GEODYNAMICS & TECTONOPHYSICS
Published by the Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

PALEOGEODYNAMICS

2025 VOLUME 16 ISSUE 6 ARTICLE 0860

ISSN 2078-502X

DOI: 10.5800/GT-2025-16-6-0860

GRENVILLE ZONAL BARROW-TYPE METAMORPHISM IN THE ISHERIM ANTICLINORIUM (NORTHERN URALS)

G.A. Petrov [1]✉, **S.K. Baltybaev** [2,3]

[1] Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 15 Academician Vonsovsky St, Ekaterinburg 620016, Russia

[2] Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, 2 Makarov Emb, Saint Petersburg, 199034, Russia

[3] Saint Petersburg University, 7-9 Universitetskaya Emb, Saint Petersburg 199034, Russia

ABSTRACT. The relevance of the work is determined by a poor knowledge of metamorphic processes in the Precambrian complexes of the Urals. The object of the study is the Belokamenka metamorphic complex of the Ishemir anticlinorium of the Northern Urals. The aim of the work was to characterize and determine the PT-parameters of metamorphic transformations of the rocks of the Belokamenka complex based on the analysis of mineral and rock compositions. PT-estimates were obtained by applying the multi-equilibrium geothermobarometry (winTWQ) method. To determine the general patterns of metamorphic mineral formation, PT-diagrams of phase equilibria were also calculated based on the minimization of the Gibbs energy. The peak metamorphism parameters – T=619 °C, P=7.4 kbar – were determined, and a conclusion was made about the progressive nature of the metamorphic process in the E-W trending, regular lateral zones of chloritoid, chlorite, staurolite and kyanite. The medium-temperature moderate-to-high-pressure type of metamorphism revealed for the Belokamenka complex, which dates back to 973±49 Ma, allows us to associate it with the areas of manifestation of the Grenville orogeny.

KEYWORDS: Northern Urals; Grenville orogeny; kyanite-sillimanite type of metamorphism

FUNDING: The research was conducted in accordance with the topic of the state assignment of the IGG UB RAS (project No. 123011800013-6) using the equipment of the Shared Research Facilities "Geoanalyst" of the IGG UB RAS, and the topic of research work of the IPGG RAS (No. FMUW-2022-0002) of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

EDN: PMKNED

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Georg A. Petrov, georg_petrov@mail.ru

Received: March 3, 2025
Revised: September 2, 2025
Accepted: September 12, 2025

FOR CITATION: Petrov G.A., Baltybaev S.K., 2025. Grenville Zonal Barrow-Type Metamorphism in the Isherim Anticlinorium (Northern Urals). Geodynamics & Tectonophysics 16 (6), 0860. doi:10.5800/GT-2025-16-6-0860

© Petrov G. A., Baltybaev S. K., 2025

ГРЕНВИЛЬСКИЙ ЗОНАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ БАРРОУССКОГО ТИПА В ИШЕРИМСКОМ АНТИКЛИНОРИИ (СЕВЕРНЫЙ УРАЛ)

Г.А. Петров[1], Ш.К. Балтыбаев[2,3]

[1] Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15, Россия

[2] Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2, Россия

[3] Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, наб. Университетская, 7/9, Россия

АННОТАЦИЯ. Актуальность работы определяется слабой изученностью метаморфических процессов в докембрийских комплексах Урала. Объектом исследования является белокаменский метаморфический комплекс Ишеримского антиклинория Северного Урала. Цель работы заключалась в характеристике метаморфических преобразований и определении PT-параметров образования пород белокаменского комплекса на основе анализа состава минералов и пород. PT-оценки получены путем применения метода мультиравновесной геотермобарометрии (winTWQ), а для определения общих закономерностей метаморфического минералообразования производился расчет PT-диаграмм фазовых равновесий на основе минимизации энергии Гиббса. Выявлены параметры пикового метаморфизма: T=619 °C, P=7.4 кбар, и сделан вывод о прогрессивном характере метаморфического процесса с закономерным латеральным развитием зон хлоритоида, хлорита, ставролита и кианита с запада на восток в современных координатах. Установленный среднетемпературный умеренно высокобарический тип метаморфизма белокаменского комплекса, датированный ранее возрастом 973±49 млн лет, позволяет связать его с проявлением гренвильской орогении.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Северный Урал; гренвильская орогения; метаморфизм кианит-силлиманитового типа

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования проведены в рамках госзадания ИГГ УрО РАН (проект № 123011800013-6) с использованием оборудования ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН и темы НИР ИГГД РАН (№ FMUW-2022-0002) Минобрнауки РФ.

1. ВВЕДЕНИЕ

Метаморфические и магматические комплексы, складчатость и системы разрывных нарушений, сформировавшиеся в течение гренвильской орогении, широко проявлены на границах донеопротерозойских блоков, входивших в состав суперконтинента Родиния [Li et al., 2008; Evans, 2009; и др.]. В составе гренвильской орогенической эпохи на Североамериканском континенте выделяют две (Эльзевирская, 1350–1220 млн лет, и Оттавская, 1200–1000 млн лет) или три (Шавиниганская, 1190–1140 млн лет, Оттавская, 1080–1020 млн лет, и Риголетская, 1000–980 млн лет) орогенические фазы [Li et al., 2008; и др.], соответствующие импульсам процессов аккреции и коллизии. На северо-западе Скандинавии установлены четыре гренвильские орогенические фазы – Арендал, Адгер, Фалькенберг и Далан, имевшие место, соответственно, 1140–1080, 1050–980, 980–970 и 970–900 млн лет назад [Bingen et al., 2008]. Аналогичные события наблюдаются в Южной Америке [Weber, Köhler, 1999], Индостане, на западной окраине Сибирского кратона [Likhanov et al., 2024] и в других регионах. Результаты изучения докембрийских комплексов Южного Урала (Башкирский антиклинорий) демонстрируют отсутствие заметных признаков влияния гренвильских тектонических событий на их формирование [Maslov et al., 2014]. В то же время метаморфические преобразования с возрастом 1.25–0.90 млрд лет отмечаются в пределах няртинского гнейсомигматитового комплекса на Приполярном Урале [Pystin, Pystina, 2008] и зафиксированы нами в Ишеримском антиклинории на Северном Урале [Petrov et al., 2015].

Ишеримский антиклинорий (рис. 1) – докембрийский тектонический блок в обрамлении нижне- и среднепалеозойских образований шельфа и континентального склона Восточно-Европейского палеоконтинента (Балтики).

При изучении и геологическом картировании его территории нами исследован белокаменский метаморфический комплекс (назван по горе Белый Камень в истоках р. Кутим, правого притока р. Улс, бассейн р. Вишера), в состав которого входят гранат-ставролит-кианит-слюдисто-кварцевые кристаллические сланцы, местами содержащие хлоритоид и плагиоклаз.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данная работа основана на авторских геологических исследованиях и собранной в ходе этих работ представительной коллекции образцов, использовались также данные геолого-съемочных работ Б.Д. Аблизина, Б.В. Клименко, А.М. Курбацкого, Г.Г. Морозова, И.Б. Попова, Г.П. Снитко.

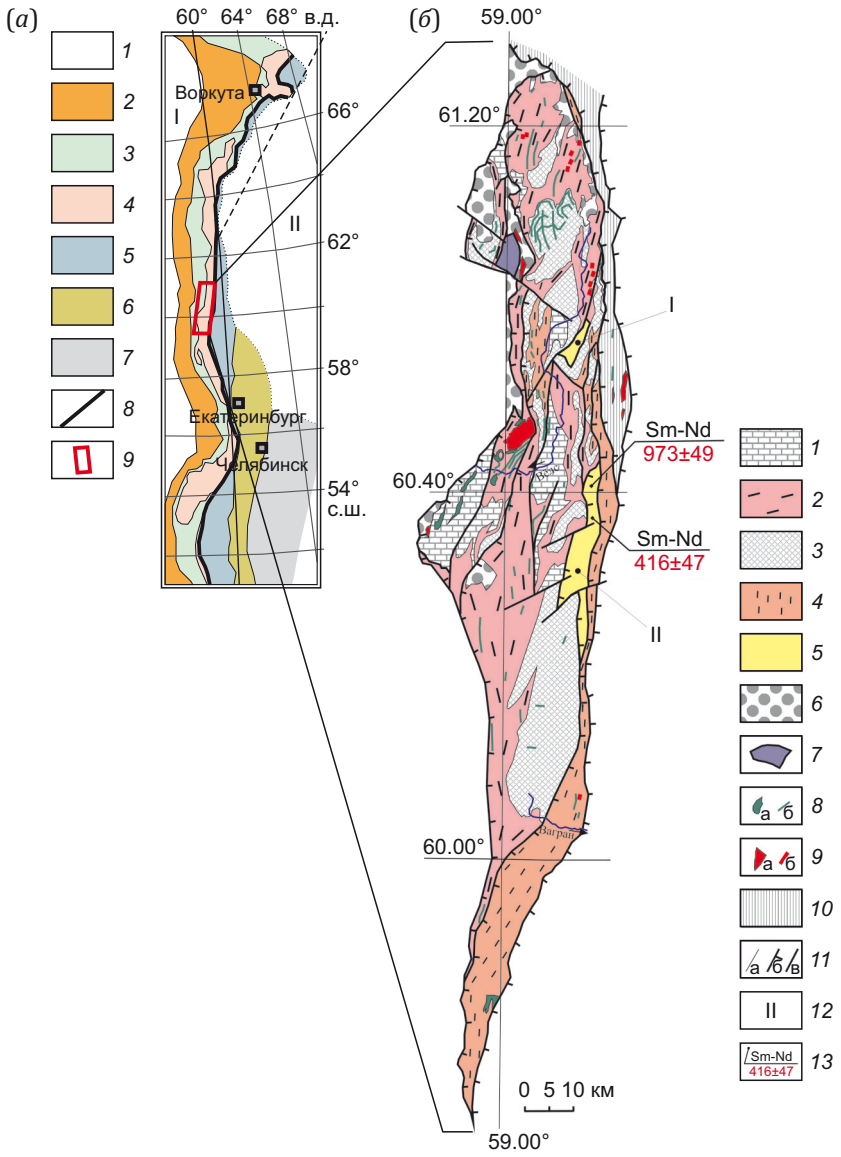

Рис. 1. Схема расположения главных структур Урала (по [Puchkov, 2010], с изменениями) (*а*) и схематическая геологическая карта Ишеримского антиклинория (составлена по материалам геолого-съемочных работ Уральской геолого-съемочной экспедиции) (*б*).

(*а*): *1* – осадочный чехол платформ: Восточно-Европейской (I) и Западно-Сибирской (II); *2–4* – «палеоконтинентальный» сектор Урала: *2* – Предуральский краевой прогиб, *3* – Западно-Уральская мегазона (палеозойские комплексы пассивной континентальной окраины и континентального склона), *4* – Центрально-Уральская мегазона (докембрийские образования); *5–7* – «палеоокеанический» сектор Урала: *5* – Магнитогорская, Тагильская и Войкаро-Щучьинская мегазоны (палеозойские преимущественно островодужные образования), *6* – Восточно-Уральская мегазона, *7* – Зауральская мегазона (коллаж блоков и пластин палеозойских и докембрийских комплексов); *8* – Главный Уральский разлом; *9* – исследуемая территория.

