

Петрофизическое группирование сланцевых пород неркаюского комплекса (Приполярный Урал)

Т. А. Пономарева, Е. В. Кушманова

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия
TAPonomareva@inbox.ru

Представлены результаты петрофизического группирования сланцевых пород неркаюского комплекса, проведенного с использованием петрофизических, петрографических и петрохимических данных. Впервые выделены четыре петрофизические группы кристаллических сланцев, отличающиеся вещественным составом, физическими параметрами и генезисом. По плотности выделены две петрогруппы. Первую петрогруппу, с пониженными плотностями, представляют сильно рассланцованные гранатосодержащие и гранатовые кварц-клинозоизит-амфибол-хлорит-мусковит-альбитовые сланцы, образовавшиеся по глинистым породам. Вторая петрогруппа пород, с повышенными плотностями, состоит из гнейсоподобных сланцев, протолитами которых были песчаники, а также апобазальтовые, преимущественно амфиболовые сланцы. По магнитным свойствам выделяются четыре петромагнитные группы: две немагнитные, зависящие от породообразующихся минералов, и две магнитные, обусловленные количеством магнетита, сформированного при вторичных (наложенных) процессах.

Ключевые слова: сланцы, состав, плотность, магнитная восприимчивость, неркаюский комплекс, Приполярный Урал

Petrophysical grouping of schist rocks of the Nerkeyu complex (the Nether-Polar Urals)

T. A. Ponomareva, E. V. Kushmanova

Institute of Geology Komi Scientific SC UB RAS, Syktyvkar, Russian

The article presents results of petrophysical grouping of schist rocks of the Nerkey complex using petrophysical, petrographic and mineralogical data. Among crystalline schists, four petrogroups differing by material composition, physical parameters and genesis are identified for the first time. Two petrogroups are distinguished by density. The first petrogroup with low densities is represented by highly foliated garnet-bearing and garnet quartz-clinozoisite-amphibole-chlorite-muscovite-albite schists formed over clayey rocks. The second petrogroup of rocks with increased densities consists of gneissose rocks, the protolith of which was sandstones, as well as apobasaltic predominantly amphibole schists.

According to their magnetic properties, four petromagnetic groups are distinguished: two non-magnetic, depending on the rock-forming minerals, and two magnetic, determined by the amount of magnetite formed during secondary (superimposed) processes.

Keywords: schists, composition, physical properties, density, magnetic susceptibility, Nerkeyu complex, Nether-Polar Urals

Введение

Неркаюский эклогит-сланцевый комплекс расположен в северо-восточной части Приполярного Урала (рис. 1). Неркаюский комплекс относится к Западно-Уральской структурной зоне и заключен между двумя глубинными разломами: Эрепшорским на западе и Главным Уральским — на востоке. Исследуемый комплекс вытянут в северо-восточном направлении с юга на север по правобережью р. Хульги от ее крупного притока — р. Хальмерью — до р. Бол. Тыкотлова на 85 км при ширине до 16 км. Образование комплекса представлены различными по составу высокобарическими метаморфическими породами. В основном это слюдяные, хлоритовые, амфиболовые и глаукофановые сланцы. Они составляют 70–80 % метаморфического комплекса. В подчиненном положении находятся metabazites неркаюского комплекса, которые в основном наблюдаются в северной части комплекса (Государственная..., 2007).

Среди геологов пока нет единого мнения по поводу строения неркаюского комплекса, возраста пород, количества и последовательности этапов метаморфических процессов (Пыстин и др., 1980, 1983, 1994; Иванов и др., 1981; Пучков и др., 1983, 1986; Вализер, Ленных, 1988; Gómez-Pugnaire and at., 1997; Григорьев и др., 2005; Ремизов и др., 2006). Одни специалисты предполагают, что породы комплекса образовались в амфиболитовую фацию метаморфизма в докембрийское время, а затем претерпели эклогитизацию и глаукофанизацию в палеозое (Пучков, Карстен, 1986). Согласно мнению других исследователей, полиметаморфизм (амфиболитизация и эклогитизация) проявился в докембрии, а низкотемпературные изменения породы претерпели в процессе диафореза в палеозойское время (Пыстин и др., 1983, Вализер, Ленных, 1988). Согласно мнению еще одной группы геологов, эклогиты, глаукофановые сланцы и амфиболиты образуются в течение одного палеозойского тектониче-

Для цитирования: Пономарева Т. А., Кушманова Е. В. Петрофизическое группирование сланцевых пород неркаюского комплекса (Приполярный Урал) // Вестник геонаук. 2025. 1(361). С. 14–24. DOI: 10.19110/geov.2025.1.2

For citation: Ponomareva T. A., Kushmanova E. V. Petrophysical grouping of schist rocks of the Nerkeyu complex (the Nether-Polar Urals). Vestnik of Geosciences, 2025, 1(361), pp. 14–24, doi: 10.19110/geov.2025.1.2

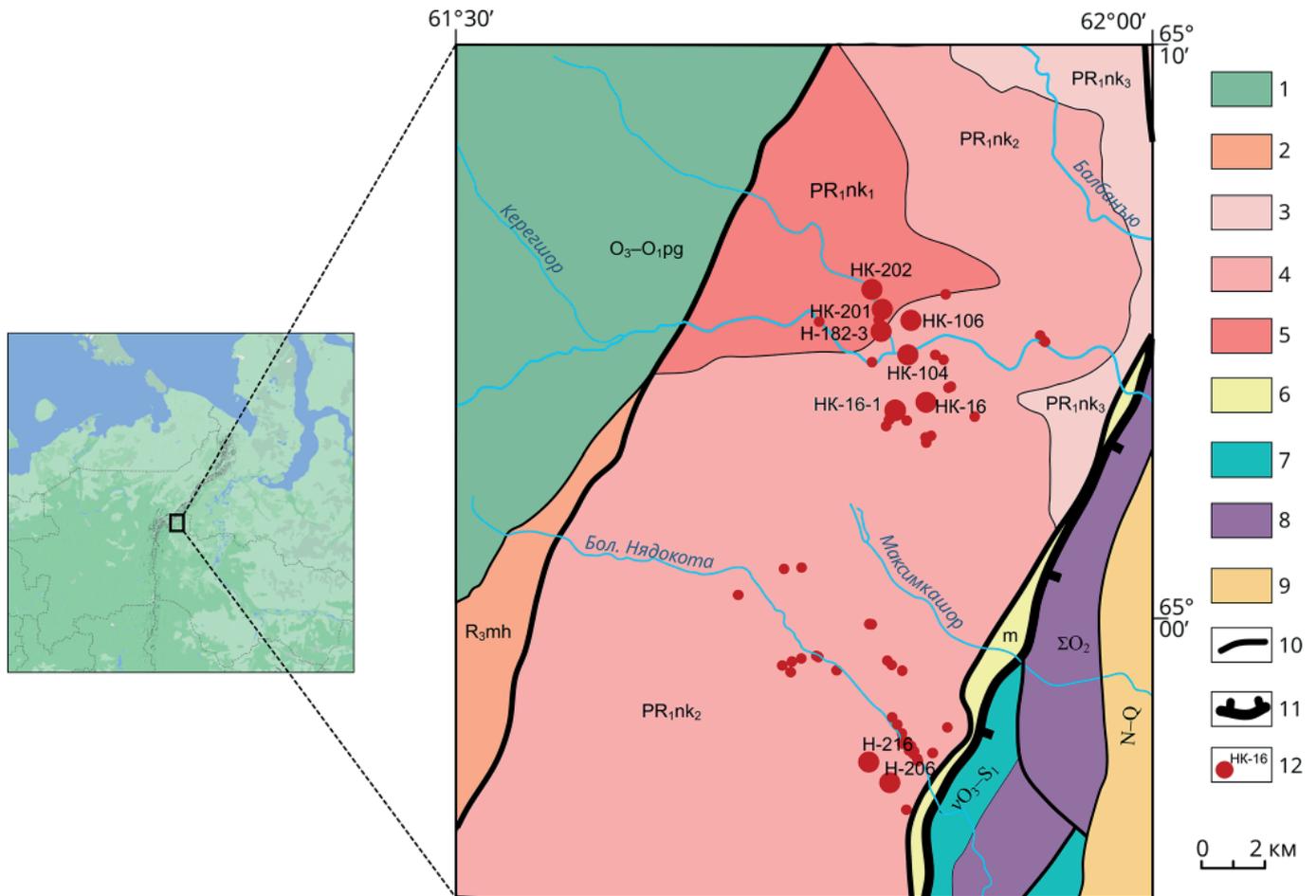


Рис. 1. Схема расположения и геологическое строение северной части неркаюского комплекса Приполярного Урала (Государственная..., 2007): 1 — погурейская свита (нерасчлененные образования O_3-O_{1pg}); 2 — малохосаинская толща (R_3mh); 3–5 — неркаюская свита: 3 — верхняя подсвита (PR_{1nk_3}): кристаллические сланцы, амфиболиты, эклогиты, кварциты, гнейсы; 4 — средняя подсвита (PR_{1nk_2}): кристаллические сланцы, амфиболиты, кварциты, гнейсы; 5 — нижняя подсвита (PR_{1nk_1}): кристаллические сланцы, амфиболиты, эклогиты, кварциты, гнейсы; 6 — кемпирсайско-войкарский комплекс тектонитов (m); 7 — габбровый комплекс (vO_3-S_1); 8 — гипербазитовый комплекс (ΣO_2); 9 — неоген-четвертичные отложения (N-Q); 10 — границы неркаюского комплекса; 11 — Главный Уральский разлом (надвиг); 12 — места отбора образцов

