 1.60 | 0.17 | 0.00 | 0 | 55 | 0.26 | 1.07 | 0.00 | 330 | |
| 6448 | 45.45 | 0.21 | 10.00 | | 8.55 | 0.12 | 21.53 | 4.49 | 0.38 | 4.56 | 0.09 | 3.22 | 0.20 | 278 | 0.59 | 1.22 | -0.16 | | |
| 9300 | 45.23 | 0.20 | 1.72 | | 8.98 | 0.14 | 23.98 | 13.00 | 0.03 | 0.13 | 0.10 | 5.48 | 0.27 | 59 | 0.17 | 1.28 | 0.19 | | |
| группа 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 92C | 39.43 | 0.05 | 0.66 | | 11.28 | 0.17 | 33.14 | 0.38 | 0.03 | 0.47 | 0.07 | 12.80 | 0.17 | 837 | 1.49 | 1.07 | 0.03 | | |
| 6478A | 34.94 | 1.92 | 8.59 | | 19.96 | 0.16 | 9.47 | 14.90 | 1.26 | 2.08 | 4.38 | 1.31 | 0.03 | 484 | 1.36 | 1.25 | -0.12 | | |
| 6478D | 32.68 | 7.80 | 6.21 | | 16.90 | 0.18 | 6.98 | 17.33 | 0.59 | 5.02 | 1.90 | 4.71 | 0.16 | 406 | 1.25 | 1.16 | -0.16 | | |
| группа 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 91E | 19.95 | 0.04 | 0.72 | | 73.88 | 0.17 | 1.55 | 2.10 | 0.00 | 0.18 | 0.12 | 0.00 | 0.05 | 2317 | 4.96 | 1.23 | -0.01 | | |
| 6636 | 6.26 | 0.06 | 0.85 | | 51.10 | 0.25 | 10.86 | 17.81 | 0.16 | 0.20 | 0.13 | 11.00 | 0.03 | 2792 | 5.82 | 1.30 | 0.08 | 590a | |

Примечание. Если Fe₂O₃ не приведено, все железо приводится в виде FeO*; h – парамагнитная кривая, a – кривая с аномальным пиком.

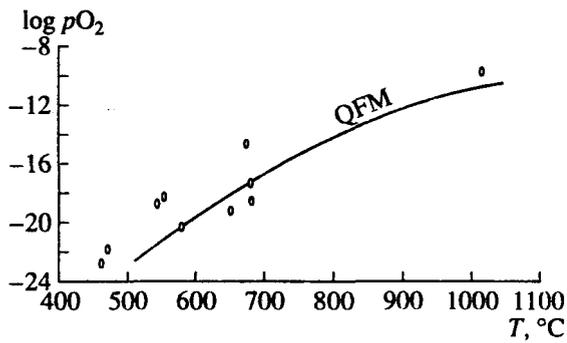


Рис. 2. Магнетит-ильменитовое равновесие в породах фундамента ВКМ на T - pO_2 диаграмме. Линией показано равновесие в буферных условиях кварц-фаялит-магнетит (QFM).

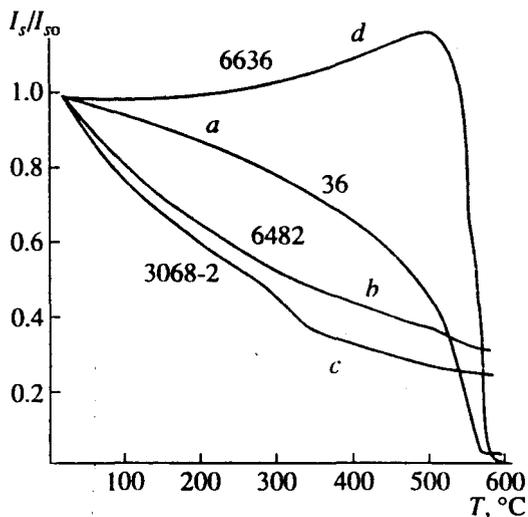


Рис. 3. Примеры кривых ТМА изученных образцов пород фундамента ВКМ.

В габбро-диоритах более широко развиты процессы; преобразования первичного минерального состава, в первую очередь амфиболизация и биотитизация пироксенов. Рудные минералы представлены магнетитом, ильменитом и титаномагнетитом. Содержание их составляет от единичных зерен до 5%. Сульфиды и мелкий магнетит встречаются в порах и по краям взаимозамещающих друг друга силикатов. В образце габбро смородинского комплекса (3030-20) крупные зерна титаномагнетита подвержены окислительному распаду, в них отмечаются участки практически чистого магнетита. Структура габбро-диоритов панидиоморфнозернистая, иногда порфиристая. Линейная текстура обусловлена вытянутыми по длинной оси биотитом и поздним линзовидным кварцем.

