ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ МЕТАМОРФИЗМА ВЕРХНЕПРОТЕРОЗОЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ПОЛЯРНОГО УРАЛА

О. В. Гракова

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

ovgrakova@geo.komisc.ru

Впервые на основе минералогических геотермометров проведена оценка РТ-параметров метаморфизма верхнепротерозойских отложений Харбейского антиклинория Центрально-Уральской мегазоны Полярного Урала. Установлено, что значения температуры и давления расположены в пределах 350—500 °С и 3—5 Кбар. Метаморфиты няровейской серии образовались в условиях эпидот-мусковит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации и нижней части эпидот-амфиболитовой фации, на фоне средних и повышенных температур и умеренных давлений.

Ключевые слова: верхнепротерозойские отложения, метаморфизм, геотермометры.

THERMODYNAMIC CONDITIONS OF METAMORPHISM OF UPPER PROTEROZOIC DEPOSITS OF POLAR URALS

O. V. Grakova

Institute of Geology, Komi Science Center, Ural Branch of RAS, Syktyvkar

The PT parameters of metamorphism of Upper Proterozoic deposits of the Nyarovey series of the Polar Urals were estimated for the first time on the basis of mineralogical geothermometers. Among the rocks of the Nyarovey series, two main groups of rocks are distinguished: quartz-epidote-chlorite-actinolite rocks (metabasalts) and micaceous-quartz schists (metapelites). The mineralogical analysis showed that the metabasalts are composed of the following rock-forming minerals — quartz, chlorite, albite, muscovite, amphibole, fluorapatite, epidote and accessory — zircon, titanite, rutile, magnetite, pyrite, chalcopryite, galena. In the metapelites — quartz, chlorite, albite, muscovite, biotite, potassium feldspar, calcite, fluorapatite, epidote, allanite; accessory and ore — zircon, apatite, garnet, titanite, rutile, tourmaline, ilmenite, magnetite, sphalerite, pyrite, chalcopryite. When calculating geothermometric parameters, a plagioclase-amphibole geothermometer for metabasites and a muscovite geothermometer for metapelites were used. Our estimation of pressure and temperature values in the metabasites and metapelites did not reveal any strong differences. It was established that the values of temperature and pressure were within 350—500 °C and 3—5 Kbar. At the same time, the temperature range turned out to be higher than assumed in previous studies. The metamorphic rocks of the Nyarovey series were formed under the conditions of the epidote-muscovite-chlorite subfacies of the greenschist facies and the lower part of the epidote-amphibolite facies, under medium and elevated temperatures and low pressures.

Keywords: Upper Proterozoic deposits, metamorphism, geothermometers.

Одним из важнейших аспектов исследования метаморфических образований является установление температур и давлений, при которых формировались их минеральные парагенезисы.

Верхнепротерозойские отложения няровейской серии, представленные нижней — верхнехарбейской и верхней — минисейшорской свитами [3], находятся в Центрально-Уральской структурно-формационной мегазоне Полярного Урала, в обрамлении глубокометаморфизованных пород харбейского и марункеуского комплексов [6, 7]. Возраст серии принимается условно среднерифейским по залеганию ниже мраморизованных известняков немурьюганской свиты, содержащих микрофитолиты IV (укского) комплекса рифея.

Верхнехарбейская свита распространена преимущественно в западном обрамлении Харбейско-Марункеуского антиклинорного блока-террейна в виде отдельных полос северо-северо-восточного простирания шириной 2—6 км, общей протяженностью более 50 км (рис. 1). Наиболее полно она представлена по ручью Саль-Тальба, рекам Гена-Хадата, Пэсавей-Яха, Паатарка. Свита сложена метаморфизованными терригенно-осадочными отложениями [3]: переслаивающимися слюдяно-кварц-полевошпатовыми кварцитопесчаниками и гравелитами с подчинёнными пластами и пачками хлорит-слюдяно-кварц-альбитовых, хлорит-серицит-альбит-кварцевых, графитовидных сланцев, редко линзами кварцитов и мраморов. Мощность свиты составляет 400—500 м.

