

УДК 551.251+552.48

DOI: 10.24930/2500-302X-2025-25-3-485-505

Высокобарический метаморфизм в зоне Главного Уральского разлома в бассейне р. Северная Сосьва (Северный Урал)

Г. А. Петров¹, Ш. К. Балтыбаев², П. С. Козлов¹, Н. И. Тристан³

¹Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15, e-mail: Georg_Petrov@mail.ru

²Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, 199034, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2

³АО “Уральская геолого-съёмочная экспедиция”, 620014, г. Екатеринбург, ул. Вайнера, 55а

Поступила в редакцию 29.06.2024 г., принята к печати 02.09.2024 г.

Объект исследования. Исследовались метаморфические породы хомасьинской свиты нижнего-среднего ордовика на Северном Урале (бассейн р. Северная Сосьва) в зоне Главного Уральского разлома (ГУР). **Цель.** Реконструкция палеообстановки формирования метаморфических пород. **Методы и материалы.** Выполнены геохимические и петролого-минералогические исследования, а также геотермобарометрия совместно с моделированием минералообразования. **Результаты.** Геохимические особенности базальтов пород хомасьинской свиты указывают на обогащенный мантийный источник. Пространственная ассоциация metabазальтов с аркозовыми, кварцевыми песчаниками и алевролитами позволяет считать, что накопление толщ происходило в обстановке перехода от континентального рифтогенеза к океаническому спредингу, исследуемая структура представляет собой фрагмент раннепалеозойской пассивной вулканической континентальной окраины. На фоне повсеместного метаморфизма фации зеленых сланцев вблизи ГУР картируются зоны глаукофансодержащих пород, а в тектонических линзах наблюдаются гранатсодержащие хлорит-эпидот-амфибол-мусковит-кварц-альбитовые сланцы. Амфиболы в зоне ГУР представлены актинолитами, винчитами, барруазитами, глаукофанами и магнезиальной роговой обманкой, гранаты демонстрируют прогрессивную (прямую) зональность. Белые слюды представлены фенгитами, во внутренних зонах кристаллов граната иногда присутствуют реликты парагонита. Гранатсодержащие породы формировались при давлениях не ниже 7–8 кбар и при температуре 400–500°C. **Выводы.** Предполагается, что минеральный состав пород и термодинамический режим их образования отвечает геодинамическому режиму субдукции (безгранатовые глаукофановые сланцы) с последующим переходом к режиму коллизии (парагенезисы с гранатом, актинолитом и роговой обманкой), чему не противоречат результаты изотопного датирования пород и выявленные *P-T* параметры их метаморфизма.

Ключевые слова: Северный Урал, Главный Уральский разлом, высокобарический метаморфизм, *P-T* параметры

Источник финансирования

Исследования проведены в соответствии с темами государственного задания ИГТ УрО РАН (№№ госрегистрации 123011800013-6, 123011800009-9, 1230118000143) с использованием оборудования ЦКП “Геоаналитик” ИГТ УрО РАН. Дооснащение и комплексное развитие ЦКП “Геоаналитик” ИГТ УрО РАН осуществляются при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-680

High-pressure metamorphism in the area of the Main Ural fault in the Severnaya Sosva River basin (Northern Urals)

Georg A. Petrov¹, Shauket K. Baltybaev², Pavel S. Kozlov¹, Nina I. Tristan³

¹A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st., Ekaterinburg 620110, Russia, e-mail: Georg_Petrov@mail.ru

²Institute of Geology and Geochronology of the Precambrian, RAS, 2 Makarova emb., St. Petersburg 199034, Russia

³JSC Ural geological survey expedition, 55a Vainer st., Ekaterinburg 620014, Russia

Received 29.06.2024, accepted 02.09.2024

Для цитирования: Петров Г.А., Балтыбаев Ш.К., Козлов П.С., Тристан Н.И. (2025) Высокобарический метаморфизм в зоне Главного Уральского разлома в бассейне р. Северная Сосьва (Северный Урал). *Литосфера*, 25(3), 485–505. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-485-505>. EDN: ELJTND

For citation: Petrov G.A., Baltybaev Sh.K., Kozlov P.S., Tristan N.I. (2025) High-pressure metamorphism in the area of the Main Ural fault in the Severnaya Sosva River basin (Northern Urals). *Lithosphere (Russia)*, 25(3), 485–505. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-485-505>. EDN: ELJTND

Research subject. Metamorphic rocks of the Khomasya formation of the Lower-Middle Ordovician in the Northern Urals (the basin of the Severnaya Sosva River) in the area of the Main Ural fault (GUR) were studied. **Aim.** Reconstruction of the formation environment of metamorphic rocks. **Materials and Methods.** Geochemical and petrological-mineralogical studies were performed, along with geothermobarometry coupled with mineral formation modeling. **Results.** The geochemical features of the basalts of the Khomasya formation rocks indicate an enriched mantle source. The spatial association of metabasalts with arkose, quartz sandstones, and siltstones suggests that the accumulation of strata occurred during the transition from continental rifting to oceanic spreading, and that the structure under study is a fragment of an Early Paleozoic passive volcanic continental margin. Against the background of widespread metamorphism of the facies of green shales, zones of glaucophane-containing rocks are mapped near the GUR, and garnet-containing chlorite-epidote-amphibole-muscovite-quartz-albite shales are observed in tectonic lenses. Amphiboles in the GUR area are represented by actinolites, winchites, barroisites, glaucophanes, and magnesian hornblende; garnets demonstrate a progressive (direct) zonality. White micas are represented by phengites, and sometimes there are relics of paragonite in the inner zones of garnet crystals. Garnet-containing rocks were formed at pressures not lower than 7–8 kbar and at temperatures up to ~ 600°C. **Conclusions.** It is assumed that the mineral composition of rocks and the thermodynamic regime of their formation correspond to the geodynamic regime of subduction (granite-free glaucophane shales) followed by a transition to the collision regime (paragenesis with garnet, actinolite, and hornblende), which agrees with the results of isotope dating of rocks and the revealed *P-T* parameters of their metamorphism.

Keywords: Northern Urals, Main Ural fault, high-pressure metamorphism, *R-T* parameters

Funding information

The research was carried out in accordance with the topics of the state task of IGG Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (state registration No. 123011800013-6, 123011800009-9, 1230118000143), using the equipment of the CCP "Geoanalytik" IGG Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Retrofitting and integrated development of the CCP "Geoanalytik" IGG Ural Branch of the Russian Academy of Sciences is carried out with the financial support of a grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement No. 075-15-2021-680

Acknowledgements

The authors are grateful to A.M. Pystin and I.I. Likhanov for their useful recommendations.

ВВЕДЕНИЕ

Пояс эклогит-глаукофансланцевого метаморфизма протягивается с перерывами в зоне Главного Уральского разлома более чем на 2000 км (Удовкина, 1971; Добрецов, 1974; Ленных, 1978; Вализер, Ленных, 1988; Пыстин, 1994; Пучков, 2010; и др.). Наиболее изученными фрагментами этого пояса являются эклогитовые комплексы – Марункеуский на Полярном Урале и Максютковский на Южном; особенностям метаморфизма и возрасту протолита в них посвящено огромное количество публикаций (Шацкий и др., 2000; Molina et al., 2002; Вализер и др., 2015; Селятицкий, Куликова, 2017; Лю и др., 2019; Русин и др., 2021; Салимгараева, Березин, 2023; и др.). На Приполярном Урале наибольшее внимание исследователей привлекал Неркаюс-

ский глаукофан-эклогитовый комплекс и его обрамление, что также хорошо освещено в литературе (Карстен, 1989; Gomez-Pugnaire et al., 1997; Иванов и др., 2000; Григорьев и др., 2005; Пыстин и др., 2019; и др.). На фоне этого североуральский фрагмент пояса оказался наименее изученным и в опубликованных работах В.В. Шалагинова (1975), А.И. Русина и О.Б. Никифорова (1991), Г.А. Петрова и В.Н. Пучкова (1994) хотя и дается общая характеристика эндогенной эволюции пояса, сведения об условиях и *PT* параметрах формирования пород, необходимых для региональных корреляций событий метаморфизма, скудны. Для восполнения этого пробела нами были исследованы метаморфические породы ГУР в бассейне р. Северная Сосьва на восточном склоне Северного Урала (рис. 1) в целях уточнения физико-химических условий их образования.

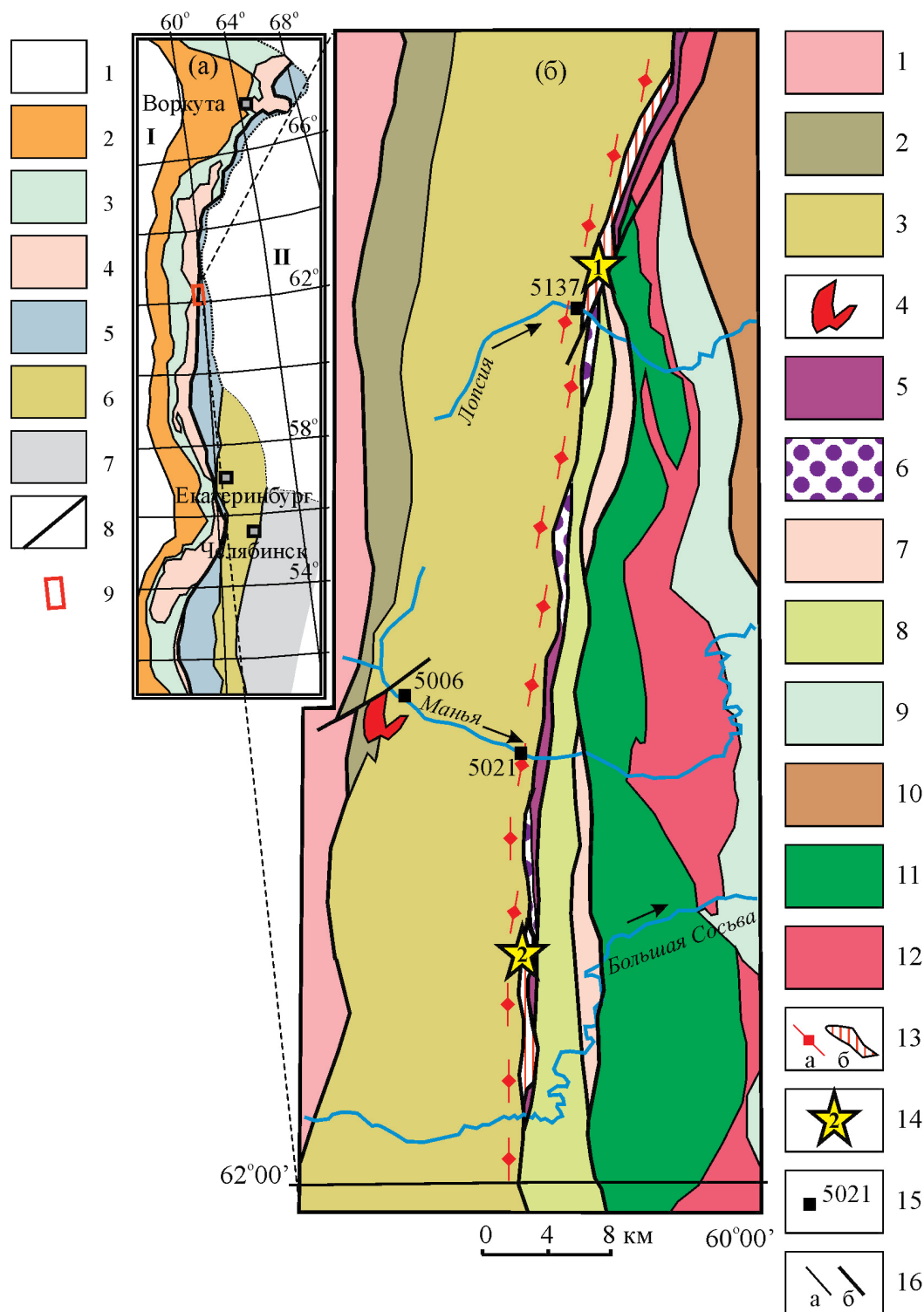


Рис. 1. Схема расположения главных структур Урала (Пучков, 2010, с изменениями) (а) и схематическая геологическая карта исследуемого района, составленная по материалам геолого-съемочных работ Уральской геолого-съемочной экспедиции (б).

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-Шучинская мегазоны (палеозойские преимущественно островодужные образования), 6, 7 – Восточно-Уральская и Зауральская мегазоны (коллаж блоков и пластин палеозойских и докембрийских комплексов); 8 – ГУР; 9 – исследуемая территория.

