

Метабазиты неркаюского комплекса Приполярного Урала: петрофизика, петрография и петрохимия

©2022 Т. А. Пономарева[✉], Е. В. Кушманова

*Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,
Первомайская, 54, Сыктывкар, 167982, Республика Коми, Российская Федерация*

Аннотация

Введение: Неркаюский эклогит-сланцевый комплекс расположен в северной части Приполярного Урала и представлен разнообразными по составу метаморфизованными породами. Ранее в геофизических исследованиях было отмечено, что на фоне отрицательных геофизических полей над комплексом, северо-восточная его часть отличается локальным повышением магнитного и гравитационного полей [1, 2]. Для выяснения причин роста интенсивности локальных аномалий (ΔT)а и Δg , актуальными стали постановка и проведение детальных петрофизических исследований метабазитов. Для обоснования степени влияния метаморфических и метасоматических процессов на магнитные и плотностные свойства пород дополнительно привлекались петрографические и петрохимические данные.

Методика исследований: Изучение физических свойств (плотности и магнитной восприимчивости) метабазитов проводилось инструментально в лабораторных условиях. Магнитная восприимчивость пород в порошковом виде измерялась на приборе KAPPABRIGE KLY-2. Плотность определялась методом гидростатического взвешивания с помощью лабораторных весов Меттлер Толодо на цельных образцах пород. Измеренные данные обрабатывались методом математической статистики [3]. Петрографическое описание пород проводилось в поляризованных шлифах на поляризационном микроскопе Полам-215. Рудные минералы изучались на сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA3 LMN.

Результаты и обсуждение: Измерение физических свойств (главным образом магнитной восприимчивости и плотности) у метабазитов неркаюского комплекса позволило выявить определенные закономерности между минеральным составом пород, степенью метаморфического и метасоматического преобразования пород и петрофизическими свойствами. Так, несмотря на определенную схожесть в петрофизических характеристиках амфиболитов и эклогитоподобных пород, наиболее дробная дифференциация метабазитов проявилась в магнитных свойствах. Из сравнения магнитных свойств среди метабазитов наиболее магнитными являются диафторированные и метасоматически измененные (окварцованные, альбитизированные, хлоритизированные и карбонатизированные) амфиболиты. Наблюдается зависимость магнитной восприимчивости амфиболитов от содержания в них ильменита, магнетита и титаномагнетита. Высокомагнитные амфиболиты являются маркерами развития мест благороднометалльного оруденения. Изменения в магнитных свойствах эклогитоподобных пород, в частности их повышение, также связано с вторичными изменениями, точнее с эпидотизацией.

Выводы: Результаты комплексного изучения метабазитов неркаюского комплекса показали отчет-



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Пономарева Татьяна Анатольевна, e-mail: taponomareva@inbox.ru

ливую схожесть в характере распределения физических свойств пород и различие в причинах их изменчивости. Статистический анализ петрофизических характеристик совместно с петрографическим описанием выявил довольно дробную дифференциацию метабазитов по магнитным характеристикам. Выявленная повышенная намагниченность и плотность отобразилась в положительных аномалиях магнитного поля и гравитационного полей [2] над участками выхода метабазитов на поверхность. В свою очередь, комплексная интерпретация (ΔT)_a и $\Delta g_{\text{д}}$ способствовали разделению неркаюского комплекса на две части: северо-восточную – положительных аномалий и юго-западную – отрицательных.

Ключевые слова: Приполярный Урал, неркаюский комплекс, амфиболит, эклогитоподобная порода, физические свойства, плотность, восприимчивость.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (рег. номер 1021062211107-6-1.5.6; FUUU-2022-0085).

Для цитирования: Пономарева Т. А., Кушманова Е.В. Метабазиты неркаюского комплекса Приполярного Урала: петрофизика, петрография и петрохимия // // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2022. № 4. С. 83–93. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/4/83-93>

Введение

На севере Урала известно два эклогитосодержащих комплекса [4]: неркаюский эклогит-сланцевый (Приполярный Урал) и марункеуский эклогит-гнейсовый (Полярный Урал).

Неркаюский эклогит-сланцевый комплекс расположен в северной части Приполярного Урала (рис. 1) и представлен разнообразными по составу метаморфизованными породами: слюдяными, хлоритовыми, амфиболовыми и глаукофановыми сланцами, амфиболитами и эклогитоподобными породами [5–8]. Ис-

следуемый комплекс, заключенный между двумя глубинными разломами (надвигами): Эрепшорским на западе и Главным Уральским – на востоке, вытянут с юга-запада на север-восток по правобережью р. Хулги от ее крупного притока – р. Хальмерью до р. Бол. Тыкоглова на 80 км. Породы неркаюского комплекса граничат на западе с рифейскими вулканогенно-осадочными отложениями кергешорского комплекса, а на юго-востоке – с палеозойскими габбро и гипербазитами Олыся-Мусюрского массива.

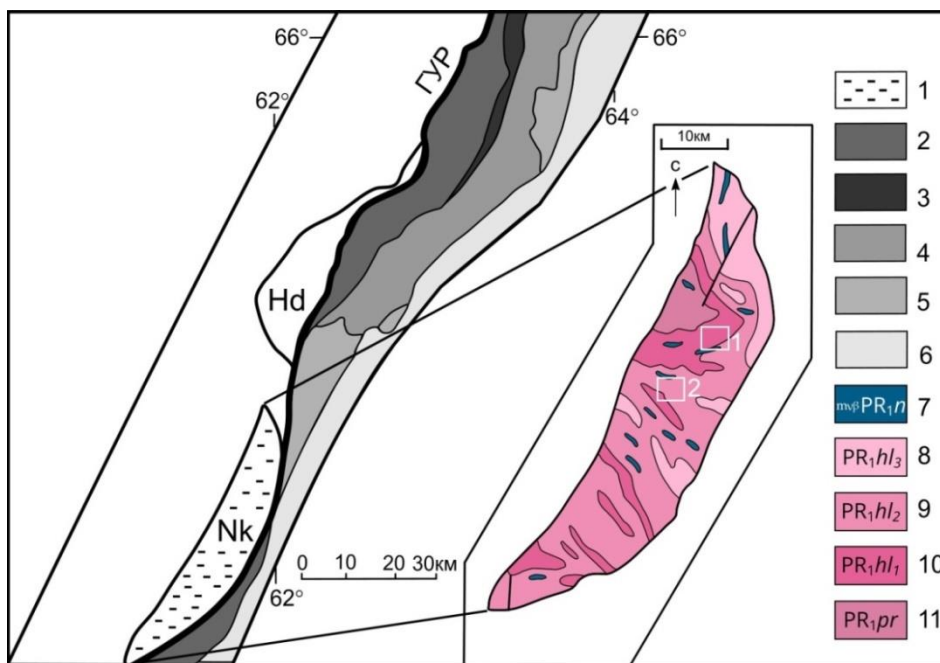


Рис.1. Схема расположения и геологическое строение метаморфического неркаюского комплекса Приполярного Урала [4]. Условные обозначения: 1 – неркаюский метаморфический комплекс; 2 – ультраосновные породы райизко-войкарского комплекса (O–S₁); 3 – базиты кершорского и лагортинского комплексов (O₃–S₁); 4 – гранитоиды собского и конгорского комплексов (S₂–D); 5 – вулканогенно-осадочные образования (O–D); 6 – мезозойско-кайнозойский чехол Западно-Сибирской плиты; 7 – неркаюский комплекс метагабродный: дайки амфиболитов, эклогитов; Неркаюская серия: 8 – хальмерьинская свита, верхняя подсвита: кристаллические сланцы, амфиболиты, эклогиты, гнейсы; 9 – хальмерьинская свита, средняя подсвита: сланцы гранат-хлорит-мусковитовые; 10 – хальмерьинская свита, нижняя подсвита: сланцы гранат-хлорит-мусковитовые часто лейкократовые; 11 – парусшорская свита – амфиболитовые аповулканогенные сланцы, кварциты, диафторированные сланцы, эклогиты, гранатсодержащие породы. Белыми квадратами обозначены участки полевых работ.