(*б*): *1* – терригенные и карбонатные породы расьинской и мойвинской свит, средний рифей; *2* – углеродистые сланцы муравьинской свиты, средний рифей; *3* – кварциты ишеримской свиты, средний рифей; *4* – углеродистые и серицит-хлорит-кварцевые сланцы и метабазальты вёлсовской свиты, верхний рифей; *5* – кристаллические сланцы белокаменского метаморфического комплекса; *6* – терригенные, вулканогенные и карбонатные толщи ордовика; *7* – перидотиты и пироксениты вишерского комплекса, средний – верхний ордовик (?); *8* – штоки (а) габбро-долеритов и дайки (б) долеритов, верхний рифей (?); *9* – массивы (а) и дайки (б) гранитоидов венда – раннего палеозоя; *10* – метабазальты и слюдисто-кварцевые сланцы южной части Ляпинского антиклинория; *11* – стратиграфические и интрузивные границы (а), надвиги (б) и разрывные нарушения со сложной или неустановленной кинематикой (в); *12* – блоки белокаменского комплекса: I – Мартайский, II – Белокаменский; *13* – точки отбора проб для изотопно-геохронологических исследований и полученный по ним Sm-Nd возраст, млн лет.

Fig. 1. The layout of the main structures of the Urals (modified after [Puchkov, 2010]) (*a*), and a schematic geological map of the Isherim anticlinorium, compiled based on the Ural Geological Survey Expedition materials (*б*).

(*a*): *1* – sedimentary cover of the platforms: East European (I) and West Siberian (II); *2–4* – "paleocontinental" sector of the Urals: *2* – Preuralian foredeep, *3* – West Ural megazone (Paleozoic complexes of the passive continental margin and continental slope), *4* – Central Ural megazone (Precambrian formations); *5–7* – «paleoceanic» sector of the Urals: *5* – Magnitogorsk, Tagil and Voikar-Shchuchye

megazones (Paleozoic island-arc formations), *6* – East Ural, *7* – Trans-Ural megazones (collage of blocks and plates of the Paleozoic and Precambrian complexes); *8* – Main Ural fault; *9* – study area.
(*б*): *1* – terrigenous and carbonate rocks of the Rasya and Moyva formations, Middle Riphean; *2* – carbonaceous shales of the Muravey formation, Middle Riphean; *3* – quartzites of the Isherim formation, Middle Riphean; *4* – carbonaceous and sericite-chlorite-quartz shales and metabasalts of the Vels formation, Upper Riphean; *5* – crystalline shales of the Belokamenka metamorphic complex; *6* – terrigenous, volcanogenic and carbonate strata of the Ordovician; *7* – peridotites and pyroxenites of the Vishera complex, Middle – Upper Ordovician (?); *8* – gabbro-dolerite stocks (а) and dolerite dikes (б), Upper Riphean (?); *9* – massifs (а) and dikes (б) of Vendian – Early Paleozoic granitoids; *10* – metabasalts and mica-quartz schists of the southern part of the Lyapin anticlinorium; *11* – stratigraphic and intrusive boundaries (а), thrusts (б) and faults with mixed or unknown kinematics (в); *12* – blocks of the Belokamenka complex: I – Martay, II – Belokamenka; *13* – points of collection of samples for isotope-geochronological study and study-based Sm-Nd age, Ma.

Изучение состава породообразующих (плагиоклаз, хлоритоид, хлорит, гранат, ставролит, мусковит, парагонит, кианит) и акцессорных (ильменит, рутил) минералов проведено в ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН с использованием электронно-зондового рентгенофлуоресцентного микроанализатора SX-100 с пятью волно-дисперсионными спектрометрами (аналитики В.П. Хиллер и Д.А. Замятин).

Оценка PT-параметров образования метаморфических минеральных парагенезисов произведена методом мультиравновесной геотермобарометрии с помощью программы winTWQ v. 2.64 [Berman, 1991, 2007]. В расчетах применялась база термодинамических данных DEC06 [Berman et al., 2007].

Расчет PT-диаграмм фазовых равновесий производился с помощью программы MAGEMIN [Riel et al., 2022] с использованием термодинамической базы данных для метапелитовых систем [White et al., 2014], адаптированной для этой программы. Эта база описывает термодинамические свойства фаз в системе K_2O-Na_2O-CaO-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-TiO_2-O-MnO с уравнением состояния для чистых фаз: кварца, кристобалита, тридимита, коэсита, стишовита, кианита, силлиманита, андалузита, рутила и сфена, а также твердых растворов: шпинели, биотита, кордиерита, ортопироксена, эпидота, граната, ильменита, силикатного расплава, мусковита, тройного полевого шпата, сапфирина, ставролита, магнетита, хлорита, хлоритоида и маргарита. Фугитивность кислорода в расчетах задавалась буфером кварц-фаялит-магнетит, а содержание воды в расчетах подбиралось по сходимости модельных минеральных парагенезисов с реальными.

3. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И СТРУКТУРНАЯ ПОЗИЦИЯ ПОРОД БЕЛОКАМЕНСКОГО КОМПЛЕКСА

Входящие в состав белокаменского комплекса метаморфические породы представлены преимущественно метапелитами муравьинской (~65 %) и мраморами (~35 %) мойвинской свиты среднего рифея. Возраст пород мойвинской свиты обосновывается находками строматолитов *Conophyton cylindricus* Masl., *Jacutophyton sp., Baicalia sp.* в слабо измененных известняках, а также Pb-Pb датировкой 1260 млн лет галенита из зоны сульфидной вкрапленности (устное сообщение Б.В. Клименко, 1998 г.).

В пределах Ишеримского антиклинория картируются два блока метаморфических пород – Мартайский и Белокаменский (рис. 1). Мартайский блок расположен в районе хр. Мартай, имеет неправильную трапециевидную форму и вытянут в северо-восточном направлении на 9 км при средней ширине 3 км. Присутствие метаморфических пород в этом районе было впервые отмечено А.М. Курбацким (устное сообщение) при проведении геолого-съемочных работ. Кристаллические сланцы на хр. Мартай сильно диафторированы, в этом районе наиболее распространены мусковит-хлорит-кварцевые сланцы с псевдоморфозами хлорита по гранату и мусковита по высокоглиноземистым минералам. Реликты граната в хлоритовых агрегатах сохраняются крайне редко. Более информативен для изучения метаморфических процессов Белокаменский блок, вытянутый в субмеридиональном направлении на 42 км при мощности 1–5 км. Представительные обнажения кристаллических сланцев расположены по рекам Граничной и Правая Рассоха в северной части блока (рис. 2). Следует отметить, что точки 5120, 5122 и 5123, показанные на рис. 2, являются центрами локальных участков, на которых были отобраны в среднем по пять образцов для исследования состава минералов.

Нами исследованы метапелиты, наиболее информативные для изучения метаморфизма. Они представлены серыми, буровато-серыми и темно-серыми неравномерно-зернистыми сланцами, состоящими из мелкозернистой сланцеватой основной ткани, сложенной мусковитом, биотитом, кварцем, хлоритоидом, хлоритом, альбитом, иногда с парагонитом, графитом и (или) гематитом. В этой основной массе развиваются порфиробласты граната, ставролита, кианита (рис. 3, а), реже – хлоритоида и биотита. Выделяются следующие минеральные парагенезисы: Qz[1]+Cld+St+Ms+Grt+Bt, Bt+Qz+Pl+St+Grt+Cld, Bt+Qz+Pl+St+Grt+Ky. Обычно порфиробласты имеют ситовидное строение и включают многочисленные мелкие зерна минералов основной массы (чаще всего кварца), но распространены и

[1] Использованные сокращения для минералов (здесь и далее): Act – актинолит, Alm – альмандин, An – анортит, Ann – аннит, Bt – биотит, Ca – кальцит, Chl – хлорит, Cld – хлоритоид, Eas – истонит, Ep – эпидот, Fs – Na-K полевой шпат, Ilm – ильменит, Grs – гроссуляр, Grt – гранат, Ky – кианит, Liq – расплав, Ma – маргарит, Ms – мусковит, Pat – парагонит, Phl – флогопит, Pl – плагиоклаз, Pyr – пироп, Qz – кварц, Rt – рутил, Sill – силлиманит, Spess – спессартин, St – ставролит.

плотные гомогенные кристаллы. Размер порфиробластов различен – от первых миллиметров до 5–10 см (в районе устья р. Граничной были найдены кристаллы ставролита размером до 20–30 см (рис. 3, б), ориентировка призматических кристаллов иногда слабо подчинена сланцеватости и метаморфической полосчатости. Среди метапелитов отмечены образцы, содержащие только порфиробласты хлоритоида и граната; граната, ставролита, биотита и хлоритоида; ставролита, граната, кианита, граната и кианита или одного граната. Наблюдается также переслаивание пород, содержащих ставролит и кианит, и сланцев гранат-мусковит-кварцевого состава, в которых высокоглиноземистые минералы не фиксируются.

Породы среднего и верхнего рифея, окружающие блоки метаморфических пород и граничащие с ними по разломам, метаморфизованы в условиях фации зеленых сланцев. Главными парагенезисами в метапелитах являются Ms+Chl+Qz+Cld, Ca+Ms+Qz+Chl, в метабазитах – Pl+Ep+Act, Pl+Chl+Ca, иногда присутствует стильпномелан.

При анализе минеральных парагенезисов Белокаменского блока было выяснено, что в его западной части распространены кристаллические сланцы со ставролитом, гранатом, биотитом, мусковитом, парагонитом и хлоритоидом (см. рис. 2, обн. 5120, зона I); восточнее появляется кианит (обн. 5122) и исчезают хлоритоид и парагонит (см. рис. 2, зона II). В восточной части блока распространены парагенезисы, включающие кианит, гранат, кварц, биотит, мусковит, плагиоклаз (альбит-олигоклаз), рутил и ильменит (см. рис. 2, обн. 5123, зона III).

Для минеральных парагенезисов зоны I характерно наличие тонкозернистой (0.1 мм и менее) сланцеватой

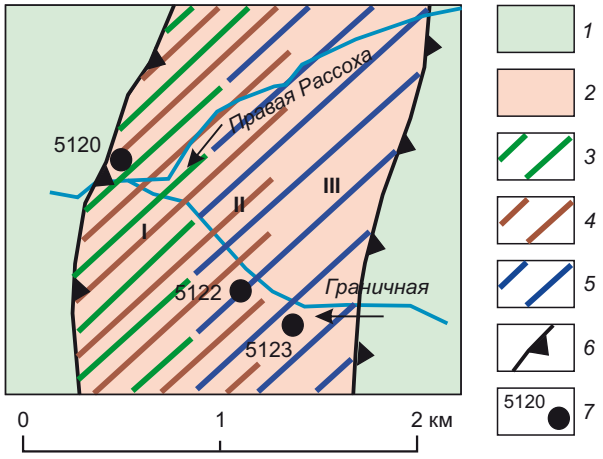

Рис. 2. Схема распространения метаморфических индексминералов в северной части Белокамеского блока.
1 – породы фации зеленых сланцев; *2* – породы эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой фаций; *3–5* – поля распространения метаморфических минералов: *3* – хлоритоида, *4* – ставролита, *5* – кианита; *6* – разрывные нарушения; *7* – точки наблюдения и номера обнажений. Метаморфические зоны: I – основная ткань Q+Mu с порфиробластами Grt, Bt, St и Cld; II – основная ткань Qz+Mu+Bt с порфиробластами Grt, St и Ky; III – основная ткань Qz+Ms+Bt+Pl с порфиробластами Grt и Ky.