Fig. 1. Location diagram and geological structure of the Nerka complex of the northern part of the Subpolar Urals (State..., 2007): 1 — Pogurey Formation (undivided formations O_3-O_{1pg}); 2 — Malokhosainskaya strata (R_3mh); 3–5 — Nerka formation: 3 — upper subformation (PR_{1nk_3}): crystalline schists, amphibolites, eclogites, quartzites, gneisses; 4 — middle subformation (PR_{1nk_2}): crystalline schists, amphibolites, quartzites, gneisses; 5 — lower subformation (PR_{1nk_1}): crystalline schists, amphibolites, eclogites, quartzites, gneisses; 6 — Kempirsay-Voykar tectonite complex (m); 7 — gabbro complex (vO_3-S_1); 8 — hypermafic complex (ΣO_2); 9 — Neogene-Quaternary deposits (N-Q); 10 — boundaries of the Nerka complex; 11 — Main Ural fault (thrust); 12 — places of sampling

ского этапа (Григорьев и др., 2005, Ремизов и др., 2006). Высокобарический метаморфизм неркаюского комплекса они связывают с погружением палеозойских образований в составе аккреционной призмы в зону субдукции.

Изучение физических свойств пород на Урале начались с 1964 года во время проведения крупномасштабного геологического картирования перспективных территорий. В задачи петрофизики входило обоснование выбора геофизических методов и эффективная интерпретация геофизических данных как наиболее важных для изучения глубинного строения Уральского региона. Результаты изучения физических свойств пород по Южному и Среднему Уралу детально представлены в работах Е. С. Родионова, Н. Б. Пунегова, Н. А. Плохих, Н. Ф. Донукалова, Б. К. Кунщикова и других исследователей. Особого внимания

заслуживают региональные петрофизические исследования Н. Б. Дортман, в том числе по Уральскому региону. Огромный вклад в области наук о Земле внесли петрофизические данные пород Уральской сверхглубокой скважины (СГ-4). С 1991 года в связи с уменьшением заинтересованности в региональных геологических исследованиях на Урале, как следствие, снизился интерес к геофизическим и петрофизическим работам. Тем не менее накопленный фактический материал по Уральскому региону был использован в ряде руководств (Методические..., 1983), а также в учебных пособиях по петрофизике и справочниках. Сведения о физических свойствах пород севера Урала находятся в основном в материалах «Комигеолфонда» и научных публикациях (Пономарева и др., 2014, 2016; 2022, 2024). При проведении петрофизических исследований ставились следующие задачи: изучение

физических свойств сланцевых пород неркаюского комплекса и выявление причин их изменчивости; проведение петрофизического группирования пород с учетом закономерностей, выявленных в комплексе с петрографическими и петрохимическими данными. Решение поставленных задач более эффективно помогает выявить определенные петрофизические группы пород в аномалиях гравитационного и магнитного полей.

Петрофизическая неоднородность пород неркаюского комплекса ранее была обнаружена на примере метабазитов (Пономарева, Кушманова, 2022). Новые данные указали одновременно на определенную схожесть в характере распределения свойств в амфиболитах и эклогитах и различие в причинах их изменчивости. Например, корреляционный анализ удельной магнитной восприимчивости выявил деление метабазитов на немагнитные и магнитные петрогруппы. Петрографическое описание указало на значительное усиление магнитных свойств только у диафорированных и метасоматически измененных амфиболитов, связанное с повышенными содержаниями ильменита, магнетита и титаномагнетита в породах. Рост магнитной восприимчивости у эклогитов связан с эпидотизацией, в процессе которой развивается магнетит. Среди метаморфических образований неркаюского комплекса метабазиты составляют менее 20 %, в основном комплекс представлен кристаллическими сланцами различного состава, которые являются объектом нашего внимания. По сути, данная работа является продолжением ранее начатых комплексных петрофизических исследований в неркаюском эклогит-амфиболит-сланцевом комплексе.

Методы исследований

Петрографическое описание пород проводилось в шлифах на поляризационном микроскопе «БиОптик СР-400» («БиОптик», РФ). Рудные минералы изучались на сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA3 LMN (TESCAN, Czech Republic). Химический состав пород получен методом мокрой химии и комплексного метода мокрой химии и рентгенофлуоресцентного анализа. Измерения физических свойств, петрографическое описание пород, определение химического состава кристаллических сланцев проводились в лабораторных условиях Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Плотность определялась методом гидростатического взвешивания с помощью весов «Меттлер Толодо». Магнитная восприимчивость пород измерялась в порошковом виде на приборе Kappabridge KLY (Geofizika BRNO, Czechoslovakia) с точностью измерения 0.2–1 %. Каждая протолочковая проба измерялась трижды. Значения плотности и магнитной восприимчивости обрабатывались методами математической статистики (Дементьев и др., 1977; Stuart, Ord, 1994), в результате чего были построены гистограммы и вариационные кривые. Также для анализа графиков распределения рассчитаны числовые характеристики: среднее значение (η), мода (M_0), медиана (M_e), среднеквадратичные отклонения (σ), дисперсия (D), коэффициент корреляции (r), асимметрия (as) и другие. Всего изучено 40 образцов пород.

Петрографические особенности сланцевых пород неркаюского комплекса

Широко развитые в неркаюском комплексе кристаллические сланцы разнообразны по вещественному составу и дифференцированы по физическим свойствам (табл. 1).

В результате изучения сланцевых пород северной части неркаюского комплекса установлено, что среди них наиболее распространены гранатсодержащие и гранатовые кварц-клиноцоизит-амфибол-хлорит-мусковит-альбитовые (нк-14, нк-16, нк-16-1, нк-106, нк-104, н-206, нк-201). В подчиненном количестве присутствуют гранат-мусковитовые гнейсоподобные сланцы с хлоритом (н-216), кварц-клиноцоизит-хлорит-амфибол-альбитовые сланцы (нк-202) и кварц-хлорит-мусковит-глаукофан-карбонатные породы (н-182-3, нк-203).

Гранатсодержащие и гранатовые кварц-клиноцоизит-амфибол-хлорит-мусковит-альбитовые сланцы (рис. 2, а, б) имеют гранолепидобластовую, порфиробластовую, мелко- и среднезернистую структуру, сланцеватую и очковую текстуру. В переменном количестве в породах содержатся (об. %): мусковит (10–30), альбит (10–40), кварц (10–15), амфибол (глаукофан, барруазит) (3–15), хлорит (5–20), клиноцоизит (2–10), гранат (1–10), апатит (1), рутил (1–3), магнетит, ильменит (ед. зерна — 3). В породе наблюдаются порфиробласты граната и альбита, между которыми развиваются зерна амфибола, клиноцоизита и чешуйки мусковита и хлорита. Гранат представлен идиоморфными изометричными зернами размером от 0.1 до 1 мм, содержит включения рутила и кварца. Минерал замещается по краям и трещинкам хлоритом. Гранаты иногда образуют структуру «снежного кома». Крупные порфиробласты образуют также зерна удлиненно-линзовидного альбита размером до 2–3 мм. Минерал имеет многочисленные включения удлиненного, изометричного мелкого кварца, амфибола и (редко) мусковита. Часто в альбите можно увидеть простые двойники. Амфибол представлен призматическими изометричными зернами размером 0.2–0.4 мм, редко до 0.7 мм. Минерал плеохроирует от бледно-зеленого до голубовато-зеленого или фиолетового и представлен, скорее всего, щелочным натриевым амфиболом — барруазитом и глаукофаном. По краям, а иногда полностью, амфибол замещается хлоритом. Мусковит представлен вытянутыми в одном направлении чешуйками размером до 1.5, редко до 2 мм, формирует сланцеватую текстуру породы. Хлорит образует крупные чешуйки размером до 3 мм, плеохроирует от бледно-зеленого до зеленого. Минерал развивается как по направлению, так и перпендикулярно сланцеватости, образует сноповидные и радиально-лучистые агрегаты, имеет включения кварца, редко слюды. Рутил представлен изометричными удлиненными зернами размером до 0.1 мм, часто развивается вокруг ильменита. Он просвечивает бурым, темно-коричневым цветом.