[Fig. 1. Layout and geological structure of the Nerkeyu metamorphic complex of the Nether-Polar Urals [4]. Legend: (1) – Nerkeyu metamorphic complex; (2) – ultrabasic rocks of the Rayiz-Voikarsky (O–S₁); (3) – basites of the Kershor and Lagorta complexes (O₃–S₁); (4) – granitoids of the Sobsky and Kongor complexes (S₂–D); (5) – volcanic-sedimentary formations (O–D); (6) – Mesozoic-Cenozoic cover of the West Siberian plate; (7) – Nerkeyu metagabbro complex: amphibolites and eclogite dykes; Nerkeyu group; (8) – Khalmerinskaya formation, upper sub-formation: crystalline schists, amphibolites, eclogites, gneisses; (9) – Khalmerinskaya formation, middle sub-formation: garnet-chlorite-muscovite schists; (10) – Khalmerinskaya formation, lower sub-formation: garnet-chlorite-muscovite schists, often leucocratic; (11) – Parus'shorskaya formation: amphibolite apovolcanic schists, quartzites, diafluorinated schists, eclogites, garnet-bearing rocks. Field work areas are indicated with white squares.]

На происхождение пород неркаюского комплекса существуют несколько мнений, а точнее на образование той части глубоко метаморфизованных пород (амфиболиты и эклогиты), которые наблюдаются в обнажениях северной части комплекса. Некоторые специалисты считают, что породы комплекса сформировались в допалеозойское время в амфиболитовую фацию метаморфизма и затем были преобразованы наложенными процессами: эклогитизацией, глаукофанизацией и диафорезом [9]. Ряд автор склоняются к позднепалеозойскому времени эклогитизации пород [7]. Согласно другому мнению, высокобарический метаморфизм проявился в палеопротерозое, а низкотемпературные изменения породы испытали в процессе полидиафореза в палеозойское время [6].

Наше внимание больше сконцентрировано на петрофизических исследованиях пород неркаюского комплекса в тесной увязке с петрографическими и петрохимическими данными. Анализ и выяснения причин изменчивости физических параметров, корреляционные связи между ними, существенно облегчают проведение комплексной интерпретации геофизических полей и являются, в свою очередь, важной частью региональных геолого-геофизических исследований, решающих задачи глубинного строения севера Урала [10]. Ранее нами по геофизическим данным установлено, что неркаюский комплекс делится на две части: северо-восточную – более “основную”, и юго-западную – “сланцевую”. Для подтверждения выявленной закономерности стало целесообразным провести детальное петрофизические исследования метабазитов северной части неркаюского комплекса с учетом их вещественного состава, петрографических и петрохимических особенностей.

Методы исследований

Исходным материалом для исследований послужили образцы пород с северной части неркаюского комплекса, точнее с двух его участков: первый расположен на правом берегу р. Неркаю, а второй – в междуречье рр. Большая Хосая и Большая Нядокота (рис. 1).

Изучение физических свойств начиналось с составления каталога данных о вещественном составе и петрографическом описании пород, которое проводилось в поляризованных шлифах на поляризационном микроскопе Полам-215. Рудные минералы изучались на сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA3 LMN с энергодисперсионной приставкой X-Max 50 mm Oxford Instruments при ускоряющем напряжении 20 кВ, диаметре зонда 180 нм и области возбуждения до 5 мкм (ЦКП “Геонаука” Институт геологии КНЦ

УрО РАН, Сыктывкар, аналитик Шуйский А. С.).

Петрофизические методы исследования заключались в инструментальных измерениях физических параметров пород и интерпретации полученных данных. Измерения плотности и магнитной восприимчивости пород проводились в лабораторных условиях Института геологии им. академика Н.П. Юшкина. Плотность определялась методом гидростатического взвешивания с помощью лабораторных весов Меттлер Толодо на цельных образцах пород. Перед измерениями каждый образец предварительно высушивался в сушильном шкафу не менее 8–10 часов при 105–110° С, затем взвешивался в воздухе и в воде. Магнитная восприимчивость пород в порошковом виде измерялась на приборе KAPPABRIGE KLY-2 с точностью измерения 0,2–1%. Одни и те же образцы пород и их протоочковые пробы измерялись трижды. Средние значения плотности и магнитной восприимчивости обрабатывались методами математической статистики [3], в результате чего были построены вариационные кривые, гистограммы, рассчитаны среднеарифметические значения, среднеквадратичные отклонения (дисперсия), коэффициент корреляции (R), асимметрия и др.

Для анализа петрохимических данных использовались химические силикатные анализы пород (табл. 1), по данным которых построены различные диаграммы и графики [11], что позволило уточнить и проверить данные исследуемой выборки пород на их статистическую однородность. В конечном результате, из 96 образцов в комплексных исследованиях участвовали только 55. Химический состав пород получен методом мокрой химии и комплексного метода мокрой химии и рентгенофлуоресцентного анализа.

Обсуждение полученных результатов

Неркаюский комплекс представлен метаморфическими породами различного состава: гранат-глаукофановыми, эпидот-глаукофановыми, актинолит-хлорит-эпидотовыми и хлорит-мусковит-альбит-кварцевыми сланцы, амфиболитами и эклогитоподобными породами (ЭПП). Эклогитоподобными породами предложено называть амфиболиты, содержащие пироксен (омфациит) [12]. Амфиболиты и ЭПП составляют менее 20 % комплекса и наблюдаются только в северной и средней частях комплекса [4].