б (врезка): 1–4 – комплексы окраины Восточно-Европейского палеоконтинента: 1 – докембрийские толщи Центрально-Уральского поднятия (саблгорская свита RF_3-V_1 , метаморфизованные базальты и вулканогенно-осадочные породы), 2–4 – комплексы раннепалеозойской рифтогенной пассивной континентальной окраины: 2 – саранхапнерская свита ϵ_3-O_1 , метапесчаники, 3 – хомасьинская свита O_{1-2} , сланцы серицит-хлорит-альбит-кварцевые, metabазальты, метапесчаники, 4 – малиновский комплекс O_2 , метаморфизованные гранит-порфиры; 5–12 – комплексы палеозойской Тагильской палеоостроводужной системы и ее фундамента: 5 – салатимский комплекс O_2 , серпентинизированные дуниты и гарцбургиты, 6 – серпентинитовый меланж, 7 – белогорский комплекс V_1 , гнейсы и амфиболиты, 8 – выйская свита O_{2-3} , metabазальты, метаалевролиты, 9 – павдинская свита S_1 , именновская свита S_{1-2} , туринская свита S_2-D_1 , базальты, риолиты, андезиты, трахибазальты, кремни, известняки, 10 – лопсийская D_{1-2} и арбыньинская D_{1-2} толщи, алевролиты, известняки, 11 – тагил-кытлымский комплекс S_1 , габбро, 12 – петропавловский комплекс S_1 , диориты, гранодиориты; 13, 14 – проявления высокобарического метаморфизма: 13а – глаукофансодержащие амфибол-эпидот-альбит-хлоритовые, альбит-хлорит-мусковитовые сланцы, 13б – гранатсодержащие амфибол-слюдисто-альбит-кварцевые сланцы, 14 – точки определения состава горных пород и параметров метаморфизма: 14а – г. Яны-Ур, обр. 2026, 2026-6, 14б – р. Луцоуля, обр. 2087-8, 2088-10; 15 – точки определения состава горных пород (см. табл. 1); 16 – стратиграфические и интрузивные геологические границы (а) и разрывные нарушения (б).

Fig. 1. The layout of the main structures of the Urals (Puchkov, 2010, with changes) (а), and a schematic geological map of the studied area, compiled from the materials of geological mapping work of the Ural geological survey expedition (б).

а: 1 – sedimentary cover of platforms: East European (I) and West Siberian (II); 2–4 – the “Paleocontinental” sector of the Urals: 2 – the Pre-Ural regional trough, 3 – the West Ural megazone (Paleozoic complexes of the passive continental margin and continental slope), 4 – the Central Ural megazone (Precambrian formations); 5–7 – the Paleoeceanic sector of the Urals: 5 – Magnitogorsk, Tagil and Voykaro-Shchuchinskaya megazones (Paleozoic mainly island-arc formations), 6, 7 – East Ural and Trans-Ural megazones (collage of blocks and plates of Paleozoic and Precambrian complexes); 8 – The Main Ural fault; 9 – the studied area. б (inset): 1–4 – complexes of the margin of the Eastern European paleocontinent: 1 – Precambrian strata of the Central Ural uplift (Sablegorskaya formation RF_3-V_1 , metamorphosed basalts and volcanogenic sedimentary rocks), 2–4 – complexes of the Early Paleozoic rift passive continental margin: 2 – Sarankhapner formation ϵ_3-O_1 , metasandstones, 3 – Khomasya formation O_{1-2} , sericite-chlorite-albite-quartz shales, metabasalts, metasandstones, 4 – Malinovsky complex O_2 , metamorphosed granite porphyry; 5–12 – complexes of the Paleozoic Tagil paleo-Island Arc system and its basement: 5 – Salatim complex O_2 , serpentinized dunites and harzburgites, 6 – serpentinite mélange, 7 – Belogorsky complex V_1 , gneisses and amphibolites, 8 – Vyjskaya formation O_{2-3} , metabasalts, metaaleurolites, 9 – Pavdinskaya formation S_1 , Imennovskaya formation S_{1-2} , Turin formation S_2-D_1 , basalts, rhyolites, andesites, trachybasalts, silicenes, limestone, 10 – Lopsiyskaya D_{1-2} and Arbynskaya D_{1-2} series, siltstones, limestones, 11 – Tagil-Kytlym complex S_1 , gabbro, 12 – Petropavlovsk complex, S_1 , diorites, granodiorites; 13а – glaucophane-containing amphibole-epidote-albite-chlorite, albite-chlorite-muscovite shales, 13б – garnet-containing amphibole-mica-albite-quartz shales; 14 – points for determining the composition of rocks and metamorphism parameters: а – Yany-Ur mount, samples 2026, 2026-6; б – Lutsoulia river, samples 2087-8, 2088-10; 15 – points for determining the composition of rocks (Table. 1); 16 – stratigraphic and intrusive geological boundaries (а) and discontinuous faults (б).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данная работа основана на авторских геологических исследованиях, выполненных в бассейне р. Северная Сосьва на восточном склоне Северного Урала и собранной в ходе этих работ представительной коллекции образцов.

Определение содержания петрогенных окислов производилось рентгеноспектральным флуоресцентным методом в лаборатории ИГГ УрО РАН на приборах CPM-18 и EDX-900HS по стандартным методикам. Содержание редкоземельных и других элементов устанавливалось методом ICP-MS в лаборатории ИГГ УрО РАН на квадрупольном масс-спектрометре с индукционно связанной плазмой ELAN-9000. Изучение состава породообразующих (плагиоклаза, амфибола, хлорита, граната, эпидота, мусковита) и аксессуарных (титаномagnetита, ильменита, сфена) минералов проведено в ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН с использованием электронно-зондового рентгенофлуоресцентного микроанализатора SX-100 с 5 волнодисперсионными спектрометрами.

Оценка P - T параметров метаморфических преобразований пород выполнялась с применением программ *Perple_X* (Connolly, 1990, с обновлениями 1990–2024 гг.) и *avPT-Thermocalc* (Holland, Powell, 1998, с обновлениями 1998–2023 гг.). Для геотермобарометрии использовались минеральные термометры: Grt-Ms (Green, Hellman, 1982; Coggon, Holland, 2002), Grt-Hbl (Graham, Powell, 1984; Perchuk, 1991).

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕОЛОГИЧЕСКОМ СТРОЕНИИ ЗОНЫ ГЛАВНОГО УРАЛЬСКОГО РАЗЛОМА НА СЕВЕРНОМ УРАЛЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД

Главный Уральский разлом отделяет раннепалеозойские геологические образования окраины Восточно-Европейского палеоконтинента от островодужных комплексов Магнитогорской и Тагильской структурно-формационных мегазон (см. рис. 1а). В систему ГУР входят разновозрастные разрывные нарушения различной кинематики, главными из которых являются надвиги и сдвиги-

надвиگی, сменяемые сбросами и сдвиго-сбросами (Иванов, 1998; и др.). Характерной особенностью зоны ГУР является широкое развитие бластомилонитов, тектонического меланжа и высокобарических минеральных парагенезисов (см. рис. 1б). Комплексы раннепалеозойской пассивной континентальной окраины представлены метаморфизованными аркозовыми и кварцевыми песчаниками, метаалевролитами саранхапнерской (C_3-O_1) свиты, а также метабазами, метаалевролитами и метапесчаниками хомасьинской (O_{1-2}) свиты. Интрузивные образования представлены штоками рифтогенных гранитов малиновского комплекса O_2 , а также дайками и силлами метаморфизованных долеритов и габбродолеритов, комагматичных базальтов хомасьинской свиты. Поскольку в составе последней локализованы высокобарические метаморфические парагенезисы, далее остановимся на ее характеристике более подробно. Тектоногенный комплекс ГУР представлен полимиктовым меланжем, состоящим из тектонических линз серпентинитов, метаморфизованных долеритов и габбро, углеродисто-(серицит)-кварцевых, углеродисто-серицит-хлоритовых, углеродисто-карбонатных, серицит-хлоритовых и хлоритовых сланцев.

Восточнее ГУР, в фундаменте палеоостровной дуги распространены породы офиолитовой ассоциации (перидотиты, габбро, комплекс параллельных долеритовых даек, вулканиты), верхний вулканический комплекс которой имеет позднеордовикский возраст (Петров, 2007). Выше залегают образования следующих вулканических формаций: риолит-базальтовой контрастно дифференцированной катийского-рудданского ярусов (шемурская свита), базальт-андезит-дацитовая последовательно дифференцированная азрона – шейнвуда (павдинская свита), базальт-андезитовой гомера – нижнего пржидолия (именновская свита и горблагодатская толща) и трахибазальт-трахитовой верхней пржидолия – лохкова (туринская свита). Нижне- и среднедевонские последовательности лопсийской (D_{1-2}) и арбыньинской (D_2) толщ представлены карбонатными и терригенными образованиями. Интрузивные комплексы – силурийскими габбро тагило-кытлымского и гранодиоритами петропавловского комплексов.

В строении изученной хомасьинской свиты принимают участие разнородные по составу сланцы – серицит-хлорит-альбит-кварцевые, (амфибол)-эпидот-хлорит-альбитовые с различными соотношениями компонентов, в прослоях – кварцито-песчаники и филлиты. Серицит-хлорит-альбит-кварцевые сланцы зеленовато-серого, серого цвета; структура бластоалевритовая, бластосаммитовая и гетеробластовая; текстура полосчатая, обусловленная чередованием метаморфогенных слоев хлорит-серицитового и альбит-кварцевого составов. Соотношение основных минеральных компонентов пе-

ременное. Часто присутствуют карбонат, лейкоксен, стильпномелан, эпидот. Кварцито-песчаники белые, иногда с различными оттенками цвета, структуры гранобластовая, мозаичная и зубчатая, иногда с реликтами базальной, текстура сланцеватая; кроме кварца содержат в незначительных количествах серицит или мусковит, иногда карбонат, хлорит.

Сланцы амфибол-эпидот-хлорит-альбитовые содержат переменное количество минеральных компонентов, амфибол часто отсутствует. Для этих пород характерны сланцевые, пятнистые, иногда полосчатые, редко сохраняются реликтовые миндалекаменные текстуры. Структуры нематогранобластовые, фиброгранобластовые и бластопорфиоровые. Амфиболы преимущественно относятся к группе актинолита, реже встречаются винциты, глаукофаны, барруазиты и роговые обманки. Часто породы содержат карбонат или лейкоксен, иногда до 5% кварца. В блоках, прилегающих к Главному Уральскому разлому, отмечается гранат. Отметим, что впервые наличие гранатовых амфиболитов в данном районе было отмечено при проведении геолого-съёмочных работ м-ба 1 : 50 000 (М.М. Павлов, Северо-Сосьвинская ГРЭ, устное сообщение).

Образования хомасьинской свиты слагают тектонически раздробленные блоки с нарушенной последовательностью залегания, породы интенсивно смяты в складки различного порядка, катаклазированы, будинированы. Метаморфизм соответствует фации зеленых сланцев. Широко проявлены метасоматические процессы: окварцевание и эпидотизация. Местами в составе разреза свиты появляются линзы известняков, в которых обнаружены остатки цистоидей из отряда *Regularia*, а также криноидей *Apertocrinus* sp. и *Fascicrinus* sp. (Петров, 2007). Этот комплекс фауны, по мнению В.С. Милициной, может указывать на среднеордовикский возраст вмещающих пород. Южнее, в левом борту р. Ольва, в линзе мраморизованных известняков была обнаружена фауна криноидей: *Asterocrinus* (?) sp. indet., *Apertocrinus* (?) sp. indet., *Fascicrinus* cf. *flabellatus* Yelt. et Stuk.; *Dianthoceleoma* cf. *kegelensis* Yelt. (?); *Schizocrinus* (?) sp. indet.; *Cyclopagoda* cf. *inaequalis* (Yeltyschew); *Pentagonocyclicus* sp. indet.; *Pentagonopentagonalis* sp. средне-го-верхнего ордовика (определения В.А. Наседкиной) (Петров, Наседкина, 2008).

Характерной особенностью является пояс сближенных силлов, даек, редко штоков меридионального направления, представленных метадолеритами и метагаббродолеритами, которые принадлежат субвулканическим образованиям, одновозрастным хомасьинской свите.