Изредка в породах (рис. 2, с, d) наблюдаются участки (прослойки, прожилки, изометричные обособления), выполненные зернами кварца. По всей видимости, кварц (в большей степени) и хлорит являются наложенными минералами по отношению к другим поро-

Таблица 1. Содержания породобразующих оксидов (мас. %) и физические параметры сланцев неркаюского комплекса

Table 1. Rock-forming oxides content (wt. %) and physical parameters of schists of the NerkaYu complex

| nn | № 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 | п.п.п. LOI | Сумма Sum | Fe ₂ O ₃ общ | χ, n × 10 ⁻⁸ [SI] | ρ, n × 10 ⁵ кг/м ³ |
|----|--------------------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|---------------|--------------|------------------------------------|---------------------------------|---|
| 1 | нк-14 | 59.54 | 1.07 | 17.64 | 2.00 | 4.91 | 0.11 | 3.02 | 1.61 | 4.13 | 1.68 | 0.19 | 2.74 | 99.13 | 7.4 | 19.19 | 2.82 |
| 2 | нк-14-2 | 66.97 | 0.46 | 15.85 | 1.29 | 3.64 | 0.1 | 1.88 | 1.50 | 4.50 | 0.87 | 0.51 | 2.44 | 100 | 5.33 | 15.56 | 2.71 |
| 3 | нк-16 | 61.04 | 0.87 | 16.65 | 2.26 | 4.38 | 0.12 | 3.05 | 1.66 | 3.45 | 2.32 | 0.48 | 2.65 | 99.37 | 7.08 | 16.53 | 2.74 |
| 4 | нк-16-1 | 63.03 | 0.6 | 18.37 | 1.32 | 3.55 | 0.06 | 2.15 | 1.39 | 3.06 | 3.16 | 0.49 | 2.82 | 100 | 5.26 | 12.48 | 2.73 |
| 5 | нк-16-3 | 60.54 | 0.59 | 19.04 | 1.01 | 5.14 | 0.07 | 2.62 | 0.97 | 3.94 | 2.10 | 0.53 | 3.47 | 100 | 6.71 | 17.06 | 2.76 |
| 6 | н-166-1 | 66.68 | 0.70 | 15.93 | 3.66 | 2.91 | 0.04 | 2.12 | 0.85 | 2.00 | 2.46 | 0.07 | 2.59 | 100 | 6.89 | 10.04 | 2.74 |
| 7 | нк-205 | 68.08 | 0.50 | 15.12 | 2.75 | 2.55 | 0.11 | 2.25 | 2.67 | 2.6 | 1.91 | 0.34 | 1.12 | 100 | 5.58 | 16.90 | 2.75 |
| 78 | нк-201 | 59.6 | 0.52 | 13.16 | 2.38 | 2.86 | 0.09 | 2.2 | 2.26 | 3.55 | 1.00 | 0.35 | 2.04 | 100 | 5.55 | 359.34 | 2.78 |
| 9 | нк-111 | 61.73 | 0.53 | 18.39 | 1.90 | 3.92 | 0.1 | 2.29 | 1.4 | 1.88 | 3.83 | 0.53 | 3.50 | 100 | 6.25 | 50.64 | 2.83 |
| 10 | нк-109 | 62.23 | 0.58 | 18.15 | 2.15 | 3.4 | 0.11 | 2.07 | 1.61 | 2.22 | 3.44 | 0.63 | 3.40 | 100 | 5.92 | 85.25 | 2.71 |
| 11 | нк-106 | 68.34 | 0.48 | 14.35 | 2.62 | 2.25 | 0.1 | 2.40 | 2.28 | 4.07 | 0.66 | 0.37 | 2.08 | 100 | 5.12 | 165.80 | 2.75 |
| 12 | н-206 | 59.77 | 0.80 | 17.33 | 3.12 | 4.5 | 0.34 | 3.31 | 2.61 | 2.46 | 2.46 | 0.22 | 3.08 | 100 | 8.12 | 19.07 | 2.85 |
| 13 | н-146-1 | 73.86 | 0.91 | 10.4 | 1.69 | 4.19 | 0.09 | 2.00 | 1.39 | 2.58 | 0.90 | 0.11 | 1.88 | 100 | 6.34 | 14.62 | 2.75 |
| 14 | н-147-1 | 72.83 | 1.00 | 10.98 | 1.58 | 4.29 | 0.10 | 2.04 | 1.78 | 2.43 | 1.14 | 0.08 | 1.75 | 100 | 6.34 | 15.30- | 2.80 |
| 15 | н-62 | 75.38 | 0.63 | 9.78 | 1.46 | 2.57 | 0.10 | 1.35 | 2.58 | 2.13 | 0.31 | 0.091 | 3.25 | 99.89 | 4.29 | 6.86 | 2.68 |
| 16 | н-63 | 77.22 | 0.67 | 10.23 | 1.95 | 2.27 | 0.04 | 1.41 | 0.84 | 1.28 | 1.60 | 0.06 | 2.44 | 100 | 4.47 | 15.84 | 2.71 |
| 17 | н-216 | 70.03 | 0.74 | 13.22 | 1.77 | 4.41 | 0.08 | 2.63 | 0.49 | 2.48 | 1.14 | 0.08 | 2.95 | 100 | 6.66 | 16.44 | 2.69 |
| 18 | н-217 | 75.13 | 0.97 | 9.53 | 1.53 | 4.33 | 0.09 | 1.59 | 1.69 | 2.85 | 0.61 | 0.11 | 1.59 | 100 | 6.34 | 12.63 | 2.74 |
| 19 | н-210 | 77.2 | 0.12 | 13.04 | 0.84 | 0.72 | 0.03 | 0.43 | 0.3 | 4.93 | 1.20 | 0.04 | 1.16 | 100 | 1.64 | 8.19 | 2.62 |
| 20 | н-182-3 | 40.52 | 0.64 | 10.09 | 3.07 | 5.89 | 0.37 | 11.31 | 9.45 | 3.44 | 1.03 | 0.35 | 13.73 | 100.48 | 9.55 | 240.85 | 2.88 |
| 21 | н-184-1 | 39.48 | 0.65 | 9.92 | 3.20 | 5.75 | 0.36 | 11.16 | 9.67 | 3.18 | 0.98 | 0.38 | 13.96 | 99.26 | 9.52 | 287.27 | 2.94 |
| 22 | нк-202 | 51.5 | 1.07 | 13.29 | 5.82 | 6.95 | 0.24 | 5.7 | 8.28 | 2.66 | 0.05 | 0.89 | 3.54 | 100 | 13.53 | 2866.73 | 2.99 |

Примечание. 1–19 — парароды: 1–12 — гранатсодержащие и гранатовые кварц-клинозоизит-амфибол-хлорит-мусковит-альбитовые сланцы; 1–7 — немагнитные, 7–11 — магнитные; 12–19 — гранат-мусковитовые гнейсоподобные сланцы; 20–22 — ортопороды: 20, 21 — кварц-хлорит-мусковит-глаукофан-карбонатные породы; 22 — кварц-клинозоизит-хлорит-амфибол-альбитовые сланцы.

Note. 1–19 — pararocks: 1–12 — garnet-bearing and garnet quartz-clinozoisite-amphibole-chlorite-muscovite-albite schists; 1–7 — non-magnetic, 7–11 — magnetic; 12–19 — garnet-muscovite gneiss-like schists; 20–22 — orthorocks: 20, 21 — quartz-chlorite-muscovite-glaucophane-carbonate rocks; 22 — quartz-clinozoisite-chlorite-amphibole-albite schists.