Амфиболиты имеет массивную, иногда очковую текстуру, порфиробластовую и нематогранобластовую структуру. Порода состоит в основном (в об. %) из амфибола (30–45), граната (15–30), плагиоклаза (10–50). Второстепенными минералами являются пироксен (0–3), эпидот (0–30), мусковит (0–3), хлорит (0–1), карбо-

Табл. 1. Содержание оксидов в метабазитах Неркаюского комплекса, мас. %
[Table 1. The content of oxides in the metabasites of the Nerkeyu complex, wt. %]

n/n [no.]	№ образцов [sample no.]	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	Сумма [sum]	Fe ₂ O ₃ общ. [total]
1	нк-11	48.18	2.81	13.07	4.67	12.26	0.29	4.69	9.33	2.82	0.18	0.29	99.94	18.28
2	нк-11-1	48.3	1.83	13.65	3.84	9.6	0.2	6.53	9.77	3.73	0.72	0.18	99.77	14.5
3	нк-12	48.08	2.66	14.1	2.89	12.56	0.27	5.28	9.65	2.26	0.34	0.23	99.68	16.81
4	нк-124-2	44.44	3.54	14.32	4.84	10.62	0.19	6.13	9.88	3.46	0.24	0.27	99.39	16.63
5	н-28	54.44	3.68	13.8	7.57	10.18	0.18	5.09	8.65	3.48	0.25	0.25	100	18.87
6	н-207	49.22	1.8	12.58	3.59	12.06	0.24	5.66	8.78	2.7	0.11	0.34	99.19	17
7	н-145-1	47.2	2.89	12.92	5.25	11.12	0.24	5.25	8.58	2.4	0.21	0.28	98.9	17.59
8	н-138-1	49.51	3.66	13.15	4.07	11.95	0.27	4.43	7.35	3.87	0.14	0.28	100	17.34
9	н-145-3	49.24	2.05	12.94	4.21	12.18	0.25	5.51	8.78	2.41	0.35	0.34	99.7	17.73
10	н-146-3	48.07	2.89	12.74	13.25	5.63	0.26	5.17	8.47	2.58	0.19	0.29	100	19.15
11	н-120	46.32	2.42	15.53	5.49	8.64	0.25	5.62	10.1	3.1	0.4	0.25	99.7	15.08
12	н-151-2	49.78	1.6	13.06	3.19	12.04	0.24	5.06	8.8	3.35	0.19	0.23	99.01	16.55
13	н-223	47.74	3.28	12.73	4.67	12.27	0.25	5.43	8.58	2.22	0.23	0.27	99.12	18.29
14	н-60	49.52	1.39	14.01	2.74	11.09	0.22	6.28	8.91	3.85	0.18	0.15	100.05	15.08
15	н-105-2	46.98	2.16	14.42	1.68	11.74	0.2	6.85	12.04	2.5	0.22	0.05	100.13	14.71
16	нк-18-1	47.62	1.17	14.63	3.84	8.65	0.23	8.06	9.93	2.28	0.15	0.11	99.67	13.44
17	нк-26	47.84	1.83	13.43	5.2	9.55	0.26	6.7	10.4	2.57	0.16	0.14	99.43	15.8
18	нк-101	47.08	2.03	13.27	7.95	10.19	0.33	5.59	5.79	4.16	0.19	0.2	99.37	19.26
19	нк-108	46.02	1.55	13.33	6.82	8.5	0.27	6.55	9.97	2.73	0.16	0.12	99.91	16.25
20	нк-110	48.84	0.75	16.91	3.57	6.51	0.15	7.12	9.6	2.98	0.32	0.28	100	10.8
21	нк-113	49.98	1.01	15.14	3.15	10.22	0.19	5.63	8.7	2.32	0.83	0.31	100	14.49
22	нк-114	52.68	1	13.46	2.7	9.78	0.16	5.28	10.34	2.46	0.47	0.37	100	13.55
23	нк-115	50.71	1.56	13.26	2.68	11.12	0.18	5.48	10.42	2.15	0.18	0.33	100	15.02
24	нк-204	49.27	0.77	13.31	4.31	6.36	0.19	5.75	10.37	3.6	0.05	0.69	100	11.37
25	н-61	45.38	2.27	7.85	6.5	9.5	0.23	10.55	8.4	2.41	0.17	1.16	100	17.14
26	н-106-1	48.83	1.89	13.1	4.68	10.83	0.28	5.97	9.47	2.8	0.15	0.18	100	16.7
27	н-108-1	47.1	0.94	15.22	4.01	7.22	0.2	8.13	11.18	1.82	0.19	0.11	100	12.02
28	н-108-5	49.64	1.6	14	4.61	9.9	0.21	5.97	7.34	3.17	0.59	0.22	99.36	15.05
29	н-124-1	49.96	1.69	13.1	6.65	9.23	0.31	5.41	8.33	2.31	0.1	0.24	100	16.9
30	н-161-1	49.22	2.02	13.82	6.36	10.04	0.23	5.07	7.44	3.25	0.12	0.34	100.42	17.5
31	н-214	49.21	2.39	13.26	6.33	11.5	0.31	4.81	7.35	2.29	0.12	0.25	100	19.09

Примечание: 1–15 – эцлогитоподобные породы; 16–31 – амфиболиты.

[Note: (1–15) – eclogite-like rocks; (16–31) – amphibolites].

нат (0–1) и кварц (2–30 %). Акцессорные минералы представлены рутилом, титанитом, апатитом и цирконом, рудные минералы – ильменитом, пиритом, халькопиритом, золотом, магнетитом и титаномагнетитом.

По степени проявления в амфиболитах диафтореза и метасоматоза, а также по содержаниям тех или иных рудных и акцессорных минералов можно выделить две группы амфиболитов: не измененные и метасоматически измененные.

Амфиболиты первой группы (нк-114, нк-26) с содержаниями Na₂O около 2.5 % и Fe₂O₃ – 2.7–5.2 % имеют массивную текстуру. Они состоят в основном из амфибола, альбита и граната. Минералы равномерно распределены по породе. Ферромагнетики представлены ильменитом, содержание которого менее 1 %. Он практически полностью замещен рутилом, который в свою очередь замещается титанитом.

Ко второй группе пород (нк-101, н-128-3) отнесены сильно измененные окварцованные и перекристаллизованные амфиболиты и слабо измененные очковые амфиболиты с повышенным содержанием

Na₂O – до 4,2 % и Fe₂O₃ – до 8 % по сравнению с амфиболитами первой группы (рис. 2с, д).

Сильно измененные амфиболиты (н-128-2) состоят из крупных перекристаллизованных порфиробластов амфибола размером до 4 мм и мелких менее 0,1 мм зерен граната, локализующихся в порфиробластах амфибола и в отдельные прослои (рис. 2а, б). По породе развиваются крупные и мелкие зерна кварца как по отдельным прожилкам и линзовидным обособлениям, так и равномерно по породе. В качестве рудного минерала в метаморфите содержится ильменит (1–2 %) и магнетит (до 12 %).

Слабо измененные амфиболиты имеют порфиробластовые линзовидные выделения альбита размером до 1 см, имеющего пойкилитовые включения амфибола, граната, эпидота, пироксена, кварца, рудных и акцессорных минералов. В некоторых разновидностях пород наблюдается повышенное содержание эпидота до 20 %, который распределен по породе, а также вместе с ильменитом и альбитом локализуется в отдельные прослои (прожилки). Ферромаг-

нитные минералы здесь представлены ильменитом (2–5%), магнетитом (1–8 %) и титаномагнетитом (1–5%). Ильменит равномерно распределен по породе и в разной степени замещается рутилом. Магнетит и титаномагнетит ассоциируются с альбитом. Мелкие зерна (до 0,1 мм) минералов локализованы в общей массе породы и концентрируются на границе порфи-робластового альбита. Более крупные (0,1–0,4 мм)

зерна содержатся в виде включений в альбите, а также развиваются совместно с ним по прожилкам. В породе (нк-101), где наблюдается развитие хлорита и карбоната, количество магнетита и титаномагнетита увеличивается до 6–8 %. Важно отметить, что в трещинах некоторых минералов формируется высокопробное и среднепробное золото ($Au_{0,75-0,87}Ag_{0,13-0,25}$).

