

Е. О. Пиндюрина¹, А. Б. Кольцов²

КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ СЛАНЦЫ КЕЙВСКОГО МЕТАМОРФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА (КОЛЬСКИЙ П-ОВ): МИНЕРАЛЬНЫЕ ПАРАГЕНЕЗИСЫ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ

¹ ООО «Уральское горно-геологическое агентство», Российская Федерация, 450097, г. Уфа, бул. Х. Давлетшиной, 11

² Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

Среди кристаллических сланцев Кейвского метаморфического комплекса выделены кианит-ставролит-двуслюдяные, хлорит-мусковит-кианит-ставролитовые, гранат-ставролит-хлоритовые, гранат-двуслюдяные, а также мусковитовые кварциты. Протолитом последних служили гидрослюдистые песчаники и аркозы, глиноземистых сланцев с кианитом — гидрослюдистые и каолиновые глины, гранатосодержащих сланцев — полимиктовые песчаники и граувакки. В работе приведены результаты определения термодинамических параметров метаморфизма с помощью комплекса методов классической и мультиравновесной термобарометрии и численного моделирования. Наиболее вероятные оценки составляют $T = 540\text{--}620^\circ\text{C}$ и $P = 5,2\text{--}6$ кбар. Анализ минеральных парагенезисов сланцев кейвского комплекса показал, что они метаморфизованы в условиях кианит-хлорит-ставролитовой субфации эпидот-амфиболитовой фации и кианит-мусковит-биотит-ставролитовой субфации амфиболитовой фации. К первой относятся хлоритосодержащие, ко второй — биотитосодержащие сланцы. Границей между этими фациями служит равновесие $Ms + St + Chl = Ky + Bt + H_2O$, положение которого определено при $T = 580^\circ\text{C}$. Библиогр. 16 назв. Ил. 7. Табл. 8.

Ключевые слова: метаморфизм, кристаллический сланец, парагенезис, геотермобарометрия, численное моделирование.

SCHISTS OF KEIV METAMORPHIC COMPLEX (KOLA PENINSULA): MINERAL PARAGENESIS AND FORMATION CONDITIONS

Е. О. Pindyurina¹, А. В. Kol'tsov²

¹ LLC «Ural Mining and Geological Agency», 11, bul. Kh. Davletshinoy, Ufa, 450097, Russian Federation

² St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 7/9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

The main petrographic varieties of schists in Keiv metamorphic complex are represented by kyanite-staurolite-biotite-muscovite, chlorite-muscovite-kyanite-staurolite, garnet-staurolite-chlorite, garnet-biotite-muscovite schists, and muscovite quartzites. A protolith for the latter were hydromica quartz sandstones and arkoses, while for kyanite-bearing aluminous schists it was hydromicaceous and kaolinite clays, and for garnet-bearing schists it was polymictic sandstones and greywacks. Thermodynamic parameters of metamorphism are evaluated by means of classic, multiequilibrium thermobarometry and numerical simulation. The most likely estimates are $540\text{--}620^\circ\text{C}$ and $5,2\text{--}6$ kbar. The analysis of mineral parageneses in the schists from Keiv complex proves that chlorite-bearing varieties of these rocks can be related to the kyanite-chlorite-staurolite subfacies of the epidote-amphibolite facies, while biotite-bearing varieties — to the kyanite-muscovite-biotite-staurolite subfacies of the amphibolite facies. The equilibrium $Ms + St + Chl = Ky + Bt + H_2O$ is outlined as the boundary between these facies, and its position is estimated at $T = 580^\circ\text{C}$. Refs 16. Figs 7. Tables 8.

Keywords: metamorphism, schist, paragenesis, geothermobarometry, numerical simulation.

Алюминий — один из самых востребованных металлов современной промышленности. Доля России в мировой добыче его руд в 2007 г. составляла 3,7%. Однако бедная бокситами Россия располагает богатыми запасами кианитовых руд. Кейвский метаморфический комплекс на Кольском полуострове содержит около 95%

балансовых запасов кианита РФ, что существенно превышает суммарные запасы зарубежных стран. Кроме того, Кейвы — известное месторождение уникального коллекционного кианита.

Перспективы освоения и разработки месторождений кианита в Кейвах напрямую связаны с всесторонним изучением генезиса этих пород, условиями их формирования.

Кейвский метаморфический комплекс начал детально изучаться в середине XX в. Тогда И. В. Бельковым были впервые получены сведения о первичном составе пород этого комплекса и показано, что химический состав метаморфических пород соответствует составу глин, песчанистых глин, глинистых песчаников, песчаников, кварцитов и мергелей, а богатые кианитом сланцы образовались из высокоглиноземистых пород в результате метаморфизма [1]. В дальнейшем было установлено, что значительная часть кианитовых сланцев Кейвского комплекса представляет собой кислотные метасоматиты разной степени изменения [2].

Метаморфические сланцы Кейвского комплекса характеризуются значительным разнообразием минерального состава и количественных соотношений метаморфических минералов: кианита, мусковита, биотита, хлорита, ставролита, граната, роговой обманки. Они описывались как глинозёмистые, кианитовые, кианит-ставролитовые, слюдяные сланцы. При этом оставалось неясным, какие из этих различий обусловлены различием состава протолита, а какие — разной степенью метаморфизма. Кроме того, не удавалось получить надёжные оценки P-T-параметров метаморфизма для основной части кейвских сланцев, не содержащих необходимого для традиционной геотермобарометрии набора минералов переменного состава.

Это определяет необходимость более детального изучения пород Кейвского метаморфического комплекса. Помимо петрографического описания и минералогических особенностей в статье приводятся результаты парагенетического анализа минеральных ассоциаций пород Кейвского комплекса. Впервые применен комплекс геотермобарометрических методов, который позволил определить термодинамические параметры метаморфизма как для пород с минералами переменного состава — гранатом, биотитом, роговой обманкой, так и для глинозёмистых сланцев — породы без граната, но с кианитом, ставролитом и мусковитом.

Геологическая позиция Кейвского метаморфического комплекса

Кейвский метаморфический комплекс входит в состав Кейвского террейна, который представляет собой одну из наиболее крупных на Кольском полуострове структур и располагается в центральной его части. В пределах террейна выделяются: предполагаемый фундамент, представленный тоналит-тронджемитовой ассоциацией (ТТГ), супракрустальный комплекс метаморфических пород, имеющий сложное покровно-надвиговое строение и включающий высокоглинозёмистые сланцы кейвской свиты, комплекс щелочных гранитов, иногда ассоциирующихся с ультраосновными и щелочными породами. Тектонические границы террейна контролируют размещение базит — гипербазитовых интрузий, среди которых расслоенные плутоны Панских и Федоровских тундр.

В структуре Кейвского комплекса выделяются нижний лебяжинский покров, сложенный метавулканитами кислого и среднего состава, преобразованными

в гнейсы, и верхний кейвский покров, представленный различными парасланцами. По данным [1], Кейвский комплекс в районе Центрального водораздела занимает положение синклинория первого порядка в мегасинклинорной структуре восточной части Кольского полуострова. Он образован системой крупных сопряженных складок, вытянутых в основном согласно общему направлению простирания оси синклинория СЗ 290–300°, частично или полностью замкнутых и отделенных друг от друга антиклинальными перегибами. Северное крыло синклинория почти на всем своем протяжении опрокинута к югу (углы падения 60–80°). Оно имеет в плане более или менее прямолинейную границу, круто меняющую направление в районе западных Кейв, а также в участках тундры Нусса и тундры Манюк.

Возраст пород Кейвского комплекса определялся многими исследователями. Все оценки позволяют однозначно утверждать, что он почти целиком сложен архейскими образованиями и его обособление произошло в конце неоархея. В районе хр. Серповидный известен небольшой останец супракрустальных образований нижнего протерозоя [3], которые сопоставляются с породами умбинской свиты ятулия палеопротерозойского рифта Имандра-Варзуга [4].

По данным [5], U-Pb-возраст по цирконам из метавулканитов лебяжинской свиты составляет 2,87 млрд лет. Возраст щелочных гранитов и сиенитов оценивается как архейский (2,61–2,76 млрд лет). U-Pb-возраст по цирконам для габбро-анортозитовых интрузий составляет 2,66–2,68 млрд лет. Оценки возрастов метаморфических событий следующие: ранний архейский метаморфизм — 2,68 млрд лет, затем раннепротерозойский (раннекарельский) метаморфизм — 2,2–2,3 млрд лет, еще более поздний свекофеннский метаморфизм (1,7 млрд лет) датируется U-Pb-методом по сфену и Rb-Sr-методом по метаморфическим минералам (амфибол, калишпат) и породе из нижней части разреза лебяжинской серии. В работе [2] возраст покровно-надвиговых структур и соответственно возраст метаморфизма оценивается в 1,72–1,76 млрд лет. Такие же оценки получены по U-Pb-системе ставролита [6].