дообразующим составляющим. В породах, где увеличивается содержание крупночешуйчатого хлорита и кварца (нк-106, нк-104, нк-201), наблюдается повышенное содержание магнетита. Магнетит размером до 0.1, редко до 0.2 мм, в сечении имеет неправильную четырехугольную форму. В отраженном свете стально-серый.

Гранат-мусковитовые гнейсоподобные сланцы с хлоритом (или без хлорита) (н-216) имеют лепидогранобластовую, мелко- и среднезернистую структуру, слан-

цеватую или гнейсовидную текстуру (рис. 2, е, ф). Порода состоит (об. %): из кварца (30–40), альбита (20–25), хлорита (10), мусковита (10–15), граната (1), титанита (менее 1), рутила (1) сульфидов и ильменита (1–2).

Порода вмещает удлиненные изометричные таблитчатые зерна альбита размером до 2–3 мм с включениями мелкого кварца, рутила, и мусковита, а также угловатых, удлиненных, неправильной формы зерен кварца размером до 1 мм. В альбите наблюдаются простые двойники. Между зернами кварца и

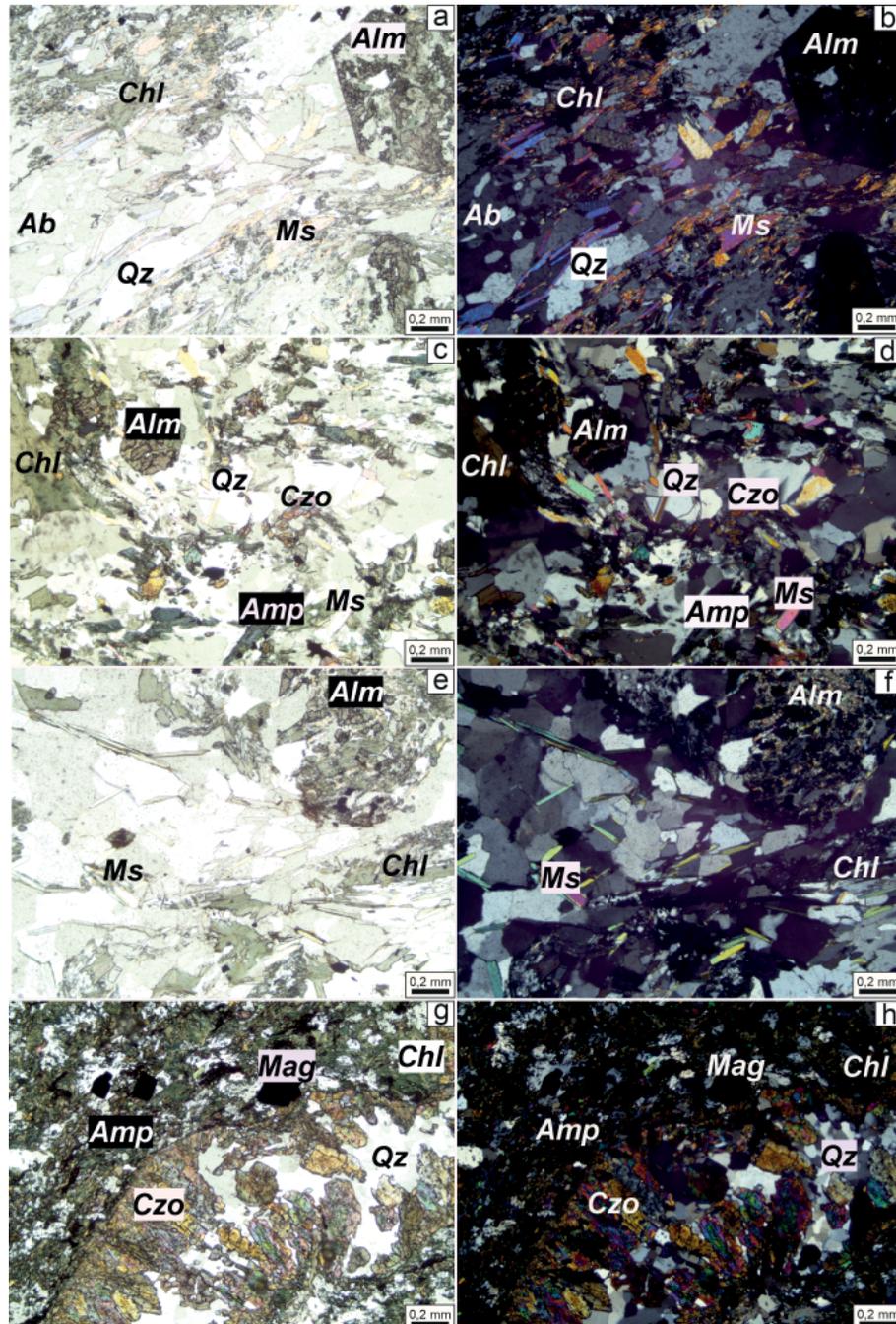


Рис. 2. Гранатовые кварц-клиноцоизит-амфибол-хлорит-мусковит-альбитовые сланцы (нк-14) — а, b; окварцованный, хлоритизированный сланец (нк-201) — с, d; гранат-мусковитовый гнейсоподобный сланец (н-216) — е, f; кварц-клиноцоизит-хлорит-амфибол-альбитовые сланцы (нк-202) — g, h. Фото сделаны в параллельных и скрещенных николях: Alm — альмандин (гранат), Amp — амфибол, Ms — мусковит, Qz — кварц, Ab — альбит, Czo — клиноцоизит, Mag — магнетит, Chl — хлорит

Fig. 2. Garnet quartz-clinozoisite-amphibole-chlorite-muscovite-albite schists (nk-14) — a–b; silicified, chloritized schist (nk-201) — c–d; garnet-muscovite gneiss-like schist (n-216) — e–f; quartz-clinozoisite-chlorite-amphibole-albite schists (nk-202) — g–h. Photos were taken in parallel and crossed nicols: Alm — almandine (garnet), Amp — amphibole, Ms — muscovite, Qz — quartz, Ab — albite, Czo — clinozoisite, Mag — magnetite, Chl — chlorite



альбита развиваются чешуйки мусковита размером до 0.8 мм, ориентированные в одном направлении. В породе наблюдаются также чешуйки хлорита размером до 1 мм, развивающиеся как по гнейсовидности, так и поперек. Они часто образуют сноповидные агрегаты. Изометричные зерна граната размером до 1 мм практически полностью заместились хлоритом, серицитом и кварцем. Рутил часто развивается вокруг ильменита неправильной формы размером до 0.1–0.2 мм. Встречаются зерна сульфидов кубической изометрической формы размером до 0.5 мм.

Кварц-клиноцоизит-хлорит-амфибол-альбитовые сланцы (нк-202) имеют лепидонематогранобластовую, порфиробластовую, мелко- и среднезернистую структуру, слабосланцеватую и плейчатую текстуру (рис. 2, g, h). Порода состоит (об. %) из: альбита (25–30), амфибола (15–20), кварца (10–12), хлорита (15–20), клиноцоизита (5–10), карбоната (1–2), титанита (1–3) магнетита (5). Порода сложена изометричными, линзовидными порфиробластами альбита размером до 0.6 мм, с мелкими включениями клиноцоизита, амфибола и кварца. Между зернами альбита расположены призматические зерна клиноцоизита и амфибола, чешуйки хлорита, а также кварца размерами до 0.4 мм. Амфибол плеохроирует от бледно-зеленого до голубовато-зеленого (возможно, барруазит). Хлорит образует чешуйки, сноповидные агрегаты размером до 0.5 мм, часто развивается поперек сланцеватости. Минерал плеохроирует от бледно-зеленого до зеленого, интерферирует в коричневых тонах. В породе встречаются скопления мелких изометричных зерен титанита в виде отдельных полос, развиваются зерна магнетита (октаэдри) размером до 1 мм, которые в сечении принимают треугольную и четырехугольную формы. С магнетитом ассоциируются скопления зерен карбоната. Породу прорывает прожилок мощностью около 2 мм магнетит-кварц-клиноцоизитового состава. По взаимоотношениям минералов можно утверждать, что кварц и хлорит, а возможно клиноцоизит и магнетит, являются вторичными по отношению к амфиболу и альбиту.