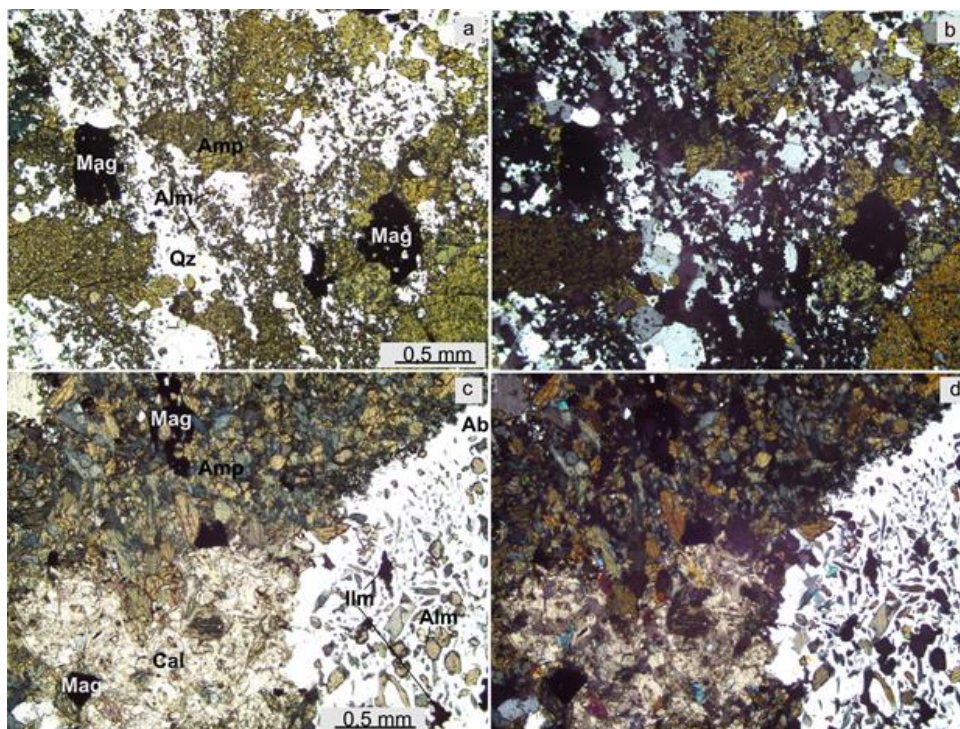


Рис. 2. Окварцованный высокомагнитный амфиболит н-128-2 (a, b) и альбитизированный, карбонатизированный магнитный амфиболит нк-101 (c, d): a, c – без анализатора, b, d – с анализатором. Amp – амфибол, Qz – кварц, Alm – альмандин, Ab – альбит, Cal – карбонат, Mag – магнетит, Ilm – ильменит.
[Fig. 2. Quartz bearing highly magnetic amphibolite n-128-2 (a, b) and albitised, carbonated magnetic amphibolite nk-101 (c, d): (a, c) – without analyser, (b, d) – with analyser. (Amp) – amphibole, (Qz) – quartz, (Alm) – almandine, (Ab) – albite, (Cal) – carbonate, (Mag) – magnetite, (Ilm) ilmenite.]

Эклогитоподобные породы имеют массивную текстуру и нематогранобластовую структуру. Порода состоит из пироксена (20–35 %), граната (25–30 %), амфибола (5–20 %) и кварца (5–10 %). В качестве второстепенных минералов встречаются альбит, эпидот и мусковит. Акцессорные минералы представлены рутилом, апатитом и цирконом. Рудными минералами являются пирит, халькопирит, магнетит и титаномагнетит. По содержанию тех или иных породообразующих минералов можно выделить кварц-гранат-амфибол-омфацитовые породы (н-146-3) с повышенным содержанием пироксена и кварц-альбит-пироксен-гранат-эпидот-амфиболовые разновидности (н-120), где клинопироксен имеет подчиненное количество. Содержание эпидота в последней иногда достигает 30 %. В обоих типах пород ферромагнетитики представлены ильменитом (3–4 %), замещающегося в различной степени рутилом. Содержание магнетита и титаномагнетита менее 1 %.

Магнитные свойства амфиболитов (n=39) меня-

ются в широких пределах от 16.85 до 1176×10^{-8} СИ и характеризуются мультимодальным распределением удельной магнитной восприимчивости (рис. 3а), где выделяются три выраженных интервала: слабо магнитный (n=29) – $16.85-74.75 \times 10^{-8}$ СИ при $\chi_{cp} 38 \times 10^{-8}$ СИ; средне магнитный (n=6) – $123.5-273.5 \times 10^{-8}$ СИ при $\chi_{cp} 196,72 \times 10^{-8}$ СИ и магнитный (n=5) – $687.39-1584 \times 10^{-8}$ СИ при $\chi_{cp} 968.41 \times 10^{-8}$ СИ. Слабо магнитными свойствами характеризуются не измененные амфиболиты с низким содержанием ильменита. Средне магнитные свойства имеют альбитизированные амфиболиты с содержанием ильменита 2–3 %, магнетита 1–3 % и титаномагнетита (1–3 %). Магнитными являются альбитизированные амфиболиты с повышенным содержанием ильменита (3–5 %), магнетита (4–8 %) и титаномагнетита (3–5 %). Самое высокое значение магнитной восприимчивости (1584.74×10^{-8} СИ) имеет окварцованный амфиболит (н-128-2) с высоким содержанием магнетита (12 %).