Петрографическая характеристика метаморфических пород

Объектом исследования в данной работе являются породы кейвского покрова, как наиболее разнообразные по минеральному составу и пригодные для реконструкции условий метаморфизма. Метаморфические породы здесь представлены различными глиноземистыми кианит-ставролитовыми сланцами с мусковитом, хлоритом или биотитом, гранат-ставролит-хлоритовыми, гранат-двуслюдянными сланцами, кварцито-сланцами. Встречаются маломощные тела амфиболовых сланцев и гранатовых амфиболитов, представляющие собой метаморфизованные силлы.

Глиноземистые сланцы с переменным количеством кианита и ставролита в ассоциации с мусковитом, хлоритом или биотитом — породы с пойкилопорфиروبластовой, реже порфиروبластовой структурой и массивной текстурой. Основная масса породы, как правило, сложена кварцем и плагиоклазом на 30–40% до 80% с переменным количеством мусковита, биотита, хлорита. Плагиоклаз присутствует двух типов: первый — не содержит включений, второй — содержит пойкилитовые включения зерен кварца, чешуек мусковита, «сотовый», часто образует полисинтетические двойники и серицитизирован. Мусковит в породе встречается от мелких чешуек размерами от долей мм до крупных призматических чешуек в 1,5 мм и волокни-

стых агрегатов, развивающихся по границам порфиробластов. Хлорит встречается в виде мелких чешуек и в виде агрегатов неправильной формы. Имеет бледную зеленовато-серую окраску. Очень часто хлорит и мусковит в породе развиваются по порфиробластам ставролита. Биотит в глинозёмистых сланцах встречается нечасто. В некоторых образцах наблюдается присутствие волокнистого агрегата силлиманита в ассоциации с биотитом.

Порфиробласты представлены кианитом и ставролитом. Кианит часто в виде вытянутых призматических кристаллов, зерен неправильной формы, реже мелких зерен размерами в среднем 2 мм, иногда достигающих до 6 мм по удлинению. Ставролит в виде крупных кристаллов неправильной и изометричной формы размерами до 8 мм. Часто кианит и ставролит содержат включения зерен кварца, чешуек мусковита и хлорита, а также углистое вещество.

Иногда встречаются порфиробласты граната в виде обломков или зерен округлой формы размером не более 1 мм. Зачастую имеют пойкилитовые включения зерен кварца и чешуек мусковита.

Гранат-ставролит-хлоритовые сланцы — породы с пойкилопорфиробластовой структурой и гранобластовой структурой основной ткани. Основная масса породы представлена кварцем и хлоритом. Порфиробласты ставролита представлены зернами неправильной формы, реже идиоморфными кристаллами размером до 2 мм. Содержат значительное количество пойкилитовых включений кварца. Порфиробласты граната часто имеют субидиоморфные формы, размерами до 5 мм. Содержат незначительное количество включений кварца. Отмечается значительный объем порфиробластов — до 50%. В целом по породе распылено углистое вещество.

Гранат-двуслюдяные сланцы — породы с пойкилопорфиробластовой структурой и лепидогранобластовой структурой основной ткани. Минералы основной ткани — кварц, плагиоклаз в подчиненном значении, мусковит, биотит, хлорит, в единичных зернах встречается калиевый полевой шпат. Мусковит, как правило, в виде тонких вытянутых чешуй размером до 1,5 мм, а также в виде призматических кристаллов размером до 0,6 мм. Биотит имеет пластинчатую форму с размерами кристаллов до 1,5 мм. Для него характерен плеохроизм от светло-коричневого до коричнево-бурого. Хлорит в породе представлен в очень малых количествах в виде тонких лейст светло-зеленой, почти бесцветной окраски. Порфиробласты граната часто в виде изометричных зерен до 3–3,5 мм в диаметре либо в виде зерен неправильной формы. Содержат значительное количество пойкилитовых включений кварца.

Кварцито-сланцы, мусковитовые кварциты — мелкозернистые породы, почти полностью сложенные кварцем. Структура породы — гранобластовая, текстура массивная, иногда сланцеватая (обусловленная вытянутостью зерен кварца и тонких лейст мусковита в одном направлении). Зерна кварца имеют форму от остроугольной до округлой, размер в среднем составляет 0,2 мм. Иногда наблюдаются зубчатые границы зерен. В качестве второстепенного минерала здесь выступают мусковит и реже хлорит. Они присутствуют в породе в виде тонких вытянутых чешуек.

Гранатовые амфиболиты и амфиболовые сланцы — породы с пойкилопорфиробластовой (для гранатовых амфиболитов) и нематогранобластовой структурой (для амфиболовых сланцев). Текстура — массивная.

Для гранатовых амфиболитов характерно наличие порфиробластов и основной ткани. Минеральный состав основной ткани — кварц, плагиоклаз, роговая обманка,

Таблица 1. Состав пород кейвской свиты, масс.%

Компоненты	Мусковит-кварциты и кварцито-сланцы		Гранат-ставролит-хлоритовые сланцы				Гранат- вуслюдяные сланцы	
	Б906	Б927-1	Б910-3	Б910-4	Б910-5	Б911-4	Б908-2	
SiO ₂	92,30	92,09	61,58	64,35	61,01	60,27	74,41	
TiO ₂	0,18	0,07	1,85	1,95	1,62	2,06	0,46	
Al ₂ O ₃	4,41	4,44	19,41	16,42	19,67	20,42	10,2	
Fe ₂ O ₃	0,19	0,33	3,84	3,53	4,32	4,53	1,09	
FeO	0,53	0,53	6,7	6,61	8,03	5,31	5,38	
MnO	0,02	0,01	0,21	0,28	0,28	0,21	0,15	
MgO	0,03	0,43	1,43	0,34	1,05	1,73	0,22	
CaO	0,27	0,53	2,33	1,78	1,78	1,54	2,55	
Na ₂ O	0,27	0,11	0,05	0,13	0,05	0,05	1,13	
K ₂ O	0,77	1,11	0,05	0,08	0,05	0,1	2,94	
P ₂ O ₅	0,1	0,06	1,21	1,74	1,06	1,11	0,14	
SO ₃	0,02	0,01	0,12	0,04	0,05	0,046	0,02	
п.п.п.	0,50	0,46	1,17	1,61	0,71	1,33	0,82	
Сумма	99,59	100,18	99,95	98,86	99,68	98,71	99,51	
Компоненты	Глиноземистые сланцы							
	с биотитом				с хлоритом			
	Б879-2	Б897-4	Б901-1	Б962-2	Б881-1	Б892-9	Б893-2	Б914
SiO ₂	54,74	58,22	51,46	56,29	42,50	43,91	59,31	66,10
TiO ₂	1,59	1,86	1,95	1,60	1,50	2,12	1,83	1,40
Al ₂ O ₃	31,67	27,91	36,98	26,80	40,32	44,85	24,45	22,12
Fe ₂ O ₃	5,73	2,00	0,89	5,84	8,55	1,14	2,79	3,20
FeO	2,65	1,60	1,31	—	2,10	1,77	2,34	1,57
MnO	0,08	0,02	0,02	0,04	0,11	0,02	0,04	0,05
MgO	1,14	0,40	0,13	2,31	1,33	0,39	0,19	0,49
CaO	0,38	1,49	2,19	1,71	—	1,88	0,80	0,67
Na ₂ O	0,43	2,32	3,07	1,64	0,54	2,00	1,63	0,86
K ₂ O	0,45	1,73	0,58	2,37	0,58	0,63	2,08	0,86
P ₂ O ₅	0,06	0,16	0,16	0,10	0,16	0,29	0,16	0,10
SO ₃	0,01	0,01	0,01	—	0,02	0,07	0,01	0,03
п.п.п.	0,77	2,14	1,02	0,51	1,23	1,26	3,67	1,32
Сумма	99,70	99,86	99,77	99,21	98,94	100,33	99,30	98,77

хлорит. Кварц в породе имеет остроугольную форму и размеры в среднем 0,3 мм. В подчиненном значении присутствует плагиоклаз в виде зерен неправильной формы, их размеры составляют до 0,5 мм. Роговая обманка в виде призматических кристаллов размерами до 0,5 мм по удлинению плеохроирует от светло-зеленого до зеленого и сине-зеленого. Хлорит присутствует в незначительных количествах как вторичный минерал, имеет зеленоватую окраску и размеры до 0,4 мм. Порфириобласты граната встречаются в виде идиоморфных кристаллов и в виде зерен неправильной формы.

В амфиболовых сланцах наблюдается возрастание количества плагиоклаза. Роговая обманка в виде вытянутых призматических кристаллов размерами до 1,5 мм.