Кварц-хлорит-мусковит-глаукофан-карбонатные породы имеют лепидонематогранобластовую, средне- и крупнозернистую порфиробластовую структуру, неравномерную сланцеватую или массивную текстуру. Порода состоит (об. %) из амфибола (глаукофан) (20–30), альбита (0–2), хлорита (10), мусковита (5–10), карбоната (20–50), рутила (1), ильменита и магнетита (1–2).

В породе развиваются крупные порфиробласты карбоната размером до 1 см, между которыми наблюдаются мелкие зерна (до 1 мм) глаукофана, кварца, хлорита и мусковита. В карбонате присутствуют включения кварца, глаукофана, мусковита. Зеленый хлорит образует чешуйки размером до 2 мм, интерферирует в серо-зеленых тонах. Призматический и длиннопризматический глаукофан плеохроирует от бледно-зеленого до бледно-фиолетового. Кварц и альбит образуют удлиненные, неправильной формы зерна размером до 1.5 мм. В кварце иногда наблюдается неравномерное погасание, полосы излома. Рутил развивается, по-видимому, вокруг ильменита. Рудные минералы размером 0.1 мм в сечении имеют сложные четырехугольные формы.

Из петрографического описания следует, что различные по составу кристаллические сланцы в разной степени подверглись вторичным изменениям. В процессе окварцевания, хлоритизации, эпидотизации и карбонатизации в сланцах развиваются рудные минералы — ильменит, магнетит и сульфиды.

Петрохимические особенности сланцев неркаюского комплекса

Для разделения сланцев на пара- и ортопороды была применена диаграмма А. Нематова, в которой использовались данные химического состава пород, представленные в таблице 1. На диаграмме А. Нематова преобладающее большинство фигуративных точек составов гранатсодержащих и гранатовых кварц-клиноцоизит-амфибол-хлорит-мусковит-альбитовых сланцев и гранат-мусковитовых гнейсоподобных пород попадают в область паропород (рис. 3). Подтверждают первичную осадочную природу этой группы сланцев данные дискриминантной функции $DF(x)$ (Великославинский и др., 2013), значения которой находятся в пределах 0.35–1.74, и результаты анализа литохимических особенностей. На классификационной диаграмме М. Хиррона большая часть образцов попадает в область глинистых пород (рис. 4). Гранат-мусковитовые гнейсоподобные породы обнаруживают схожесть с железистыми песчаниками (единичные образцы находятся в поле литита и вакка). Выводы о первично-осадочном происхождении кристаллических сланцев были получены в работах предшественников (Пыстин и др., 1994; Ремизов и др., 2006; Кушманова, 2020).

Несколько фигуративных точек кварц-хлорит-мусковит-глаукофан-карбонатного и кварц-клиноцоизит-хлорит-амфибол-альбитового состава пород проецируются в поле ортопород (рис. 3). Для реконструкции их первичного состава была построена диаграмма TAS, на которой фигуративные точки химического состава амфиболовых (глаукофановых) сланцев попадают в поле базальтов (габбро) либо располагаются в области субщелочных габброидов (рис. 5).

Петрофизические группы сланцев неркаюского комплекса

Результаты совместного анализа плотности, зависящего от вещественного состава пород, их текстурно-структурных особенностей, и магнитной восприимчивости, обусловленной образованием ферромагнитных минералов при вторичных (наложенных) процессах, представлены в таблице 2. В процессе группирования по петроплотностным и петромагнитным параметрам кристаллические сланцы разделились на четыре петрофизические группы (Пономарева, Кушманова, 2024). Каждая выделенная петрогруппа отличается количественно-минеральным составом и пределами вариаций плотности и удельной магнитной восприимчивости. Наиболее детально распределение физических параметров представлено на гистограммах и вариационных кривых распределения (рис. 6).

У кристаллических сланцев наблюдаются широкие диапазоны изменения как плотности ($2.62–3.02 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ (рис. 6, а), так и удельной магнитной

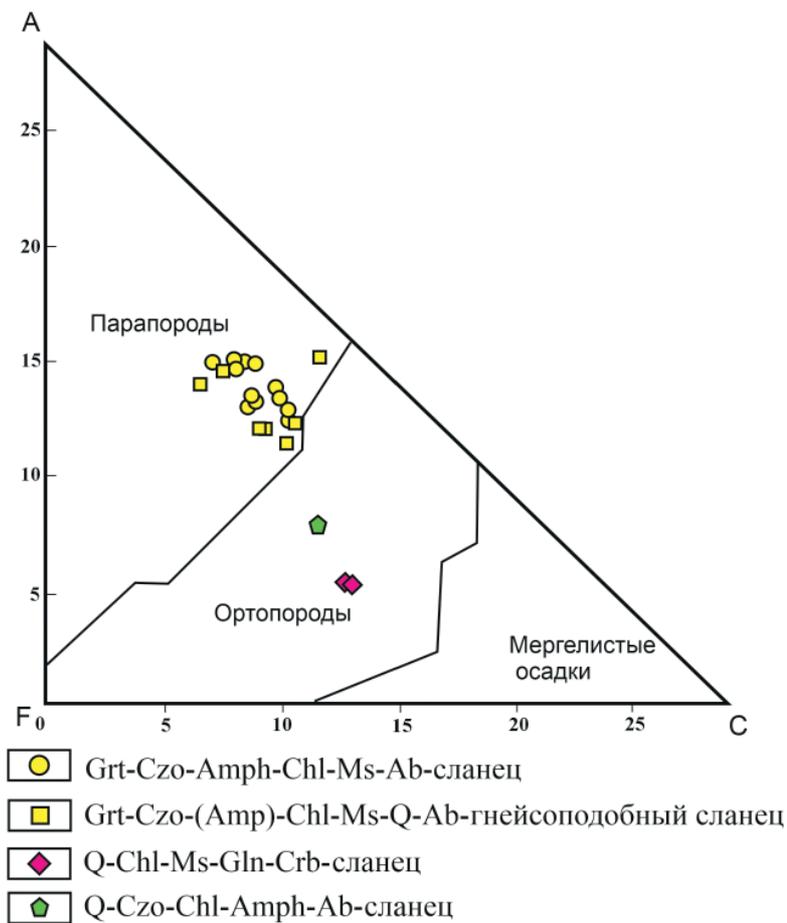


Рис. 3. Диаграмма для разделения пара- и ортопород по А. Нематову (Ефремова, Стафеев, 1985): Grt – гранат, Czo – клинозоизит, Amp – амфибол, Chl – хлорит, Ms – мусковит, Ab – альбит, Q – кварц, Gln – глаукофан, Crb – карбонат, Ep – эпидот

Fig. 3. Diagram for separating para- and ortho-rocks according to A. Nematov (Efremova, Stafeev, 1985): Grt – garnet, Czo – clinozoisite, Amp – amphibole, Chl – chlorite, Ms – muscovite, Ab – albite, Q – quartz, Gln – glaucophane, Crb – carbonate, Ep – epidote

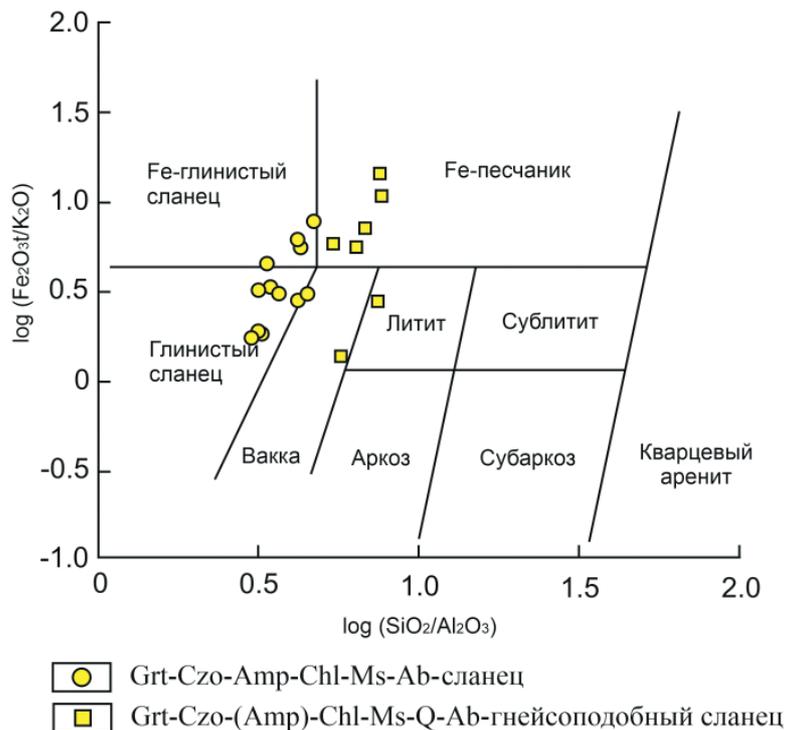


Рис. 4. Классификационная диаграмма М. Хиррона (Herron, 1988)