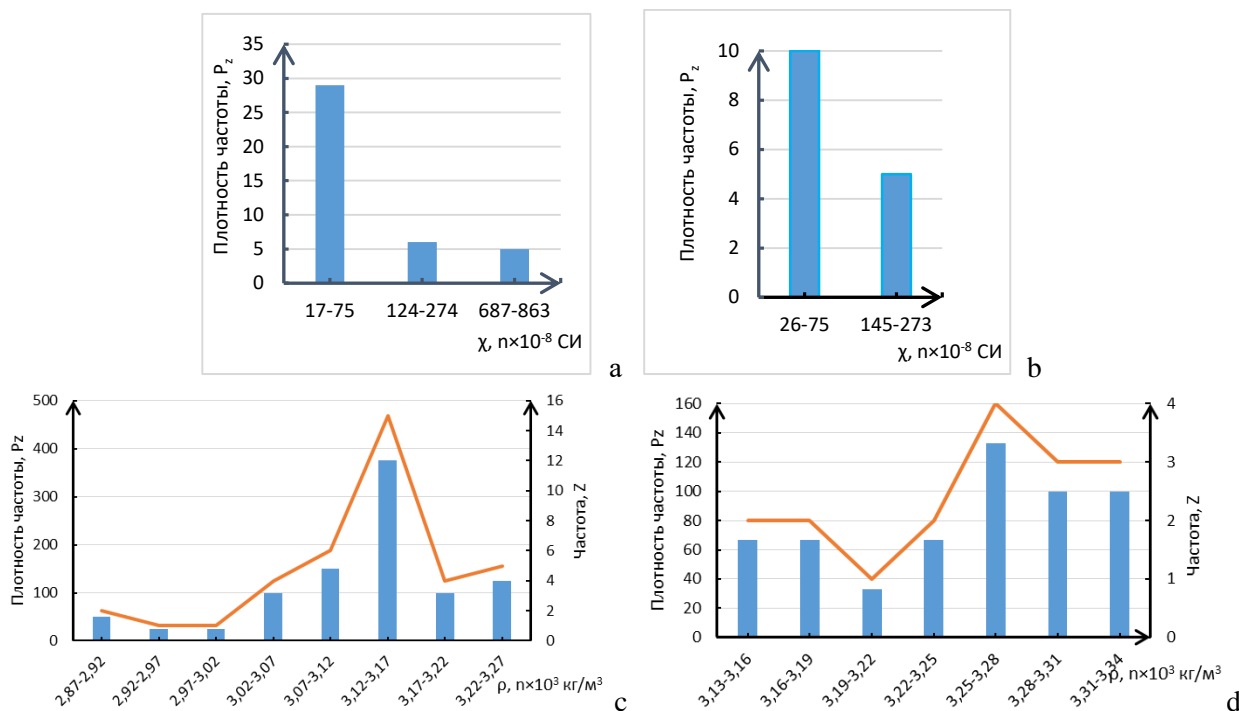


Рис. 3. Гистограммы и полигоны распределения частот удельной магнитной восприимчивости (*a* – амфиболитов, *b* – ЭПП) и плотности (*c* – амфиболитов, *d* – ЭПП).

[**Fig. 3.** Histograms and polygons of frequency distribution of specific magnetic susceptibility ((*a*) – of amphibolites, (*b*) – of eclogite-like rocks) and density (*c*) – of amphibolites, (*d*) – of eclogite-like rocks.]

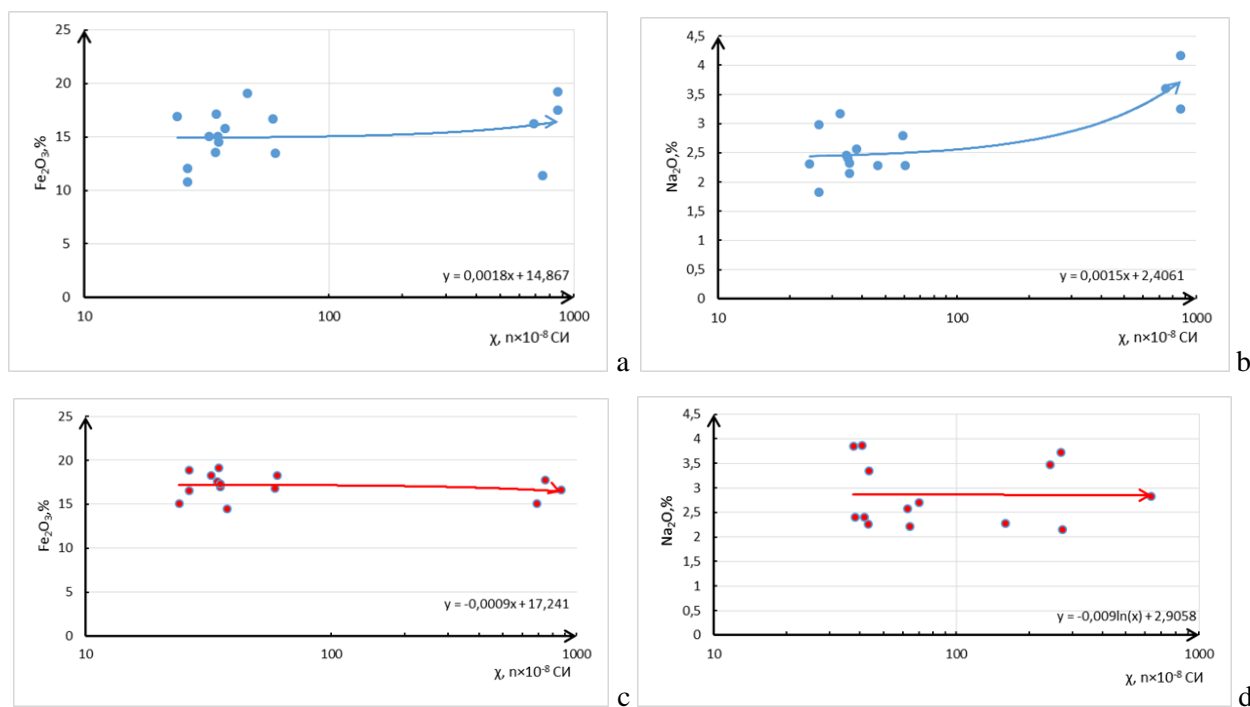


Рис. 4 Вариационные диаграммы Харкера: соотношения $\chi_{\text{уд}}$ и $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ у амфиболитов (*a*) и ЭПП (*b*); соотношения $\chi_{\text{уд}}$ и Na_2O у амфиболитов (*c*) и ЭПП (*d*).

[**Fig. 4.** Harker variation diagrams: χ_{sp} and $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ ratios in amphibolites (*a*) and eclogite-like rocks (*b*); χ_{sp} and Na_2O ratios in amphibolites (*c*) and eclogite-like rocks (*d*).]

На диаграмме зависимости магнитной восприимчивости от Fe_2O_3 и Na_2O у слабо магнитных амфиболитов корреляция между ними не наблюдается

(Рис. 4а, б; таблица 2), а у магнитных амфиболитов намечается положительная корреляция между этими параметрами ($R=0.24$ и $R=0.75$, соответственно).

Табл. 2. Содержания оксидов железа (мас. %) и физические параметры амфиболитов и эклогитоподобных пород Неркаюского комплекса
[Table 2. Content of iron oxides (wt. %) and physical parameters of amphibolites and eclogite-like rocks of the Nerkaю complex]