Редко встречаются зерна клиноцоизита, имеющие изометричную форму и размеры в среднем 0,2 мм.

Точки составов метаморфических пород (табл. 1), нанесенные на дискриминационную диаграмму А. А. Предовского [7], распадаются на три группы, попадающие в поля: 1) полевошпатовых и гидрослюдистых кварцевых песчаников и аркозов; 2) полимиктовых песчаников и граувакк; и 3) гидрослюдистых и каолинистых глин (рис. 1). Видно, что первую группу образуют составы мусковитовых кварцитов и кварцито-сланцев (парагенезис *Qtz Ms Chl*). Вторую группу образуют составы гранат-ставролит-хлоритовых и гранат-двуслюдяных сланцев (парагенезисы *Gr St Qtz Chl* и *Gr Qtz Ms Bt*), а третью — составы глиноземистых сланцев с хлоритом или биотитом (парагенезисы *Ky St Qtz Pl Ms Chl* и *Ky St Qtz Pl Ms Bt*). Отсюда следует, что ряд

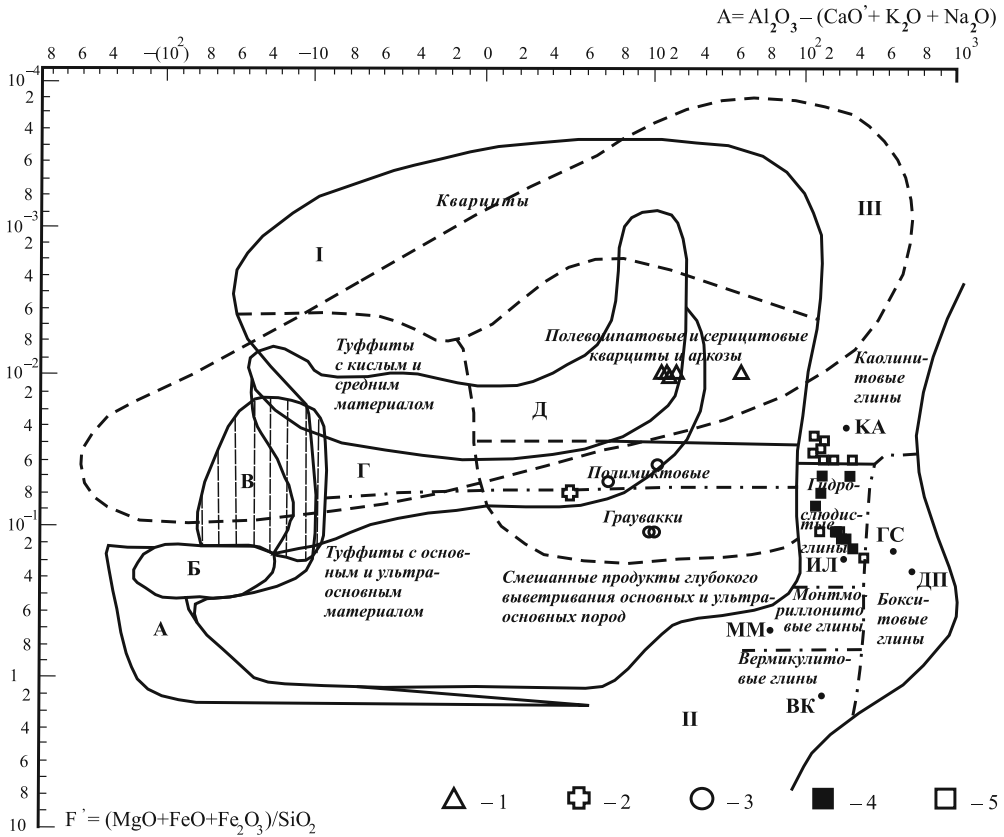


Рис. 1. Фрагмент диаграммы А. А. Предовского [7] для реконструкции первичного состава силикатных вулканогенных, вулканогенно-осадочных и терригенных пород

1 — кварцито-сланцы и мусковитовые кварциты; 2 — гранат-двуслюдяные сланцы; 3 — гранат-ставролит-хлоритовые сланцы; 4 — глиноземистые сланцы с хлоритом; 5 — глиноземистые сланцы с биотитом.

Поля осадочных и вулканогенно-осадочных пород: I — зернистых осадочных и смешанных; II — пелитовых; III — силицитовых.

Точки составов некоторых пород и минералов: КА — каолин; ИЛ — иллит (гидрослюда); ММ — монтмориллонит; ВК — вермикулит; ГС — гиббсит; ДП — диаспор.

Поля изверженных пород: А — ультрабазитов; Б — базитов; В — сиенитов, щелочных сиенитов; Г — диоритов; Д — гранитов (все интрузивные породы с их эффузивными аналогами).

различий петрографических типов пород Кейвского комплекса обусловлен разным исходным составом протолита.

Составы амфиболитов, для которых характерно низкое содержание щелочей ($(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) < 1,6$ вес.%), нанесенные на диаграмму TAS для магматических эффузивных пород, соответствуют андези-базальтам.

Состав минералов

Микрозондовые исследования состава минералов из гранатовых амфиболитов и гранат-двуслюдяных сланцев выполнены на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6510LA с энерго-дисперсионной приставкой JED-2200 методом EDS в ИГГД РАН, аналитик О. Л. Галанкина. Кроме того, для характеристики составов минералов из гранат-ставролит-хлоритовых и глиноземистых сланцев использованы неопубликованные данные, предоставленные Т. П. Щегловой и Е. О. Самуйловой.

Гранаты — часто встречающийся минерал в породах Кейвского комплекса. По составу гранаты из различных типов пород отвечают альмандину. Однако в гранатах из гранат-двуслюдяных сланцев с микроклином (образцы Б910–2 и Б967) наблюдается значительное увеличение доли гротуларового и спессартинового минала соответственно (табл. 2). Наименее железистыми с $\text{Fe} = 1,9 - 2,1$ ф. ед. являются гранаты из гранатовых амфиболитов.

Мусковит — один из наиболее распространенных минералов в породах Кейвского комплекса. Химический состав изученных мусковитов приведен в табл. 3. Этот минерал присутствует практически во всех изученных парагенезисах, за исключением гранатовых амфиболитов. Примечательным является то, что мусковиты кейвских сланцев содержат значительную долю парагонитовой составляющей (в глиноземистых сланцах до 0,37 ф. ед. Na). Они также широко варьируют по отношению Al/K, которое увеличивается от гранат-двуслюдяных сланцев к глиноземистым сланцам.

Составы *плаггиоклазов* широко варьируют в зависимости от типа пород: наиболее кислыми оказались плаггиоклазы из гранат-двуслюдяных сланцев — An_{17-22} , а наиболее основными из гранатовых амфиболитов, где плаггиоклаз представлен битовнитом до почти чистого анортита An_{80-95} . В гранат-двуслюдяных сланцах с микроклином плаггиоклаз представлен андезином An_{32-42} . Наибольшие вариации по составу характерны для плаггиоклаза из глиноземистых сланцев: от An_{13} до An_{47} .

Биотиты по химическому составу делятся на три группы (табл. 4). Первая — биотиты из гранат-двуслюдяных сланцев с микроклином (обр. Б910–2 и Б967) представлены аннитом. Для них характерны низкие значения $\text{Al}^{\text{VI}} < 0,5$ ф. ед. и $X_{\text{Mg}} < 0,25$. Вторая группа — биотиты из гранат-двуслюдяных и гранат-ставролит-хлоритовых сланцев, они имеют аннит-флогопитовый состав (значения Al^{VI} и X_{Mg} в пределах 0,4–0,5). В третьей группе — биотиты глиноземистых сланцев. Они широко варьируют по глиноземистости ($\text{Al}^{\text{VI}} = 0,3 - 0,7$ ф. ед.) и отвечают ряду флогопит — истонит.

Хлориты по минеральному составу однотипны и отвечают составам рипидолита и пикнохлорита, кроме наиболее железистого хлорита из гранат-двуслюдяного сланца с микроклином (табл. 5). В последнем случае хлорит представлен псевдотюрингитом. Для хлорита из глиноземистых сланцев характерно высокое содержание Al^{VI} и Al^{IV} (в сумме до 3 ф. ед.).