Fig. 4. Classification diagram by M. Herron (Herron, 1988)

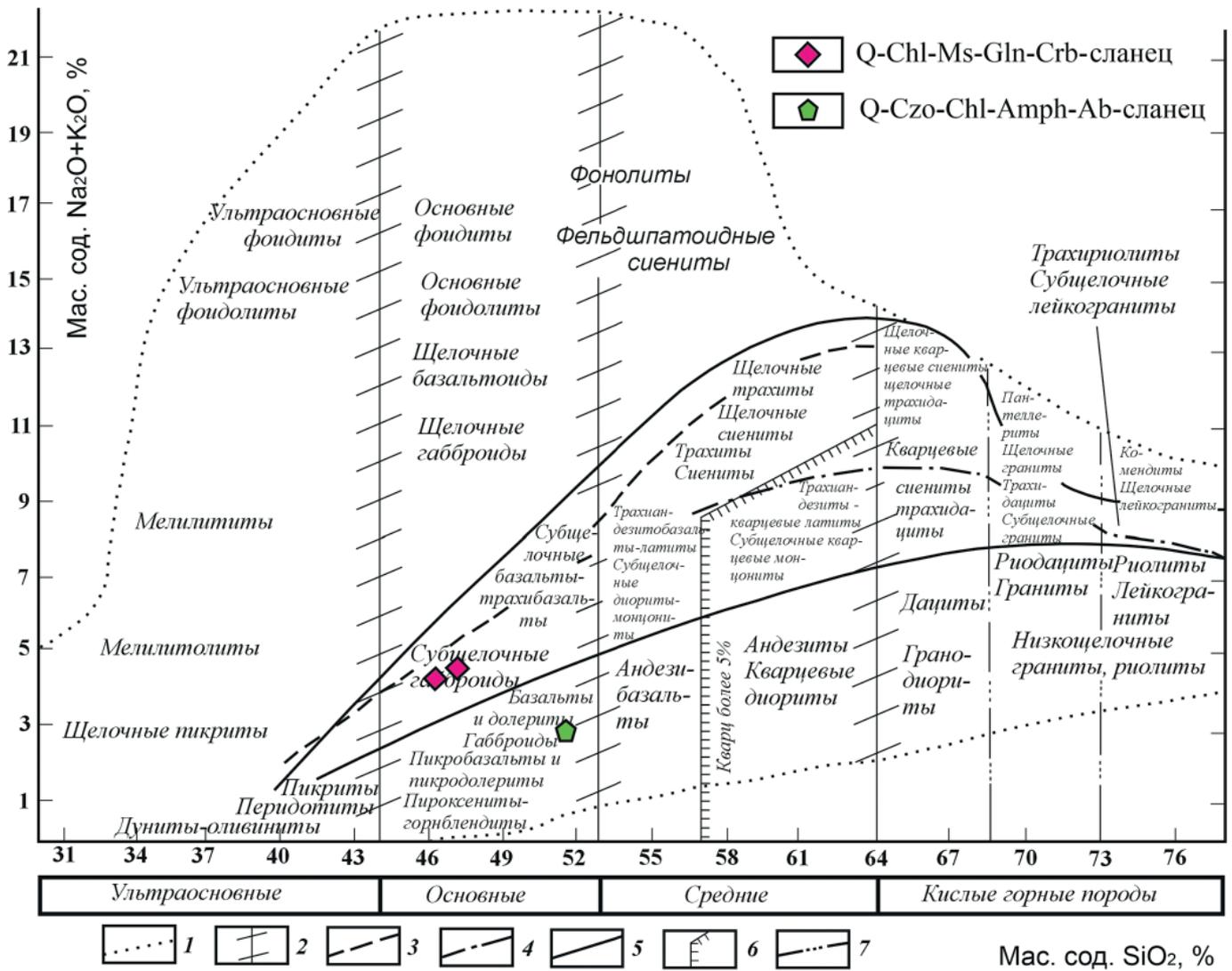


Рис. 5. Положение фигуративных точек ортопород неркаюского комплекса на диаграмме TAS (Классификация..., 1997)

Fig. 5. Position of figurative points of orthorocks of the Nerkey complex on the TAS diagram (Classification..., 1997)

Таблица 2. Петрофизические характеристики кристаллических сланцев неркаюского комплекса

Table 2. Petrophysical characteristics of crystalline schists of the Nerkeyu complex

| Петрофизические характеристики пород / Petrophysical characteristics of the rocks | | | | | |
|---|----------------------------|---|---|----------------------|---|
| Петроплотностные группы Petrodensity groups | Немагнитные / Non-magnetic | | | Магнитные / Magnetic | |
| | I | a | $\rho < 2.78 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ $\chi < 100 \times 10^{-8} \text{ СИ}$ | b | $\rho < 2.78 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ $\chi > 100 \times 10^{-8} \text{ СИ}$ |
| | II | c | $2.78 < \rho < 3.00 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ $\chi < 100 \times 10^{-8} \text{ СИ}$ | d | $\rho \geq 2.78 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ $\chi > 100 \times 10^{-8} \text{ СИ}$ |

восприимчивости $(10-2880) \times 10^{-8}$ СИ (рис. 6, b). Статистические характеристики распределения плотности ($M_o - 2.71, M_e - 2.74, \eta - 2,76, A_s - 1$) и удельной магнитной восприимчивости ($M_o - 15.84; M_e - 20.75; \eta - 86.6, A_s - 1.3$) имеют сложную форму вариационных кривых со случайными флуктуациями и положительную правостороннюю асимметрию на обоих графиках. На рис. 6 плотностной максимум, заключенный в пределах $(2.72-2.77) \times 10^3 \text{ кг/м}^3$, составляют гранатсодержащие и гранатовые кварц-клинозоизит-амфибол-хлорит-мусковит-альбитовые сланцы

(табл. 2, Ia). Магнетит в этих кристаллических сланцах практически не встречается или встречается редко в виде мелких зерен размером до 0.1 мм, поэтому сланцы немагнитны. Для них характерен очень узкий диапазон изменения магнитной восприимчивости, заключенный в интервале $(10-56) \times 10^{-8}$ СИ (рис. 6, b). Среди сланцев осадочного происхождения встречаются магнитные разновидности (табл. 2, Ib). Развитие магнитных рудных минералов подтверждается ростом значений $\chi_{уд}$ свыше 100×10^{-8} СИ и может варьировать в пределах $(148-240) \times 10^{-8}$ СИ. В процессе замещения

высокоплотных минералов (амфибол) на минералы с низкоплотными свойствами (кварц, хлорит) плотность сланцев остается постоянной благодаря образованию рудных минералов, таких как рутил, титаномагнетит, магнетит (нк-106, нк-104, нк-201). Важно отметить, что кварц (в большей степени) и хлорит являются наложенными минералами по отношению к другим породообразующим составляющим.

Немагнитную петрогруппу также представляют гранат-мусковитовые гнейсоподобные сланцы с хлоритом (или без хлорита) (табл. 2, Пс). Анализ минерального состава гнейсоподобных сланцев показал, что породы, состоящие в основном из кварца, альбита, мусковита, хлорита и граната, практически не содержат ферромагнетиков. В незначительных количествах в качестве рудного минерала у них выступает ильменит. Показатели удельной магнитной восприимчивости соответствуют значениям существенно меньшим, чем 100×10^{-8} СИ. Но в отличие от вышеописанных кристаллических сланцев гнейсоподобные сланцы имеют повышенные плотности. На рис. 6 пределы вариаций плотности варьируют в интервале $2.78 < \rho < 3.00 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Отдельную петрогруппу составляют самые высокоплотные и магнитные сланцы кварц-клиноцоизит-хлорит-амфибол-альбитового и кварц-хлорит-мусковит-глаукофан-карбонатного состава (табл. 2, Пд). На гистограмме плотности амфиболовые (глаукофановые) сланцы имеют значения плотности $(2.92-2.97) \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ (рис. 6, а). Намагниченность этих пород превышает

100×10^{-8} СИ и меняется в пределах от $(286-378) \times 10^{-8}$ СИ и более (рис 6, б), а плотность варьирует в пределах $2.78 < \rho \leq 3.00) \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ [9]. Аномально высокими магнитными свойствами отличаются хлоритизированные, окварцованные и эпидотизированные амфиболовые сланцы, в которых обнаружены самые высокие содержания до (5 %) крупнозернистого магнетита (рис. 2, g, h). В этих частично или полностью перекристаллизованных амфиболитах $\chi_{\text{уд}}$ увеличивается до 2866×10^{-8} СИ.