№ [#]	№ пробы [sample no.]	Fe ₂ O ₃ общ. [total]	Fe ₂ O ₃	FeO	Na ₂ O	P, n×10 ³ кг/м ³ [kg/m ³]	X, n×10 ⁻⁸ [SI]
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	H-11	18.28	4.67	12.26	2.82	3.327	635.4
2	HK-11-1	14.5	3.84	9.6	3.73	3.247	269.07
3	HK-12	16.81	2.87	12.56	2.26	3.271	43.42
4	H-124-2	16.63	4.48	10.62	3.46	3.332	158.83
5	H-28	18.87	7.57	10.18	3.48	3.256	243.39
6	H-207	17.0	3.59	12.08	2.7	3.308	70.02
7	H-145-1	17.59	5.25	11.12	2.4	3.308	41.81
8	H-138-1	17.34	4.08	11.95	3.87	3.259	40.98
9	H-145-3	17.73	4.2	12.18	2.41	3.234	38.18
10	H-146-3	19.15	13.25	5.63	2.58	3.320	63.04
11	H-120	15.08	5.49	8.64	3.1	3.175	273.39
12	H-151-2	16.55	3.19	12.04	3.35	3.133	43.54
13	H-223	18.29	4.67	12.27	2.22	3.268	64.08
14	H-60	15.08	2.77	11.09	3.85	3.140	37.64
15	H-105-2	14.71	1.68	11.74	2.5	3.289	26.38
16	HK-18-1	13.44	3.84	8.65	2.28	3.21	60.52
17	HK-26	15.8	5.2	9.55	2.57	3.155	37.82
18	HK-101	19.26	7.95	10.19	4.16	3.09	863.02
19	HK-108	16.25	6.82	8.50	2.73	3.126	687.39
20	HK-110	10.8	3.57	6.51	2.98	3.085	26.46
21	HK-113	14.49	3.15	10.22	2.32	3.055	35.51
22	HK-114	13.55	2.69	9.78	2.46	3.220	34.45
23	HK-115	15.02	2.68	11.12	2.15	3.174	35.31
24	HK-204	11.37	4.31	6.36	3.6	2.94	743.50
25	H-61	17.14	6.5	9.50	2.41	3.14	34.82
26	H-106-1	16.7	4.68	10.83	2.8	3.244	59.04
27	H-108-1	12.02	4.0	7.22	1.82	3.01	26.40
28	H-108-5	15.05	4.61	9.90	3.17	3.178	32.38
29	H-124-1	16.90	6.66	9.23	2.31	3.174	24.09
30	H-161-1	17.5	6.36	10.04	3.25	3.121	862.83
31	H-214-1	19.09	6.33	11.5	2.29	3.08	46.55

Примечание: I – 1–15 – эклогитоподобные породы; 16–31 – амфиболиты. II–VII – данные главных оксидов взяты из силикатных анализов ЭПП и амфиболитов; VII–VIII – инструментальные данные.

[Note: I – (1-15) eclogite-like rocks; (16-31) amphibolites. (II-VII) basic oxide data were taken from silicate analyses of eclogite-like rocks and amphibolites; (VII-VIII) instrumental data.]

Намагниченность эклогитоподобных пород изменяется в меньших пределах $26.38-273.39 \times 10^{-8}$ СИ по сравнению с амфиболитами и имеет бимодальное распределение, в котором выделяются две моды: слабомагнитная (n=10) – $26.38-74.75 \times 10^{-8}$ СИ при $\chi_{\text{ср}}$ 49.96×10^{-8} СИ и средне магнитная (n=5) – $144.56-273.39 \times 10^{-8}$ СИ при $\chi_{\text{ср}}$ 217.85×10^{-8} СИ (рис. 3b). Слабо магнитные характеристики имеют кварц-гранат-амфибол-омфацитовые породы. Средняя намагниченность зафиксирована по пироксен-гранат-эпидот-амфиболовым образованиям с повышенным количеством эпидота.

Четкой корреляции между химическим составом и магнитной восприимчивостью у ЭПП не наблюдается (R=-0.2 и R=0.03, соответственно), средне магнитные породы имеют повышенные значения Fe₂O₃ и Na₂O по

сравнению со слабомагнитными разновидностями (Рис. 4с, d; табл. 2).

Амфиболиты также имеют достаточно широкий диапазон вариаций значений плотности от 2.87 до 3.27×10^3 кг/м³. Среднее значение плотности ($\rho_{\text{ср}}$) у амфиболитов соответствует 3.13×10^3 кг/м³. На гистограмме частот выделен главный плотностной интервал $3.12-3.17 \times 10^3$ кг/м³, в который попадает наибольшее количество образцов (n=15). Полигон распределения указывает на умеренную асимметрию правого типа. Сжатый и заостренный максимум над центральной частью, коэффициент вариаций W=3.2 % и незначительное отклонение $\sigma_{K_n}=0,1$ предполагает, что при численном увеличении выборки средние значения плотности амфиболитов будут попадать в пределы выделенного выше интервала.

Эклогитоподобные породы характеризуются большим разбросом значений плотности от 3.13 до 3.34×10^3 кг/м³, при $\rho_{\text{ср}} 3.26 \times 10^3$ кг/м³. На гистограмме видно, что эклогитоподобные породы характеризуются большими значениями плотности со смещением максимума на интервал $3.25\text{--}3.28 \times 10^3$ кг/м³. Умеренная правая асимметрия распределения, коэффициент вариаций $W=1.9\%$ и незначительное отклонение $\sigma_{\text{Кн}}=0.06$ предполагают вероятность попадания в выделенные пределы плотностного максимума большего количества образцов при увеличении доли выборки.

Совместный анализ петрофизических характеристик и петрографического описания метабазитов

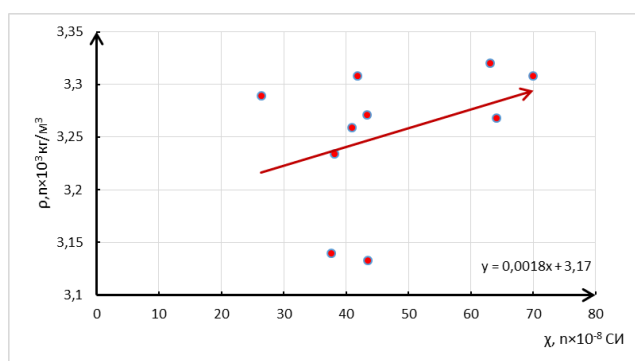
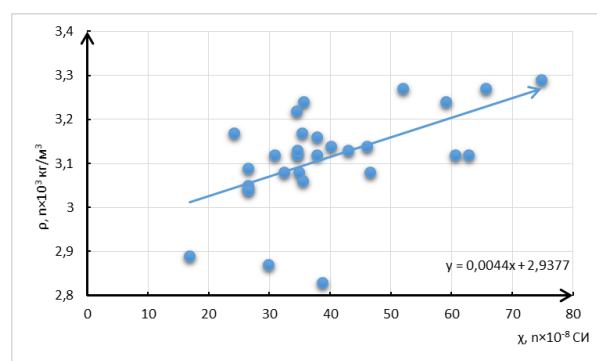


Рис. 5. Зависимость плотности (ρ , $n \times 10^3$ кг/м³) и удельной магнитной восприимчивости (χ , $n \times 10^{-8}$ СИ) метабазитов: *a* – амфиболиты; *b* – эклогитоподобные породы.

[Fig. 5. Dependence of density (ρ , $n \times 10^3$ kg/m³) and specific magnetic susceptibility (χ , $n \times 10^{-8}$ SI) of metabasites: (a) – amphibolites; (b) – eclogite-like rocks.]

Ранее такая зависимость была выявлена по эклогитосодержащим комплексам (неркаюскому и марункеускому) севера Урала с учетом всех типов пород, слагающих данные комплексы [13].

Характер изменчивости магнитных и плотностных свойств метабазитов и выявленные взаимосвязи между магнитной восприимчивостью и другими петрофизическими характеристиками отражаются в морфологии аномального магнитного и гравитационного полей. В целом над неркаюским комплексом наблюдаются отрицательные магнитное и гравитационное поля. Повышение аномально магнитного поля (ΔT)_а в северной части неркаюского комплекса приурочено к местам локального выхода на поверхность сильно измененных амфиболитов. А в положительные аномалии, проявившиеся в локальных полях силы тяжести (Δg)_а в северо-восточной части комплекса, наибольший вклад внести не измененные амфиболиты и эклогитоподобные породы [2].