Таблица 2. Составы гранатов из пород Кейвского метаморфического комплекса (окислы в масс.%, катионы в формульных единицах)

Компоненты	Гранатовый амфиболит				Гранат-двуслюдяные сланцы					
	Б883-2	Б902-7	Б979-13*	Б886-3*	Б882-2	Б887-3	Б968-1*	Б910-2	Б967*	
SiO ₂	37,10	37,56	36,99	38,10	37,16	37,02	36,62	37,21	36,46	
TiO ₂	—	—	0,06	—	—	—	0,03	—	—	
Al ₂ O ₃	21,16	21,73	20,43	21,43	20,83	22,30	19,85	21,19	20,04	
FeO	28,47	30,82	30,76	29,21	37,90	32,91	33,37	28,10	27,04	
MnO	2,17	2,30	3,07	1,51	0,14	1,69	7,68	0,46	10,58	
MgO	1,59	2,98	3,37	3,89	1,03	2,83	0,06	0,45	0,33	
CaO	9,51	4,60	5,24	5,82	2,93	3,25	2,35	12,58	5,51	
Cr ₂ O ₃	—	—	0,08	0,05	—	—	0,05	—	0,04	
Сумма	100,00	99,99	100,00	100,01	99,99	100,00	100,01	99,99	100,00	
Si	2,97	2,99	2,97	3,01	3,02	2,96	3,02	2,98	2,99	
Ti	—	—	0,00	—	—	—	0,00	—	—	
Al	2,00	2,04	1,94	2,00	2,00	2,10	1,93	2,00	1,94	
Fe	1,91	2,05	2,07	1,93	2,58	2,20	2,30	1,88	1,85	
Mn	0,15	0,16	0,21	0,10	0,01	0,11	0,54	0,03	0,74	
Mg	0,19	0,35	0,41	0,46	0,13	0,34	0,01	0,05	0,04	
Ca	0,82	0,39	0,45	0,49	0,26	0,28	0,21	1,08	0,48	
Cr	—	—	0,01	0,00	—	—	0,00	—	0,00	
Сумма	8,03	7,99	8,06	7,99	8,00	7,99	8,01	8,02	8,04	

Компоненты	Гранат-ставролит-хлоритовые сланцы							Глиноземистые сланцы			
	Б882-9*	Б901-10*	Б910-3*	Б910-5*	Б911-3*	Б911-5*	Б911-6*	Б887-1*	Б887-2*	Б887-4*	
SiO ₂	37,16	36,36	37,92	37,91	37,35	36,18	35,85	36,88	37,10	36,84	
TiO ₂	—	—	0,17	0,07	0,03	—	0,11	0,03	—	0,03	
Al ₂ O ₃	20,85	20,58	21,29	20,99	21,27	20,62	20,42	20,58	20,58	20,34	
FeO	35,18	37,52	31,05	31,01	30,84	36,84	34,74	33,89	32,75	32,72	
MnO	3,09	3,14	4,53	4,60	6,30	3,16	4,99	2,77	3,60	5,06	
MgO	0,35	0,85	1,32	1,36	2,02	2,80	2,28	2,00	2,63	1,23	
CaO	3,38	1,55	3,73	4,06	2,19	0,41	1,61	3,87	3,34	3,78	
Cr ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Сумма	100,01	100,00	100,01	100,00	100,00	100,01	100,00	100,02	100,00	100,00	
Si	3,03	2,99	3,04	3,05	3,01	2,96	2,94	3,00	3,00	3,00	
Ti	—	—	0,01	0,00	0,00	—	0,01	0,00	—	0,00	
Al	2,00	1,99	2,01	1,99	2,02	1,99	1,97	1,97	1,96	1,95	
Fe	2,40	2,58	2,08	2,09	2,08	2,52	2,38	2,30	2,21	2,23	
Mn	0,21	0,22	0,31	0,31	0,43	0,22	0,35	0,19	0,25	0,35	
Mg	0,04	0,10	0,16	0,16	0,24	0,34	0,28	0,24	0,32	0,15	
Ca	0,30	0,14	0,32	0,35	0,19	0,04	0,14	0,34	0,29	0,33	
Cr	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Сумма	7,98	8,02	7,93	7,95	7,97	8,07	8,07	8,04	8,03	8,01	

Примечание: * — данные Т. П. Щелковой (ИГГД РАН); без звездочки — собственный материал.

Таблица 3. Составы мусковитов из пород Кейвского метаморфического комплекса (окислы в масс.%, катионы в формульных единицах)

Компоненты	Гранат-двуслюдяные сланцы				Глиноземистые сланцы						
	Б882-2	Б887-3	Б910-2	Б880-6*	Б885-3**	Б892-4**	Б892-9**	Б892-10**	Б901-1**		
SiO ₂	48,84	48,54	47,55	49,89	50,10	49,73	48,54	48,27	47,46		
TiO ₂	0,27	0,49	—	0,79	0,70	0,37	0,41	0,75	1,44		
Al ₂ O ₃	38,78	37,62	33,54	35,72	36,33	36,99	36,09	36,07	36		
FeO	0,93	0,95	5,48	0,77	0,50	0,36	0,45	0,64	0,64		
MnO	—	—	—	0,09	—	—	0,02	0,05	0,07		
MgO	0,67	0,88	0,29	0,68	0,79	0,57	0,75	0,75	0,07		
CaO	—	—	0,04	—	—	—	—	—	—		
Na ₂ O	2,11	1,15	0,10	2,49	2,26	3,04	2,13	1,79	1,42		
K ₂ O	8,40	10,37	11,67	9,15	6,38	6,15	7,33	8,48	9,35		
Cr ₂ O ₃	—	—	—	—	0,08	—	0,05	0,09	—		
BaO	—	—	1,34	0,41	—	—	—	—	—		
Сумма	100,00	100,00	100,01	99,99	97,14	97,21	95,77	96,89	96,45		
Si	3,05	3,06	3,12	3,15	3,18	3,15	3,14	3,12	3,08		
Ti	0,01	0,02	—	0,04	0,03	0,02	0,02	0,04	0,07		
Al(IV)	0,95	0,94	0,88	0,85	0,82	0,85	0,86	0,88	0,92		
Al(VI)	1,90	1,86	1,71	1,81	1,90	1,92	1,90	1,87	1,83		
Fe	0,05	0,05	0,30	0,04	0,03	0,02	0,02	0,04	0,04		
Mn	—	—	—	0,01	—	—	0,00	0,00	0,00		
Mg	0,06	0,08	0,03	0,06	0,08	0,05	0,07	0,07	0,07		
Ca	—	—	0,00	—	—	—	—	—	—		
Na	0,26	0,14	0,01	0,30	0,28	0,37	0,27	0,22	0,18		
K	0,67	0,84	0,98	0,74	0,52	0,50	0,61	0,70	0,77		
Cr	—	—	—	—	0,00	—	0,00	0,01	—		
Ba	—	—	0,03	0,01	—	—	—	—	—		
Σ (VI)	2,02	2,01	2,04	1,96	2,04	2,01	2,01	2,03	2,01		
Σ (XII)	0,93	0,98	1,02	1,05	0,80	0,87	0,88	0,92	0,95		

Примечание: * — данные Т. П. Щегловой (ИГГД РАН); ** — данные Е. О. Самуйловой (СПбГУ); без звездочки — собственный материал.

Таблица 4. Составы биогитов из пород Кейвского метаморфического комплекса (окислы в масс.%, катионы в формульных единицах)

Компоненты	Гранат-двуосновные сланцы						Линоземистые сланцы					
	Б882-2	Б887-3	Б910-2	Б967-1*	Б882-1*	Б968-1*	Б880-6*	Б885-3**	Б887-1*	Б887-2*	Б887-4*	Б901-1**
SiO ₂	38,52	37,67	35,44	36,29	39,48	34,82	37,99	41,29	38,77	38,71	38,89	38,72
TiO ₂	1,20	1,79	2,15	2,06	1,35	3,82	2,06	1,43	2,20	1,79	1,95	2,25
Al ₂ O ₃	19,29	20,57	19,30	17,19	19,58	17,81	20,12	22,29	20,36	20,46	19,92	20,65
FeO	21,48	17,65	29,69	32,57	22,21	33,89	17,56	8,91	19,45	19,39	20,64	13,39
MnO	0,07	0,24	0,21	0,64	—	0,45	0,09	0,10	0,32	0,07	0,17	0,04
MgO	9,36	11,34	2,91	2,91	9,52	0,46	13,15	15,04	10,34	11,38	10,00	13,42
CaO	0,07	0,32	—	0,16	—	—	—	—	0,03	—	—	—
Na ₂ O	0,14	0,32	—	0,83	—	0,47	0,62	0,87	—	—	—	0,59
K ₂ O	9,86	10,11	10,30	7,35	7,85	8,27	8,32	6,37	7,95	8,18	8,45	8,41
Сумма	99,99	100,01	100,00	100,00	99,99	99,99	99,91	96,30	99,42	99,98	100,02	97,47
Si	2,79	2,70	2,71	2,78	2,83	2,70	2,70	2,86	2,76	2,75	2,79	2,76
Ti	0,07	0,10	0,12	0,12	0,73	0,22	0,11	0,07	0,12	0,10	0,11	0,12
Al(IV)	1,21	1,30	1,29	1,22	1,17	1,30	1,30	1,14	1,24	1,25	1,21	1,24
Al(VI)	0,44	0,44	0,45	0,33	0,49	0,33	0,38	0,68	0,47	0,46	0,47	0,49
Fe	1,30	1,06	1,90	2,08	1,33	2,20	1,04	0,52	1,16	1,15	1,24	0,8
Mn	0,00	0,02	0,01	0,04	—	0,03	0,01	0,01	0,02	0,00	0,01	0
Mg	1,01	1,21	0,33	0,33	1,01	0,05	1,39	1,55	1,16	1,01	1,07	1,42
Ca	0,01	0,03	—	0,01	—	—	—	—	0,00	—	—	—
Na	0,26	0,05	—	0,12	—	0,07	0,09	0,12	—	—	—	0,08
K	0,67	0,93	1,00	0,71	0,72	0,81	0,75	0,56	0,72	0,74	0,77	0,76
Σ (VI)	2,82	2,83	2,81	2,90	3,56	2,83	2,93	2,83	2,93	2,72	2,90	2,83
Σ (XII)	0,94	1,01	1,00	0,84	0,72	0,88	0,84	0,68	0,72	0,74	0,77	0,84