Базальты (8483, 8645, 9410) представлены слабо раскристаллизованными афанитовыми породами. Они состоят из основного плагиоклаза (10-45%),

клинопироксена (3-15%), реже - амфибола, содержат мелкие зерна эпидота, хлорита, кальцита. Рудные - титаномагнетит и ильменит.

Габбро-долериты и амфиболиты смородинского комплекса (3030-31, 3030-2) представлены среднезернистыми и малоизмененными породами с лейстами и короткостолбчатыми выделениями зонального плагиоклаза (Лабрадора). Объем последнего колеблется от 65 до 73%, ортопироксена 15-20%, клинопироксена 5-30%, амфибола до 3%, биотита до 3%. Среди вторичных встречаются зеленый и бледно-зеленый амфибол и хлорит. Рудные представлены довольно крупными зернами титаномагнетита и ильменита (2-3%). По границам железистых пироксенов выделяется мелкий магнетит. Ильменит в виде крупных зерен размером в сотни мкм иногда содержит включения магнетита. Титаномагнетит гетерофазный, содержит ламеллы ильменита. Иногда мелкий магнетит выделяется по трещинам, по границам ортопироксена. Структура пород габбровая, офитовая, часто наблюдается линейная текстура.

Ультраосновные породы (9300, 92с, 6578А) представлены пироксенитом (9300), серпентинитом (92с) и апопироксенитовым амфиболитом (6478А). Рудные минералы содержатся в количестве 2-5%. Пироксенит состоит главным образом из клинопироксена, часто замещаемого бурым амфиболом. Среди второстепенных минералов - красно-коричневый биотит. В породе отмечаются крупные зерна магнетита (размер более 200 мкм). Серпентинит содержит реликты оливина, редкие бесцветные зерна амфибола и зерна сульфидов. Апопироксенитовый амфиболит состоит преимущественно из амфибола. В незначительном количестве присутствуют клинопироксен (иногда как реликтовая фаза), а также буровато-коричневый биотит. Среди вторичных минералов отмечен хлорит и серпентин. Порода изменена наложенными процессами амфиболизации, серпентинизации и деформации, с которой связано появление линейной текстуры вторичного биотита. Рудные представлены крупными зернами пирита, троилита и магнетита. Сульфиды часто встречаются в сростках.

Метаморфические породы. Эта группа достаточно гетерогенна по составу и включает в себя плагиогнейсы (102А, 6455-2, 6455-3, 8011), кварциты (91Е, 2918-1-7, 3030-34, 6455-1), карбонатизированный сланец (3721), мрамор (6636-1), меланократовые сланцы (6478в, 6478р) и биотит-ортопироксеновый кристаллический сланец (2844-8).

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕТРОМАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Изученные магнитные характеристики вместе с петрохимическими параметрами приведены в таблице и на рис. 3-8.

На основании данных по содержанию SiO_2 в породах и концентрации в них магнитных минералов (величины K_a и I_s) в исследованной коллекции можно выделить следующие петромагнитные типы пород:

1 – Практически немагнитные (среднее значение $I_s = 0.11$ Гс см³/г) породы кислого состава (среднее значение $\text{SiO}_2 = 69.6\%$).

2 – Магнитные ($I_s = 1.72$) породы среднего ($\text{SiO}_2 = 62.3$) состава.

3 – Породы, характеризующиеся широким спектром намагниченности – от практически немагнитных ($I_s = 0.03$) до магнитных ($I_s = 4.33$), основного состава ($\text{SiO}_2 = 49.4$).

4 – Породы, обладающие средней по величине намагниченностью ($I_s = 1.37$) и повышенной основностью ($\text{SiO}_2 = 35.7$).

5 – Сильномагнитные ($I_s = 5.39$) породы с очень низким содержанием (13.1) кремнекислоты.

В группу 1 попали граниты, в группу 2 – различные кварц–полевошпатовые породы, в группу 4 – анопироксенитовые амфиболиты и серпентиниты, в группу 5 – железистые кварциты. Наиболее интересной представляется группа 3. В ней наблюдается бимодальное распределение пород по намагниченности, что дает основание разделить ее на две подгруппы: 3а – магнитную ($I_s = 1.56$) и 3б – немагнитную ($I_s = 0.23$). Обе подгруппы заселяют близкие по типу породы – в разной степени метаморфизованные габброиды, причем по оцененным РЕ параметрам равновесия минеральных фаз большая часть пород принадлежит гранулитовой фации метаморфизма.