Представительные анализы пород хомасьинской свиты приведены в табл. 1. Метабазальты хомасьинской свиты – натриевые высокотитанистые (TiO_2 1.09–4.17%, в среднем 2.16%), низко

Таблица 1. Представительные анализы горных пород хомасьинской свиты**Table 1.** Representative analyses of rocks of the Khomasya formation

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8
	2126	5006	5021	5137	2087-8	2088-10	2125-2	2126-6
SiO ₂	48.52	45.56	44.17	49.47	46.71	47.81	47.75	74.80
TiO ₂	1.79	2.31	4.17	1.66	1.45	3.36	1.98	0.59
Al ₂ O ₃	13.70	15.58	13.89	12.80	14.89	12.71	12.63	10.45
Fe ₂ O ₃ общ	14.44	19.26	17.72	13.77	15.91	15.47	15.67	5.78
MnO	0.18	0.28	0.18	0.27	0.34	0.31	0.21	0.38
MgO	6.14	5.76	6.60	6.58	7.65	6.33	7.03	1.87
CaO	9.70	2.28	4.60	6.66	4.25	5.38	10.52	0.62
Na ₂ O	3.41	5.10	4.48	4.13	1.91	4.78	2.46	1.24
K ₂ O	0.17	0.03	0.04	0.04	1.60	0.07	0.43	1.72
P ₂ O ₅	0.15	0.16	0.46	0.14	0.10	0.45	0.13	0.12
П.п.п.	1.30	3.29	3.40	4.20	4.52	2.55	0.89	1.77
Сумма	99.50	99.61	99.71	99.72	99.33	99.22	99.70	99.34
Rb	2.46	0.27	0.36	10.39	38.78	0.76	7.72	51.64
Sr	165.32	39.20	50.57	106.28	63.72	211.49	107.72	49.61
Y	25.40	31.40	30.30	12.43	28.04	34.03	26.84	17.35
Zr	21.35	35.05	35.69	7.84	17.72	76.52	28.27	72.21
Hf	0.68	1.68	1.26	0.27	0.49	1.89	0.90	2.05
Nb	6.15	6.40	27.20	2.02	7.23	32.03	5.73	8.12
Ba	20.17	0.01	0.01	170.98	211.19	17.15	108.75	307.47
V	383.31	327.44	286.12	356.84	332.50	339.93	406.54	72.19
Cr	143.55	47.22	6.21	44.27	136.49	27.54	85.75	184.03
Co	51.05	49.69	48.44	55.61	52.48	40.38	47.22	21.49
Ni	96.10	53.34	14.46	125.79	84.11	24.38	50.44	36.82
Ta	0.37	0.46	1.88	0.13	0.40	1.96	0.40	0.55
Th	0.50	0.73	2.06	0.17	0.62	2.18	0.29	3.84
Pb	0.52	4.32	1.16	0.44	3.09	6.52	0.53	7.67
La	5.76	5.77	20.94	2.24	8.85	26.53	5.97	5.93
Ce	16.44	16.62	51.43	6.15	19.16	62.43	17.12	14.58
Pr	2.51	2.58	7.15	0.95	2.98	8.40	2.65	1.73
Nd	12.49	13.40	31.92	4.75	13.95	37.03	13.76	6.88
Sm	3.82	2.30	7.89	1.54	3.98	8.79	4.30	1.83
Eu	1.35	1.39	2.69	0.67	1.23	2.82	1.62	0.52
Gd	4.74	5.50	8.01	2.16	5.18	9.85	5.54	2.98
Tb	0.78	0.97	1.23	0.37	0.83	1.33	0.88	0.45
Dy	5.00	6.48	7.29	2.53	5.51	7.77	5.76	2.98
Ho	1.07	1.40	1.38	0.54	1.17	1.49	1.16	0.64
Er	3.15	3.99	3.60	1.61	3.50	4.08	3.33	1.95
Tm	0.43	0.58	0.46	0.23	0.50	0.53	0.48	0.28
Yb	2.75	3.55	2.55	1.40	3.23	3.18	2.88	1.84
Lu	0.39	0.43	0.27	0.19	0.45	0.38	0.42	0.28

Примечание. 2126 – альбит-эпидот-гранатовый амфиболит, г. Яны-Ур; 5006 – сланец эпидот-альбит-хлоритовый, р. Манья; 5021 – сланец магнетит- глаукофан-эпидот-альбит-хлоритовый (метабаза), р. Манья; 5137 – сланец альбит-эпидот-хлоритовый (метабаза), р. Лопсия; 2087-8 – сланец гранат-амфибол-мусковит-хлорит-альбитовый, р. Луцоуля; 2088-10 – сланец эпидот-альбит-глаукофановый, р. Луцоуля; 2125-2 – эпидот-гранатовый амфиболит, г. Яны-Ур; 2126-6 – сланец гранат-мусковит-альбит-кварцевый, г. Яны-Ур.

Note. 2126 – albite-epidote-garnet amphibolite, Yany-Ur mount; 5006 – epidote-albite-chlorite shale, Mania river; 5021 – magnetite-glaucophane-epidote-albite-chlorite shale (metabasalt), Mania river; 5137 – albite-epidote-chlorite shale (metabasalt), Lopsia river; 2087-8 – garnet-amphibole-muscovite-chlorite-albite shale; 2088-10 – epidote-albite-glaucophane shale, Loutsoulia river; 2125-2 – epidote-garnet amphibolite, Yany-Ur mount; 2126-6 – garnet-muscovite-albite-quartz shale, Yany-Ur mount.

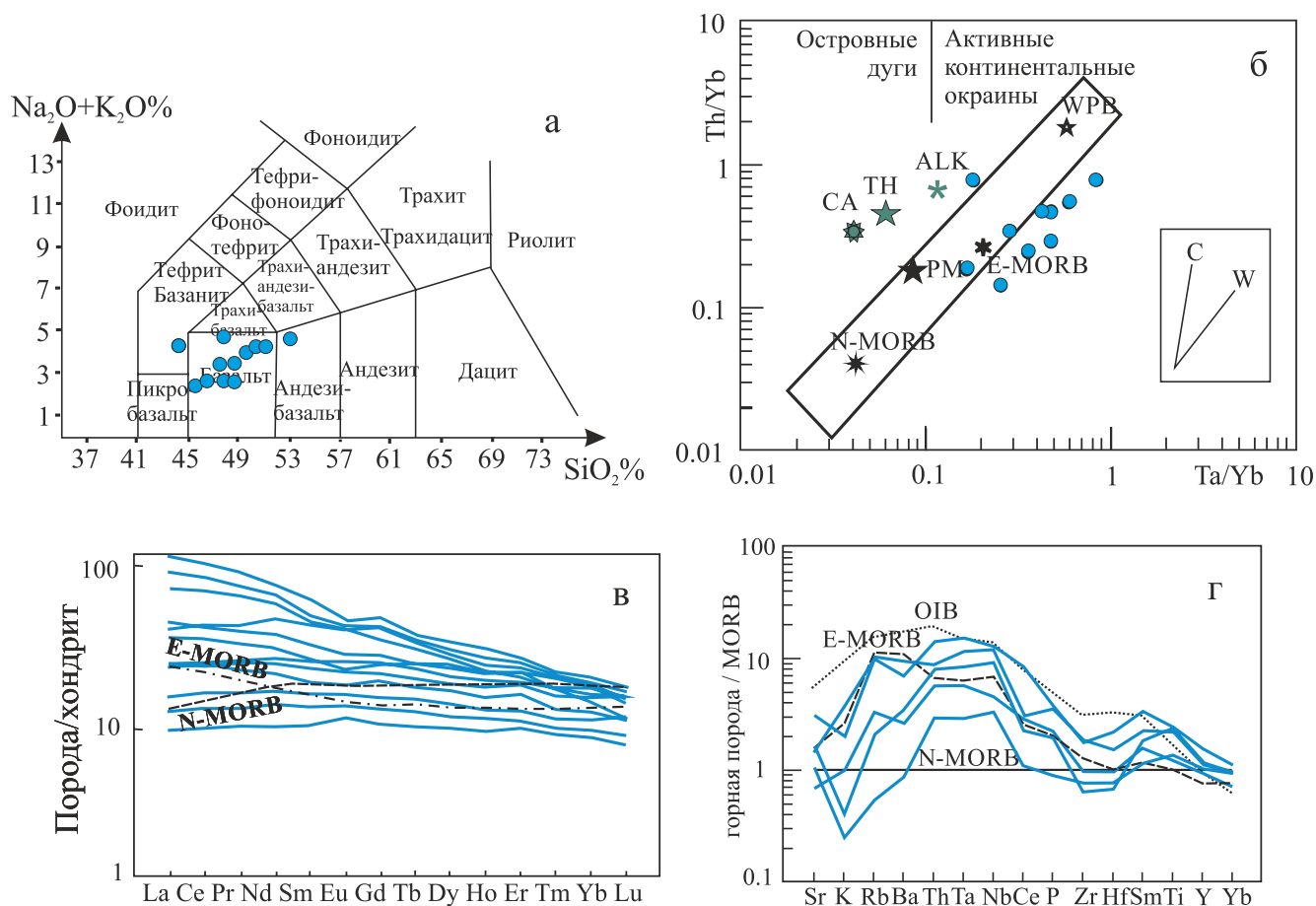


Рис. 2. Дискриминационные диаграммы и спайдер-диаграммы для базальтов хомасьинской свиты (Петров, 2022).

а – $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ (Le Bas et al., 1986); б – $\text{Th}/\text{Yb} - \text{Ta}/\text{Yb}$ (Pearce, 1983). Эталонные составы: N-MORB и E-MORB (“нормальных” и “обогащенных” базальтов срединно-океанических хребтов) (Sun, McDonough, 1989), PM (примитивной мантии) (Taylor, McLennan, 1985), WPB (базальтов внутриплитных обстановок) (Barberi et al., 1975). Составы островодужных вулканитов (Фролова, Бурикова, 1997): CA – известково-щелочных базальтов вулкана Камбальный (Камчатка), TH – толеитовых базальтов острова Кунашир, ALK – субщелочных базальтов вулкана Толбачик, Камчатка. Тренды составов магматических серий, обусловленные коровой контаминацией (C) и дифференциацией мантийных магм (W) (Фролова, Бурикова, 1997); в – содержания редкоземельных элементов, нормированные на хондрит (Sun, McDonough, 1989); г – содержания петрологически информативных элементов, нормированные на состав океанического базальта N-MORB. Составы горных пород эталонных обстановок: хондрита, MORB (N-MORB) – “нормального” базальта срединно-океанических хребтов и E-MORB – “обогащенного” базальта срединно-океанических хребтов, OIB – базальта океанических островов (Sun, McDonough, 1989).

Fig. 2. Discriminatory and spider diagrams for basalts of the Khomasi formation (Petrov, 2022).

а – $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ (Le Bas et al., 1986); б – $\text{Th}/\text{Yb} - \text{Ta}/\text{Yb}$ (Pearce, 1983). Reference compositions: N-MORB and E-MORB (“normal” and “enriched” basalts of mid-oceanic ridges) (Sun, McDonough, 1989), PM (primitive mantle) (Taylor, McLennan, 1985), and WPB (basalts of intraplate environments) (Barberi et al., 1975). Compositions of island-arc volcanites (Frolova, Burikova, 1997): CA – calcareous-alkaline basalts of Kambalny volcano (Kamchatka), TH – tholeiitic basalts of Kunashir Island, ALK – subalkaline basalts of Tolbachik volcano, Kamchatka. Trends in the compositions of magmatic series due to crustal contamination (C) and differentiation of mantle magmas (W) (Frolova, Burikova, 1997); в – the contents of rare earth elements (REE) normalized for chondrite (Sun, McDonough, 1989); г – the contents of petrologically informative elements normalized for the composition of oceanic basalt. Compositions of rocks of reference environments: chondrite, MORB (N-MORB) – “normal” mid-ocean ridge basalt and E-MORB – “enriched” mid-ocean ridge basalt, OIB – ocean island basalt (Sun, McDonough, 1989).