Примечание: * — данные Т. П. Щетловой (ИГГД РАН); ** — данные Е. О. Самуйловой (СПбГУ); без звездочки — собственный материал.

Таблица 5. Составы хлоритов из пород Кейвского метаморфического комплекса (окислы в масс.%, катионы в формульных единицах)

Компоненты	Гранатовые амфиболиты B902-7	Гранат-двуслю- дяные сланцы B910-2	Глиноземистые сланцы						Гранат-ставролит- хлоритовые сланцы B882-9*
			B880-6*	B885-3**	B892-4**	B892-9**	B892-10**	B901-1**	
SiO ₂	32,11	26,77	28,93	27,64	27,72	26,19	25,41	27,04	29,31
TiO ₂	—	—	0,12	0,16	0,01	0,15	0,14	0,13	0,15
Al ₂ O ₃	24,10	22,81	26,71	25,85	25,21	24,91	23,89	24,81	25,18
FeO	23,29	48,97	23,41	12,42	13,11	16,57	19,75	16,65	31,22
MnO	0,25	0,72	0,12	0,01	0,03	0,08	0,11	0,03	—
MgO	19,97	0,73	20,52	19,78	19,45	17,64	17,07	18,64	14,01
CaO	0,28	—	0,11	0,01	—	—	—	0,01	0,10
Na ₂ O	—	—	0,07	0,41	0,12	0,69	0,32	—	—
K ₂ O	—	—	0,02	0,13	—	0,01	—	0,05	0,02
Cr ₂ O ₃	—	—	—	0,09	0,11	0,06	0,06	0,04	—
Сумма	100,00	100,00	100,01	86,50	85,76	86,30	86,75	87,40	99,99
Si	2,87	2,45	2,60	2,73	2,77	2,66	2,62	2,70	2,72
Ti	—	—	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
Al(IV)	1,13	1,55	1,40	1,27	1,23	1,34	1,38	1,30	1,28
Al(VI)	1,41	0,91	1,43	1,74	1,74	1,65	1,53	1,63	1,48
Fe	1,74	3,75	1,76	1,03	1,09	1,41	1,70	1,39	2,43
Mn	0,02	0,06	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	—
Mg	2,66	0,10	2,75	2,91	2,89	2,67	2,62	2,78	1,95
Ca	0,03	—	0,01	0,00	—	—	—	0,00	0,01
Na	—	—	0,01	0,08	0,02	0,14	0,06	—	—
K	—	—	0,00	0,02	—	0,00	—	0,01	0,00
Cr	—	—	—	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	—
Σ (VI)	5,83	4,82	5,96	5,70	5,73	5,76	5,88	5,82	5,87
Σ (XII)	—	—	0,02	0,10	0,02	0,14	0,06	0,01	0,01

Примечание: * — данные Т. П. Щегловой (ИГД РАН); ** — данные Е. О. Самуйловой (СПбГУ); без звездочки — собственный материал.

Таблица 6. Составы амфиболов из пород Кейвского метаморфического комплекса (окислы в масс.%, катионы в формульных коэффициентах)

Компоненты	Гранатовые амфиболиты			
	Б883-2	Б902-7	Б886-3*	Б979-13*
SiO ₂	43,95	41,80	41,44	43,42
TiO ₂	0,45	0,12	0,21	0,57
Al ₂ O ₃	16,66	20,80	19,35	15,63
FeO	17,85	17,21	15,79	16,60
MnO	0,18	0,04	0,07	0,18
MgO	6,94	7,36	6,99	9,65
CaO	12,37	11,25	11,51	11,46
Na ₂ O	1,21	1,15	4,24	2,21
K ₂ O	0,40	0,26	0,40	0,28
Сумма	100,01	99,99	100,00	100,00
Si	6,43	6,01	6,04	6,31
Ti	0,05	0,01	0,02	0,05
Al	2,87	3,53	3,32	2,68
Fe	2,19	2,07	1,93	2,02
Mn	0,02	0,01	0,01	0,02
Mg	1,51	1,58	1,52	2,09
Ca	1,94	1,73	1,80	1,78
Na	0,34	0,32	1,20	0,62
K	0,08	0,05	0,07	0,05
Сумма	15,43	15,31	15,91	15,62

Примечание: * — данные Т.П. Щегловой (ИГГД РАН); без звездочки — собственный материал.

ными выше различиями гранат-ставролит-хлоритовых и глиноземистых сланцев по химическому составу (см. табл. 1, рис. 1). Указанные различия можно проследить на диаграммах АКФ и АФМ (см. рис. 3), где нанесены фигуративные точки состава этих пород. Парагенезисы *Gr St Ms Bt* в гранат-дву-сланцах и *Ky St Ms Bt* в глиноземистых сланцах с биотитом, но без хлорита определяют возможность второго варианта триангуляции (см. рис. 2, в). Как и в предыдущем случае, эти два парагенезиса отвечают породам соответственно более железистым и более глиноземистым, следовательно, их появление также определяется различием исходного состава пород, что иллюстрирует положение фигуративных точек этих пород на рис. 4.

Амфиболы из гранатовых амфиболитов относятся к группе кальциевых амфиболов и представлены феррочермакитом и гастингситом. Для них характерны высокая глинозёмистость (Al до 3,53 ф. ед. и вариации по сумме Na + K от 0,3 до 1,4 ф. ед.) (табл. 6).

Парагенетический анализ

Приведённые выше данные показывают, что в число метаморфических минералов парасланцев кейвской свиты входят гранат, кианит, ставролит, мусковит, биотит, хлорит. Эти минералы принадлежат к системе из четырёх виртуальных компонентов Al₂O₃, FeO, MgO, K₂O и избыточного SiO₂. Их составы и равновесные соотношения могут быть изображены в тетраэдре АКФМ (K = KAlO₂) (рис. 2) и на проекциях на его грани АКФ и АФМ (рис. 3, 4). Для ясности в объёмной диаграмме АКФМ конноды показаны одинарными линиями для некоторых конкретных составов минералов, а на треугольных диаграммах АКФ и АФМ пучками коннод показаны сосуществующие твёрдые растворы.

Наличие парагенезисов *Gr St Ms Chl* в гранат-ставролит-хлоритовых сланцах и *Ky St Ms Chl* в глиноземистых сланцах с хлоритом, но без биотита допускает единственный вариант триангуляции в тетраэдре АКФМ (см. рис. 2, а). Как видно, первый из этих парагенезисов образуется в породах более богатых Fe и бедных Al, чем второй. Это согласуется с описанными выше различиями гранат-ставролит-хлоритовых и глиноземистых сланцев по химическому составу (см. табл. 1, рис. 1).