Заключение

Комплексные петрофизические, петрографические, петрохимические и геофизические исследования метабазитов неркаюского комплекса показали одновременно определенную схожесть в характере распределения физических свойств в амфиболитах и эклогитоподобных породах и различие в причинах их изменчивости.

одновременно отмечает определенную схожесть в характере распределения магнитной восприимчивости и плотности в амфиболитах и эклогитоподобных породах и различие в причинах изменчивости этих параметров.

В процессе изучения физических свойств обнаружено присутствие прямой связи между магнитной восприимчивостью и плотностью ($R=0.6$) в амфиболитах слабомагнитной группы (рис. 5а). В эклогитоподобных породах среди слабо магнитных и средне магнитных групп корреляционная связь между физическими свойствами ($K=0.2$) выражена очень слабо (рис. 5б).

Статистический анализ физических свойств совместно с петрографическим описанием выявил довольно дробную дифференциацию метабазитов по магнитным характеристикам. Увеличение магнитных свойств связано с повышением содержания ильменита, магнетита и титаномагнетита у диафорированных и метасоматически измененных (окварцованных, альбитизированных, хлоритизированных и карбонатизированных) амфиболитов. Установлено, что высокомагнитные амфиболиты являются маркерами развития пунктов благороднометалльного оруденения. Изменения в магнитных свойствах, в частности их повышение, в высокоплотных эклогитоподобных породах связаны с вторичными изменениями, точнее с эпидотизацией. Усиление намагниченности метабазитов локально проявилось в положительных аномалиях магнитного поля на севере неркаюского комплекса.

В свою очередь, полученные результаты служат важным доказательством ранее проведенного деления неркаюского комплекса по гравиметрическим данным на: северо-восточную область положительных аномалий и юго-западную – отрицательных.

Авторы благодарны за помощь при проведении лабораторных исследований Шуйскому А. С. и Уляшевой Н. В. за внимание и ценные консультации.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Ананьева Е.М., Горонович Е.Б., Черняк З.Б. и др. Методические рекомендации по интерпретации геофизических данных при крупномасштабном геологическом картировании. Свердловск: Уралгеология, 1993. 298 с.
2. Пономарева Т.А. Структурные особенности эклогитсодержащих комплексов севера Урала по гравимагнитным данным // *Вестник Пермского университета: Серия геологическая*. 2020. №1(19). С. 25–37. DOI: 10.17072/psu.geol.19.1.25.
3. Дементьев Л.Ф., Жданов М.А. Кирсанов А.Н. Применение математической статистики в нефте-газопромысловой геологии. М: Недра, 1977. 255 с.
4. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 000 000. Карта донеогеновых образований: Q-40,41 (Воркута). СПб.: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2001 г.
5. Вализер П.М., Ленных В.И. Амфиболы голубых сланцев Урала. М.: Наука, 1988. 203 с.
6. Пыстин А.М. Полиметаморфические комплексы западного склона Урала. СПб.: Наука, 1994. 208 с. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28375209> (дата обращения: 25.11.2022).
7. Ремизов Д.Н., Григорьев С.И., Григорьева Н.Г., Юдин В.В., Иванов В.Н., Феофилактов Ф.Н. Первичный состав и геодинамика неркаюского комплекса и лемвинско-аллохтонов Приполярного Урала // *Проблемы геологии и минералогии*. Сыктывкар: Геопринт, 2006. С. 128–142.
8. Пыстин А.М., Кушманова Е.В., Потапов И.Л., Панфилов А.В. Неркаюский метаморфический комплекс Приполярного Урала. // *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. № 11. 2014. С. 22–27.
9. Пучков В.Н., Карстен Л.А., Иванов К.С. Состав и тектоническое положение эклогит-глаукофансланцевых комплексов Приполярного Урала // *Доклады академии наук СССР*. 1983. Т. 271. № 3. С. 676–680.
10. Пономарева Т.А., Пыстин А.М., Кушманова Е.В. Глубинная характеристика неркаюского эклогит-сланцевого комплекса Приполярного Урала // *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2017. № 11. С. 9–14.
11. Практическая петрология: методические рекомендации по изучению магматических образований применительно к задачам госгеолкарт. СПб. Изд-во ВСЕГЕИ, 2017. 168 с.
12. Голубева И.И., Козлов В.В. Амфиболиты неркаюского комплекса // *Петрология и минералогия севера Урала и Тимана*. 2008. № 5. С. 63–76.
13. Пономарева Т.А., Пыстин А.М. Петрофизическая характеристика пород полиметаморфических комплексов севера Урала // *Известия Коми научного центра УрО РАН*. 2014. №2(18). С. 68–74.

Metabasites of the Nerkeyu complex in the Nether-Polar Urals: petrophysics, petrography and petrochemistry

©2022 T. A. Ponomareva[✉], E. V. Kushmanova

*Institute of Geology of Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy
of Sciences, 54 Pervomaiskaya ul., 167982, Syktyvkar, Russian Federation*

Abstract

Introduction: The Nerkeyu eclogite-shale complex is located in the northern part of the Nether-Polar Urals and is represented by metamorphosed rocks of various compositions. In earlier geophysical studies, it was noted that against the background of negative geophysical fields above the complex, its north-eastern part is characterised by a local increase in magnetic and gravitational fields [1, 2]. To understand the reasons for the increase in the intensity of local anomalies (ΔT)_a and Δg , it is important to conduct detailed petrophysical studies of metabasites. Petrographic and petrochemical data were also used to substantiate the degree of influence of metamorphic and metasomatic processes on the magnetic and density properties of the rocks.

Methodology: The study of the physical properties (density and magnetic susceptibility) of metabasites was carried out with the help of instruments in the laboratory conditions. The magnetic susceptibility of the rocks in the form of powders was measured by the KAPPABRIGE KLY-2 system. Density was determined by hydroscopic weighing of solid rock samples using Mettler Toledo laboratory scales. The measured data were processed by the method of mathematical statistics [3]. Petrographic descriptions of rocks were given for polarised thin sections using a Polam-215 polarised-light microscope. Ore minerals were studied using a Tescan VEGA3 LMH scanning electron microscope.

Results and discussion: Measurements of physical properties (mainly magnetic susceptibility and density) of metabasites of the Nerkeyu complex allowed identifying certain patterns between the mineral composition of rocks, the degree of their metamorphic and metasomatic transformations, and their petrophysical properties. For example, despite a certain similarity in the petrophysical characteristics of amphibolites and eclogite-like rocks, the most fractional differentiation of metabasites was revealed in their magnetic properties. The comparison of magnetic properties of metabasites showed that diaphthorised and metasomatically altered (quartz bearing, albitised, chloritised, and carbonatised) amphibolites are the most magnetic. There is also a dependence of magnetic susceptibility of amphibolites on the content of ilmenite, magnetite, and titanomagnetite in them. Highly magnetic amphibolites are markers of the development of sites of noble metal mineralisation. Changes in the magnetic properties of eclogite-like rocks, in particular their increase, are also associated with secondary changes, namely with epidotisation.