Минисейшорская свита распространена в междуречье рр. Щучья—Байдарата, Бол. Хадата—Щучья и бассейне р. Лонготъеган. Свита представлена метабазами, филлитовидными, эпидот-хлорит-амфиболовыми, эпидот-альбит-хлоритовыми и магнетитовыми сланцами с подчинённым развитием углеродистых и карбонатных разностей [3]. В сланцах содержатся прослои, пласты и пачки алевролитов кварцитовидных, алевропесчаников кварц-альбитовых, иногда встречаются прослои и пласты светлых кварцитов. Наиболее полные разрезы отмечаются по рр. Орангъеган, Паатарка. Мощность свиты 1200—1400 м.

Формирование вулканогенно-осадочного материала в няровейское время, скорее всего, происходило в окраинно-океанической или окраинно-морской обстановке в умеренно-климатической зоне [3]. Породы метаморфизованы в условиях фации зеленых сланцев. По мнению А. М. Пыстина, температура метаморфизма, определенная на основе анализа минеральных парагенезисов пород, составляла 400—450 °С, давление 3—5 Кбар [4].

Актуальность проведенных исследований определяется тем, что отложения няровейской серии остаются малоизученным объектом в отношении уровня метаморфизма.

Целью данной работы является уточнение РТ-параметров метаморфизма пород няровейской серии на количественной основе с использованием минералогических геотермометров.

Рис. 1. Схематическая геологическая карта нижнего течения р. Немурьюган (Полярный Урал) (по [3]). Условные обозначения: 1—2 марункеуский комплекс: 1 — марункеуская свита, 2 — ханмейхойская свита; 3—4 — няровейская серия: 3 — верхнехарбейская свита, 4 — минисейшорская свита; 5 — слюдногогорский комплекс габбро-гипербазитовый эклогитизированный плутонический; 6 — ев-юганский комплекс мигматит-плагиогранитовый плутонический; 7 — минисейский комплекс измененных гипербазитов плутонический; 8 — харбей-собский комплекс габбро-гранодиоритовый; 9 — сядатояхинский комплекс гранитовый плутонический; 10 — сьумкеуский комплекс дунит-гарцбургитовый плутонический; 11 — войкаро-кемпирсайский комплекс тектонитов; 12 — марунский комплекс щелочно-базитовый; 13 — разрывные нарушения: а — сдвиги, b — неустановленной кинематики, с — взбросо-надвиги второстепенные, d — взбросо-надвиги главные. Точками показаны места отбора проб с номерами проб

Fig. 1. A schematic geological map of the lower reaches of the river Nemuryugan (Polar Urals) (for Dushin, 1997). Legend: 1—2 Marunkey complex: 1 — Marunkey series, 2 — Hanmeyhoys series; 3—4 — Nyarovey series: 3 — Verhneharbey series, 4 — Miniseyshor series; 5 — Slyudyanyogorsky complex gabbro-ultramafic plutonic eclogitized; 6 — Evyugansky complex migmatite plagiogranite plutonic; 7 — Miniseysky complex ultramafic plutonic; 8 — Harbeysobsky complex gabbro-granodiorite; 9 — Syadatoyahinsky complex granite plutonic; 10 — Syumkeusky complex harzburgite-dunite plutonic; 11 — Voikar-Kempirsay complex tectonites; 12 — Marunsky complex alkaline basite; 13 — faults: a — shifts, b — unknown kinematics, c — reversed strike-thrusts minor, d — reversed strike-main thrusts. Points show the sampling points with sample numbers

Методы исследования

Были проведены петрографическое и минералогическое исследования пород няровейской серии. Химические составы минералов были получены с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионной приставкой Instruments X-Max (аналитик С. С. Шевчук) в ЦКП «Геонаука» ИГ Коми НЦ УрО РАН (9 аншлифов, 150 микронзондовых анализов). Для расчета геотермометрических параметров метаморфизма применялись амфибол-плагиоклазовые геотермометры программы PetroExplorer v.3.2 (Blundy, Holland [8]; Holland, Blundy [9]; Jaques et al. [10]; Spear [11]) и мусковитовый геотермометр (Wu, Chen [12]).