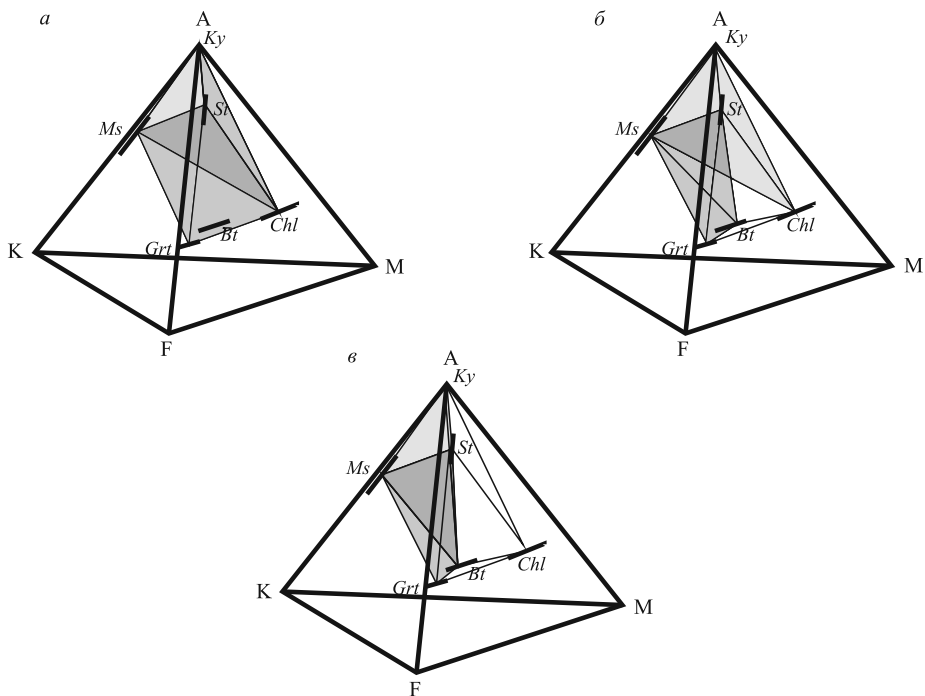
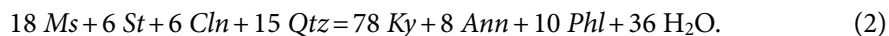
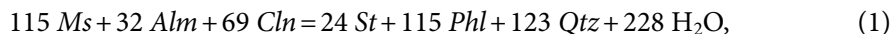


Рис. 2. Диаграмма АКФМ для пород Кейвского метаморфического комплекса

А — Al, К — KAl, F — Fe, М — Mg. Парагенезисы: *а* — глинозёмистых и гранат-ставролитовых сланцев с хлоритом, *б* — глинозёмистых сланцев с хлоритом и гранат-двуслюдяных сланцев, *в* — глинозёмистых сланцев с биотитом и гранат-двуслюдяных сланцев. Затенены объёмы, включающие составы выделенных типов пород.

Сопоставление диаграмм на рис. 2 показывает, что переход от первого варианта триангуляции ко второму определяется последовательной сменой коннод. Сначала вместо коннодной плоскости *Gr Ms Chl* появляется коннода *Bt St* (см. рис. 2, б), а затем возникает коннода *Ky Bt*, сменяющая плоскость *St Ms Chl* (см. рис. 2, в). Этому соответствуют две моновариантные реакции дегидратации, которые могут быть выражены через миналы твёрдых растворов биотита и хлорита:



В результате реакции (1) становится устойчивым парагенезис *Ms Bt Gr St*, имеющийся в гранат-двуслюдяных сланцах, причём парагенезис *Ky St Ms Chl*, характерный для глинозёмистых сланцев с хлоритом, сохраняется (см. рис. 2, б). После протекания реакции (2) возникает парагенезис *Ky Bt Ms St*, характерный для глинозёмистых сланцев с биотитом, и продолжает существовать парагенезис *Ms Bt Gr St* (см. рис. 2, в). При этом образующийся в реакции (2) биотит оказывается более железистым, чем хлорит. Последнее подтверждается при сопоставлении составов хлорита и биотита в глинозёмистых сланцах (см. табл. 3, 4). В обеих реакциях вы-

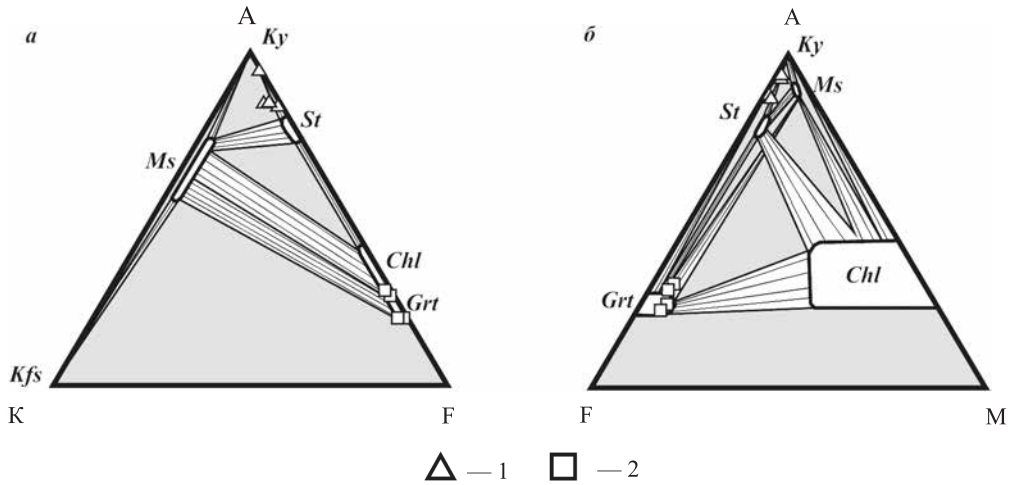


Рис. 3. Диаграммы АКФ (а) и АФМ (б) для парагенезисов с хлоритом
Составы: 1 — глиноземистых, 2 — гранат-ставролит-хлоритовых сланцев.

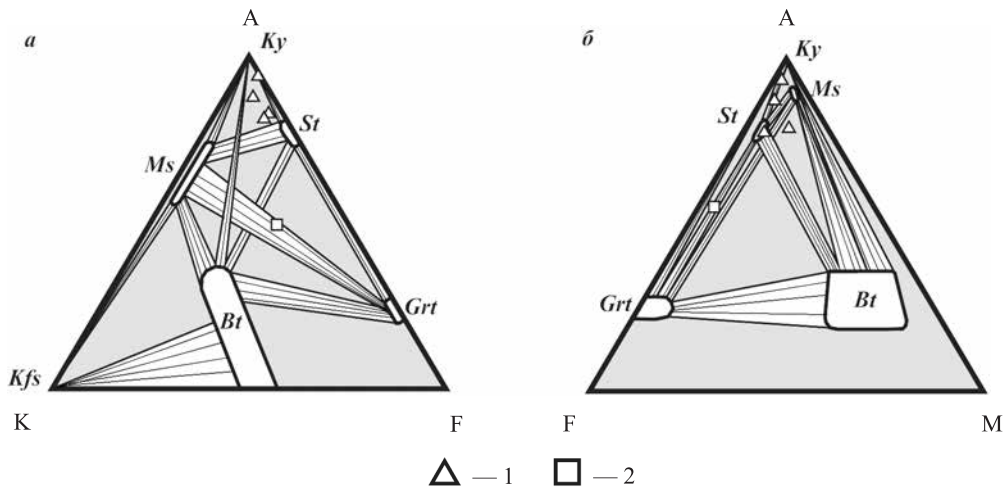


Рис. 4. Диаграмма АКФ (а) и АФМ (б) для парагенезисов с биотитом
Составы: 1 — глиноземистых, 2 — гранат-двуслюдяных сланцев.

деляется вода, следовательно, парагенезисы их левых частей, присутствующие в гранат-ставролит-хлоритовых и глиноземистых сланцах с хлоритом, являются более низкотемпературными, а парагенезисы правых частей, имеющиеся в гранат-двуслюдяных и глиноземистых сланцах с биотитом, — более высокотемпературными. Таким образом, различия в минеральном составе глиноземистых сланцев с хлоритом и гранат-ставролит-хлоритовых сланцев, с одной стороны, и глиноземистых сланцев с биотитом и гранат-двуслюдяных сланцев — с другой, обусловлены более высокой температурой образования последних.

Реконструкция Р-Т-параметров

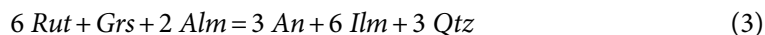
Для определения термодинамических параметров метаморфизма применен комплекс методов, включающих классическую термобарометрию, мультиравновесную термобарометрию и численное моделирование. Используются гранат-биотитовый [8, 9], амфибол-плагноклазовый [10] и гранат-амфиболовый [11] геотермометры. В таблице 7 выборочно приведены результаты, полученные с использованием различных термометров. Для гранат-биотитового термометра [9] и амфибол-плагноклазового термометра расчеты температур приведены для давления 5 кбар. При расчете температур по гранат-биотитовому термометру [8] использованы значения $X_{\text{Fe+Mn}}$ 2,6 и 2,32 (ф. ед.) для обр. Б882-2 и Б887-3 соответственно.