Conclusions: The results of a comprehensive study of the metabasites of the Nerkeyu complex showed a distinct similarity in the nature of the distribution of physical properties of the rocks and a difference in the reasons for their variability. Statistical analysis of petrophysical characteristics in combination with the petrographic description revealed a fairly fractional differentiation of metabasites by their magnetic characteristics. A pronounced increased magnetisation and density resulted in positive anomalies of the magnetic field and gravitational fields [2] over the areas of metabasites' exposure on the surface. In turn, a comprehensive interpretation of (ΔT)_a and Δg allowed dividing the Nerkeyu complex into two parts: north-east (with positive anomalies) and south-west (with negative anomalies).



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Tatiana Ponomareva, e-mail: taonomareva@inbox.ru

Keywords: Nether-Polar Urals, Nerkeyu complex, amphibolite, eclogite-like rock, physical properties, density, susceptibility.

Funding: The work was carried out within the framework of the state task of the IG FRC Komi SC UB RAS (reg. number 1021062211107-6-1.5.6; FUUU-2022-0085).

For citation: Ponomareva T. A., Kushmanova E.V. Metabasites of the Nerkeyu complex in the Nether-Polar Urals: petrophysics, petrography and petrochemistry *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 4, pp. 83–93. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/4/83–93>

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

REFERENCES

1. Ananeva E.M., Goronovich E.B., Chernyak Z.B. et al. *Metodicheskie rekomendatsii po interpretatsii geofizicheskikh dannykh pri krupnomasshtabnom geologicheskoy kartirovani* [Methodological recommendations for the interpretation of geophysical data in large-scale geological mapping]. Sverdlovsk, Uralgeologiya publ., 1983. 301 p. (In Russ.)
2. Ponomareva T.A. Strukturnye osobennosti jeklogit-soderzhashhih kompleksov severa Urala po gravimagnitnym dannym [Structural characteristics of Marunkeu eclogite-gneiss complex in the Polar Urals inferred from gravimagnetic data]. *Vestnik Permskogo universiteta, Seriya Geologiya = Bulletin of Perm University. Geology*. 2020, vol. 19, no. 1, pp. 25–37. DOI: 10.17072/psu.geol.19.1.25 (In Russ.)
3. Dement'ev L.F., Zhdanov M.A., Kirsanov A.N. *Primenenie matematicheskoy statistiki v neftegazopromyslovoj geologii* [Application of mathematical statistics in oil and gas geology]. Moscow. Nedra publ., 1977, 255 p. (In Russ.)
4. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoy Federacii. Masshtab 1:1 000 000. Karta doneogenovykh obrazovaniy: Q-40, 41 (Vorkuta) [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 000 000. Map of pre-Neogene formations: Q-40, 41 (Vorkuta). St. Petersburg: FGBU "VSEGEI", 2001. (In Russ.)
5. Valizer P.M., Lennykh V.I. *Amfiboly golubyykh slancev Urala* [Amphiboles of the blue schists of the Urals]. Moscow, Nauka publ., 1988. 203 p. (In Russ.)
6. Pystin A.M. *Polimetamorfnicheskie komplekсы zapadnogo sklona Urala* [Polymetamorphic complexes of the western slope of the Urals] Moscow. Nauka publ., 1994, 208 p. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28375209> (accessed 25.11.2022) (In Russ.)
7. Remizov D.N., Grigoryev S.I., Grigoryeva N.G., Yudin V.V., Ivanov V.N., Feofilaktov F.N. Pervichnyy sostav i geodinamika nerkajuskogo kompleksa i lemvinskono allohtonov Pripoljarnogo Urala [Primary composition and geodynamics of the Nerkeyu complex and Lemva allochthons of the Nether-Polar Urals]. *Problemy geologii i mineralogii = Problems of Geology and Mineralogy*. Syktyvkar: Geoprint, 2006, pp. 128–142. (In Russ.)
8. Pystin A.M., Kushmanova E. V., Potapov I. L., Panfilov A. V. Nerkajuskij metamorficheskij kompleks Pripoljarnogo Urala [The Nerkeyu metamorphic complex in the Polar Urals]. *Vestnik Instituta geologii Komi NC UrO RAN = Vestnik of Institute of Geology of Komi SC UB RAS*, 2014, no. 11, pp. 14–19. (In Russ.)
9. Puchkov V.N., Karsten L.A., Ivanov K.S. Sostav i tektonicheskoe polozhenie jeklogit-glaukofanslancevykh kompleksov Pripoljarnogo Urala [Composition and tectonic position of eclogite-glaucophane complexes of the Circumpolar Urals]. *Doklady academy of sciences USSR*, 1983, vol. 271, no. 3, pp. 676–680. (In Russ.)
10. Ponomareva T.A., Pystin A.M., Kushmanova E.V. Glubinnaya harakteristika nerkajuskogo jeklogit-slancevogo kompleksa Pripoljarnogo Urala [Deep characteristics of the Nerkeyu eclogite-schist complex of the Polar Urals]. *Vestnik Instituta geologii Komi NC UrO RAN = Vestnik of Institute of Geology of Komi SC UB RAS*, 2017, no. 11, pp. 9–14. (In Russ.)
11. *Prakticheskaya metrologiya: metodicheskie rekomendacii po izucheniju magmaticheskikh obrazovaniy primenitel'no k zadacham gosgeol'kart* [Practical petrology: methodological recommendations for the study of magmatic formations in relation to the tasks of geological mapping]. Saint Petersburg, VSEGEI publ., 2017. 168 p. (In Russ.)
12. Golubeva I.I., Kozlov V.V. Amfibolity nerkajuskogo kompleksa [Amphibolites of the Nerkeyu complex]. *Petrologiya i mineralogiya severa Urala i Timana: sbornik statey = Petrology and mineralogy in the North of the Urals and Timan: Collection of articles*, 2008, no. 5, pp. 63–76. (In Russ.)
13. Ponomareva T.A., Pystin A.M. Petrofizicheskaya harakteristika porod polimetamorfnicheskikh kompleksov severa Urala [Petrophysical characteristics of rocks of polymetamorphic complexes in the north of the Urals]. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN = Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences*, 2014, no. 18, pp. 68–74. (In Russ.)

Пonomareva Татьяна Анатольевна – к.г.-м.н, с.н.с.,
ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар,
e-mail: taponomareva@inbox.ru,
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6895-5450>

Кушманова Евгения Валерьевна – м.н.с., ФИЦ Коми НЦ
УрО РАН, Сыктывкар, e-mail: e.v.kushmanova@mail.ru,
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0300-9732>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант
рукописи.

Tatyana A. Ponomareva – PhD in Geology and Mineralogy,
senior research fellow, Institute of Geology of Komi Science
Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Syktyvkar, e-mail: taponomareva@inbox.ru,
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6895-5450>
Evgeniya V. Kushmanova – research fellow, Institute of Geology
of Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Acad-
emy of Sciences, Syktyvkar, e-mail: e.v.kushmanova@mail.ru,
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0300-9732>
Authors have read and approved the final manuscript.