Fig. 2. Distribution pattern of metamorphic index minerals in the northern part of the Belokamenka block.
1 – greenschist facies rocks; *2* – epidote-amphibolite and amphibolite facies rocks; *3–5* – metamorphic minerals: *3* – chloritoid, *4* – staurolite, *5* – kyanite; *6* – faults, *7* – observation points and outcrop numbers. Metamorphic zones: I – Q+Mu matrix with Grt, Bt, St and Cld porphyroblasts; II – Qz+Mu+Bt matrix with Grt, St and Ky porphyroblasts; III – Qz+Ms+Bt+Pl matrix with Grt and Ky porphyroblasts.

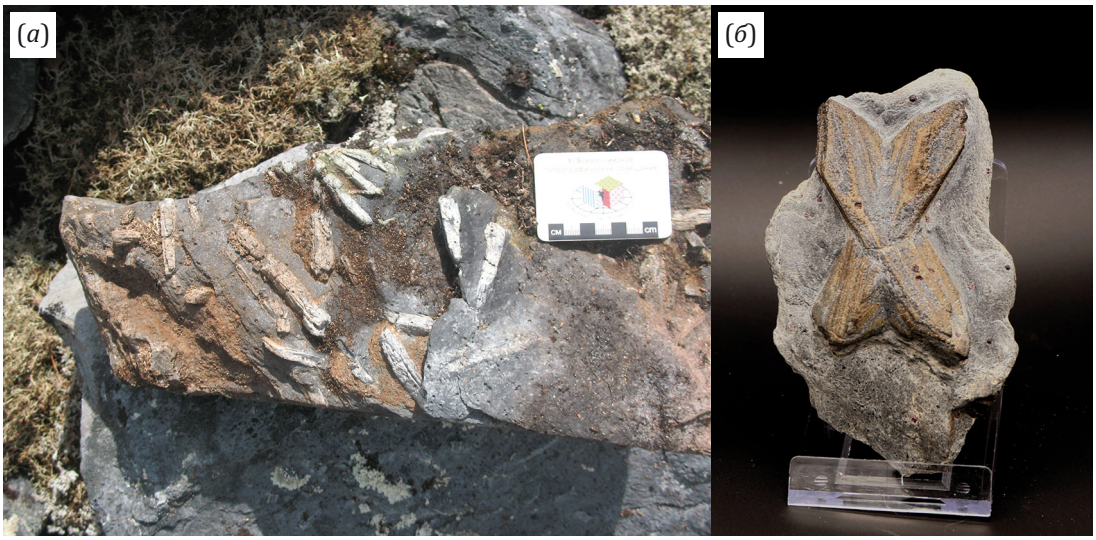

Рис. 3. Крупные кристаллы кианита (*а*) и двойник ставролита (*б*) в кристаллических сланцах белокаменского комплекса. Фото М.В. Цыганко.

Fig. 3. Large kyanite crystals (*а*) and a staurolite twin (*б*) in crystalline schists of the Belokamenka complex. Photo by M.V. Tsyganko.

основной ткани, состоящей из агрегата мусковита, кварца и акцессорного ильменита, в которой развиваются порфиробласты розового граната (рис. 4, а, в), хлоритоида (рис. 4, б), ставролита (рис. 4, б, в) и биотита (рис. 4, г).

Ставролит присутствует в виде как плотных, так и ситовидных кристаллов, содержащих многочисленные округлые включения кварца (рис. 4, в). Часто ориентировка порфиробластов не подчиняется направлению сланцеватости. Проявлены также и ретроградные минеральные преобразования – по гранату и биотиту развивается хлорит, по ставролиту – мусковит (рис. 4, г).

В пределах метаморфической зоны II в составе основной ткани, наряду с мусковитом и кварцем, повсеместно присутствует биотит (рис. 5). Размер зерен 0.1–0.5 мм. Порфиробласты представлены гранатом (рис. 5, а, б), ставролитом (рис. 5, б) и кианитом (рис. 5, в). Кристаллы граната, как правило, имеют неоднородное строение – их внутренние части содержат тонкие округлые включения кварца, внешние – более плотные и однородные (рис. 5, а, б). Ставролит и кианит образуют ситовидные кристаллы с большим количеством включений (рис. 5, б, в).

Метаморфическая зона III включает породы, состоящие из плагиоклаз-кварц-мусковит-биотитовой основной ткани (рис. 6, а, размер зерен 0.2–0.8 мм) с порфиробластами граната и кианита (рис. 6, б). Гранаты имеют неоднородное строение, их внутренние части содержат большое количество тонких включений кварца, внешние зоны плотные. Кианит формирует длиннопризматические кристаллы, не параллельные преобладающему направлению сланцеватости.

Таким образом, по мере продвижения с запада на восток в породах белогорского комплекса происходят следующие изменения:

– увеличивается размер зерен в мусковит-кварцевой основной ткани с 0.1 мм до 0.2–0.8 мм, в ее составе исчезает парагонит и появляются биотит и плагиоклаз;

– меняется набор порфиробластических минералов: в зоне I это гранат, ставролит, хлоритоид и биотит,

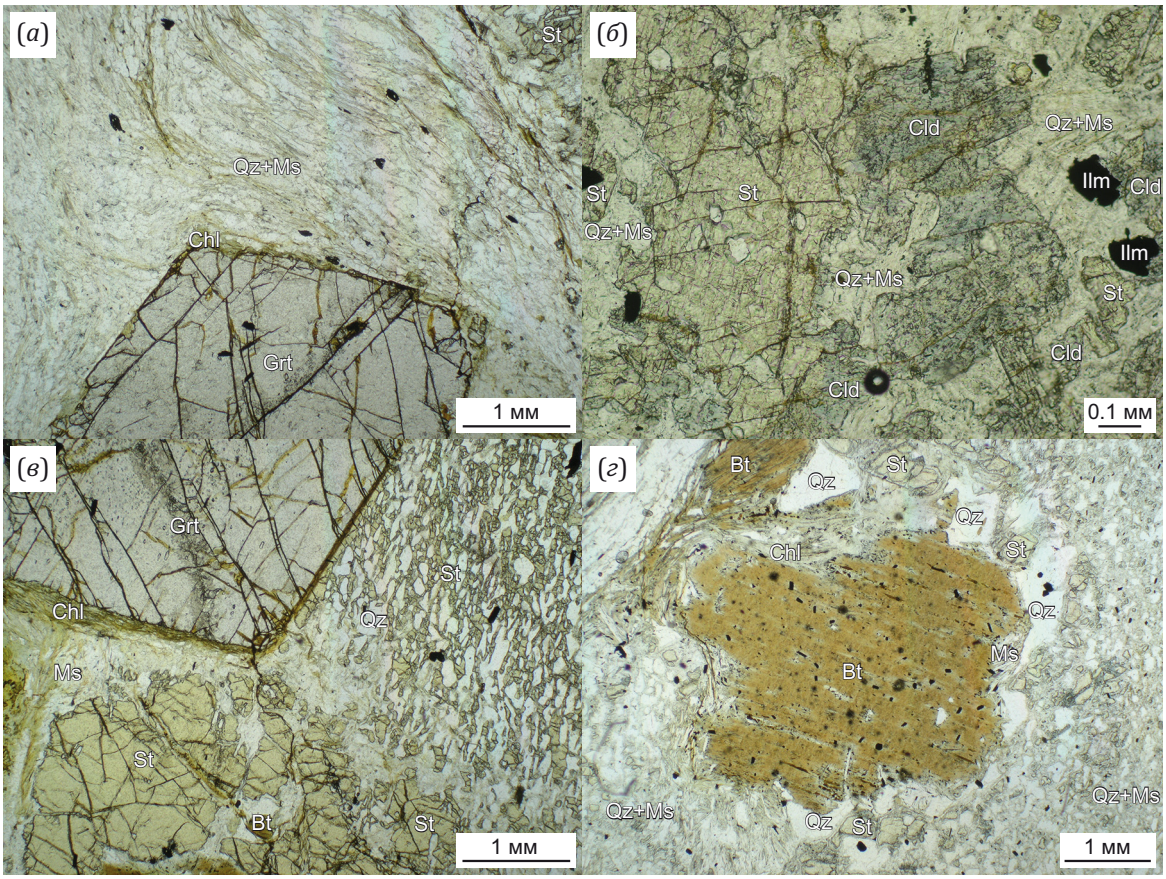

Рис. 4. Фотографии шлифов горных пород из метаморфической зоны I, обнажение 5120 (см. рис. 2).
Николи ||. Порфиробласт граната в мусковит-кварцевой основной ткани (*а*); порфиробласты ставролита и хлоритоида в ильменитсодержащей мусковит-кварцевой основной ткани (*б*); порфиробласты ставролита и граната. Ставролит в виде массивных и ситовидных кристаллов (*в*); порфиробласты ставролита и биотита. Ситовидные кристаллы ставролита, замещенные мусковитом, развитие хлорита по биотиту (*г*).

Fig. 4. Photos of rock thin sections from the methamorphic zone I, outcrop 5120 (see Fig. 2).
Nicols ||. Garnet porphyroblast in a muscovite-quartz matrix (*a*); staurolite and chloritoid porphyroblasts in a muscovite-quartz matrix (*б*); staurolite and garnet porphyroblasts. Massive and sieve-like staurolite crystals (*в*); porphyroblasts of staurolite and biotite. Sieve-like crystals of staurolite, replaced by muscovite; development of chlorite from biotite (*г*).