Таблица 7. Оценки температуры метаморфизма пород Кейвского комплекса по гранат-биотитовому геотермометру

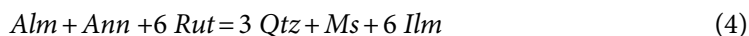
Порода	Термометр	Параметры состава (ф. ед.)							T, °C
		Fe ^{Gr}	Mg ^{Gr}	Ca ^{Gr}	Fe ^{Bt}	Mg ^{Bt}	Al _{VI} ^{Bt}	Ti ^{Bt}	
Gr Bt сланец (Б882-2)	[8]	2,55	0,23	0,19	1,30	1,01	0,44	0,07	593
		2,57	0,18	0,15	1,28	1,07	0,44	0,06	571
	[9]	2,55	0,23	0,19	1,30	1,01	0,44	0,07	590
		2,57	0,18	0,15	1,28	1,07	0,44	0,06	469
Gr Bt Ms сланец (Б887-3)	[8]	2,22	0,35	0,28	1,06	1,21	0,44	0,10	596
		2,15	0,28	0,35	1,10	1,15	0,46	0,10	587
	[9]	2,22	0,35	0,28	1,18	1,17	0,42	0,09	568
		2,15	0,28	0,35	1,10	1,15	0,46	0,10	539

Оценки температуры, полученные по гранат-биотитовому и гранат-амфиболовому геотермометрам, составляют 470–600°C. При использовании амфибол-плагноклазового геотермометра [10] по данным о составе плагноклаза ($X_{\text{Ab}} = 0,07–0,08$ в обр. Б883-2 и $0,09–0,20$ в обр. Б902-7) и амфибола ($\text{Si} = 6,45–6,50$ ф. ед. в обр. Б883-2 и $6,03–6,33$ в обр. Б902-7) в гранатовых амфиболитах получены температуры 940–1090°C, которые отражают скорее условия кристаллизации магматического протолита этих пород. Действительно, высокие содержания тетраэдрического Al и Na в позиции А в изученных амфиболах (см. табл. 6) соответствуют таковым в амфиболах некоторых базальтов [10]. По-видимому, обмен Al и Na между амфиболом и плагноклазом в амфиболитах при метаморфизме был затруднён.

Для оценки давления в сочетании с термометрами рассчитаны реакции с большим объемным эффектом:



— для гранат-биотитового сланца (Б882-2);



— для гранат-биотит-мусковитового сланца (Б887-3). Полученные значения давления составляют 3,5–5 и 4–6 кбар соответственно.

Таблица 8. Оценки температуры метаморфизма пород Кейвского комплекса по амфибол-гранатовому геотермометру [11]

Порода	Параметры состава (ф. ед.)						T, °C
	Fe ^{Gr}	Mg ^{Gr}	Mn ^{Gr}	Fe ^{Am}	Mg ^{Am}	Mn ^{Am}	
Gr амфиболит (Б883–2)	1,79	0,21	0,14	2,19	1,73	0,02	500
	1,91	0,19	0,15	2,19	1,51	0,02	490
	1,75	0,16	0,13	2,25	1,66	0,01	495
Gr амфиболит (Б902–7)	2,18	0,42	0,08	1,89	1,48	0,00	580
	2,06	0,43	0,08	1,93	1,74	0,01	600

Оценки температуры и давления методом мультиравновесной термобарометрии получены в программе TWQ [12] с использованием дополнительных программ TWQ_Comb и TWQ_View, написанных Д. В. Доливо-Добровольским (ИГГД РАН). Для применения этого метода пригодными оказались только гранатые амфиболиты, в которых минералы включают достаточное количество миналов. Их компоненты образуют систему Na₂O-CaO-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-TiO₂-H₂O (NCFMASTH). В качестве критериев отбора приняты следующие величины невязки при пересечении моновариантных линий в пучке: в системах с тремя независимыми реакциями — $dT \leq 10^\circ$ и $dP \leq 0,5$ кбар, в системах с четырьмя независимыми реакциями — $dT \leq 30^\circ$ и $dP \leq 1$ кбар. Расчеты проведены в два этапа: сначала в двух подсистемах Na₂O-CaO-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O и CaO-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-TiO₂-H₂O (три независимые реакции) выбраны те составы минералов, для которых пучки имеют высокую степень сходимости, а далее для таких составов получены пучки в общей системе NCFMASTH (четыре независимые реакции). В результате для обр. Б883–2 получены значения T = 510–570°C и P = 5,1–5,7 кбар, а для обр. Б902–7 — T = 590–640°C и P 6–6,5кбар (рис. 5).

По согласующимся данным всех геотермобарометров, наиболее вероятными оценками условий метаморфизма гранатсодержащих пород являются T = 540–620°C и P 5,2–6 кбар.

Большая часть пород Кейвского метаморфического комплекса представляет собой глиноземистые сланцы. Ограниченный набор минералов переменного состава делает их непригодными для расчета P-T-параметров методами классической и мультиравновесной термометрии. Для таких пород существует возможность иного подхода к оценкам температуры и давления, который заключается в численном моделировании равновесного минерального состава породы путём поиска минимальной свободной энергии системы при заданном химическом составе, температуре и давлении. Моделирование выполнено средствами программного комплекса NCh [13] с базой данных [14]. В расчётах использован состав типичного глинозёмистого сланца (обр. Б881–1, см. табл. 1). Область температур и давлений, в которой получено совпадение модельных парагенезисов с описанными выше характерными для таких сланцев, показана на рис. 6. Эта область ограничена со стороны низких температур пределом устойчивости плагиоклаза с кианитом, которые переходят в парагонит и маргарит, а со стороны высоких температур — кривой полиморфного превращения кианит — силлиманит. Указанное поле делится почти пополам линией

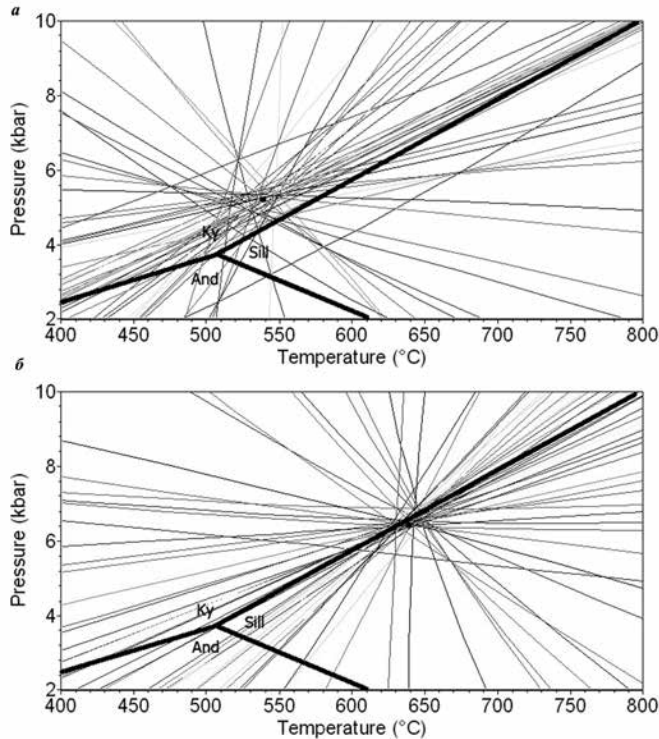


Рис. 5. P-T-диаграмма возможных минеральных равновесий для гранатового амфиболита с парагенезисом *Hb Pl Gr Qtz* в системе NCFMATSH

a — обр. B883-2, *b* — обр. B902-7.

равновесия (2 на рис. 6), слева от которой устойчив модельный парагенезис *Qtz Ky St Pl Ms Chl*, а справа — *Qtz Ky St Pl Ms Bt*. Видно, что выявленное при моделировании равновесие совпадает с реакцией (2), установленной при парагенетическом анализе. Можно заключить, что условия метаморфизма глинозёмистых сланцев с хлоритом характеризуются $T = 540\text{--}580^\circ\text{C}$, а глинозёмистых сланцев с биотитом — $T = 580\text{--}620^\circ\text{C}$ при $P = 5,2\text{--}6,5$ кбар.

По набору минеральных парагенезисов кристаллические сланцы Кейвского комплекса соответствуют кианит-хлорит-ставролитовой субфации эпидот-амфиболитовой фации и кианит-мусковит-биотит-ставролитовой субфации амфиболитовой фации по фациальной схеме [15] (см. рис. 7). Границей между ними служит линия равновесия реакции (2), выявленного по результатам парагенетического анализа и численного моделирования. Однако, согласно фациальной схеме [15], полученные оценки термодинамических параметров метаморфизма лежат целиком в поле кианит-мусковит-биотит-ставролитовой субфации амфиболитовой фации, расположенном выше кривой равновесия (2). В то же время на фациальной диаграмме [16] эти значения оказываются в поле более низкотемпературных субфаций эпидот-амфиболитовой фации, расположенном ниже указанной линии. Таким образом, намечается несоответствие данных по петрогенетическим решеткам разных исследователей, которые нуждаются в согласовании.