и умеренно глиноземистые (Al_2O_3 11.23–15.58%, в среднем 13.25%) породы нормальной щелочности, низко- и среднекальциевые, относящиеся к толеитовой серии (Петров, 2022). Для них характерен значительный разброс содержаний MgO

(5.76–9.26%, в среднем 6.85%), Cr (6.21–232.57 г/т, в среднем 88.83 г/т), Zr (3.48–170.75 г/т, в среднем 55.16 г/т), высокие содержания Nb (2.02–32.03 г/т, в среднем 13.63 г/т) и P_2O_5 (до 0.48%). На диаграмме $\text{Th}/\text{Yb} - \text{Ta}/\text{Yb}$ (рис. 2б), точки составов вулкана

Таблица 2. Представительные анализы гранатов из горных пород хомасьинской свиты**Table 2.** Representative analyses of garnets from rocks of the Khomasya formation

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8
	2126ц	2126п	2126к	2126-6ц	2126-6к	2087-8ц	2087-8п	2087-8к
SiO ₂	37.32	37.19	37.68	36.64	36.84	36.88	37.05	37.37
TiO ₂	0.29	0.16	0.15	0.20	0.05	0.16	0.13	0.10
Al ₂ O ₃	20.34	20.60	20.84	20.33	20.54	20.27	20.50	20.52
Fe ₂ O ₃ _{общ}	20.33	25.21	27.04	23.84	31.75	19.98	22.62	26.71
Cr ₂ O ₃	0.06	0.03	0.06	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03
MnO	6.79	2.38	0.41	11.00	3.25	11.36	7.72	2.87
MgO	0.33	0.56	1.22	1.10	1.72	0.49	0.62	0.85
CaO	13.38	13.33	12.41	5.96	5.21	10.03	11.09	11.46
Na ₂ O	0.02	0.03	0.00	0.03	0.00	0.02	0.01	0.01
K ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
Сумма	98.87	99.50	99.82	99.10	99.42	99.21	99.77	99.94
Si	3.001	2.979	3.000	2.988	2.989	2.987	2.975	2.990
Al	1.934	1.944	1.955	1.954	1.964	1.935	1.940	1.935
Ti	0.018	0.010	0.009	0.012	0.003	0.010	0.008	0.006
Cr	0.004	0.002	0.004	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002
Fe ³⁺	0.010	0.082	0.025	0.049	0.051	0.072	0.093	0.073
Fe ²⁺	1.362	1.607	1.776	1.577	2.104	1.282	1.427	1.715
Mn	0.464	0.161	0.028	0.760	0.223	0.779	0.525	0.194
Mg	0.040	0.067	0.145	0.134	0.208	0.059	0.074	0.101
Ca	1.156	1.144	1.059	0.521	0.453	0.871	0.954	0.982
Na	0.003	0.005	0.000	0.005	0.000	0.003	0.002	0.002
K	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000
Fe	1.371	1.689	1.800	1.626	2.155	1.353	1.519	1.787
Sum	12	12	12	12	12	12	12	12
Fe/(Fe + Mg)	0.972	0.962	0.925	0.924	0.912	0.958	0.953	0.947
Pyr	0.013	0.022	0.048	0.045	0.070	0.020	0.025	0.034
Alm	0.451	0.539	0.590	0.527	0.704	0.429	0.479	0.573
Spess	0.154	0.054	0.009	0.254	0.075	0.260	0.176	0.065
Ca	0.383	0.384	0.352	0.174	0.152	0.291	0.320	0.328

Примечание. Фрагменты кристалла: ц – центральная часть, п – промежуточная, к – краевая; 2126 – альбит-эпидот-гранатовый амфиболит; 2126-6 – сланец гранат-мусковит-альбит-кварцевый; 2087-8 – сланец гранат-амфибол-мусковит-хлорит-альбитовый.

Note. Crystal fragments: ц – central part, п – intermediate part, к – marginal; 2126 – albite-epidote-garnet amphibolite; 2126-6 – garnet-muscovite-albite-quartz shale; 2087-8 – garnet-amphibole shale-muscovite-chlorite-albite.

нитов хомасьинской свиты находятся на мантийном тренде со сдвигом в сторону более высоких Ta/Yb отношений, что может указывать на “обогащенный” мантийный источник. Среднее содержание редких земель – 88.03 г/т (25.3–218.75 г/т), отношение суммы легких к сумме тяжелых редких земель ЛРЗЭ/ТРЗЭ = 2.85 (1.31–5.52). Часть графиков содержаний РЗЭ в породах демонстрирует обогащение легкими РЗЭ и обеднение тяжелыми (см. рис. 2в), а другая часть – менее фракционированная – отражает, вероятно, влияние “обогащенного” мантийного источника (вероятно, плюмового) и деплетированной верхней мантии. Графики содержаний нормированных редких элементов (см. рис. 2г) показывают резко различное содержание щелочных элементов (от обогащенных до обедненных составов), что может быть вызвано миграцией К и Rb в процессе зелено- и глаукофансланцевого метаморфизма. Часть пород имеет спектры, сходные с E-MORB, другие содержат меньше ред-

ких элементов, но общей характерной чертой является обогащенность Th, Ta и Nb. В целом перечисленные геохимические особенности базальтов хомасьинской свиты указывают на “обогащенный” мантийный источник расплавов, вероятно связанный с мантийным плюмом, а пространственная ассоциация вулканитов с аркозовыми и кварцевыми песчаниками и алевролитами не противоречит интерпретации обстановки рифтогенной пассивной континентальной окраины (Петров, 2007).

Состав и последовательность образования метаморфических минералов

В изученных породах распространены минералы – твердые растворы, составы которых отражают сложную эволюцию *P-T* параметров метаморфизма.

Гранаты встречаются в части образцов и характеризуются переменными составами с выраженными профилями зональности (табл. 2, рис. 3). По

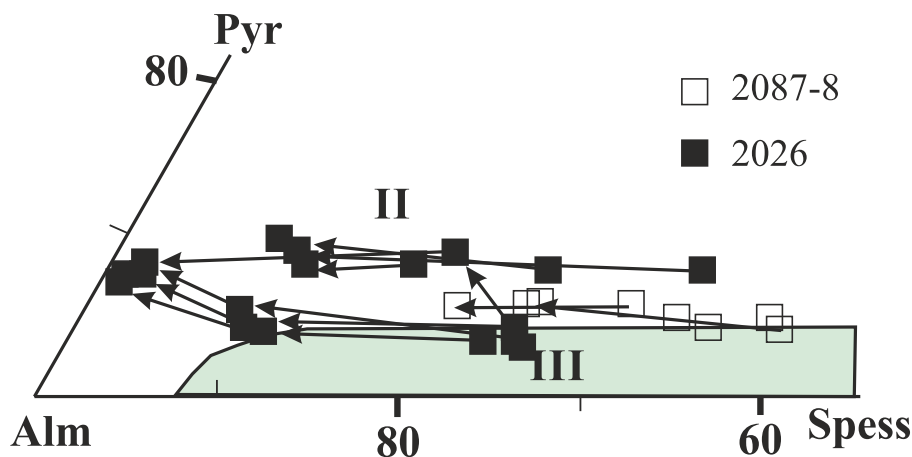


Рис. 3. Изменение составов гранатов от центров к краям кристаллов в породах хомасынской свиты.

Миналы: Alm – альмандиновый, Pyr – пироповый, Spess – спессартиновый. Поля составов гранатов (Miyashiro, 1953): II – амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций, III – фации зеленых сланцев. Стрелки показывают изменение составов гранатов от центра кристаллов к их периферии.

Fig. 3. The change in the composition of garnets from the centers to the edges of crystals in the rocks of the Khomasya formation.

Minerals: Alm – almandine, Pyr – pyrope, Spess – spessartine. Fields of pomegranate compositions (Miyashiro, 1953): II – amphibolite and epidote-amphibolite facies, III – facies of green shales. The arrows show the change in the composition of garnets from the center of the crystals to their periphery.

направлению от центральных частей кристаллов граната к их периферии происходит резкое уменьшение содержаний MnO (иногда более чем в 10 раз), при этом увеличивается содержание MgO и FeO (см. табл. 2). На рис. 3 это проявлено в снижении содержания спессартинового и росте альмандинового и пиропового миналов. Такого рода зональность (“прогрессивная”, или “прямая”) может указывать на увеличение *P-T* параметров метаморфизма в процессе роста кристаллов (Лепезин, Королук, 1985; и др.).

Амфиболы (табл. 3, рис. 4–6) в исследованных породах определяются как кальциевые, натриево-кальциевые и натриевые. Среди кальциевых амфиболов наиболее распространены актинолиты, но в гранатовых амфиболитах (обр. 2126) отмечается магнезиальная роговая обманка (см. рис. 4). Натриево-кальциевые амфиболы (см. рис. 5) представлены винчитами и барруазитами. Наиболее часто данные минералы ассоциируют с глаукофанами, но они присутствуют также в гранатовых амфиболитах вместе с актинолитами и роговыми обманками. Натриевые амфиболы представлены ферро-глаукофанами и глаукофанами (см. рис. 6).

Характерными особенностями зерен амфиболов являются блоковое строение, неоднородность составов отдельных кристаллов и их агрегатов, что может свидетельствовать о неравновесности парагенезисов и незавершенности метаморфических реакций. На диаграмме $\text{Na}^{\text{M4}}\text{--Al}^{\text{IV}}$ (рис. 7) точки состава

кальциевых амфиболов образуют ряд от актинолитов до роговых обманок, что с учетом ярко выраженной прогрессивной зональности гранатов (см. рис. 3) может отражать увеличение температур и давлений. Натриевые и натриево-кальциевые амфиболы показывают широкое разнообразие составов.

Белые слюды представлены *парагонитами* и *фенгитами* (табл. 4). Парагониты присутствуют исключительно в виде включений в зернах граната в обр. 2126, фенгиты распространены более широко. Фенгиты в парагенезисе с роговой обманкой и гранатом (обр. 2126) отличаются от белых слюд в парагенезисе с гранатом + актинолит (обр. 2087-8) меньшим содержанием Si и большими значениями $\text{Na}/(\text{Na} + \text{K})$.

Хлориты в парагенезисе с роговой обманкой и фенгитом (обр. 2126, 2126-6) в отличие от хлоритов из актинолитовых ассоциаций (обр. 2087-8) имеют более высокую глиноземистость и низкую магнезиальность (табл. 5). Судя по взаимоотношениям с другими минералами, хлориты (или их часть) являются продуктами регрессивных метаморфических преобразований и развиваются по гранатам и амфиболам.

Эпидоты также отличаются разнообразием составов (табл. 6). Во внутренних частях кристаллов гранатов (обр. 2126) сохранились включения бесцветных низкожелезистых эпидотов ($\text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{общ}}$ менее 5%), ассоциирующих с парагонитами; в основной массе породы присутствуют эпидоты с более вы-

Таблица 3. Представительные анализы амфиболов из горных пород хомасьинской свиты**Table 3.** Representative analyses of amphiboles from rocks of the Khomasya formation

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8
	2126.1	2126.2	2126.3	2087-8.1	2087-8.2	2088-10.1	2088-10.2	2088-10.3
SiO ₂	50.88	49.68	49.33	50.60	51.02	56.21	48.27	52.92
TiO ₂	0.15	0.13	0.14	0.12	0.13	0.04	0.20	0.06
Al ₂ O ₃	7.16	8.58	7.64	5.11	4.80	8.49	7.54	2.87
Fe ₂ O ₃ _{общ}	14.59	14.99	16.59	15.70	15.79	16.63	19.98	19.05
Cr ₂ O ₃	0.05	0.01	0.04	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00
MnO	0.02	0.08	0.05	0.10	0.22	0.16	0.36	0.50
MgO	12.04	10.95	10.54	11.84	11.93	7.28	8.24	10.81
CaO	9.33	9.04	9.47	10.76	10.64	0.75	6.90	7.77
Na ₂ O	2.47	2.76	2.38	1.76	1.73	7.05	4.22	3.09
K ₂ O	0.21	0.21	0.20	0.18	0.16	0.02	0.30	0.15
Сумма	96.89	96.44	96.38	96.20	96.43	96.62	96.02	97.22
Si	7.407	7.294	7.308	7.518	7.553	8.048	7.295	7.802
Al	1.228	1.485	1.334	0.895	0.837	1.433	1.343	0.499
Ti	0.016	0.014	0.016	0.013	0.014	0.004	0.023	0.007
Cr	0.006	0.001	0.005	0.001	0.002	0.000	0.001	0.000
Fe ³⁺	0.173	0.145	0.182	0.047	0.079	0.173	0.313	0.329
Fe ²⁺	1.603	1.695	1.873	1.904	1.876	1.818	2.213	2.020
Mn	0.002	0.010	0.006	0.013	0.028	0.019	0.046	0.062
Mg	2.613	2.397	2.328	2.623	2.633	1.554	1.856	2.376
Ca	1.455	1.422	1.503	1.713	1.688	0.115	1.117	1.227
Na	0.697	0.786	0.684	0.507	0.497	1.957	1.237	0.883
K	0.039	0.039	0.038	0.034	0.030	0.004	0.058	0.028
Al ^{IV}	0.593	0.706	0.692	0.482	0.447	0.000	0.705	0.198
Al ^{VI}	0.635	0.779	0.642	0.413	0.390	1.433	0.638	0.301
Fe	1.776	1.841	2.055	1.951	1.955	1.991	2.525	2.349
Sum	23	23	23	23	23	23	23	23

Примечание. 1–3 амфиболы из обр. 2126 (альбит-эпидот-гранатовый амфиболит); 4, 5 – амфиболы из обр. 2087-8 (сланец гранат-амфибол-мусковит-хлорит-альбитовый); 6–8 – амфиболы из обр. 5088-10 (сланец эпидот-альбит-глаукофановый).