При анализе петроплотностных характеристик парапород отмечаются значительно меньшие плотности у сланцев с мелко- и среднезернистой структурой и сланцеватой (табл. 2, Ia), очковой и гнейсовидной текстурой (табл. 2, Пс). Кроме того, на понижение плотности парапород в определенной степени может влиять мусковит, развивающийся между зернами кварца и альбита по направлению сланцеватости (нк-14, нк-16, нк-16-3). Ортопороды со средне- и крупнозернистой структурой, слабо сланцеватой и массивной текстурой (табл. 2, Пд) характеризуются наибольшей плотностью (нк-202, н-182-3, нк-203). На диаграмме зависимости плотности от содержания основных породообразующих оксидов выяснилось, что плотность кристаллических сланцев при $r = 0.45$ имеет слабую связь с суммой оксидов железа, магния, калия и кальция на всем интервале изменений (рис. 7, а). Обратная зависимость между плотностью и содержанием кремнезема ($r = -0.8$) (рис. 7, б) также указывает на то, что плотность кристаллических сланцев в меньшей степени

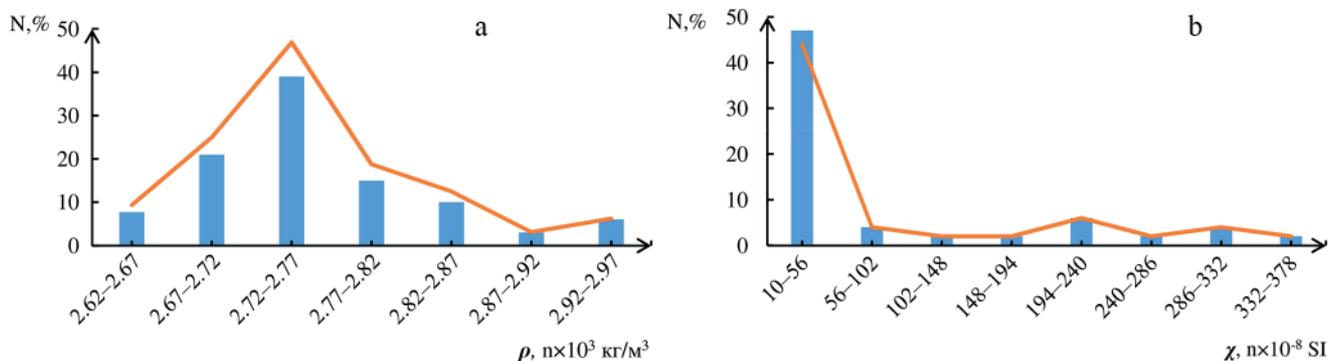


Рис. 6. Гистограммы и вариационные кривые плотности (а) и намагниченности (б) кристаллических сланцев неркаюского комплекса

Fig. 6. Histograms and variation curves of density (a) and magnetization (b) of crystalline schists of the Nerka complex

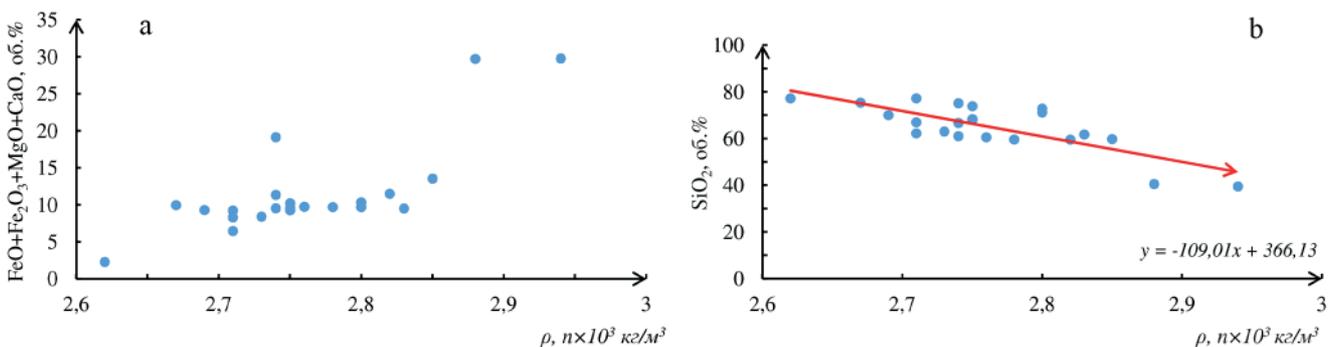


Рис. 7. Диаграммы зависимости изменения плотности сланцев от содержания оксидов: а — FeO + Fe₂O₃ + MgO + CaO; б — SiO₂

Fig. 7. Diagrams of the dependence of changes in schist's density on the content of oxides: а — FeO + Fe₂O₃ + MgO + CaO; б — SiO₂



зависит от содержаний SiO_2 (менее 50–55 %) в породах (табл. 1).

Приведенные данные показывают, что плотностные характеристики изучаемых пород, претерпевших изменения при низко- и среднетемпературных метаморфических процессах, хорошо коррелируются с их первичным составом и структурно-текстурными особенностями. Сильно рассланцованные гранатсодержащие и гранатовые кварц-клиноцоизит-амфибол-хлорит-мусковит-альбитовые сланцы с гранолепидобластовой структурой, образовавшиеся по глинистым породам, имеют пониженную плотность. Гнейсоподобные породы с лепидогранобластовой структурой, протолитами которых были песчаники, а также апобазальтовые, преимущественно амфиболовые сланцы с немагнетогранобластовой структурой имеют повышенную плотность.

Выводы

В процессе проведенного петрофизического группирования сланцевых пород неркаюского комплекса выделены четыре группы сланцев, отличающиеся вещественным составом, физическими параметрами и генезисом.

Петроплотностные характеристики пара- и ортосланцев определяются минеральным составом и плотностью исходных пород (субстрата). Разделение по плотности проходит по условному значению $2.78 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$.

В отличие от плотности, магнитные свойства кристаллических сланцев имеют наложенный характер и зависят от количества и размерности зерен вторичного магнетита, развивающегося в процессе диафореза. Локальный характер распределения магнетита в породах позволил выделить среди пара- и ортосланцев немагнитные (до 100×10^{-8} СИ) и магнитные (свыше 100×10^{-8} СИ) разновидности.

Результаты комплексного подхода в изучении физических свойств сланцевых пород неркаюского комплекса, на наш взгляд, являются ценным материалом при решении задач петрофизического районирования и для построения надежных геолого-геофизических глубинных моделей.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (№ ГР 122040600012-2).

Авторы выражают благодарность кандидату геолого-минералогических наук Н. С. Уляшевой за ряд существенных разъяснений по петрографии и петрохимии.

Литература / References

- Вализер П. М., Ленных В. И. Амфиболы голубых сланцев Урала. М.: Наука, 1988. 203 с.
Valizer P. M., Lennyh V. I. Amphiboles of the blue schists of the Urals. Moscow: Nauka, 1988, 203 p. (in Russian)
- Великославинский С. Д., Глебовицкий В. А., Крылов Д. П. Разделение силикатных осадочных и магматических пород по содержанию петрогенных элементов с помощью дискриминантного анализа // ДАН. 2013. Т. 453. № 3. С. 310–313.
Velikoslavinsky S. D., Glebovitsky V. A., Krylov D. P. Separation of silicate sedimentary and igneous rocks by

the content of major elements using discriminant analysis. Doklady Earth Sciences, 2013, No. 453(3), pp. 310–313. (in Russian)

Дементьев Л. Ф., Жданов М. А., Кирсанов А. Н. Применение математической статистики в нефтегазопромышленной геологии. М.: Недра, 1977. 255 с.

Dementyev L. F., Zhdanov M. A., Kirsanov A. N. Application of mathematical statistics in oil and gas geology. Moscow: Nedra, 1977, 255 p. (in Russian)

Ефремова С. В., Стафеев К. Г. Петрохимические методы исследования горных пород. М.: Недра, 1985. 512 с.