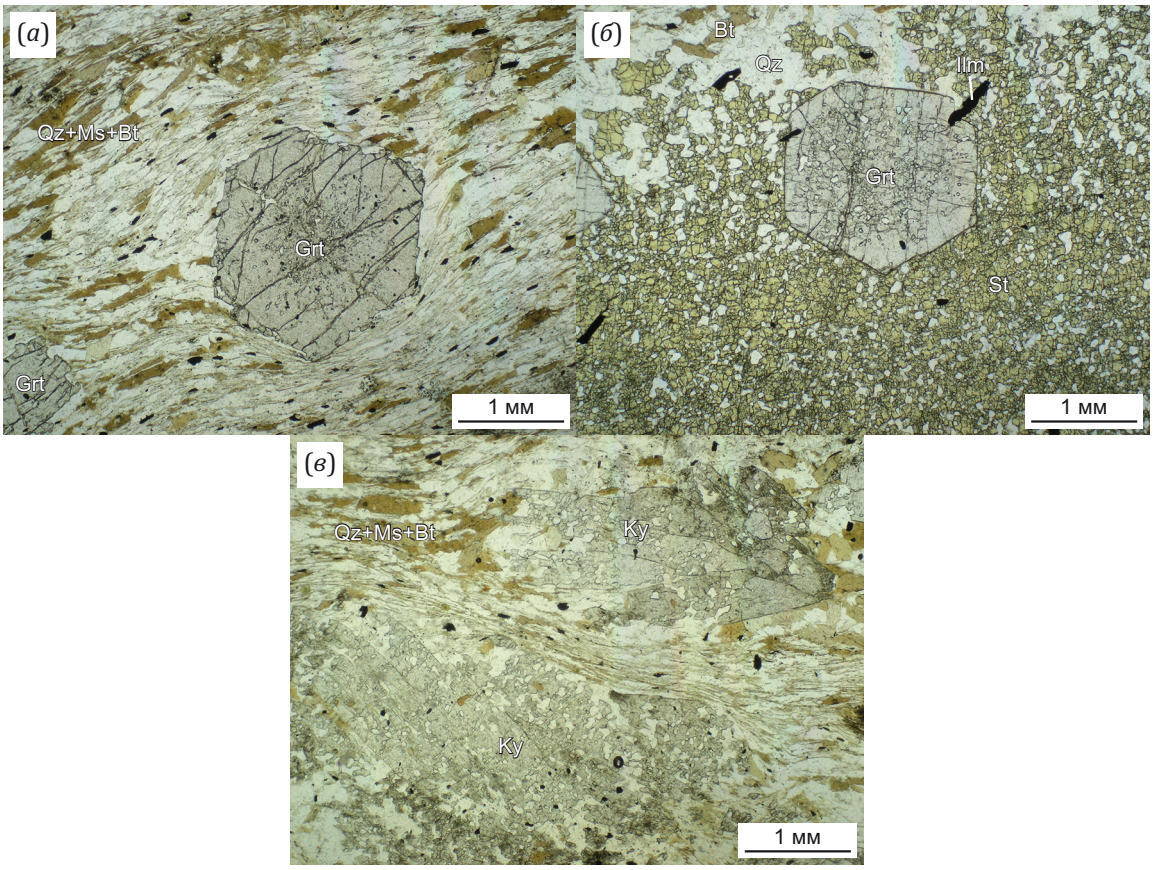

Рис. 5. Фотографии шлифов горных пород из метаморфической зоны II, обнажение 5122 (см. рис. 2).
Николи ||. Порфиробласт граната в мусковит-биотит-кварцевой основной ткани (*а*); порфиробласты граната и ставролита (*б*); порфиробласты кианита (*в*).

Fig. 5. Photos of rock thin sections from the methamorphic zone II, outcrop 5122 (see Fig. 2).
Nicols ||. Garnet porphyroblast in a muscovite-biotite-quartz matrix (*a*); staurolite and garnet porphyroblasts (*б*); kyanite porphyroblasts (*в*).

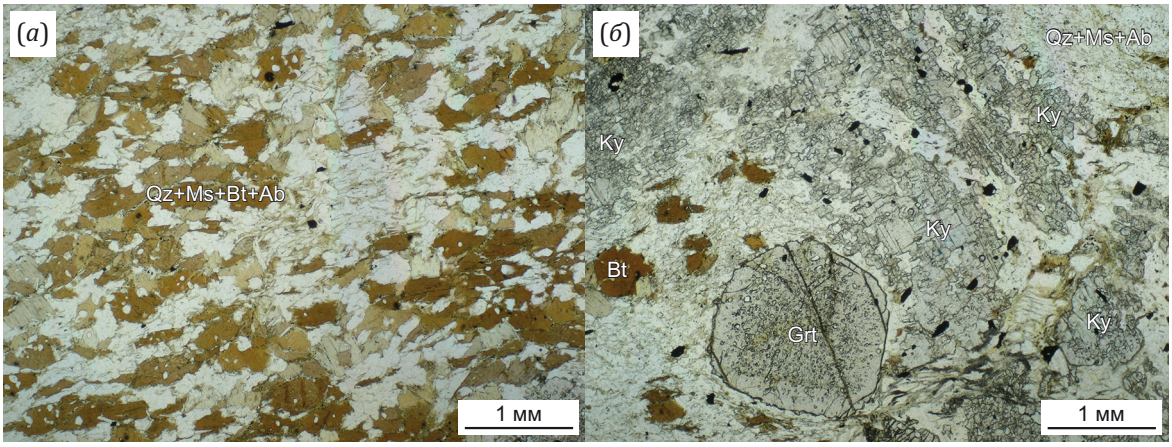

Рис. 6. Фотографии шлифов горных пород из метаморфической зоны III, обнажение 5123 (см. рис. 2). Николи ||. Плагиоклаз-кварц-мусковит-биотитовый сланец (*а*); порфиробласты граната и кианита (*б*).

Fig. 6. Photos of rock thin sections from methamorphic zone III (see Fig. 2). Nicols ||. Plagioclase- quartz- muscovite-biotite schist (*a*); garnet and kyanite porphyroblasts (*б*).

в зоне II – гранат, ставролит и кианит, в зоне III – гранат и кианит.

Авторами дважды предпринимались попытки датирования метаморфических образований белокаменского комплекса. Первоначально на основе Sm-Nd датировки 416±47 млн лет (СКВО=0.77), полученной по минеральным фракциям граната, агрегата мусковит +кианит и породе в целом (рис. 7), образование кристаллических сланцев было связано с одним из этапов аккреции Тагильского палеоостроводужного мегаблока к окраине Восточно-Европейского палеоконтинента в палеозое [Petrov et al., 2009]. Образец 2333-1 был отобран в южной части Белогорского блока, среди пород, подвергшихся сильному ретроградному метаморфизму; ставролит и кианит в них почти полностью замещены мусковитом.

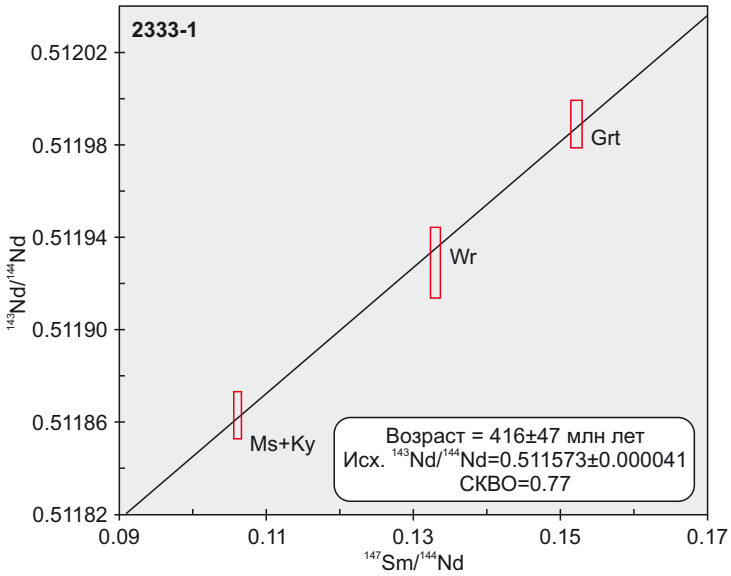

Рис. 7. Sm-Nd изохрона для кианит-гранат-кварц-мусковитового кристаллического сланца. Размеры прямоугольников пропорциональны погрешностям [Petrov et al., 2009]. Анализ выполнен Ю.Л. Ронкиным (ИГГ УрО РАН).

Fig. 7. Sm-Nd isochron for kyanite-garnet-quartz-muscovite crystalline schist. The dimensions of the rectangles are proportional to the errors [Petrov et al., 2009]. The analysis was performed by Yu.L. Ronkin (IGG UB RAS).

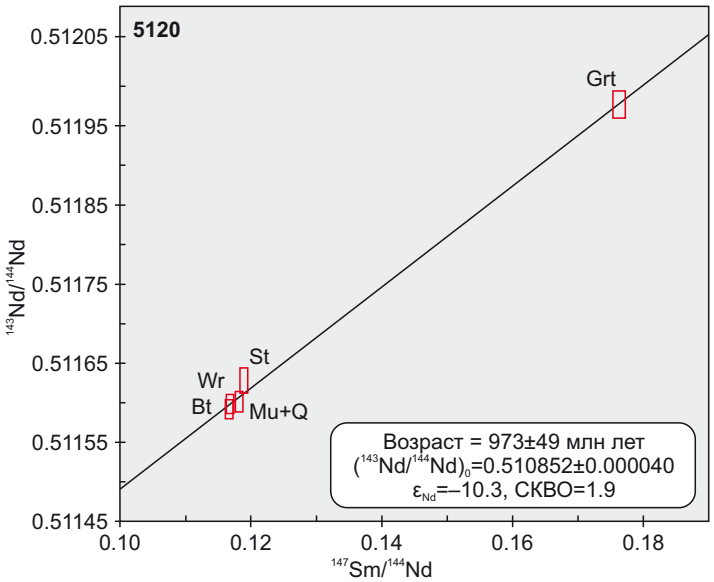

Рис. 8. Sm-Nd эволюционная зависимость для кристаллического сланца белокаменского комплекса (обр. 5120).
Grt – гранат, St – ставролит, Bt – биотит, Mu+Q – мусковит и кварц; WR – порода в целом. Размеры прямоугольников пропорциональны ±2σ [Petrov et al., 2015]. Анализ выполнен Ю.Л. Ронкиным (ИГГ УрО РАН).

Fig. 8. Sm-Nd evolutionary dependence for the crystalline schist of the Belokamenka complex (sample 5120).
Grt – garnet, St – staurolite, Bt – biotite, Mu+Q – muscovite and quartz; WR – rock as a whole. The dimensions of the rectangles are proportional to ±2σ [Petrov et al., 2015]. The analysis was performed by Yu.L. Ronkin (IGG UB RAS).

Последующие исследования в северной части комплекса (бассейны рек Граничной и Правая Рассоха) показали, что метаморфическое событие, сформировавшее кристаллические сланцы, имело место значительно раньше – в начале позднего рифея, а раннедевонское определение возраста фиксирует, вероятно, один из этапов диафтореза. По фракциям ставролита, биотита, граната, мусковита и кварца, отобранным из кристаллического сланца (обр. 5120) из района устья р. Граничной (N59.29239; E60.68632), и породе в целом получена Sm-Nd изохрона 973±49 млн лет, СКВО=1.9 (рис. 8) [Petrov et al., 2015].

4. МИНЕРАЛЫ БЕЛОКАМЕНСКОГО КОМПЛЕКСА

Указанные различия парагенезисов хорошо коррелируются с особенностями составов и зональности гранатов (Прил. 1, табл. 1.1; рис. 9, 10). В восточной и центральной части блока прогрессивная зональность (увеличение содержаний Mg и снижение Ca и Mn от центра к краям кристаллов) проявлена слабо (обр. 5122-1, 5123-2), а в западной части (обр. 5120-5) – напротив, содержания указанных элементов изменяются в 2.5–5.0 раза. Отмеченные особенности, вероятно, свидетельствуют о более равновесном составе минералов и о высокой степени завершенности метаморфических реакций во внутренних частях метаморфического ореола и, наоборот, о неравновесности составов пород и минералов во внешней (западной) части метаморфического блока. Составы внешних зон гранатов приближаются к почти чистому пироп-альмандину (рис. 10).