Note. 1–3 amphiboles from model 2126 (albite-epidote-garnet amphibolite); 4, 5 amphiboles from model 2087-8 (garnet-amphibole-muscovite-chlorite-albite shale); 6–8 amphiboles from model 5088-10 (epidote-albite-glaucophane shale).

сокими содержаниями железа (Fe₂O₃_{общ} более 7%). Наиболее высокие содержания железа (Fe₂O₃_{общ} более 12%) характерны для глаукофановых сланцев.

Плагиоклазы в исследованных породах представлены исключительно деформированным альбитом. В краях порфириобластов включения минералов отсутствуют.

Кроме перечисленных минералов в состав пород входят также кварц, сфен, кальцит, магнетит.

Определение параметров метаморфизма

Для оценки *P-T* параметров минералообразования были использованы минеральные ассоциации и составы минералов, из которых наибольшую информативность показали гранатсодержа-

щие ассоциации. Высокие содержания гроссулярового минала в ряде гранатов заставляет с осторожностью относиться к ряду температурных оценок, поскольку такие составы граната не всегда соответствуют условиям калибровки использованных термометров.

Для гранат-амфибол-мусковит-хлорит-альбитового сланца (образец 2087-8) по положению минерального парагенезиса с гранатом в *P-T* координатах можно оценить нижний предел по давлению (рис. 8), который ограничивает область существования граната в протолитах подобного состава (см. табл. 1). Из этих данных следует, что образования наблюдаемого в породе минерального парагенезиса возможно при давлениях не ниже 7–8 кбар и при температуре ниже ~600°C.

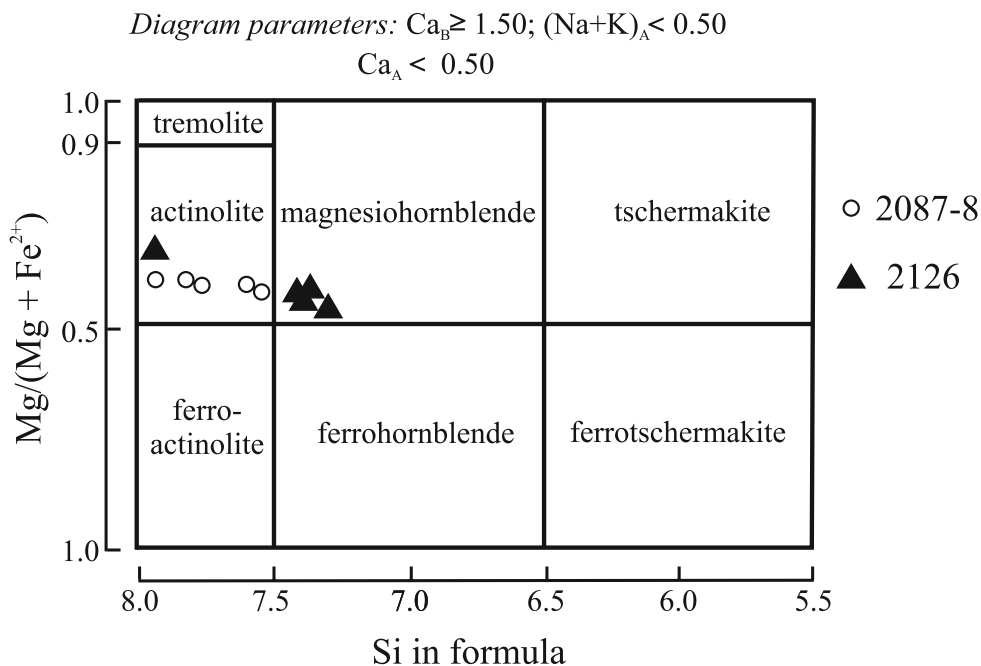


Рис. 4. Составы кальциевых амфиболов из пород хомасьинской свиты на классификационной диаграмме (Nomenclature..., 1997).

Fig. 4. Compositions of calcium amphiboles from rocks of the Khomasya formation in the classification diagram (Nomenclature..., 1997).

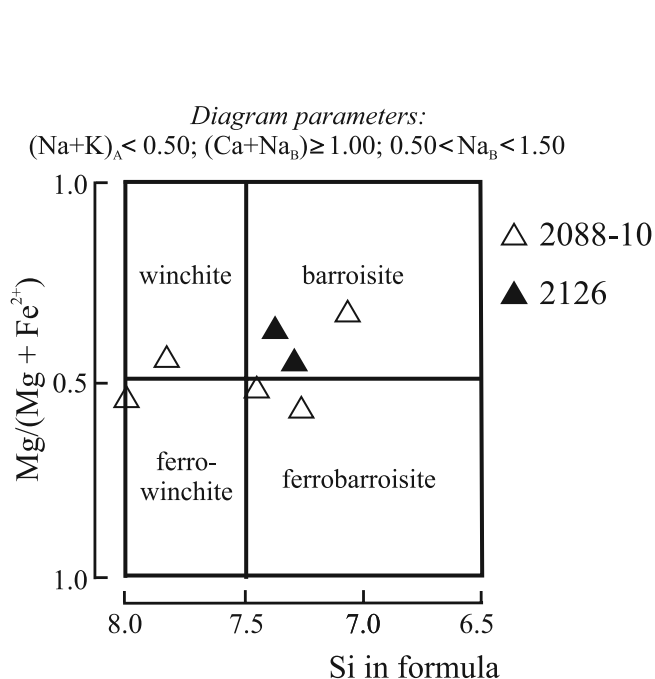


Рис. 5. Составы натриево-кальциевых амфиболов из пород хомасьинской свиты на классификационной диаграмме (Nomenclature..., 1997).

Fig. 5. Compositions of sodium-calcium amphiboles from rocks of the Khomasya formation in the classification diagram (Nomenclature..., 1997).

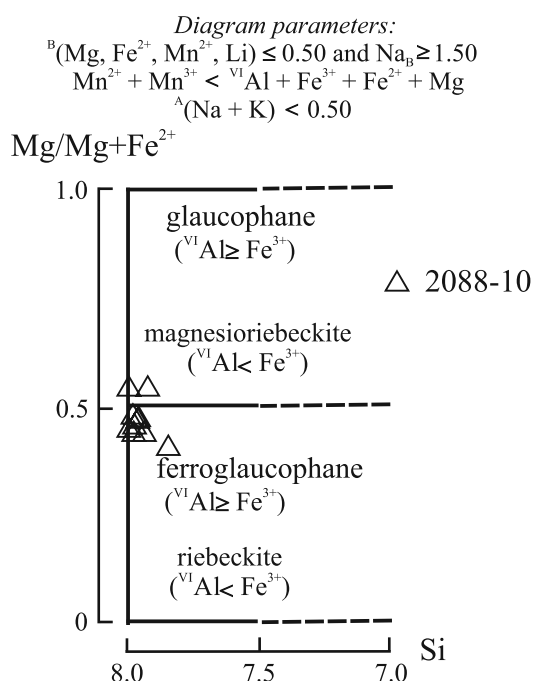


Рис. 6. Составы натриевых амфиболов из пород хомасьинской свиты на классификационной диаграмме (Nomenclature..., 1997).

Fig. 6. Compositions of sodium amphiboles from rocks of the Khomasya formation in the classification diagram (Nomenclature..., 1997).

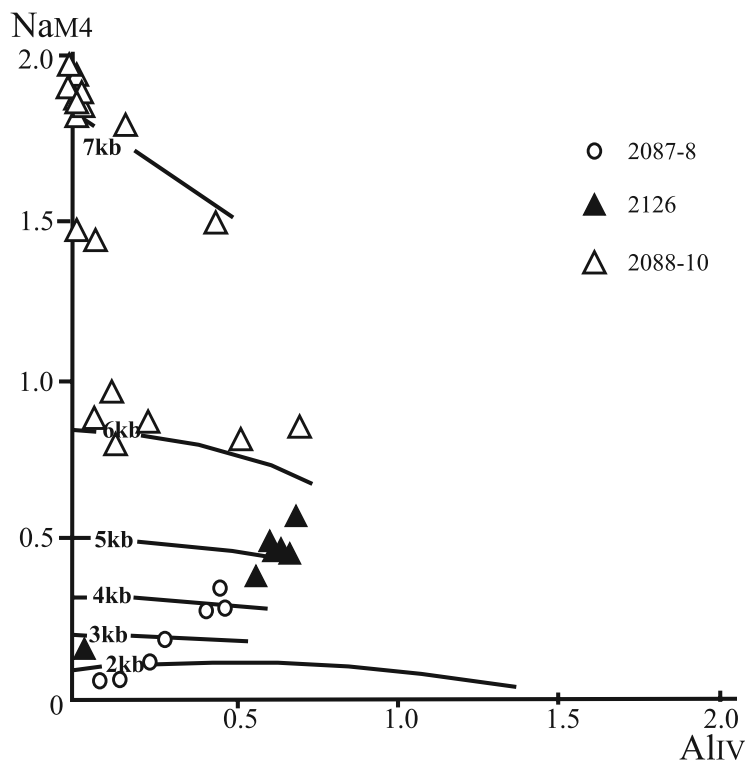


Рис. 7. Положение фигуративных точек составов амфиболов метаморфических пород хомасьинской свиты на диаграмме $\text{Na}^{\text{M4}} - \text{Al}^{\text{IV}}$ (Brown, 1977).

Составы минералов показаны на рис. 4–6.

Fig. 7. The position of figurative points of amphibious compositions of metamorphic rocks of the Khomasya formation in the diagram $\text{Na}^{\text{M4}} - \text{Al}^{\text{IV}}$ (Brown, 1977).

The mineral compositions are shown at the Fig. 4–6.

Согласуются с относительно низкотемпературным образованием наблюдаемых минералов и результаты минеральной термометрии. Например, на основе составов минеральных пар “гранат–мусковит”, “гранат–амфибол” для рассмотренной породы получены температуры минералообразования в диапазоне $\sim 400\text{--}500^\circ\text{C}$ (рис. 9). О достижении степени химического равновесия можно судить по данным расчета точки пересечения в P - T координатах независимых минеральных реакций в выше-рассмотренном сланце (рис. 10). Для построения указанной диаграммы использовался модуль одновременного расчета среднего давления и температуры, реализованный в программном комплексе Thermocalc (Holland, Powell, 1998).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В исследованном районе наблюдаются тектонические пластины пород с типичными парагенезисами фации зеленых сланцев, включающими хлорит, серицит, актинолит, эпидот, альбит, кварц, а также локально развитыми минеральными ассоци-

ациями с винчитом, глаукофаном, реже с барруазитом, гранатом и магнезиальной роговой обманкой. Вероятно, гранатсодержащие парагенезисы сформировались на большей глубине, в условиях более высоких температур и давлений по сравнению с таковыми для безгранатовых минеральных ассоциаций. Оценка пиковых параметров метаморфизма гранат-амфибол-мусковит-хлорит-альбитового сланца (обр. 2087-8), показала вероятное формирование пород в диапазоне температур $420\text{--}500^\circ\text{C}$ при давлениях выше 7–8 кбар. Судя по повсеместному распространению альбита, хлорита и актинолита и отсутствию глаукофана в обр. 2087-8, давление в системе не превышало 7.5–8.0 кбар (Maruyama et al., 1986), т. е., по всей вероятности, оно составляло 7.0–7.5 кбар. В обр. 2088-10, судя по наличию глаукофана, давление превышало 8 кбар, но было менее 11–12 кбар ввиду отсутствия жадеита (Tsai et al., 2013). В обр. 2126 появляются барруазит и роговая обманка в ассоциации с гранатом, что может указывать на температуры порядка $500\text{--}550^\circ\text{C}$ (Ernst, 1979). В исследуемом районе фиксируются безгрантовые глаукофановые слан-

Таблица 4. Представительные анализы белых слюд из горных пород хомасьинской свиты

Table 4. Representative analyses of white micas from rocks of the Khomasya formation