Efremova S. V., Stafeyev K. G. Petrochemical methods for studying rocks. Moscow: Nedra, 1985, 512 p. (in Russian)

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист Q-41 — Воркута. Объяснительная записка / Отв. исп. М. А. Шишкин, Я. Э. Файвусович, А. П. Астапов, А. С. Воронин, Е. В. Молчанова. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2007. 541 с.
State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Ural series. Sheets Q-41 — Vorkuta. Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI map plant, 2007, 541 p. (in Russian)

Григорьев С. И., Ремизов Д. Н., Григорьева Н. Г., Юдин В. В., Феофилактов Ф. Н. Термодинамические условия формирования метаморфических пород Неркаюского и Лемвинского аллохтонов на Приполярном Урале // Петрология и минералогия севера Урала и Тимана: Сб. ст. Сыктывкар, 2005. Вып. 119. С. 53–64. (Тр. ИГ Коми НЦ УрО РАН.)

Grigor'ev S. I., Remizov D. N., Grigor'eva N. G., Judin V. V., Feofilaktov F. N. Thermodynamic conditions for the formation of metamorphic rocks of the Nerkeyu and Lemvinsky allochthons in the Subpolar Urals. Collection of articles: Petrology and mineralogy of the north of the Urals and Timan. V. 119, Syktyvkar, 2005, pp. 53–64. (in Russian)

Иванов К. С., Пучков В. Н., Пелевин И. А. Эклогиты и глаукофановые сланцы района реки Балбанью (Приполярный Урал) // Ежегодник. 1980: УНЦ АН СССР. Свердловск, 1981. С. 72–75.

Ivanov K. S., Puchkov V. N., Pelevin I. A. Eclogites and glaucophane schists of the Balbanyu River region (Polar Urals). Yearbook-1980, Sverdlovsk, USC USSR AS, 1981, pp. 72–75. (in Russian)

Классификация магматических (изверженных) пород и словарь терминов (Рекомендации Подкомиссии по систематике изверженных пород Международного союза геологических наук). М.: Недра, 1997. 247 с.

Classification of igneous (igneous) rocks and glossary of terms (Recommendations of the Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks of the International Union of Geological Sciences). Moscow: Nedra, 1997, 247 p. (in Russian)

Кушманова Е. В. Состав и геодинамические условия формирования кристаллических сланцев неркаюского эцлогит-сланцевого комплекса (Приполярный Урал) // Материалы ЛII Тектонического совещания. 2020. Т. 2. С. 13–16.

Kushmanova E. V. Composition and geodynamic conditions for the formation of crystalline schists of the Nerkeyu eclogite-schist complex (Subpolar Urals). Proc. of the 70th Tectonic conference, Moscow: GEOS, V. 2, 2020, pp. 13–16. (in Russian)



- Методические рекомендации по интерпретации геофизических данных при крупномасштабном геологическом картировании / Отв. исп. Е. М. Ананьева, Е. Б. Гороневич и др. Свердловск: Изд-во УГСЭ, 1983. 301 с. Methodological recommendations for the interpretation of geo-physical data in large-scale geological mapping. Sverdlovsk: Uralgeologiya, 1983, 301 p. (in Russian))*
- Пономарева Т. А., Кушманова Е. В. Метабазиты неркаюского комплекса Приполярного Урала: петрофизика, петрография и петрохимия // Вестник ВГУ. Серия: Геология. № 4. 2022. С. 84–94. <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/4/84-94>*
- Ponomareva T. A., Kushmanova E. V. Metabasites of the NerkaYu Complex of the Subpolar Urals: petrophysics, petrography and petrochemistry. Vestnik VSU, Series: Geology, No. 4, 2022, pp. 84–94. (in Russian)*
- Пономарева Т. А., Кушманова Е. В. Петрофизические и петрографические исследования сланцев северной части неркаюского комплекса Приполярного Урала / Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XVIII Геологического съезда РК. Сыктывкар, 2024. С. 59–62.*
- Ponomareva T. A., Kushmanova E. V. Petrophysical and petrographic studies of shales in the northern part of the Nerka-Yu complex of the Subpolar Urals. Proc. of the 18th Geological Congress of the Komi Republic. Syktyvkar: Geoprint, 2024, pp. 59–62. (in Russian)*
- Пономарева Т. А., Пыстин А. М. Петрофизическая характеристика пород полиметаморфических комплексов севера Урала // Известия Коми НЦ УрО РАН, 2014. № 2(18). С. 68–74.*
- Ponomareva T. A., Pystin A. M. Petrophysical characteristics of polymetamorphic rock complexes of the north of the Urals). Proceedings of the Komi Science Centre, 2014, No. 2 (18), pp. 68–74. (in Russian)*
- Пономарева Т. А., Пыстин А. М. Анализ физических свойств пород Восточной зоны севера Урала // Известия Коми НЦ УрО РАН, 2016. №1(25). С. 51–61.*
- Ponomareva T. A., Pystin A. M. Analysis of the physical properties of rocks of the eastern zone of the northern Urals. Proceedings of the Komi Science Centre, 2016, No. 1(25), pp. 51–61.*
- Пучков В. Н., Карстен Л. А., Иванов К. С. Состав и тектоническое положение эклогит-глаукофансланцевых комплексов Приполярного Урала // ДАН СССР. 1983. Т. 271. № 3. С. 676–680.*
- Puchkov V. N., Karsten L. A., Ivanov K. S. Composition and tectonic position of eclogite-glaucophane complexes of the Circumpolar Urals. Doklady Earth Sciences, 1983, V. 271(3), pp. 676–680. (in Russian)*
- Пучков В. Н., Карстен Л. А., Шмелев В. Р. Важнейшие черты геологического строения восточного склона Приполярного Урала // Геология и палеонтология Урала. Свердловск, 1986. С. 75–88.*
- Puchkov V. N., Karsten L. A., Shmelev V. R. The most important features of the geological structure of the eastern slope of the Nether-Polar Urals. Geology and Paleontology of the Urals. Sverdlovsk, 1986, pp. 75–88. (in Russian)*
- Пыстин А. М., Казак А. П., Чернышев Ю. А. Эклогиты неркаюского комплекса на Приполярном Урале // Записки ВМО. 1983. Ч. 112. Вып. 3. С. 346–353.*
- Pystin A. M., Kazak A. P., Chernyshev Yu. M. M., Kazak A. P. Eclogites of the NerkaYu complex in the Nether-Polar Urals. RMC Proc., 1983, V. 112, No. 3, pp. 346–353. (in Russian)*
- Пыстин А. М., Чернышев Ю. А., Царев Ю. М. О проявлении эклогитового метаморфизма на Приполярном Урале // Ежегодник-1979 Института геологии и геохимии. УНЦ АН СССР. Свердловск, 1980. С. 79–81.*
- Pystin A. M., Chernyshev Yu. M., Tsarev Yu. M. On the manifestation of eclogite metamorphism in the Subpolar Urals. Yearbook-1979 of the Institute of Geology and Geochemistry, 1980, USC USSR AS, Sverdlovsk, P. 79–81. (in Russian)*
- Пыстин А. М. Полиметаморфические комплексы западного склона Урала. СПб: Наука, 1994. 208 с.*
- Pystin A. M. Polymetamorphic complexes of the western slope of the Urals. Saint Petersburg: Nauka, 1994, 208 p. (in Russian)*
- 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 лемвинского аллохтона Приполярного Урала // Проблемы геологии и минералогии. 2006. С. 128–142.*
- Remizov D. N., Grigor'ev S. I., Grigor'eva N. G., Judin V. V., Ivanov V. N., Feofilaktov F. N. Primary composition and geodynamics of the NerkaYu complex and Lemva allochthons of the Nether-Polar Urals. Problems of Geology and Mineralogy. Syktyvkar: Geoprint, 2006, pp. 128–142. (in Russian)*
- Gómez-Pugnaire M. T., Karsten L., Lopez Sánchez-Vizcaíno V. Phase relationships and P-T conditions eclogite-blue-schists and their transformation to greenschist faces rocks in NerkaYu complex (Northern Urals) // Tectonophysics. 1997. Vol. 276. P. 195–216. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(97\)00055-3](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00055-3)*
- Herron M. M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data // Journal of Sedimentary Petrology. 1988. No. 58. P. 820–829.*
- Stuart A., Ord K. Kendall's Advanced Theory of Statistics. London: Edward Arnold. 1994. 704 p.*

Поступила в редакцию / Received 05.11.2024