Минералого-петрографическая характеристика пород

Нами изучены сланцевые толщи няровейской серии по безымянным притокам р. Ингилорьеган и вдоль руч. Нярошор и Графитовый бассейна р. Немурьеган (рис. 1). По химическому составу образования няровейской серии разделяются на орто- (метабазалты, метатифы) и паропороды (метапелиты, метаморфизованные граувакковые песчаники и алевролиты, аркозовые и кварцевые песчаники) [5].

По минеральному составу среди образований няровейской серии нами были выделены две разновидности: кварц-эпидот-хлорит-актинолитсодержащие породы и слюдисто-кварцевые сланцы.

Кварц-эпидот-хлорит-актинолитовые породы (метабазалты) имеют сланцеватую, иногда слабосланцеватую и массивную текстуру, нематолепидогранобластовую, редко порфириобластовую структуру. Они представлены эпидотом (5—40 %), амфиболом (преимущественно актинолитом) (15—35 %), альбитом (3—30 %), хлоритом (5—25 %), кварцем (1—10 %), кальцитом (0—10 %), мусковитом (1—3 %). Минералогический анализ показал, что в составе метабазалтов встречаются следующие акцессорные и рудные минералы: циркон, титанит, рутил, магнетит, пирит, халькопирит, галенит (рис. 2).

Слюдисто-кварцевые сланцы (метапелиты) по количеству темноцветных минералов делятся на меланократовые (50 % и более), мезократовые (30—50 %) и лейкократовые (менее 30 %) разновидности. Меланократовые породы включают в себя альбит-эпидот-мусковит-кварцевые, альбит-мусковит-хлорит-кварцевые, альбит-кварц-актинолитовые-мусковитовые, биотит-хлорит-эпидот-кварцевые, мусковит-альбит-биотит-эпидот-хлорит-кварцевые, кварц-мусковитовые, эпидот-мусковит-хло-

Рис. 2. Метабазиты (а) и метапелиты (б) няровейской серии (в проходящем свете): Qz — кварц, Chl — хлорит, Ab — альбит, Ms — мусковит, Act — актинолит, Ep — эпидот, Ttn — титанит

Fig. 2. Metabasites (a) and metapelites (b) of the Nyarovey series (in the transmitted light): Qz — quartz, Chl — chlorite, Ab — albite, Ms — muscovite, Act — actinolite, Ep — epidote, Ttn — titanite

Таблица 1

Химические составы и эмпирические формульные единицы плагиоклазов из метабазитов няровейской серии

Table 1

Chemical compositions and empirical formula units of plagioclases from metabasites of nyaroveyskaya series

Свита / Suite	Верхнехарьбейская / verkhnekharbeyskaya				Минисейшорская / Miniseyshorskaya				
№ пробы / Sample No	н-5-16				н-5-18		н-5-19		
№ анализа в табл. 4 Analysis No in Table 4	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	70.95	70.82	71.44	71.78	68.74	69.67	70.46	72.69	71.26
Al ₂ O ₃	20.47	20.71	20.92	20.56	20.18	20.09	20.95	20.91	20.66
Na ₂ O	11.7	11.58	11.67	11.69	11.05	11.34	11.83	11.91	11.94
CaO	н.о.	0.32	н.о.	0.28	0.28	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Сумма / Total	103.12	103.43	104.03	104.31	100.25	101.1	103.24	105.51	103.86
Si	3.01	3.00	3.01	3.02	3.01	3.01	2.98	3.02	3.00
Al	1.02	1.03	1.04	1.02	1.04	1.02	1.05	1.02	1.03
Na	0.96	0.95	0.95	0.95	0.94	0.95	0.97	0.96	0.98
Ca	н.о.	0.02	н.о.	0.01	0.01	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Ab	1.00	0.98	1.00	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00
An	—	0.02	—	0.01	0.01	—	—	—	—
Or	—	—	—	—	—	0.01	—	—	—
Свита / Suite	Минисейшорская / Miniseyshorskaya								
№ пробы Sample No	н-5-19		н-4-44			н-4-62		н-4-64	
№ анализа в табл. 4 Analysis No in Table 4	10	11	12	13	14	15	16	17	
SiO ₂	68.95	69.37	72.58	70.49	72.08	67.15	69	70.2	
Al ₂ O ₃	20.06	20.26	21.16	20.74	20.16	19.61	19.51	20.28	
Na ₂ O	11.79	11.27	12.42	12.08	11.71	11.15	11.53	11.67	
CaO	н.о.	н.о.	н.о.	0.19	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	
FeO	н.о.	0.36	0.33	0.42	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	
Сумма / Total	100.8	101.26	106.49	103.92	103.95	97.91	100.04	102.15	
Si	2.99	3.01	2.98	2.96	3.04	3.01	3.02	3.01	
Al	1.02	1.04	1.02	1.03	1.01	1.03	1.01	1.02	
Na	0.99	0.95	0.99	0.99	0.96	0.97	0.98	0.97	
Ca	н.о.	н.о.	н.о.	0.01	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	
Fe ²⁺	н.о.	0.01	0.01	0.02	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	
Ab	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	
An	—	—	—	0.01	—	—	—	—	
Or	—	—	—	—	—	—	—	—	