Большинство изученных образцов слабо анизотропны. При этом преобладает плоскостной тип анизотропии ($K_a < 0$). Статистически заметная магнитная анизотропия отмечена только на породах группы 1 – средняя величина анизотропии составляет 22% ($A = 1.22$) при выраженном плоскостном типе ($K_a = -0.11$) и группы 5 – $A = 1.27$ при осевом типе анизотропии ($K_a = +0.04$). Сильная анизотропия железистых кварцитов по магнитным свойствам отмечалась и в [6]. В породах остальных групп магнитная анизотропия в среднем не превышает 10%.

По результатам термомагнитного анализа (ТМА) I_s на большинстве пород данной коллекции фиксируется магнетит с $T_c = 580^\circ\text{C}$ (рис. 3а), либо вовсе не обнаруживается ферримagnetик (парамагнитный тип кривой ТМА – рис. 3в). Почти безпримесный магнетит определен и в результате микронзондовых исследований. Только среди пород группы 3б отмечены случаи фаз с более низкими T_c (~330°C), что, возможно, свидетельствует о сохранности в этих породах магнитных минералов, близких к первичным (рис. 3с). В группе железистых кварцитов кривые ТМА имеют пик намагниченности перед T_c (рис. 3з), что свиде-

тельствует о большой магнитной жесткости материала (полей 20 кЭ явно недостаточно, чтобы намагнитить породу до насыщения).

ОБСУЖДЕНИЕ

Петрохимические диаграммы изученной коллекции образцов показывают, что в протогоеосинклинальных структурах ВКМ широко представлены преимущественно первичномагматические образования с варьирующими изменениями со-

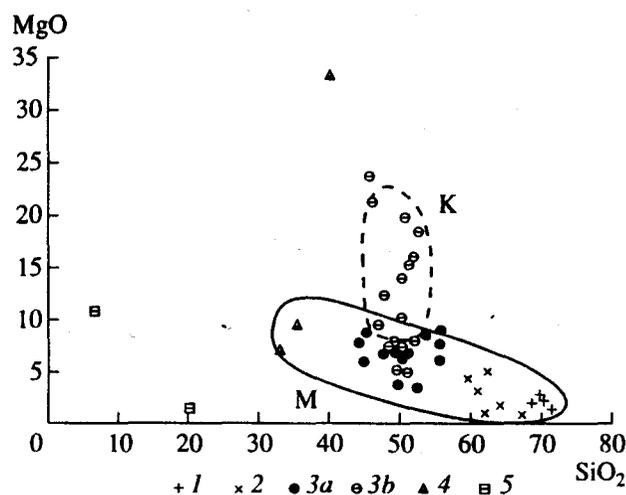


Рис. 4. Соотношение содержаний SiO_2 и MgO в образцах ВКМ. М – поле магматических дериватов, К – поле кумулятивных пород. 1 – кислые, практически немагнитные породы, 2 – магнитные породы среднего состава, 3а – магнитные породы и 3б – немагнитные породы основного состава, 4 – умеренномагнитные породы повышенной основности, 5 – сильномагнитные породы с низким содержанием SiO_2 (метаморфиты, в том числе железистые кварциты).

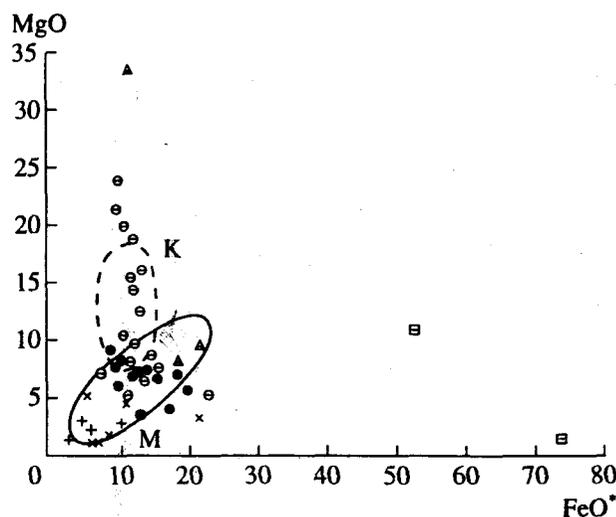


Рис. 5. Соотношение содержаний MgO и FeO^* в образцах ВКМ. Обозначение см. на рис. 4.