Светлые слюды представлены преимущественно мусковитами, реже – парагонитами (последние встречены в западной части блока, в обн. 5120) (Прил. 1, табл. 1.2). Мусковиты, замещающие кианит, отличаются отсутствием окиси титана.

Составы биотитов характеризуются значительными колебаниями содержаний Cr_2O_3, TiO_2, MgO и других окислов (Прил. 1, табл. 1.3).

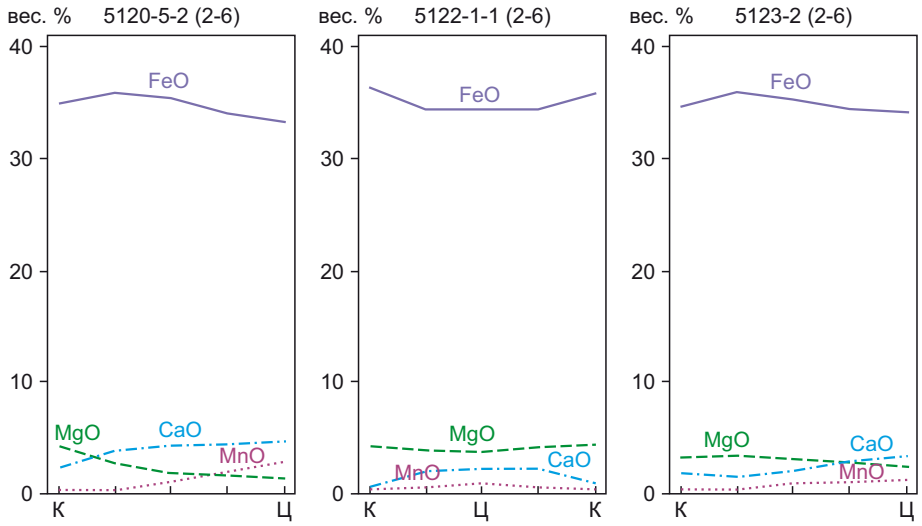

Рис. 9. Профили содержаний информативных химических элементов через кристаллы граната (по данным микрозондового анализа); Ц – центр, К – край кристалла.
Обр. 5120-5 (Qz+Grt+Bt+Ms+St+Cld) отобран в западной части Белокаменского блока, обр. 5122-1 (Qz+Grt+Bt+Ms+St+Cld+Ky) – в центральной части, обр. 5123-2 (Qz+Grt+Bt+Ms+Pl+Ky) – в восточной части.

Fig. 9. Profiles of informative chemical element contents through garnet crystals (according to microprobe analysis results); Ц – center, К – edge of crystal.
Sample 5120-5 (Qz+Grt+Bt+Ms+St+Cld) was taken from the western part of the Belokamenka block, samples 5122-1 (Qz+Grt+Bt+Ms+St+Cld+Ky) and 5123-2 (Qz+Grt+Bt+Ms+Pl+Ky) – from the central and the eastern parts of the block, respectively.

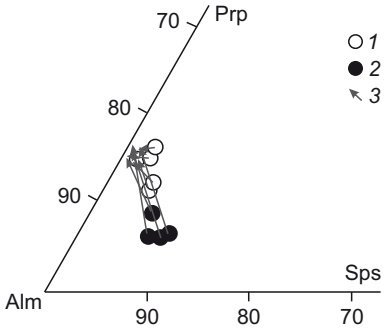

Рис. 10. Составы гранатов из кристаллических сланцев района р. Граничной. *1* – минералы из восточной части метаморфического блока (обн. 5122-5123), *2* – из западной части блока (обн. 5120), *3* – изменения составов от центра к краям зерен. Миналы гранатов: Alm – альмандин, Prp – пироп, Sps – спессартин.

Fig. 10. Compositions of garnets from crystalline schists of the Granichnaya River area. *1* – minerals from the eastern part of the metamorphic block (outcrop 5122-5123), *2* – minerals from the western part of the block (outcrop 5120), *3* – center-to-edge changes in grain composition. Garnet end-members: Alm – almandine, Prp – pyrope, Sps - spessartine.

Ставролиты в парагенезисе с кианитом (обр. 5122-1) содержат больше MgO по сравнению со ставролитами из хлоритоидсодержащих пород (обр. 5120-5). Анализы ставролитов приведены в Прил. 1, табл. 1.4.

Плагиоклазы встречены только в восточной части Белокаменского блока, в парагенезисе с гранатами, слюдами и кианитом. Составы их соответствуют альбиту и олигоклазу (Прил. 1, табл. 1.5).

Кианит характерен для центральной и восточной части блока (Прил. 1, табл. 1.5).

В Прил. 1, табл. 1.6 приведены составы хлоритоидов и хлоритов. В Прил. 1, табл. 1.7, показаны составы рутилов и ильменитов. Существенных различий составов перечисленных минералов из разных частей блока не отмечается.

Гранаты и биотиты замещаются хлоритом, ставролиты и кианиты – мусковитом.

5. ОЦЕНКА PT-ПАРАМЕТРОВ МЕТАМОРФИЗМА

Для оценки PT-параметров метаморфизма пород использовались составы граната, биотита, плагиоклаза, мусковита, ильменита с одновременной проверкой достижения равновесия между этими минералами методом TWEEQU. При расчете множества минеральных реакций для образца метапелита (5123), содержащего парагенезис «гранат+биотит+мусковит+ильменит +плагиоклаз+рутил+кварц», пересечение линий трех независимых минеральных реакций в PT-координатах позволило установить давление и температуру метаморфизма: T=619 °C, P=7.4 кбар (рис. 11).

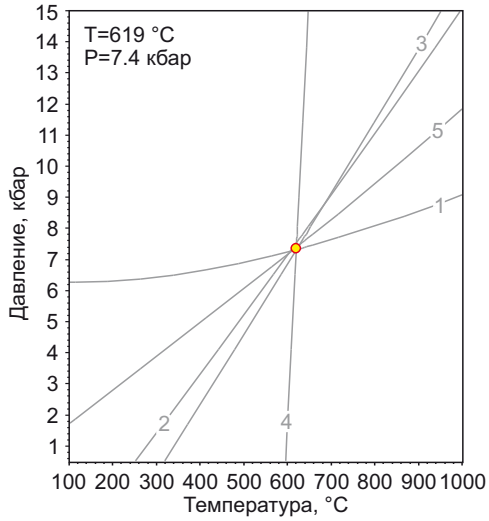

Рис. 11. PT-диаграмма для образца метапелита (5123), рассчитанная методом TQWEEQU [Berman, 1991].
Номера на линиях соответствуют пяти минеральным реакциям: 1 – 3Rt+Alm=3Ilm+Ky+2Qz, 2 – Qz+2Ky+Grs=3An, 3 – Ms+ +Grs+Alm=Ann+3An, 4 – Alm+Phl=Pyr+Ann, 5 – 6Qz+Pyr+2Grs+ +3Eas=6An+3Phl, из которых три являются независимыми.

Fig. 11. PT-diagram for the metapelite sample (5123), calculated by the TQWEEQU method [Berman, 1991].
The numbers on the lines correspond to five mineral reactions: 1 – 3Rt+Alm=3Ilm+Ky+2Qz, 2 – Qz+2Ky+Grs=3An, 3 – Ms+Grs+ +Alm=Ann+3An, 4 – Alm+Phl=Pyr+Ann, 5 – 6Qz+Pyr+2Grs+3Eas= =6An+3Phl, of which three are independent.

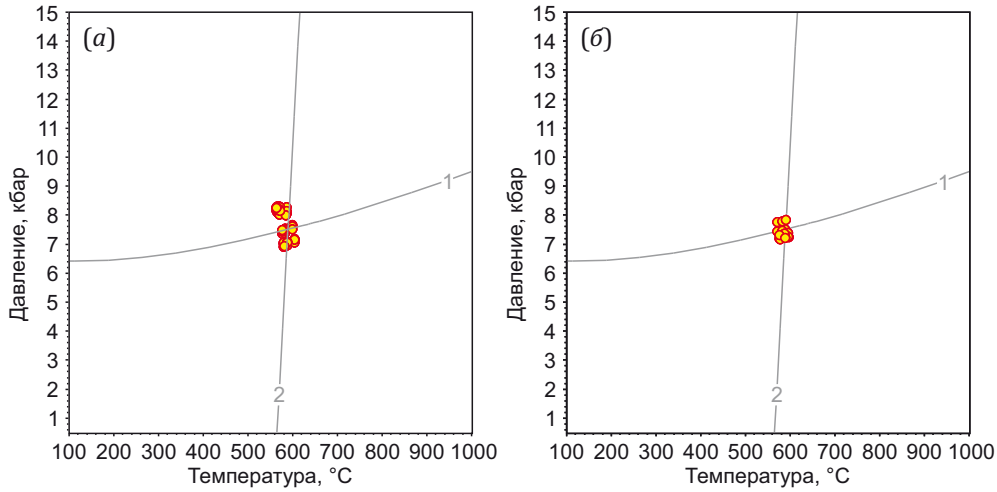

Рис. 12. PT-диаграммы для образцов метапелитов (5122-1, 5122-5), рассчитанные методом TWEEQU [Berman, 1991].
Номера на линиях соответствуют минеральным реакциям: 1 – 3Rt+Alm=3Ilm+Ky+2Qz, 2 – Phl+Alm=Ann+Pyr. Кружками показаны места пересечений линий двух аналогичных реакций, но при использовании других составов сосуществующих минералов (граната, биотита, ильменита).

Fig. 12. PT-diagrams for metapelite samples (5122-1, 5122-5), calculated by the TWEEQU method [Berman, 1991].
The numbers on the lines correspond to mineral reactions: 1 – 3Rt+Alm=3Ilm+Ky+2Qz, 2 – Phl+Alm=Ann+Pyr. The circles stand for the intersections of the lines of two similar reactions, which though involved different compositions of coexisting minerals (garnet, biotite, ilmenite).

Для двух других образцов (5122-1, 5122-5) метапелитов отсутствие в составе плагиоклаза ограничивает число независимых минеральных реакций до двух, но оцениваемые значения давления при этом практически совпадают с полученными для плагиоклазсодержащего образца метапелита (рис. 12). Температура (T~620 °C), полученная для метапелита обр. 5123, в среднем на 20 °C выше, чем у восточнее расположенных (5122-1, 5122-5) образцов, что не противоречит положению в зональности сравниваемых метапелитов (см. рис. 2), указывающей на рост температуры с запада на восток.

Рассчитанная фазовая диаграмма для породы метапелитового состава (рис. 13, а, образец 5120) хорошо воспроизводит реально наблюдаемые минеральные парагенезисы и ассоциации. В частности, для T=~620 °C и P~7.4 кбар полученные минеральные составы и их соотношения достаточно близки к наблюдаемым в этих породах.