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8
	2126.1	2126.2	2126.3	2126-6.1	2126-6.2	2087-8.1	2087-8.2	2087-8.3
SiO ₂	46.87	47.22	50.15	49.01	49.63	51.20	51.30	49.62
TiO ₂	0.04	0.04	0.17	0.35	0.34	0.21	0.15	0.12
Al ₂ O ₃	38.63	40.78	27.70	29.10	29.51	27.89	25.94	26.85
Fe ₂ O ₃ _{общ}	0.45	0.33	2.43	2.82	2.93	2.98	2.95	4.35
Cr ₂ O ₃	0.00	0.01	0.02	0.15	0.04	0.06	0.03	0.01
MnO	0.00	0.00	0.00	0.07	0.04	0.05	0.00	0.04
MgO	0.17	0.17	3.31	2.48	2.58	3.29	3.72	3.25
CaO	0.15	0.23	0.00	0.02	0.01	0.03	0.00	0.03
Na ₂ O	7.23	7.00	0.51	0.38	0.45	0.34	0.29	0.13
K ₂ O	0.68	0.08	10.01	9.91	9.89	8.71	10.07	10.06
Сумма	94.22	95.85	94.30	94.30	95.42	94.74	94.46	94.46
Si	3.027	2.981	3.376	3.308	3.360	3.404	3.453	3.37
Al	2.940	3.035	2.198	2.315	2.221	2.185	2.058	2.149
Ti	0.002	0.002	0.009	0.018	0.013	0.011	0.008	0.006
Cr	0.000	0.000	0.001	0.008	0.007	0.003	0.002	0.001
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.024	0.017	0.137	0.159	0.156	0.166	0.166	0.247
Mn	0.000	0.000	0.000	0.004	0.004	0.003	0.000	0.002
Mg	0.016	0.016	0.332	0.250	0.301	0.326	0.373	0.329
Ca	0.010	0.016	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.001
Na	0.905	0.857	0.067	0.050	0.074	0.044	0.038	0.017
K	0.056	0.006	0.860	0.853	0.829	0.739	0.865	0.872
AlIV	0.973	1.019	0.624	0.692	0.640	0.596	0.547	0.630
AlVI	1.967	2.016	1.574	1.622	1.581	1.589	1.510	1.519
Fe	0.024	0.017	0.137	0.159	0.156	0.166	0.166	0.247
Sum	11	11	11	11	11	11	11	11

Примечание. 1–3 слюды из обр. 2126 (альбит-эпидот-гранатовый амфиболит): 1, 2 – парагониты, 3 – фенгит; 4, 5 – фенгиты из обр. 2126-6 (сланец гранат-мусковит-альбит-кварцевый); 6–8 – фенгиты из обр. 2087-8 (сланец гранат-амфибол-мусковит-хлорит-альбитовый).

Note. 1–3 micas from mod. 2126 (albite-epidote-garnet amphibolite): 1, 2 – paragonites, 3 – phengite; 4, 5 – phengites from mod. 2126-6 (garnet-muscovite-albite-quartz shale); 6–8 – phengites from mod. 2087-8 (garnet-amphibole-muscovite-chlorite-albite shale).

цы с винчитом и барруазитом (обр. 2088-10), гранат- и актинолитсодержащие сланцы (обр. 2087-8), а также гранатсодержащие существенно фенгитовые и эпидот-фенгит-амфибол (барруазит и роговая обманка)-альбитовые сланцы (обр. 2126-6 и 2126). Вероятно, указанные особенности минерального состава пород связаны с различными условиями и обстановками их формирования: глаукофансодержащих сланцев на стадии субдукции, а гранат-актинолитовых и гранат-роговообманковых – в обстановке коллизии.

Следует также принять во внимание, что глаукофансодержащие сланцы слагают зоны мощно-

стью в первые десятки метров, вытянутые вдоль ГУР, а гранатсодержащие породы распространены только в пределах нескольких небольших тектонических линз (пластин). Но преобладающими здесь являются парагенезисы, содержащие альбит, эпидот, хлорит, кварц, мусковит, актинолит (в метадолеритах), реже – стильпномелан. Наблюдаемую картину распределения минеральных парагенезисов можно объяснить, если предположить относительную кратковременность существования обстановки высоких давлений, когда глаукофановые сланцы сформировались в локальных флюидонасыщенных структурах (возможно, связанных

Таблица 5. Представительные анализы хлоритов из горных пород хомасьинской свиты**Table 5.** Representative analyses of chlorites from rocks of the Khomasi formation

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8
	2126.1	2126.2	2126-6.1	2126-6.2	2087-8.1	2087-8.2	2088-10.1	2088-10.2
SiO ₂	24.27	25.32	25.28	25.25	26.05	27.99	25.85	29.58
TiO ₂	0.06	0.05	0.07	0.00	0.13	0.00	0.03	0.02
Al ₂ O ₃	20.40	18.84	19.68	20.33	18.89	18.01	18.94	17.41
Fe ₂ O ₃ _{общ}	29.19	28.79	28.34	26.47	27.04	26.08	27.15	26.10
Cr ₂ O ₃	0.06	0.36	0.05	0.29	0.12	0.21	0.01	0.04
MnO	0.89	0.21	0.84	0.56	0.56	0.75	0.73	0.70
MgO	10.53	11.50	11.94	12.97	13.18	12.79	14.14	14.61
CaO	0.10	0.15	0.03	0.06	0.05	0.27	0.04	0.04
Na ₂ O	0.02	0.00	0.00	0.01	0.03	0.08	0.01	0.01
K ₂ O	0.01	0.08	0.00	0.02	0.00	0.12	0.00	0.00
Сумма	85.53	85.29	86.22	85.97	86.07	86.3	86.90	88.51
Si	2.702	2.812	2.770	2.744	2.835	3.014	2.790	3.084
Al	2.676	2.466	2.542	2.604	2.423	2.285	2.410	2.139
Ti	0.005	0.004	0.006	0.000	0.011	0.000	0.002	0.002
Cr	0.005	0.032	0.004	0.025	0.01	0.018	0.001	0.003
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	2.718	2.674	2.597	2.406	2.461	2.348	2.451	2.276
Mn	0.084	0.02	0.078	0.052	0.052	0.068	0.067	0.062
Mg	1.748	1.904	1.951	2.101	2.138	2.053	2.275	2.271
Ca	0.012	0.018	0.004	0.007	0.006	0.031	0.005	0.004
Na	0.004	0.000	0.000	0.002	0.006	0.017	0.002	0.002
K	0.001	0.011	0.000	0.003	0.000	0.016	0.000	0.000
AlIV	1.298	1.188	1.230	1.256	1.165	0.986	1.210	0.916
AlVI	1.378	1.278	1.312	1.348	1.258	1.299	1.200	1.224
Fe	2.718	2.674	2.597	2.406	2.461	2.348	2.451	2.276
Sum	14	14	14	14	14	14	14	14

Примечание. 1, 2 – хлориты из обр. 2126 – альбит-эпидот-гранатовый амфиболит; 3, 4 – хлориты из обр. 2126-6 – сланец гранат-мусковит-альбит-кварцевый; 5, 6 – хлориты из обр. 2087-8 – сланец гранат-амфибол-мусковит-хлорит-альбитовый; 7, 8 – хлориты из обр. 2088-10 (сланец эпидот-альбит-глаукофановый).

Note. 1, 2 – chlorites from mod. 2126 – albite-epidote-garnet amphibolite; 3, 4 – chlorites from mod. 2126-6 – garnet-muscovite-albite-quartz shale; 5, 6 – chlorites from mod. 2087-8 – garnet-amphibole-muscovite-chlorite-albite shale; 7, 8 – chlorites from mod. 2088-10 (epidote-albite shale-glaucophane).

с надвигами или поддвигами). Также нужно принять во внимание, что голубые сланцы развиваются в вулканогенных и терригенных породах пассивной континентальной окраины. По всей видимости, легкие массы континентальной окраины были вовлечены в процесс субдукции на заключительной стадии последнего, что послужило причиной незначительного распространения высокобарических пород и быстрой эксгумации блоков. Такая обстановка имеет много общего с альпийским типом субдукции, или А-типом, когда погружению подвергаются континентальные блоки, что демон-

стрируется сходством полученных нами *P-T* параметров метаморфизма в зоне ГУР на Северном Урале и *P-T-t* трендом пород меланжа альпийского типа субдукции в Западных Альпах (Ernst, 1988; Лиханов, 2020).

Предположение о формировании высокобарических пород зоны ГУР на Северном Урале в процессе перерастания субдукционной обстановки в коллизионную подтверждается результатами датирования (Петров и др., 2008). Южнее рассматриваемой территории выполнено Sm-Nd и Rb-Sr датирование минеральных фракций из двух образ-

Таблица 6. Представительные анализы эпидотов из горных пород хомасинской свиты

Table 6. Representative analyses of epidotes from rocks of the Khomasi formation

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8
	2126.1	2126.2	2126.3	2126.4	2087-8.1	2088-10.1	2088-10.1	2088-10.2
SiO ₂	39.09	38.40	37.71	37.99	38.33	37.68	37.53	37.94
TiO ₂	0.15	0.10	0.12	0.23	0.11	0.01	0.05	0.09
Al ₂ O ₃	29.70	28.79	26.12	26.37	27.14	22.89	23.04	23.57
Fe ₂ O ₃ общ	3.34	4.57	7.86	7.60	6.56	12.50	12.10	12.00
Cr ₂ O ₃	0.01	0.05	0.03	0.04	0.05	0.02	0.00	0.00
MnO	0.27	0.17	0.00	0.00	0.08	0.72	0.69	0.70
MgO	0.06	0.10	0.04	0.03	0.04	0.01	0.01	0.02
CaO	24.26	23.94	23.66	23.69	24.34	23.14	23.24	22.63
Na ₂ O	0.02	0.02	0.01	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00
K ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Сумма	96.91	96.14	95.55	95.95	96.66	96.97	96.66	96.96
Si	3.053	3.044	3.065	3.068	3.060	3.104	3.097	3.108
Al	2.734	2.690	2.502	2.510	2.554	2.222	2.241	2.276
Ti	0.009	0.006	0.007	0.014	0.007	0.001	0.003	0.006
Cr	0.001	0.003	0.002	0.003	0.003	0.001	0.000	0.000
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.218	0.303	0.534	0.513	0.438	0.861	0.835	0.822
Mn	0.018	0.011	0.000	0.000	0.005	0.050	0.048	0.049
Mg	0.007	0.012	0.005	0.004	0.005	0.001	0.001	0.002
Ca	2.030	2.033	2.060	2.050	2.082	2.042	2.055	1.986
Na	0.003	0.003	0.002	0.000	0.003	0.003	0.000	0.000
K	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
AlIV	2.734	2.69	2.502	2.510	2.554	2.222	2.241	2.276
AlVI	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe	0.218	0.303	0.534	0.513	0.438	0.861	0.835	0.822
Sum	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5

Примечание. 1–4 – эпидоты из обр. 2126 (альбит-эпидот-гранатовый амфиболит): 1, 2 – включения во внутренних частях кристаллов гранатов, 3, 4 – кристаллы из основной массы; 5 – эпидот из обр. 2087-8 (сланец гранат-амфибол-мусковит-хлорит-альбитовый); 6–8 – эпидоты из обр. 2088-10 (сланец эпидот-альбит-глаукофановый).

Note. 1–4 – epidotes from model 2126 (albite-epidote-garnet amphibolite): 1, 2 – inclusions in the inner parts of garnet crystals, 3, 4 – crystals from the main mass; 5 – epidote from model 2087-8 (garnet-amphibole-muscovite-chlorite-albite shale); 6–8 – epidotes from model 2088-10 (epidote-albite-glaucophane shale).