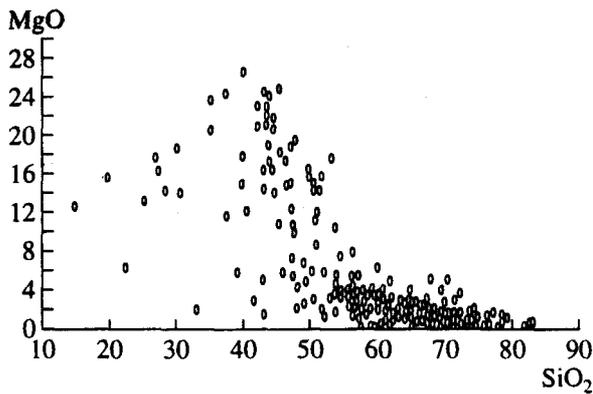


Рис. 6. Соотношение SiO_2 и MgO для пород ВКМ, по данным [5].

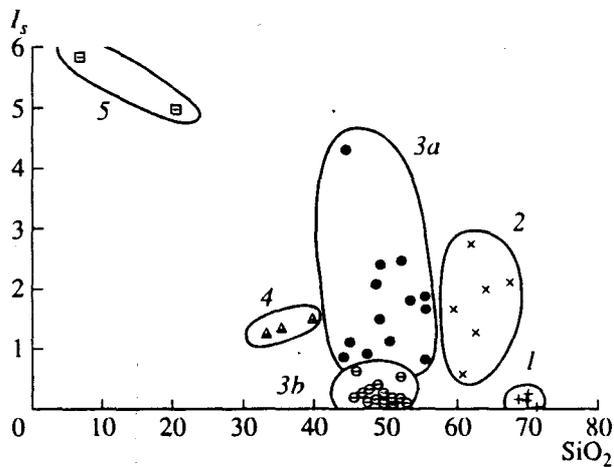


Рис. 7. Зависимость намагниченности насыщения I_s изученных образцов ВКМ от их основности. Обозначения см. на рис. 4.

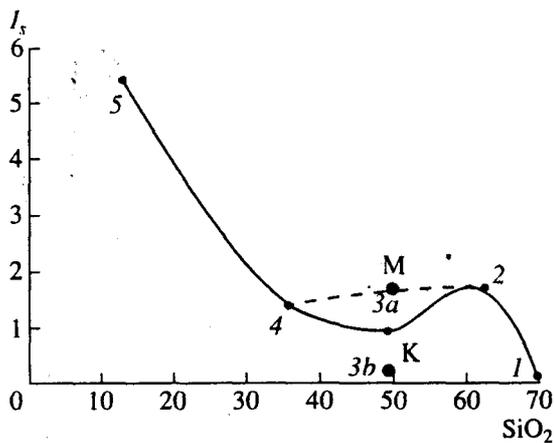


Рис. 8. Зависимость средних значений намагниченности насыщения I_s для выделенных групп образцов пород ВКМ от среднего содержания SiO_2 в каждой из пяти выделенных групп. Точки М и К представляют группы 3а и 3б соответственно. Остальные обозначения см. на рис. 4.

става при их постмагматических минеральных преобразованиях. Бинарные петрохимические диаграммы типа соотношений SiO_2 - MgO (рис. 4), MgO - FeO^* (рис. 5) указывают на принадлежность пород к кумулятивному и собственно магматическому дифференцированным трендам, подобным установленным для кайнозойских пород земной коры Исландии [4]. Представительность изученной выборки подтверждается сопоставлением с обширными данными по петрохимии и петрофизическим свойствам пород ВКМ, собранными в [5] и показанными на рис. 6. Для отдельных структур ВКМ и вулcano-плутонических ассоциаций основного состава ранее подчеркивалась ведущая роль кристаллизационного фракционирования в формировании различных магматических дериватов [7]. На рис. 7 представлена намагниченность насыщения изученных пород в зависимости от их основности, а на рис. 8 то же самое, но не для индивидуальных образцов, а усредненные характеристики для выделенных групп. Подобный вид зависимости (минимум в области SiO_2 порядка 50 мас. %) является типичным для ряда ранее изученных глубинных пород [8]. В буферных окислительно-восстановительных условиях, близких QFM, от температуры ликвидуса в относительно широком температурном интервале кристаллизуется безрудная ассоциация силикатных минералов. Поэтому кумулятивные типы пород являются немагнитными или слабомагнитными. Магматические дериваты (породы, отвечающие так называемому "магматическому тренду") обогащаются железом и при некотором нарастании потенциала кислорода начинается кристаллизация рудных фаз - ильменита и титаномагнетита, которые в конечном счете и обеспечивают присутствие в породах земной коры ферритмагнетиков [8]. Диаграммы, представленные на рис. 7, 8, ясно показывают, что высокомагнезиальные кумулятивные образования являются наименее магнитными в ряду изученных образцов. По-видимому, эта особенность распределения магнитных параметров пород ВКМ является общей закономерностью. Ранее на примере Ширяевской интрузии в мамонском комплексе и Смородинского массива (смородинский комплекс) было показано, что породы первой интрузии, богатые MgO , FeO , CaO и обедненные Fe_2O_3 , TiO_2 и щелочами, имеют почти на порядок более низкие магнитные характеристики, чем породы второго массива [9]. Можно допустить, что в основе этих различий лежит разная генетическая природа и геодинамика формирования пород сравниваемых комплексов.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что намагниченность изученных образцов определяется тем или иным количеством беспримесного (вторичного) магнетита. При этом его содержание отражает первичную - магматическую - стадию становления