Примечание: н.о. — не обнаружен. Note. н.о. — not detected

рит-кварцевые, углеродистые хлорит-мусковит-кварцевые, кальцит-биотит-хлорит-мусковит-кварцевые, гранат-альбит-эпидот-хлорит-мусковит-кварцевые, гранат-хлорит-мусковит-кварцевые сланцы с полосчатой текстурой, порфиробластовой и лепидогранобластовой структурой. В их состав входят: кварц (20—60 %), мусковит (5—40 %), хлорит (0—30 %), актинолит (0—20 %), эпидот (0—20 %), альбит (1—10 %), биотит (0—10 %) и гранат (0—2 %). К мезократовым образованиям относятся кальцит-гранат-мусковит-эпидот-хлорит-кварцевые, гранат-мусковит-хлорит-альбит-кварцевые, хлорит-эпидот-мусковит-кварцевые, эпидот-альбит-хлорит-мусковит-кварцевые, хлорит-биотит-мусковит-альбит-кварцевые и мусковит-альбит-кварцевые сланцы. Породообразующие минералы представлены кварцем (50—70 %), мусковитом (10—

30 %), эпидотом (0—20 %), хлоритом (0—15 %), альбитом (0—10 %), биотитом (0—5 %), кальцитом (0—3 %), гранатом (0—2 %). К лейкократовым образованиям отнесены мусковитные кварциты, часто углеродистые, мусковит-клинозоизит-хлорит-кварцевые, хлорит-мусковит-кварцевые сланцы с содержаниями кварца (70 % и более), мусковита (0—20 %), хлорита (0—15 %), эпидота (0—10 %), с мощностью выходов 2—7 м. Эти породы плотные, с заметной сланцеватой текстурой. В них практически отсутствует плагиоклаз. В составе метapelитов присутствуют следующие аксессуарные и рудные минералы: циркон, апатит, гранат, титанит, рутил, турмалин, ильменит, магнетит, сфалерит, пирит, халькопирит (рис. 2).

Минералого-петрографическая характеристика верхнепротерозойских отложений няровейской серии пока-

Таблица 2

Химические составы и эмпирические формульные единицы амфиболов из метабазитов няровейской серии

Table 2

Chemical compositions and empirical formula units of amphiboles from metabasites of nyaroveyskaya series