При использовании состава более магнезиальной породы (рис. 13, б, образец 5122) также достаточно удовлетворительно моделируются наблюдаемые минеральные парагенезисы, из которых следует верхнее температурное ограничение для ставролитовой ассоциации для протолитов такого состава в диапазоне 620–650 °C.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Характерный состав парагенезисов регионального метаморфизма метапелитов, включающий ставролит,

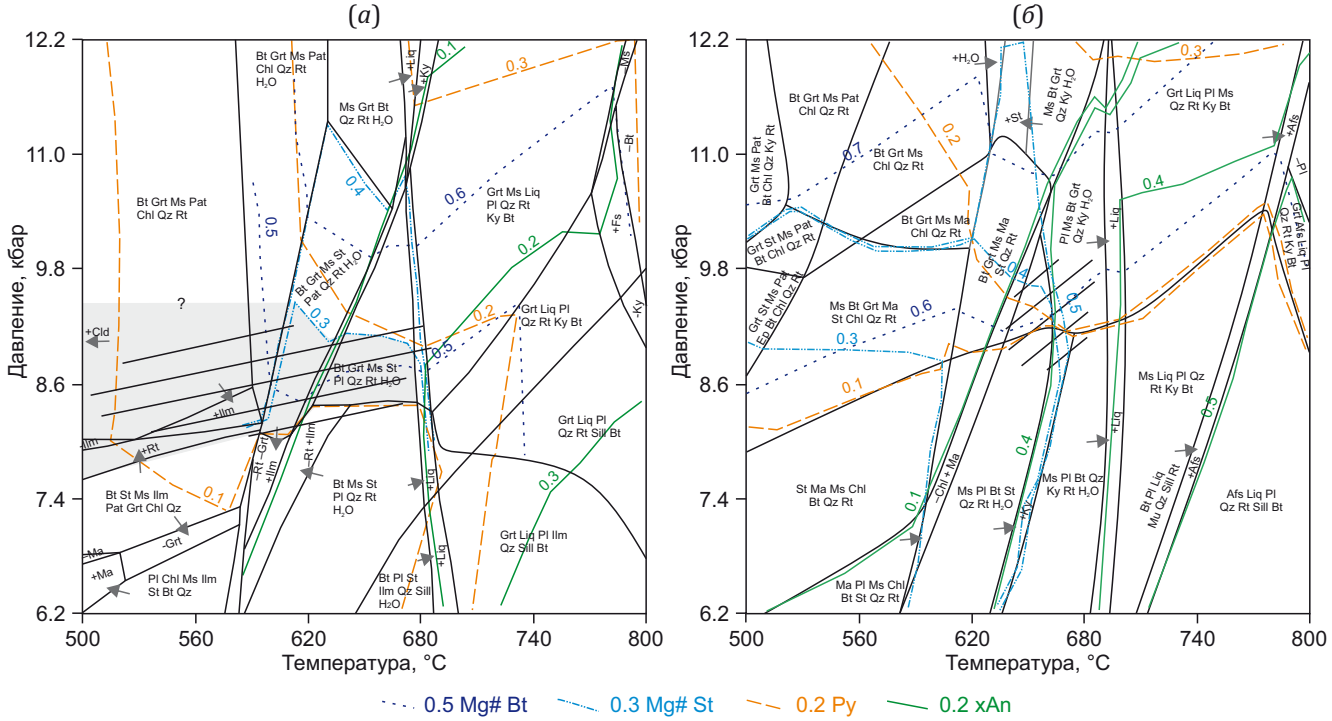

Рис. 13. PT-диаграммы фазового равновесия, рассчитанные методом минимизации энергии Гиббса.
Для расчетов на диаграмме (*а*) использован состав образца 5120 (вес. %: SiO_2=61.18, TiO_2=0.89, MgO=2.93, Al_2O_3=18.99, Fe_2O_3общ=8.29, Na_2O=1.48, K_2O=2.94, CaO=0.45, MnO=0.07, P_2O_5=0.07); на диаграмме (*б*) – состав образца 5122 (вес. %: SiO_2=50.61, TiO_2=0.69, MgO=2.18, Al_2O_3=22.38, Fe_2O_3общ=3.41, Na_2O=0.81, K_2O=5.51, CaO=0.54, MnO=0.01, P_2O_5=0.37). Серым цветом на диаграмме (*а*) показано PT-поле, соответствующее наблюдаемым минеральным парагенезисам с учетом магнезиальности биотита, граната, ставролита и состава плагиоклаза. Ограничения по давлению принимаются условно – сверху по максимальной магнезиальности ставролита xMg<0.3, снизу – по нижней границе устойчивости рутила. Широкое поле устойчивости рутила в более магнезиальной породе 5122 не позволяет оценить предельное минимальное давление из-за отсутствия модельного ильменита. Цветными изолиниями равновесия и цифрами при них показана магнезиальность ставролита, биотита, граната, а также содержание анортита в плагиоклазе.

Fig. 13. PT-equilibrium phase diagrams calculated by Gibbs energy minimization method.
The calculations of diagram (*a*) and diagram (*б*) were made using the compositions of sample 5120 (wt. %: SiO_2=61.18, TiO_2=0.89, MgO=2.93, Al_2O_3=18.99, Fe_2O_3total=8.29, Na_2O=1.48, K_2O=2.94, CaO=0.45, MnO=0.07, P_2O_5=0.07) and sample 5122 (wt. %: SiO_2=50.61, TiO_2=0.69, MgO=2.18, Al_2O_3=22.38, Fe_2O_3total=3.41, Na_2O=0.81, K_2O=5.51, CaO=0.54, MnO=0.01, P_2O_5=0.37), respectively. The gray color on diagram (*a*) shows the PT-fields corresponding to mineral parageneses observed with regard to magnesium content of biotite, garnet and staurolite, and to the plagioclase composition. The pressure limitations are defined conditionally – by the maximum magnesium content of staurolite <0.3 from above and by the lower limit of rutile stability from below. The wide stability field of rutile in high-magnesium rock 5122 does not allow estimating the ultimate minimum pressure due to the absence of model ilmenite. The colored equilibrium isolines and the numbers nearby show magnesium contents of staurolite, biotite, garnet, as well as the content of anorthite in plagioclase.

гранат, хлоритоид, плагиоклаз, белые слюды, биотит и кианит, дает возможность только приблизительно оценить PT-параметры метаморфизма. Так, по схеме субфаций и фациальных серий, предложенной в работе [Glebovitsky, 1973], поле устойчивости данного парагенезиса располагается между параметрами температуры 520–680 °C, давления – 4.5–8.5 кбар. Н.Л. Добрецов с соавторами [Sobolev, 1974] указывают на приуроченность парагенезиса Bt+Ky+Cld±Grt к зонам особо повышенных давлений; условия формирования таких пород сопоставимы с PT-параметрами образования гранат-глаукофановых амфиболитов. Р.Х. Вернон ограничивает нижний предел устойчивости парагенезиса «кианит+ставролит+биотит+кварц» температурой 530 °C и давлением 4.7 кбар [Vernon, 1980]. Согласно работе [Korikovsky, 1979] вышеуказанные парагенезисы метапелитов относятся к фациальной серии кианит-силлиманитового типа и отвечают широкому диапазону PT-условий: от ставролит-хлоритоидной и ставролит-хлоритовой субфаций до нижней ступени кианит-биотит-ставролитовой субфации ставролитовой фации.

Приведенные выше наши термобарометрические оценки параметров метаморфизма пород дают более узкие диапазоны как по температуре, так и по давлению. Основываясь на этих значениях P и T, можно считать, что изученные породы были подвергнуты среднетемпературному метаморфизму умеренно повышенных давлений. Указанное вполне согласуется с наблюдаемыми минеральными парагенезисами в породах.

Следует обратить внимание на смену по латерали (см. рис. 2) таких глиноземистых Fe-Mg минералов, как хлоритоид, хлорит, ставролит. Такая последовательность (хлоритоид–>хлорит–>ставролит) смены минеральных ассоциаций в породах вполне согласуется с прогрессивным рядом минералообразования, связанным с ростом температуры. Этот ряд минералообразования подтверждают и термодинамические расчеты появления указанных минералов при росте температуры (рис. 14).

Таким образом, в минеральных парагенезисах кристаллических сланцев белокаменского комплекса запечатлен эпизод прогрессивного метаморфизма средних температур и повышенных давлений, что вполне

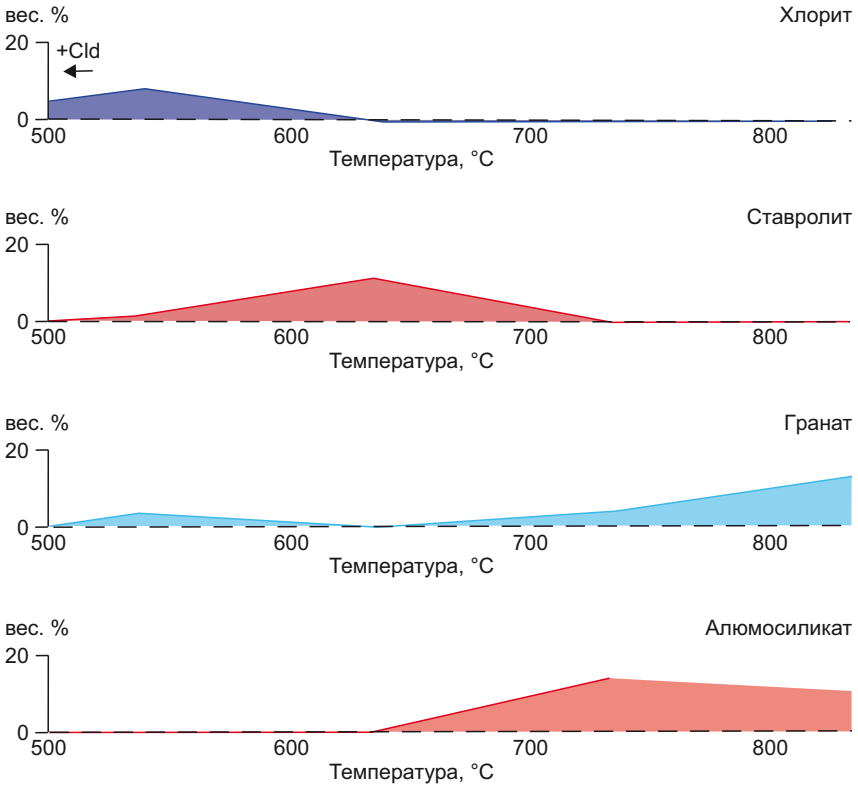

Рис. 14. Последовательность образования глиноземистых минералов в породах пелитового состава по результатам термодинамического расчета минералообразования методом минимизации энергии Гиббса в программе MAGEMin.
Расчеты с использованием состава образца 5120 произведены для области на PT-диаграмме, приведенной на рис. 13. Предполагается, что исходная порода (протолит) такого состава подвергалась метаморфизму при смене PT- параметров в указанной области. Алюмосиликат может в разных частях тренда представлять фазу кианита или силлиманита.