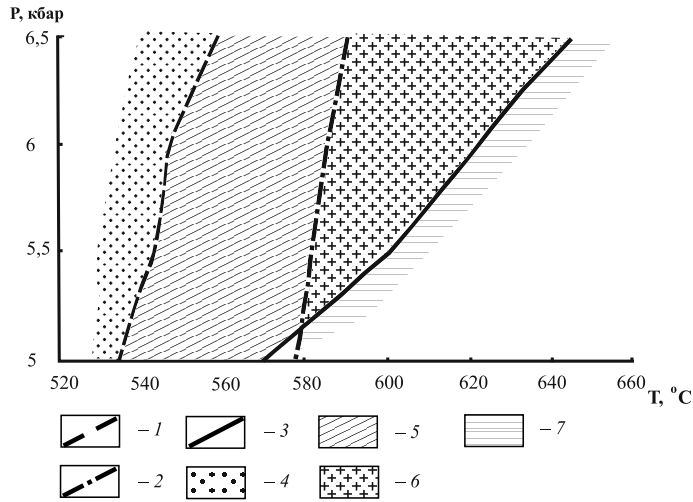


Рис. 6. Поля устойчивости парагенезисов глинозёмистых сланцев и ограничивающие их моновариантные линии равновесия по результатам численного моделирования

1-3 — линии равновесия: 1 — $Par + Mrg = Pl + Ky$; 2 — $St + Chl + Ms = Bt + Ky + Qtz$; 3 — $Ky = Sil$; 4-7 — поля устойчивости парагенезисов: 4 — $Mrg \ Par \ St \ Ms \ Chl$, 5 — $Ky \ St \ Pl \ Ms \ Chl$, 6 — $Ky \ St \ Pl \ Ms \ Bt$, 7 — $Sil \ St \ Pl \ Ms \ Bt$.

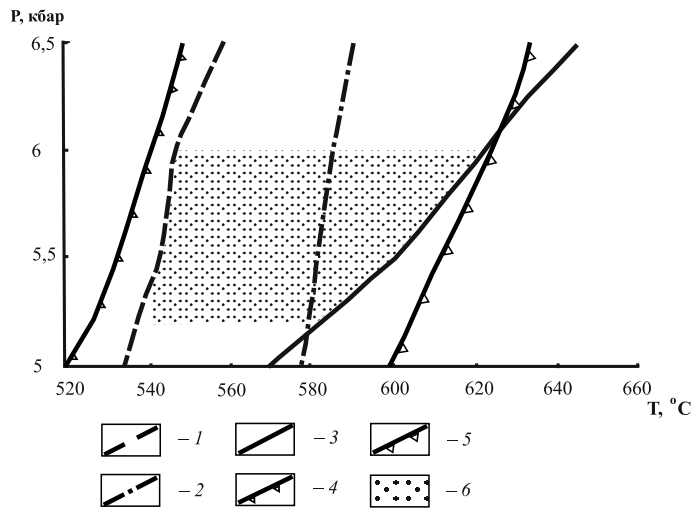


Рис. 7. Область P-T-параметров метаморфизма изученной части Кийевского комплекса в сопоставлении с границами фаций по различным фациальным схемам

1-5 — линии равновесия: 1 — $Par + Mrg = Pl + Ky$, 2 — $St + Chl + Ms = Bt + Ky + Qtz$ (наши данные), 3 — $Ky = Sil$, 4 — $St + Chl + Ms = Bt + Ky + Qtz$ (по [15]), 5 — то же по [16]; 6 — поле наиболее вероятных оценок температуры и давления, полученных в данной работе.

Заключение

Кейвский метаморфический комплекс характеризуется значительным разнообразием петрографических разновидностей пород, среди которых можно выделить: 1) кварцито-сланцы и мусковитовые кварциты; 2) гранат-ставролит-хлоритовые сланцы; 3) гранат-двуслюдяные сланцы; 4) глинозёмистые сланцы с хлоритом; 5) глинозёмистые сланцы с биотитом. Породы первого типа сформировались по гидрослюдистым и полевошпатовым кварцевым песчаникам, второго и третьего — по полимиктовым песчаникам и грауваккам, четвёртого и пятого — по гидрослюдистым и каолиновым глинам. Кроме того, в составе комплекса присутствуют амфиболовые сланцы и гранатовые амфиболиты, образовавшиеся по силлам андезито-базальтового состава.

В изученной части Кейвского комплекса условия метаморфизма неоднородны, по результатам биминеральной и мультиравновесной геотермобарометрии они отвечают области $T = 540\text{--}620^\circ\text{C}$ и $P = 5,2\text{--}6$ кбар. Анализ минеральных парагенезисов метапелитов указывает на их принадлежность двум фациям — эпидот-амфиболитовой (кианит-хлорит-ставролитовая субфация) и амфиболитовой (кианит-мусковит-биотит-ставролитовая субфация). К первой относятся гранат-ставролит-хлоритовые и глинозёмистые сланцы с хлоритом, ко второй — гранат-двуслюдяные и глинозёмистые сланцы с биотитом. Граница между этими фациями определяется равновесием $Ms + St + Chl = Ky + Bt + H_2O$, положение которого установлено методом численного моделирования с учётом реального состава участвующих в нём минералов и характеризуется значениями $T = 580^\circ\text{C}$, $P = 5,2\text{--}6$ кбар. Отмечается существенное расхождение параметров этого равновесия в современных фациальных схемах, что указывает на необходимость их дополнительного уточнения в этой части.

* * *

Авторы благодарны С. А. Бушмину за предоставленную коллекцию каменного материала.

Литература

1. Бельков И. В. Кинанитовые сланцы свиты Кейв. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 321 с.
2. Бушмин С. А., Глебовицкий В. А., Пресняков С. Л. и др. Новые данные о возрасте (SHRIMP II) протолита и палеопротерозойских преобразований архейского Кейвского террейна (Кольский полуостров) // ДАН. 2011. Т. 438, № 2. С. 237–241.
3. Балаганский В. В., Раевский А. Б., Мудрук С. В. Нижний докембрий Кейвского террейна, северо-восток Балтийского щита: стратиграфический разрез или коллаж тектонических пластин? // Геотектоника. 2011. № 2. С. 32–48.
4. Белопицкий А. П., Гаскельберг В. Г., Гаскельберг Л. А., Антонюк Е. С., Ильин Ю. И. Геология и геохимия метаморфических комплексов раннего докембрия Кольского полуострова. Л.: Наука, 1980. 240 с.
5. Баянова Т. Б. Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма. СПб.: Наука, 2004. 174 с.
6. Лобиков А. Ф., Левский Л. К. U-Pb геохимия ставролитов // Геохронометрические изотопные системы, методы их изучения, хронология геологических процессов. Материалы V Российской конференции по изотопной геохронологии. М.: ИГЕМ РАН, 2012. С. 222–224.
7. Предовский А. А. Геохимическая реконструкция первичного состава метаморфизованных вулканогенно-осадочных образований докембрия. Апатиты, 1970. 115 с.
8. Никитина Л. П. Межфазовые геотермометры, геобарометры и геооксобарометры: учеб. пособие. СПб., 2005. 128 с.

9. *Аранович Л. Я.* Минеральные равновесия многокомпонентных твердых растворов. М.: Наука, 1991. 253 с.
10. *Blundy J. D., Holland T.* Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1990. Vol. 104. P. 208–224.
11. *Перчук Л. Л.* Равновесия породобразующих минералов. М.: Наука, 1970. 392 с.
12. *Berman R.* Thermobarometry using multiequilibrium calculations: a new technique with petrologic applications // *Canadian Mineralogist*. 1991. Vol. 29. P. 833–855.
13. *Шваров Ю. В.* Алгоритмизация численного равновесного моделирования динамических геохимических процессов // *Геохимия*. 1999. № 6. С. 646–652.
14. *Berman R. G.* Internally consistent thermodynamic data for minerals in the system Na₂O-K₂O-CaO-MgO-FeO-Fe₂O₃-Al₂O₃-SiO₂-TiO₂-H₂O-CO₂ // *J. Petrol.* 1988. Vol. 29. P. 445–522.
15. *Бушмин С. А., Глебовицкий В. А.* Схема минеральных фаций метаморфических пород // *Записки РМО*. 2008. Ч. СXXXVII, № 2. С. 1–13.
16. *Spear F.* Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths. Washington: Miner. Soc. Amer., 1993. 799 p.

Статья поступила в редакцию 30 декабря 2014 г.

Контактная информация:

Пиндюрина Евгения Олеговна — геолог; PindyurinaEvgeniya@mail.ru

Кольцов Александр Борисович — доктор геолого-минералогических наук, профессор;
a.koltsov@spbu.ru

Pindyurina E. O. — geologist; PindyurinaEvgeniya@mail.ru

Kol'tsov A. B. — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor; a.koltsov@spbu.ru