Свита / Suite	Верхнехарьбейская / Verkhnekharybeyskaya				Минисейшорская / Miniseyshorskaya				
№ пробы Sample No	н-5-16				н-5-18		н-5-19		
№ анализа в табл. 4 Analysis No in Table 4	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	54.75	53.49	55.14	55.37	54.55	55.75	58.7	57.72	54.99
Al ₂ O ₃	2.59	3.79	1.87	2.41	2.54	2.08	2.8	2.51	2.72
FeO	16.81	18.18	16.92	17.3	11.55	9.39	9.74	10.77	10.59
MnO	н.о.	н.о.	0.31	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.34
MgO	13.36	12.52	13.63	13.24	16.42	18.08	18.68	18.58	17.39
CaO	12.91	12.7	13.06	12.83	11.56	11.94	12.23	13.16	12.62
Na ₂ O	н.о.	0.82	н.о.	0.37	0.63	0.87	0.88	н.о.	0.52
Сумма / Total	100.42	101.5	100.93	101.52	97.25	98.11	103.03	102.74	99.17
Si	7.78	7.58	7.80	7.78	7.84	7.81	7.82	7.77	7.69
Al ^{IV}	0.22	0.42	0.20	0.22	0.16	0.19	0.18	0.23	0.31
Al ^{VI}	0.21	0.21	0.11	0.18	0.27	0.15	0.26	0.16	0.14
Fe ³⁺	0.01	0.12	0.09	0.08	0.04	0.17	0.09	0.07	0.18
Fe ²⁺	1.98	2.04	1.91	1.95	1.23	0.93	0.99	1.14	1.06
Mn	н.о.	н.о.	0.04	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.04
Mg	2.83	2.64	2.87	2.78	3.52	3.78	3.71	3.73	3.62
Ca	1.97	1.93	1.98	1.93	1.78	1.79	1.75	1.90	1.89
Na	н.о.	0.23	н.о.	0.10	0.18	0.24	0.23	н.о.	0.14
Тип / Amf	Act	Act	Act	Act	Act	Act	Act	Act	Act
Свита / Suite	Минисейшорская / Miniseyshorskaya								
№ пробы / Sample No	н-5-19		н-4-44			н-4-62		н-4-64	
№ анализа в табл. 4 Analysis No in Table 4	10	11	12	13	14	15	16	17	
SiO ₂	54.99	56.06	56.6	55.8	54.55	54.03	53.93	54.56	
Al ₂ O ₃	2.5	2.48	1.26	2.16	1.02	1.66	1.84	3.71	
FeO	10.36	10.68	12.37	13.35	13.4	13.88	13.99	13.04	
MnO	н.о.	н.о.	0.3	0.41	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	
MgO	16.92	17.22	16.93	16.06	15.56	14.74	14.75	15.47	
CaO	12.21	11.72	12.6	12.34	12.01	11.68	11.84	12.5	
Na ₂ O	0.6	0.97	0.34	0.57	0.54	0.63	0.68	0.46	
Сумма / Total	97.58	99.13	100.4	100.69	97.08	96.62	97.03	99.74	
Si	7.79	7.81	7.87	7.77	7.88	7.86	7.82	7.66	
Al ^{IV}	0.21	0.19	0.13	0.23	0.12	0.14	0.18	0.34	
Al ^{VI}	0.21	0.22	0.08	0.12	0.06	0.15	0.13	0.27	
Fe ³⁺	0.10	0.14	0.09	0.16	0.13	0.10	0.15	0.12	
Fe ²⁺	1.13	1.10	1.35	1.39	1.49	1.59	1.55	1.41	
Mn	н.о.	н.о.	0.04	0.05	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	
Mg	3.58	3.58	3.51	3.33	3.35	3.20	3.19	3.24	
Ca	1.85	1.75	1.88	1.84	1.86	1.82	1.84	1.88	
Na	0.17	0.26	0.09	0.15	0.15	0.18	0.19	0.13	
Тип / Amf	Act	Act	Act	Act	Act	Act	Act	Act	

Примечание: н.о. — не обнаружен. Note. н.о. — not detected

Химические составы и эмпирические формульные единицы мусковитов из метапелитов няровейской серии

Таблица 3

Table 3

Chemical compositions and empirical formula units of muscovites from metapelites of nyaroveyskaya series