цов глаукофансодержащих пород из зоны ГУР – магнетит-альбит-эпидот-амфиболового метабазальта и метаморфизованного биотит-амфибол-двуполевошпатового монцонита. В результате изотопно-геохронологических исследований в первом образце получена Sm-Nd изохрона (MSWD = 0.73) по эпидоту, магнетиту, амфиболу и породе в целом, определяющая возраст 370 ± 35 млн лет; исследование второго образца позволило вычислить Rb-Sr эррохрону (MSWD = 3.4), дающую возраст 367 ± 15 млн лет. Такой же (в пределах аналитической ошибки) возраст получен для гранулитов

и амфиболитов Салдинского метаморфического комплекса, расположенного восточнее Тагильского островодужного мегаблока. Одновременное “закрытие” Sm-Nd изотопных систем метаморфических комплексов, обрамляющих Тагильский палеостроводужный террейн, по-видимому, связано с аккрецией восточноуральских террейнов к окраине Восточно-Европейского палеоконтинента и началом Уральской коллизии в конце франского – начале фаменского веков позднего девона. Позднедевонское время (граница франского и фаменского веков) на Среднем и Северном Урале маркиру-

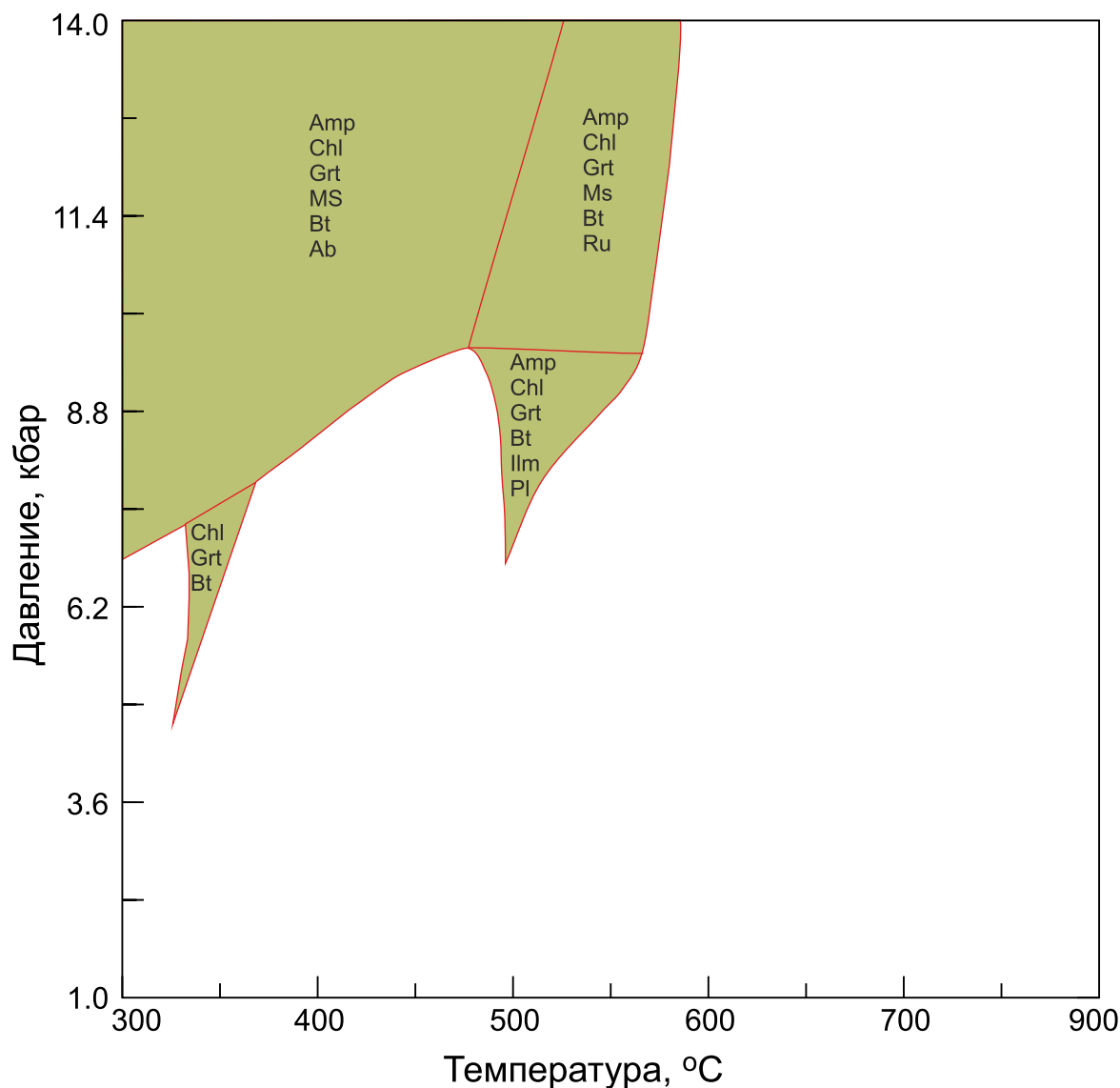


Рис. 8. Диаграмма с полями устойчивости гранатосодержащих минеральных парагенезисов, рассчитанных методом минимизации энергии Гиббса в программе Perple_X (Connolly, 1990).

Для упрощения вида диаграммы показаны главные поля парагенезисов и преимущественно минералы переменного состава. Во всех полях присутствует кварц. H_2O в расчетах учитывался как насыщенный компонент. Для расчетов использован состав образца сланца 2087-8 (см. табл. 1).

Fig. 8. Diagram with stability fields of garnet-containing mineral parageneses calculated by the Gibbs energy minimization method in the Perple_X program (Connolly, 1990).

To simplify the diagram, the main fields of paragenesis and mainly minerals of variable composition are shown. Quartz is present in all fields. H_2O was taken into account as a saturated component in the calculations. The composition of the shale sample 2087-8 was used for calculations (Table 1).

ется формированием олистостромы в зоне Главного уральского разлома, прекращением вулканизма островодужного типа в Тагильской мегазоне и началом накопления мощной грубообломочной молассоидной толщи (Петров и др., 2008). В пределах Восточно-Уральской мегазоны также присутствуют фаменско-турнейские грубообломочные

полимиктовые осадки, относимые к арамильской толще, перекрывающие франские островодужные вулканы маминской толщи.

Гранат-актинолитовые и гранат-роговообманковые парагенезисы, обнаруженные в тектонических пластинах в зоне ГУР, могли сформироваться на несколько более поздней стадии процесса пере-

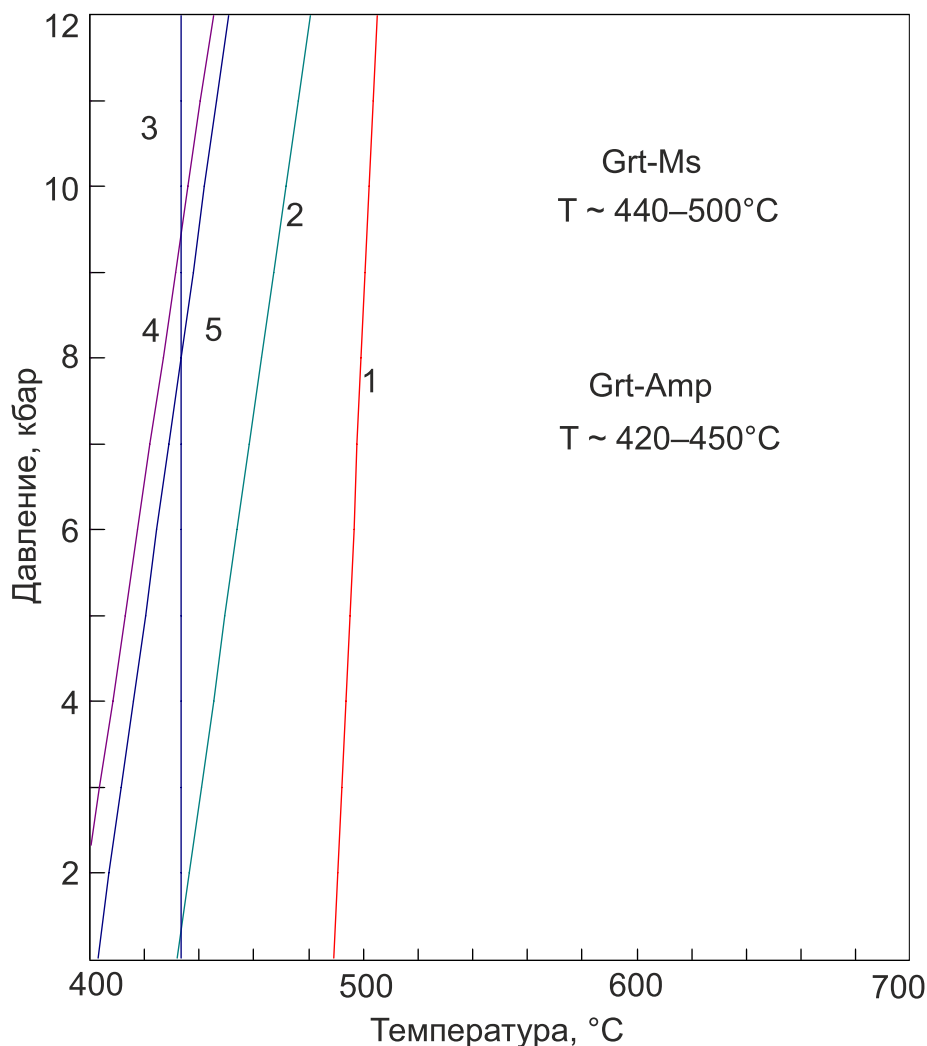


Рис. 9. *P-T* диаграмма с результатами минеральной термометрии по гранат-мусковитовым (1–3) и гранат-амфиболовым термометрам (4, 5) для гранат-амфибол-мусковит-хлорит-альбитового сланца (обр. 2087-8).

1 – (Coggon, Holland, 2002); 2, 3 – (Green, Hellman, 1982); 4 – (Graham, Powell, 1984); 5 – (Perchuk, 1991).

Fig. 9. *P-T* diagram with the results of mineral thermometry for garnet-muscovite (1–3) and garnet-amphibole thermometers (4, 5) for garnet-amphibole-muscovite-chlorite-albite shale (sample 2087-8).

1 – (Coggon, Holland, 2002); 2, 3 – (Green, Hellman, 1982); 4 – (Graham, Powell, 1984); 5 – (Perchuk, 1991).

растания субдукции в коллизию, когда параметры метаморфизма были ближе к коллизионным (несколько более высокие температуры при меньших давлениях). На схеме *P-T-t* трендов И.И. Лиханова (2020) параметры метаморфизма упомянутых пород близки к трендам областей с надвиговой тектоникой (что, вероятно, соответствует началу коллизионного тектонического режима).

ВЫВОДЫ

1. Геохимические особенности протолитов пород хомасьинской свиты, в частности базальтов,

указывают на “обогащенный” мантийный источник, а пространственная ассоциация основных вулканитов с аркозовыми и кварцевыми песчаниками и алевролитами не противоречит предположению об обстановке их формирования на пассивной континентальной окраине.

2. Образование гранатсодержащих сланцев, судя по расчетным данным минерального парагенезиса, возможно при давлениях не ниже 7–8 кбар и при температуре 400–500°C.

3. Предполагается, что минеральный состав пород и термодинамический режим их образования отвечает геодинамическому режиму субдукции

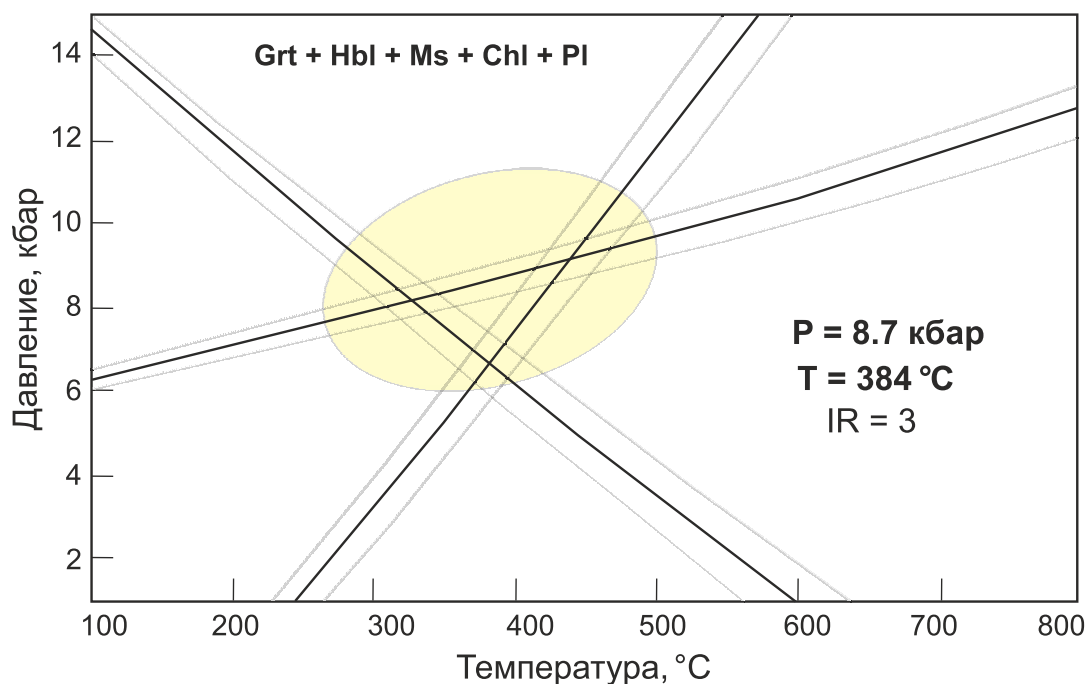


Рис. 10. Расчет P - T параметров образования минералов гранат-амфибол-мусковит-хлорит-альбитового сланца (обр. 2087-8), рассчитанные в программе avPT-Thermocalc (Holland, Powell, 1998).