Fig. 14. Sequence of formation of aluminous minerals in pelitic rocks based on the results of thermodynamic calculation of mineral formation by Gibbs energy minimization method in the MAGEMin program.
Calculations using the composition of sample 5120 were made for the area of the PT-diagram shown in Fig. 13. It is assumed that the original rock (protolith) of this nature was subject to metamorphism with changes in the PT-parameters in this area. Aluminosilicate in different parts of the trend can represent kyanite or sillimanite phase.

отвечает предполагаемой здесь обстановке коллизии [Petrov et al., 2015].

По представлениям Н.Б. Кузнецова и В.Н. Пучкова [Kuznetsov, 2009; Puchkov, 2010], а также других исследователей, докембрийские комплексы северной части Урала входили в состав палеоконтинента Арктида (или Арктида-1), аккретированного к северо-западной (в современных координатах) окраине Балтики в позднем венде – раннем кембрии. Наиболее детальные реконструкции истории формирования и эволюции Арктиды содержатся в работе Д.В. Метелкина с соавторами [Metelkin et al., 2015]. Согласно реконструкциям указанных авторов, в эпоху гренвильского орогенеза Арктида (точнее Арктида-1 по Д.В. Метелкину) располагалась в составе Родинии между Лаврентией, Сибирью и «скандинавской» частью Балтики. Позднее крупные блоки, составляющие Арктиду-1 (Кара и Свальбард), переместились в область современного фундамента Печорской синеклизы и северной части Урала. Таким образом, исследованный нами белокаменский метаморфический комплекс мог быть частью древнего орогенного пояса, фрагменты которого в настоящее время наблюдаются в Северной Скандинавии [Bingen et al., 2008], на Енисейском кряже [Likhanov et al., 2024], а также в Гренландии и на севере Канады [Li et al., 2008; Evans, 2009]. Возможно, более углубленное изучение докембрийских комплексов севера Урала и, в том числе, метаморфических образований позволит выполнить корреляцию и «сложить воедино» фрагменты древней орогенной структуры.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами выполнено исследование белокаменского метаморфического комплекса, расположенного в слабо изученном районе Северного Урала. Установлено, что в метапелитах комплекса существует определенная минеральная зональность, выраженная в смене парагенезисов (в направлении с запада на восток), содержащих хлоритоид, мусковит, кварц, ставролит и гранат, на породы с гранатом, биотитом, мусковитом, ставролитом и кианитом; в восточной части Белокаменского блока ставролит исчезает, остаются гранат, биотит, мусковит, кварц, плагиоклаз и кианит. Характер зональности гранатов и анализ последовательности минералообразования свидетельствуют о прогрессивном характере метаморфизма. Использование методов мультиравновесной геотермобарометрии (winTWQ) позволило определить параметры пикового метаморфизма: T=619 °C, P=7.4 кбар. Установленный среднетемпературный умеренно высокобарический тип метаморфизма белокаменского комплекса, датированный ранее возрастом 973±49 млн лет, позволяет связать его с проявлением гренвильской орогении.

8. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят анонимных рецензентов, чьи вдумчивые и благожелательные замечания и предложения помогли улучшить первоначальный вариант рукописи.

9. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Both authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

10. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

11. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Berman R.G., 1991. Thermobarometry Using Multi-equilibrium Calculations: A New Technique with Petrologic Applications. Canadian Mineralogist 29 (4), 833–855.

Berman R.G., 2007. WinTWQ: A Software Package for Performing Internally-Consistent Thermobarometric Calculations. Version 2.3. Geological Survey of Canada, Open File 5462, 41 p. https://doi.org/10.4095/223228.

Berman R.G., Aranovich L.Y., Rancourt P., Mercier P.H., 2007. Reversed Phase Equilibrium Constraints on the Stability of Mg-Fe-Al Biotite. American Mineralogist 92 (1), 139–150. https://doi.org/10.2138/am.2007.2051.

Bingen B., Nordgulen Ø., Viola G., 2008. A Four-Phase Model for the Sveconorwegian Orogeny, SW Scandinavia. Norwegian Journal of Geology 88, 43–72.

Evans D.A.D., 2009. The Palaeomagnetically Viable, Long-Lived and All-Inclusive Rodinia Supercontinent Reconstruction. In: J.B. Murphy, J.D. Keppie, A.J. Hynes (Eds), Ancient Orogens and Modern Analogues. Geological Society of London Special Publications 327, p. 371–404. https://doi.org/10.1144/SP327.16.

Glebovitsky V.A., 1973. Problems of the Evolution of Metamorphic Processes in Mobile Areas. Nauka, Leningrad, 128 p. (in Russian) [Глебовицкий В.А., 1973. Проблемы эволюции метаморфических процессов в подвижных областях. Л.: Наука, 128 с.].

Korikovsky S.P., 1979. Metamorphic Facies of Metapelites. Nauka, Moscow, 269 p. (in Russian) [Кориковский С.П. Фации метаморфизма метапелитов. М.: Наука, 1979. 269 с.].

Korinevsky E.V., 2015. PetroExplorer – System for Creation of Geochemical Information-Analytical Arrays in the Process of Thematic Investigations. Geoinformatics 4, 48–53 (in Russian) [Кориневский Е.В., PetroExplorer – система для создания геохимических информационно-аналитических массивов в процессе тематических исследований // Геоинформатика. 2015. № 4. С. 48–53].

Kuznetsov N.B., 2009. Cambrian Collision of Baltica and Arctica – The Initial Stage of "Assembly" of the Northern Part of the Late Palaeozoic – Early Mesozoic Pangea. Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Series

84 (1), 18–38 (in Russian) [Кузнецов Н.Б. Кембрийская коллизия Балтики и Арктиды – начальный этап «собирания» северной части позднепалеозойско-раннемезозойской Пангеи // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. 2009. Т. 84. Вып. 1. С. 18–38].

Li Z.X., Bogdanova S.V., Collins A.S., Davidson A., De Waele B., Ernst R.E., Fitzsimons I.C.W., Fuck R.A. et al., 2008. Assembly, Configuration, and Break-Up History of Rodinia: A Synthesis. Precambrian Research 160 (12), 179–210. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.021.

Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Nozhkin A.D., Kozlov P.S., 2024. Evidence of Grenville and Valgalian Tectonic Events on the Western Margin of the Siberian Craton (Angara Complex, Yenisei Ridge). Geospheric Research 2, 6–36 (in Russian) [Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Ножкин А.Д., Козлов П.С. Свидетельства гренвильских и вальгальских тектонических событий на западной окраине Сибирского кратона (Ангарский комплекс, Енисейский кряж) // Геосферные исследования. 2024. № 2. С. 6–36]. DOI:10.17223/25421379/31/1.

Maslov A.V., Ronkin Y.L., Podkovyrov V.N., Gareev E.Z., 2014. Contribution of Grenvillian Events to the Formation of Most Complete Riphean Sedimentary Successions in Northern Eurasia. Stratigraphy and Geological Correlation 22 (2), 160–174. https://doi.org/10.1134/S0869593814020063.

Metelkin D.V., Vernikovsky V.A., Matushkin N.Yu., 2015. Arctida Between Rodinia and Pangea. Precambrian Research 259, 114–129. http://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.09.013.

Petrov G.A., Ronkin Yu.L., Maslov A.V., 2015. Repercussions of the Grenvillian Orogeny in Riphean Sequences of the Northern Urals: Thermodynamic Parameters of Metamorphism and Sr-Nd Isotopic Constraints. Doklady Earth Sciences 462 (2), 575–580. https://doi.org/10.1134/S1028334X15060215.

Petrov G.A., Tristan N.I., Ronkin Yu.L., Kozlov P.S., Popov N.V., 2009. Two Stages of High-Pressure Metamorphism in the Main Uralian Fault Area (Northern Urals). Russian Geology and Geophysics 50 (1), 43–45.

Puchkov V.N., 2010. Geology of the Urals and Cis-Urals (Actual Problems of Stratigraphy, Tectonics, Geodynamics and Metallogeny). DizaynPoligrafServis, Ufa, 280 p. (in Russian) [Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.].

Pystin A.M., Pystina Yu.I., 2008. Metamorphism and Granite Formation in the Proterozoic – Early Paleozoic History of the Formation of the Subpolar Segment of the Earth's Crust. Lithosphere 6, 25–38 (in Russian) [Пыстин А.М., Пыстина Ю.И. Метаморфизм и гранитообразование в протерозойско-раннепалеозойской истории формирования Приполярноуральского сегмента земной коры // Литосфера. 2008. № 6. С. 25–38].

Riel N., Kaus B.J.P., Green E.C.R., Berlie N., 2022. MAGEMin, an Efficient Gibbs Energy Minimizer: Application to Igneous Systems. Geochemistry, Geophysics, Geosystems 23 (7), e2022GC010427. https://doi.org/10.1029/2022GC010427.

Sobolev V.S. (Ed.), 1974. Facies of Regional High-Pressure Metamorphism. Nedra, Moscow, 328 p. (in Russian) [Фации регионального метаморфизма высоких давлений / Ред. В.С. Соболев. М.: Недра, 1974. 328 с.].

Vernon R.H., 1980. Metamorphic Processes, Reactions and the Development of Microstructure. Nedra, Moscow, 227 p. (in Russian) [Вернон Р.Х. Метаморфические процессы, реакции и развитие микроструктуры. М.: Недра, 1980. 227 с.].

Weber B., Köhler H., 1999. Sm-Nd, Rb-Sr and U-Pb Geochronology of a Grenville Terrane in Southern Mexico: Origin and Geologic History of the Guichicovi Complex. Precambrian Research 96 (3–4), 245–262. https://doi.org/10.1016/S0301-9268(99)00012-1.

White R.W., Powell R., Holland T.J.B., Johnson T.E., Green E.C.R., 2014. New Mineral Activity-Composition Relations for Thermodynamic Calculations in Metapelitic Systems. Journal of Metamorphic Geology 32 (3), 261–286. https://doi.org/10.1111/jmg.12071.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

Таблица 1.1. Составы гранатов белокаменского комплекса
Table 1.1. Compositions of garnets from the Belokamenka complex

№ п.п.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SiO_2, %	37.53	37.43	37.18	37.03	36.50	37.61	37.76	37.43	37.60	37.70	37.11	37.61	37.45	37.28	37.36
TiO_2	0.00	0.00	0.00	0.05	0.35	0.01	0.00	0.03	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03
Al_2O_3	21.15	20.99	20.89	20.80	20.57	21.36	21.19	21.11	21.36	21.20	21.08	21.13	21.21	21.07	20.95
Cr_2O_3	0.01	0.02	0.01	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.04	0.01	0.00
FeO	35.07	36.01	35.45	34.16	33.19	36.82	34.74	34.73	34.74	36.11	34.99	35.81	35.68	34.58	34.48
MnO	0.10	0.07	0.92	1.82	2.69	0.40	0.93	1.04	0.95	0.50	0.70	0.70	0.84	1.27	1.58
MgO	3.99	2.46	1.69	1.47	1.34	4.01	3.84	3.88	3.91	4.17	3.55	3.59	3.35	2.98	2.60
CaO	2.08	3.67	4.12	4.36	4.46	0.66	2.06	2.13	2.17	0.89	2.10	1.89	2.30	3.13	3.43
Na_2O	0.03	0.03	0.03	0.01	0.05	0.01	0.02	0.05	0.00	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00	0.05
K_2O	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01
Σ	99.96	100.62	100.30	99.72	99.16	100.91	100.55	100.42	100.73	100.57	99.58	100.77	100.87	100.32	100.47
Py	15.90	9.83	6.80	5.93	5.46	15.91	15.19	15.52	15.50	16.56	14.29	14.25	13.34	11.91	10.42
Alm	77.92	79.48	79.19	77.27	75.24	81.32	76.86	75.99	76.18	79.77	78.03	78.79	78.19	76.21	76.10
Sps	0.23	0.16	2.10	4.17	6.23	0.90	2.09	2.36	2.14	1.13	1.60	1.58	1.90	2.89	3.60
And	0.04	0.19	0.14	0.00	0.13	0.02	0.02	0.18	0.10	0.03	0.09	0.07	0.14	0.18	0.21

Примечание. 1–5 – обр. 5120-5: 1 – край зерна, 5 – центр зерна, 2–4 – промежуточные точки от края к центру; 6–10 – обр. 5122-1: 6 и 10 – края зерна, 8 – центр зерна, 7 и 9 – промежуточные точки; 11–15 – обр. 5123-2: 11 – край зерна, 15 – центр зерна, 12–14 – промежуточные точки от края к центру. Миналы рассчитаны при помощи программы Mineral Calc [Korinevsky, 2015].