№ пробы / Sample No	н-4-11	н-4-66
№ анализа в табл. 5 Analysis No in Table 5	1	2
SiO ₂	50.33	50.69
TiO ₂	0.51	0.36
Al ₂ O ₃	29.95	31.53
FeO	4.91	2.93
MgO	2.15	2.55
Na ₂ O	0.68	0.48
C ₂ O	10.53	11.29
Сумма / Total	99.06	99.83
Si	3.28	3.25
Ti	0.03	0.02
Al ^{IV}	0.73	0.75
Al ^{VI}	1.57	1.63
Fe ²⁺	0.27	0.16
Mg	0.21	0.24
Na	0.09	0.06
C	0.87	0.92
Sid	0.56	0.39
Eas	0.44	0.61
Ann	—	—
Phl	—	—
Mus	Фенгит Phengite	Фенгит Phengite

зала, что по составу минеральных ассоциаций, в том числе по отсутствию низкотемпературных минералов (пиррофиллит, парагонит и др.), можно говорить о метаморфизме не ниже эпидот-мусковит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации и не выше нижней части эпидот-амфиболитовой фации [2]. Для определения максимальных термобарометрических параметров формирования выделенных парагенезисов минералов различных типов пород (метапелитов и метабазитов) и уточнения фаций метаморфизма использованы расчеты РТ-параметров метаморфизма на основе минералогических геотермометров.

Результаты микронзондовых анализов минералов, используемых для определения РТ-условий метаморфизма (плаггиоклазов, амфиболов и мусковитов), приведены в таблицах 1—3.

Расчет термодинамических условий метаморфизма

При расчете геотермометрических параметров, как уже было отмечено выше, мы использовали плаггиоклаз-амфиболовый геотермометр программы PetroExplorer v.3.2 для метабазитов, а также мусковитовый геотермометр для метапелитов. Температура метаморфизма ильменитсодержащих метапелитов, определяемая по содержанию Ti в мусковите, была рассчитана по формуле $\ln[T(^{\circ}\text{C})] = 7.258 + 0.289 \ln(\text{Ti}) + 0.158[\text{Mg}/(\text{Fe} + \text{Mg})] + 0.031 \ln[\text{P}(\text{kbar})]$ [12].

Для расчета давления нами были взяты значения 3—5 Кбар, полученные ранее по результатам анализа минеральных парагенезисов [4].

Вычисленные значения температур по минеральной ассоциации «альбит—актинолит» в метабазальтах верхнехарьейской свиты варьируют в пределах 340—500 °С, в отложениях минисейшорской свиты — 340—480 °С (табл. 4).

Таблица 4

Определение температуры в породах няровейской серии по амфибол-плаггиоклазовому геотермометру (Hbl-Pl)

Table 4

Temperature in the rocks of nyaroveyskaya series by amphibole-plagioclase geothermometer (Hbl-Pl)

Свита / Suite	Верхнехарьейская / Verkhnekharbeyskaya										Минисейшорская / Miniseyshorskaya					
№ анализа Analysis No	1	2				3	4				5				6	
По автору By author	а	а	б	в	г	а	а	б	в	г	а	б	в	г	а	
Параметры Parameters	Т, °C															
Р, кбар	3	439	499	389	383	354	427	422	384	374	346	389	397	423	384	401
	4	428	488	392	384	351	417	412	386	374	343	380	401	423	380	391
	5	418	477	394	384	348	407	402	388	374	340	370	404	423	377	382
Свита / Suite	Минисейшорская / Miniseyshorskaya															
№ анализа Analysis No	7	8	9	10	11	12	13				14	15	16	17		
По автору By author	а	а	а	а	а	а	а	б	в	г	а	а	а	а		
Параметры Parameters	Т, °C															
Р, кбар	3	395	450	465	412	396	388	434	394	396	363	364	373	398	474	
	4	385	440	454	403	386	379	424	396	396	359	355	364	388	463	
	5	376	429	444	393	377	369	414	396	396	356	346	355	379	452	

Примечание: а — по Blundy, Holland, 1990; б — по Holland, Blundy, 1994; в — по Jaques et al., 1982; г — Spear, 1981. По автору а получились все значения, по авторам б—г в анализах 1, 3, 6—12, 14—17 получились отрицательные значения.