пород. Наложённый метаморфизм приводит лишь к перекристаллизации минеральных фаз (и, возможно, к их уничтожению, как установлено для амфиболитизации габброидов ВКМ [10]). Вторичные ферромагнетики могут образовываться при наложенных процессах метасоматоза, в частности при гранитизации, особенно структурно-разуплотнённых пород, и при серпентинизации ультрабазитов [10]. Однако, судя по приведенным результатам настоящего исследования и литературным данным, основной вклад в образование ферромагнитных фаз внесли магматические процессы. Следует обратить внимание на то, что удивительная повторяемость закономерностей формирования и распределения магнитных и немагнитных пород среди образований различного возраста - от протерозойских до современных, по-видимому, может рассматриваться как довод в пользу однотипности магматических процессов и режимов кристаллизации магм на протяжении всего фанерозоя и позднего докембрия.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы приносят благодарность Д.М. Печерскому за постоянное внимание к работе и конструктивное ее обсуждение. Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 93-05-9426.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Надежка Л.И., Дубянский А.И., Тарков А.П., Афанасьев Н.С. Некоторые особенности глубинного строения Воронезского кристаллического массива // Литосфера Центральной и Восточной Европы. Восточно-Европейская платформа. Киев: Наукова думка. 1989. С. 121-135.

2. *Бочаров В.Л., Чернышев Н.М.* Эндогенные режимы раннего докембрия Воронежского кристаллического массива // Эндогенные режимы формирования земной коры и рудообразования в раннем докембрии. Л.: Наука. 1985. С. 192-205.
3. *Афанасьев Н.С.* Петрофизика и геологическое строение докембрия Воронежского кристаллического массива // Петрофизические исследования на щитах и платформах. Апатиты: АН СССР. 1985. С. 38-42.
4. *Лыков А.В., Шолто А.В., Геншафт Ю.С.* Петромагнитные исследования глубинных пород Исландии // Физика Земли. 1993. № 9. С. 53-66;
5. *Афанасьев Н.С.* Физические параметры, химические составы, минеральные парагенезисы горных пород докембрия Воронежского кристаллического массива. Воронеж. 1982. 248 с. (Деп. ВИНТИ, № 2870-82).
6. *Антонов Ю.В., Слюсарев С.В.* Изучение магнитных свойств железистых кварцитов при разведке железорудных месторождений // Геофизические исследования на Курской магнитной аномалии. Воронеж: Воронежский ун-т. 1981. С. 117-124.
7. *Чернышев Н.М., Багдасарова В.В., Бочаров В.Л.* Вулканно-плутоническая ассоциация основного состава раннего протерозоя КМА и общие черты ее металлогении // Вопросы геологии КМА. Воронеж: Воронежский ун-т. 1978. С. 3-14.
8. Петромагнитная модель литосферы / Колл. авторов. Киев: Ин-т геофизики АН Украины. 1994. 175с.
9. *Скрябина Н.И., Афанасьев Н.С.* К петрофизике габброидов камернодифференцированных интрузий КМА // Геофизические исследования на Курской магнитной аномалии. Воронеж: Воронежский ун-т. 1981. С.132-138.
10. *Афанасьев Н.С.* Корреляция физических параметров, минерального и химического состава в горных породах докембрия ВКМ // Вопросы геологии КМА. Воронеж: Воронежский ун-т. 1978. С. 50-56.