Note. 1–5 – sample 5120-5: 1 – grain edge, 5 – grain center, 2–4 – edge-to-center points; 6–10 – sample 5122-1: 6 and 10 – grain edges, 8 – grain center, 7 and 9 – edge-to-center points; 11–15 – sample 5123-2: 11 – grain edge, 15 – grain center, 12–14 – edge-to-center points. The endmembers were calculated using the Mineral Calc software [Korinevsky, 2015].

Таблица 1.2. Составы белых слюд белокаменского комплекса
Table 1.2. Compositions of white micas of the Belokamenka complex

№ п.п.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO_2, %	46.57	46.36	46.19	46.29	46.87	46.48	46.75	45.81	45.82	48.77
TiO_2	0.15	0.14	0.16	0.28	0.46	0.51	0.45	0.53	0.00	0.00
Al_2O_3	39.35	39.50	33.88	37.43	36.06	35.68	35.61	37.50	39.38	35.93
Cr_2O_3	0.10	0.04	0.03	0.06	0.04	0.06	0.00	0.02	–	–
FeO	0.21	0.16	1.23	0.72	0.96	0.97	1.01	0.93	0.47	0.87
MnO	0.00	0.00	0.00	0.06	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00
MgO	0.08	0.08	1.23	0.37	0.77	0.76	0.80	0.59	0.16	0.76
CaO	0.13	0.19	0.00	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	0.48	0.08
Na_2O	6.75	7.34	0.90	3.09	1.36	1.40	1.42	1.51	1.86	0.41
K_2O	1.59	0.74	9.52	6.72	8.80	8.80	9.00	8.76	7.43	9.52
Σ	94.95	94.55	92.89	95.07	95.35	94.69	95.02	95.67	95.61	96.34

Примечание. 1–4 – обр. 5120-5: 1, 2 – парагониты; 3, 4 – мусковиты; 5, 6 – мусковиты, обр. 5122-1; 7, 8 – мусковиты, обр. 5123-4; 9–10 – мусковиты, образовавшиеся по кианиту, южная часть Белогорского блока.

Note. 1–4 – sample 5120-5: 1, 2 – paragonites; 3, 4 – muscovites; 5, 6 – muscovites, sample 5122-1; 7, 8 – muscovites, sample 5123-4; 9–10 – muscovites derived from kyanite, southern part of the Belogorsk block.

Таблица 1.3. Составы биотитов белокаменского комплекса
Table 1.3. Compositions of biotites from the Belokamenka complex

№ п.п.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO_2, %	33.47	33.45	36.81	36.77	34.00	36.31	41.07	35.60	35.46	35.49
TiO_2	1.37	1.39	1.51	1.75	1.57	1.62	0.20	1.29	1.74	1.74
Al_2O_3	17.36	17.24	17.92	18.16	18.09	17.93	22.71	17.14	17.28	17.57
Cr_2O_3	3.27	2.51	0.20	0.08	0.14	0.20	0.03	0.02	0.05	0.17
FeO	18.76	19.96	15.86	16.87	18.68	16.49	12.55	19.17	19.97	18.15
MnO	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.02	0.00	0.01	0.04	0.00
MgO	9.02	9.43	12.06	11.37	13.13	12.04	7.12	10.90	10.34	10.82
CaO	0.14	0.13	0.03	0.00	0.03	0.04	0.03	0.00	0.00	0.03
Na_2O	0.27	0.22	0.16	0.17	0.10	0.16	0.04	0.08	0.05	0.18
K_2O	7.40	6.96	8.80	8.76	6.39	8.55	8.96	8.04	8.63	8.67
xMg	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
Σ	91.05	91.29	93.38	93.97	92.14	93.35	92.73	92.23	93.56	92.83

Примечание. 1, 2 – обр. 5120-5; 3–6 – обр. 5122-1; 7–10 – обр. 5123-3.
Note. 1, 2 – sample 5120-5; 3-6 – sample 5122-1; 7–10 – sample 5123-3.

Таблица 1.4. Составы ставролитов белокаменского комплекса
Table 1.4. Compositions of staurolites from the Belokamenka complex

№ п.п.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO_2, %	28.49	28.11	28.24	28.47	28.44	28.07	28.60	28.30	28.36	28.32
TiO_2	0.63	0.58	0.65	0.63	0.60	0.67	0.60	0.64	0.63	0.62
Al_2O_3	53.42	53.22	53.16	53.29	53.43	53.99	53.91	53.23	53.45	53.49
Cr_2O_3	0.06	0.05	0.03	0.06	0.01	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03
FeO	13.09	13.43	13.32	13.45	12.79	13.51	12.79	13.39	12.86	13.38
MnO	0.00	0.00	0.01	0.05	0.01	0.00	0.00	0.06	0.00	0.04
MgO	1.42	1.32	1.29	1.31	1.13	1.77	1.54	1.66	1.63	1.62
CaO	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
Na_2O	0.03	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
K_2O	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
xMg	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
Σ	97.17	96.73	96.71	97.28	96.41	98.03	97.47	97.32	96.97	97.51

Примечание. 1–5 – обр. 5120-5, 6–10 – обр. 5122-1.
Note. 1–5 – sample 5120-5, 6–10 – sample 5122-1.

Таблица 1.5. Составы плагиоклазов и кианитов белокаменского комплекса
Table 1.5. Compositions of plagioclases and kyanites from the Belokamenka complex

№ п.п.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO_2, %	67.87	64.89	65.23	63.26	37.41	37.37	37.44	36.72	37.49	37.39
TiO_2	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00
Al_2O_3	20.67	22.67	21.90	22.95	63.05	62.73	62.87	62.75	63.02	62.88
Cr_2O_3	0.00	0.00	0.01	0.02	0.04	0.09	0.04	0.04	0.05	0.02
FeO	0.00	0.00	0.15	0.03	0.20	0.20	0.20	0.17	0.16	0.19
MnO	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03
MgO	0.02	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.01	001	0.00	0.00
CaO	0.62	3.32	2.96	4.49	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02
Na_2O	11.60	9.94	10.02	9.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K_2O	0.15	0.18	0.51	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
xAn	0.03	0.15	0.14	0.21	–	–	–	–	–	–
Σ	100.95	100.03	100.86	100.30	100.58	100.28	100.58	99.72	100.75	100.53

Примечание. 1–4 – плагиоклазы, обр. 5123-4; 5–7 – кианиты, обр. 5122-1; 8–10 – кианиты, обр. 5123-4.
Note. 1–4 – plagioclases, sample 5123-4; 5–7 – kyanites, sample 5122-1; 8–10 – kyanites, sample 5123-4.

Таблица 1.6. Составы хлоритоидов и хлоритов белокаменского комплекса
Table 1.6. Compositions of chloritoids and chlorites from the Belokamenka complex

№ п.п.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO_2,%	23.62	24.52	24.40	24.37	25.11	28.25	28.83	25.50	25.51	24.80
TiO_2	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.55	0.02	0.02	0.01	0.02
Al_2O_3	38.35	39.80	39.99	39.70	22.75	19.03	19.62	20.75	20.18	21.32
Cr_2O_3	0.05	0.01	0.01	0.02	0.16	0.10	0.07	0.06	0.42	0.25
FeO	26.99	25.81	25.34	24.99	24.26	23.32	23.41	27.71	27.43	28.60
MnO	0.07	0.03	0.04	0.02	0.00	0.02	0.00	0.18	0.10	0.22
MgO	1.98	2.04	2.02	1.89	13.89	13.02	14.24	12.75	12.77	11.68
CaO	0.02	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	0.04	0.05	0.04
Na_2O	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00
K_2O	0.02	0.01	0.00	0.01	0.03	2.12	0.01	0.01	0.02	0.01
Σ	91.14	92.24	91.82	91.01	86.26	86.45	86.24	87.01	86.51	86.94

Примечание. 1–4 – хлоритоиды, обр. 5120-5; 5–7 – хлориты, обр. 5120-5; 8–10 – хлориты, обр. 5123-3.
Note. 1–4 – chloritoids, sample 5120-5; 5–7 – chlorites, sample 5120-5; 8–10 – chlorites, sample 5123-3.

Таблица 1.7. Составы ильменитов и рутилов белокаменского комплекса
Table 1.7. Compositions of ilmenites and rutiles from the Belokamenka complex

№ п.п.	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO_2, %	0.03	0.05	2.82	2.81	0.03	0.05	0.43	0.07
TiO_2	97.61	97.59	95.09	50.90	53.82	50.82	53.15	53.41
Al_2O_3	0.12	0.10	0.18	0.75	0.07	0.07	0.35	0.07
Cr_2O_3	0.10	0.02	0.04	0.02	0.03	0.45	0.00	0.01
FeO	0.97	0.52	0.50	44.28	45.91	46.43	45.19	44.58
MnO	0.05	0.00	0.00	0.37	0.24	0.10	0.25	0.28
MgO	0.00	0.01	0.01	0.06	0.11	0.52	0.05	0.08
CaO	0.01	0.02	0.06	0.03	0.01	0.04	0.02	0.01
Na_2O	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.11	0.01
K_2O	0.00	0.05	0.03	0.30	0.00	0.00	0.02	0.01
Σ	98.90	98.36	98.73	99.52	100.22	98.48	99.57	98.53

Примечание. 1–3 – рутилы: 1 – обр. 5120-5; 2, 3 – обр. 5123-3; 4–8 – ильмениты: 4, 5 – обр. 5122-1; 6 – обр. 5122-5; 7 – обр. 2123-2; 8 – обр. 2123-4.
Note. 1–3 – rutiles: 1 – sample 5120-5; 2, 3 – sample 5123-3; 4–8 – ilmenites: 4, 5 – sample 5122-1; 6 – sample 5122-5; 7 – sample 2123-2; 8 – sample 2123-4.