Note: a — according to Blundy, Holland, 1990; б — according to Holland, Blundy, 1994; в — according to Jaques et al., 1982; г — Spear, 1981. All values for author a, for authors б-г negative results of analyses 1, 3, 6—12, 14—17

В качестве дополнительных исследований мы использовали также мусковитовый термометр, хотя он и используется при давлении 1.5 Кбар. По содержанию титана в мусковите, в метапелитах няровейской серии значения температур составляют 490—510 °С (табл. 5). Ранее нами

Таблица 5

Оценка температуры в сланцах няровейской серии по мусковитовому геотермометру (содержание титана в мусковите — Ms^{Ti})

Table 5

Temperature in shales of nyaroveyskaya series by muscovite geothermometer (titanium composition in muscovite — Ms^{Ti})

№ анализа / analysis No		1	2
Параметры / Parameters		Т, °С	
Р, кбар	0.5	500	486
	1	510	496

была рассчитана температура образования углеродистого вещества в углеродсодержащих сланцах минисейшорской свиты, она составляет 500 (± 50) °С [1]. Эти данные хорошо сопоставимы со значениями РТ-параметров метаморфизма, полученных на основе минералогических геотермометров.

Проведенные оценки РТ-условий для альбит-актинолитовой ассоциации показали следующие величины: от 350 до 500 °С для температуры и от 3 до 5 Кбар для давления. Мусковит образовался при температуре 490—510 °С. Известно, что образование мусковита происходит при температуре не менее 250 °С [2]. Кроме того, в породах няровейской серии отсутствуют низкотемпературные минералы. Следовательно, можно выделить среднетемпературную эпидот-мусковит-хлоритовую субфацию зеленых сланцев.

Выводы

В результате проведенных исследований были оценены значения РТ-параметров метаморфизма верхнепротерозойских отложений Полярного Урала. При расчете геотермобарометрических параметров был использован плагиоклаз-амфиболовый геотермометр для метабазальтов и мусковитовый геотермометр для метапелитов няровейской серии. Установлено, что значения давления и температуры не имеют сильного различия и расположены в пределах 350—500 °С и 3—5 Кбар. Эти расчеты согласуются с данными по температуре образования углеродистого вещества. Анализ состава минеральных ассоциаций также не противоречит оценке РТ-условий метаморфизма. При этом диапазон температур оказался шире, чем это предполагалось в предыдущих работах [4].

Таким образом, можно с достаточной степенью уверенности говорить, что метаморфиты няровейской серии образовались в условиях эпидот-мусковит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации и нижней части эпидот-амфиболитовой фации в условиях средних и повышенных температур и пониженных давлений.

Автор выражает благодарность профессору д. г.-м. н. А. М. Пыстину и к. г.-м. н. Н. С. Уляшевой за ценные рекомендации. Работа выполнена при финансовой поддержке

РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00146 мол. а. а также при поддержке Программы фундаментальных исследований РАН № 15-18-5-17.

Литература

1. Гракова О. В., Уляшева Н. С. Металлогенические особенности верхнепротерозойских углеродсодержащих сланцев няровейской серии (Полярный Урал) // Вестник института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2016. № 9 (254). С. 16—21.
2. Добрецов Н. Л., Соболев В. С., Хлестов В. В. Фации регионального метаморфизма умеренных давлений. М.: Недра, 1972. 288 с.
3. Душин В. А., Сердюкова О. П., Малюгин А. А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Издание второе. Серия Полярно-Уральская. Листы Q-42-I, II. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 340 с.
4. Литосфера Тимано-Североуральского региона: геологическое строение, вещество, геодинамика, минерагения / А. М. Пыстин, Л. В. Махлаев, А. И. Антошкина и др.: Сыктывкар: Геопринт, 2008. 234 с.
5. Уляшева Н. С., Гракова О. В. Первичный состав пород няровейской серии (Полярный Урал) // Вестник института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2016. № 2. С. 24—35.
6. Уляшева Н. С. Метабазиты харьбейского комплекса. Отв. ред. А. М. Пыстин. Сыктывкар, 2012. 98 с.
7. Уляшева Н. С. Термодинамическая эволюция метаморфизма пород харьбейского комплекса (Полярный Урал) // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2011. № 9. С. 2—6.
8. Blundy J. D., Holland T. J. B. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer // Contrib. Mineral. and Petrol., 1990. V. 104, P. 208—224.
9. Holland T., Blundy J. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry // Contrib. Mineral. Petrol., 1994. V. 116. P. 433—447.
10. Jaques A. L., Blake D. H., Donchak P. J. T. Regional metamorphism in the Selwyn Range area, North-west Queensland // BMR Journal of Australian Geology and Geophysics, 1982. V. 7, №3. P. 181—196.
11. Spear F. S. Amphibole-plagioclase equilibria: a empirical model for the relation albite + tremolite = edenite + quartz // Contrib. Mineral. and Petrol., 1981. V. 77, № 4. P. 355—364.
12. Wu C. M., Chen H. X. Calibration of a Ti-in-muscovite geothermometer for ilmenite- and Al_2SiO_5 -bearing metapelites // Lithos, 2015. V. 212—215. P. 122—127.

References

1. Grakova O. V., Ulyasheva N. S. Metallogenicheskie osobennosti verhneproterozoiskih uglerodsoderzhashchih slantsev nyaroveiskoi serii (Polyarnyi Ural) (Metallogeny of carboniferous shales of the Nyarovey series (Polar Urals)). Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2016, No. 9 (254), pp. 16—21.
2. Dobretsov N. L., Sobolev V. S., Khlestov V. V. Fatsii regional'nogo metamorfizma umerennykh davlenii (Facies of regional metamorphism of moderate pressures). Moscow: Nedra, 1972, 288 p.
3. Dushyn V. A., Serdyukova O. P., Malyugin A. A. et al. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1:200000 (State Geological Russian Federation map scale of 1: 200.000). Second Edition. Series Polar Urals. Sheets Q-42-I, II. Explanatory letter. St. Petersburg: VSEGEI, 2007, 340 p.

4. Litosfera *Timano-Severouralskogo regiona: geologicheskoe stroenie, veschestvo, geodinamika, minerageniya* (Lithosphere of the Timan-North Urals region: geological structure, matter, geodynamics, minerageny) A. M. Pystin, L. V. Makhlaev, A. I. Antoshkina and others: Syktyvkar: Geoprint, 2008, 234 p.
5. Ulyasheva N. S., Grakova O. V. *Pervichnyi sostav porod nyaroveiskoi serii (Polyarnyi Ural)* (Primary composition of rocks of the nyarovey series (Polar Urals)) Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2016, No. 2, pp. 24—35.
6. Ulyasheva N. S. *Metabazity harbeiskogo kompleksa* (Metabasites of the Harbey complex). Ed. A. M. Pystin. Syktyvkar, 2012, 98 p.
7. Ulyasheva N. S. *Termodinamicheskaya evolyutsiya metamorfizma porod harbeiskogo kompleksa (Polyarnyi Ural)* (The thermodynamic evolution of the metamorphism of the rocks of the Harbey complex (the Polar Urals)) Vestnik IG Koomi SC UB RAS, Komi Science Centre, 2011. No. 9, pp. 2—6.
8. Blundy J. D., Holland T. J. B. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. *Contrib. Mineral. and Petrol.*, 1990, V. 104, pp. 208—224.
9. Holland T., Blundy J. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1994, V. 116, pp. 433—447.
10. Jaques A. L., Blake D. H., Donchak P. J. T. Regional metamorphism in the Selwyn Range area, North-west Queensland. *BMR Journal of Australian Geology and Geophysics*, 1982. V. 7, № 3, pp. 181—196.
11. Spear F. S. Amphibole-plagioclase equilibria: a empirical model for the relation albite + tremolite = edenite + quartz. *Contrib. Mineral. and Petrol.*, 1981. V. 77, No. 4, pp. 355—364.
12. Wu C. M., Chen H. X. Calibration of a Ti-in-muscovite geothermometer for ilmenite- and Al_2SiO_5 -bearing metapelites. *Lithos*, 2015, V. 212—215, pp. 122—127.