Линии независимых минеральных реакций с использованием оригинальной аббревиатуры для минералов (Holland, Powell, 1998): $py + 2gr + 3ames + 9ab + 9q = 3tr + 9pa$, $5mu + 2ames + 8ab + 4q = py + 5cel + 8pa$, $15alm + 12tr + 45mu + 6ames + 3gab = 28py + 8gr + 45fcel + 36pa$. Крупным эллипсом показан доверительный P - T интервал в рамках принятых термодинамических параметров минералов, также для каждой линии минеральной реакции приведены эллипсы ошибок, зависящие главным образом от ошибок определения термодинамических параметров минералов.

Fig. 10. Calculation of the P - T parameters of the formation of garnet-amphibole-muscovite-chlorite-albite shale minerals (sample 2087-8) calculated in the avPT-Thermocalc program (Holland, Powell, 1998).

Lines of independent mineral reactions using the original abbreviation for minerals according to (Holland, Powell, 1998): $py + 2gr + 3ames + 9ab + 9q = 3tr + 9pa$, $5mu + 2ames + 8ab + 4q = py + 5cel + 8pa$, $15alm + 12tr + 45mu + 6ames + 3gab = 28py + 8gr + 45fcel + 36pa$. A large ellipse shows the confidence interval within the accepted thermodynamic parameters of minerals, and error ellipses are shown for each line of the mineral reaction, depending mainly on errors in determining the thermodynamic parameters of minerals.

(безгранатовые глаукофановые сланцы) с последующим переходом к режиму коллизии (парагенезисы с гранатом, актинолитом и роговой обманкой), чему не противоречат результаты изотопного датирования пород и выявленные P - T параметры их метаморфизма.

Благодарности

Авторы благодарны А.М. Пыстину и И.И. Лиханову за полезные рекомендации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вализер П.М., Ленных В.И. (1988) Амфиболы голубых сланцев Урала. М.: Наука, 203 с.
Вализер П.М., Краснобаев А.А., Русин А.И., Зворыгина А.А. (2015) Гранат-глаукофановые сланцы Ташлинского блока Максютинского комплекса (Южный

Урал). *Литосфера*, (5), 51-70.

- Григорьев С.И., Ремизов Д.Н., Григорьева Н.Г., Юдин В.В., Феофилактов Ф.Н. (2005) Термодинамические условия формирования метаморфических пород Неркаюского и Лемвинского аллохтонов на Полярном Урале. *Петрология и минералогия Севера Урала и Тимана*. Тр. ИГ Коми НЦ УрО РАН, вып. 119, 53-64.
Добрецов Н.Л. (1974) Глаукофансланцевые и эклогит-глаукофансланцевые комплексы СССР. Тр. ИГГ СО АН СССР, вып. 57, 429 с.
Иванов К.С. (1998) Основные черты геологической истории (1.6–0.2 млрд лет) и строения Урала. Дисс.... д-ра. геол.-мин. наук. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 252 с.
Иванов К.С., Карстен Л.А., Малюски Г. (2000) Первые данные о возрасте субдукционного (эклогит-глаукофансланцевого) метаморфизма на Полярном Урале. *Палеозоны субдукции: тектоника, метаморфизм, осадконакопление*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 121-128.

- Карстен Л.А. (1989) Геология метаморфических комплексов в зоне Главного Уральского разлома на Приполярном Урале. Автореф. ... канд. геол.-мин. наук. Свердловск: ИГГ УрО АН СССР, 23 с.
- Ленных В.И. (1978) Эклогит-глаукофановый пояс Южного Урала. М.: Наука, 160 с.
- Лепезин Г.Г., Королук В.Н. (1985) Типы зональности в гранатах. *Геология и геофизика*, (6), 71-79.
- Лиханов И.И. (2020) Метаморфические индикаторы геодинамических обстановок коллизии, растяжения и сдвиговых зон земной коры. *Петрология*, **28**(1), 4-22.
- Лю И., Перчук А.Л., Арискин А.А. (2019) Высокобарный метаморфизм в перидотитовом кумулате комплекса Марун-Кеу, Полярный Урал. *Петрология*, **27**(2), 138-160.
- Петров Г.А. (2007) Условия формирования комплексов зоны Главного Уральского разлома на Северном Урале. Екатеринбург: УГТУ, 181 с.
- Петров Г.А. (2022) Геохимические особенности вулканитов северной части Тагильской структуры как отражение эволюции палеозоны субдукции. *Литосфера*, **22**(6), 709-740.
- Петров Г.А., Наседкина В.А. (2008) К проблеме корреляции среднеордовикских отложений в зоне Главного Уральского разлома на Северном и Среднем Урале. *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 155, 60-62.
- Петров Г.А., Пучков В.Н. (1994) Главный Уральский разлом на Северном Урале. *Геотектоника*, (1), 25-37.
- Петров Г.А., Ронкин Ю.Л., Маслов А.В., Свяжина И.А., Рыбалка А.В., Лепихина О.П. (2008) Время начала коллизии на Среднем и Северном Урале. *Докл. РАН*, **422**(3), 365-370.
- Пучков В.Н. (2010) Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 280.
- Пыстин А.М. (1994) Полиметаморфические комплексы западного склона Урала. СПб.: Наука, 208 с.
- Пыстин А.М., Кушманова Е.В., Пыстина Ю.И., Панфилов А.В. (2019) Возраст протолитов и геохронология метаморфизма Неркаюского эклогит-сланцевого комплекса Приполярного Урала. *Вестн. Перм. ун-та. Геология*, **18**(2), 96-107.
- Русин А.И., Никифоров О.Б. (1991) Глаукофансланцевый метаморфизм Северного Урала. *Тр. ИГГ УрО АН СССР*, вып. 138, 64-66.
- Русин А.И., Зворыгина А.А., Вализер П.М. (2021) Лавсонитовые эклогиты и метасоматиты Утарбаевской ассоциации максютовского комплекса. *Литосфера*, **21**(6), 867-883.
- Салимгараева Л.И., Березин А.В. (2023) Гранатиты из эклогитового комплекса Марун-Кеу (Полярный Урал): геохимия и проблемы образования. *Зап. Горн. ин-та*, **262**, 509-525.
- Селятицкий А.Ю., Куликова К.В. (2017) Первые данные о проявлении УНР-метаморфизма на Полярном Урале. *Докл. РАН*, **476**(6), 681-684.
- Удовкина Н.Г. (1971) Эклогиты Полярного Урала. М.: Наука, 193 с.
- Фролова Т.И., Бурикова И.А. (1997) Магматические формации современных геодинамических обстановок. М.: МГУ, 320 с.
- Шалагинов В.В. (1975) Глаукофансодержащие сланцы восточного склона Северного Урала. *Тр. Свердловского Горн. ин-та*, вып. 116, 15-22.
- Шацкий В.С., Симонов В.А., Ягоутц Э. (2000) Новые данные о возрасте эклогитов Полярного Урала. *Докл. РАН*, **371**(4), 519-523.
- Barberi F., Ferrara G., Santacroce R., Treuil M., Varet J. (1975) A transitional basalt-pantellerite sequence of fractional crystallisation, the Boina centre (Afar rift, Ethiopia). *J. Petrol.*, (16), 22-56.
- Brown E.H. (1977) The Grossite Content of Ca-Amphibole as a Guide to Pressure of Metamorphism. *Jorn. Petrol.*, **18**(1), 53-72.
- Coggon R., Holland T.J.B. (2002) Mixing properties of phengitic micas and revised garnet-phengite thermobarometers. *J. Metamorphic Geol.*, **20**(7), 683-696.
- Connolly J.A.D. (1990) Multivariable phase-diagrams: an algorithm based on generalized thermodynamics. *Amer. J. Sci.*, **290**, 666-718.
- Ernst W.G. (1979) Coexisting sodic and calcic amphiboles from high-pressure metamorphic belts and the stability of barroisitic amphibole. *Mineral. Mag.*, **43**, 269-278.
- Ernst W.G. (1988) Tectonic history of subduction zones inferred from retrograde blueschist P-T paths. *Geology*, **16**, 1081-1084.
- Gomez-Pugnaire M.T., Karsten L., Sanchez-Vizcaino V.L. (1997) Phase relationships and P-T conditions of coexisting eclogite-blueschists and their transformation to greenschist-facies rocks in the Nerkau complex (North-eastern Ural). *Tectonophysics*, **276**(1-4), 195-216. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(97\)00055-3](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00055-3)
- Graham C.M., Powell R. (1984) A garnet-hornblende geothermometer: calibration, testing, and application to the Pelona Schist, Southern California. *J. Metamorphic Geol.*, **2**(1), 13-31.
- Green T.H., Hellman P.L. (1982) Fe-Mg partitioning between coexisting garnet and phengite at high pressure, and comments on a garnet-phengite geothermometer. *Lithos*, **15**(4), 253-266.
- Holland T.J.B., Powell R. (1998) An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *J. Metamorph. Geol.*, **16**(3), 309-343.
- Le Bas M.J., Le Matre R.W., Streckeisen A., Zanettin B. (1986) A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J. Petrol.*, **27**(3), 745-750.
- Maruyama S., Cho M., Liou J.G. (1986). Experimental investigation of blueschistgreenschist transition equilibria: pressure dependence of Al₂O₃ contents in sodic amphiboles – a new geobarometer. *Geol. Soc. of America Memoir Blueschists and Eclogites*, **164**, 1-16.
- Miyashiro A. (1953) Calcium-poor garnet in relation to metamorphism. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **4**(4), 179-208.
- Molina J.F., Austrheim H., Glodny J., Rusin A. (2002) The eclogites of the Marun-Keu complex, Polar Urals (Russia): fluid control on reaction kinetics and metasomatism during high P metamorphism. *Lithos*, **61**(1), 55-78.
- Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on amphiboles of the International mineralogical association, commission on new minerals and mineral names (1997). *Canad. Miner.*, **35**, 219-246.
- Pearce J.A. (1983) Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Cambridge, Mass.: Shiva Publishing Ltd., 230-249.
- Perchuk L.L. (1991) Derivation of a thermodynamically

- consistent set of geothermometers and geobarometers for metamorphic and magmatic rocks. *Progress in Metamorphic and Magmatic Petrology: A Memorial Volume in Honour of D.S. Korzhinskiy*. (Ed. by L.L. Perchuk). Cambridge: Cambridge University Press, 93-112.
- Sun S.-S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for the mantle composition and processes. *Magmatism in the oceanic basins*. (Ed. by A.D. Saunders, M.J. Norry). Geol. Soc. London. Spec. Publ., 313-345.
- Taylor S.R., McLennan S.M. (1985) The continental crust: its composition and evolution. Cambridge, Mass.: Blackwell, 312 p.
- Tsai Ch., Yoshiyuki Y., Ernst W.G. (2013) Diverse mineral compositions, textures, and metamorphic *P-T* conditions of the glaucophane-bearing rocks in the Tamayen mélange, Yuli belt, eastern Taiwan. *J. Asian Earth Sci.*, **63**, 218-233.
- ### REFERENCES
- Barberi F., Ferrara G., Santacroce R., Treuil M., Varet J. (1975) A transitional basalt-pantellerite sequence of fractional crystallisation, the Boina centre (Afar rift, Ethiopia). *J. Petrol.*, (16), 22-56.
- Brown E.H. (1977) The Grossite Content of Ca-Amphibole as a Guide to Pressure of Metamorphism. *Jorn. Petrol.*, **18**(1), 53-72.
- Coggon R., Holland T.J.B. (2002) Mixing properties of phengitic micas and revised garnet-phengite thermobarometers. *J. Metamorphic Geol.*, **20**(7), 683-696.
- Connolly J.A.D. (1990) Multivariable phase-diagrams: an algorithm based on generalized thermodynamics. *Amer. J. Sci.*, **290**, 666-718.
- Dobretsov N.L. (1974) Glaucophanslant and eclogite-glaucophanslant complexes of the USSR. *Tr. IGG SO AN SSSR*, vyp. 57, 429 p. (In Russ.)
- Ernst W.G. (1979) Coexisting sodic and calcic amphiboles from high-pressure metamorphic belts and the stability of barroisitic amphibole. *Mineral. Mag.*, **43**, 269-278.
- Ernst W.G. (1988) Tectonic history of subduction zones inferred from retrograde blueschist *P-T* paths. *Geology*, **16**, 1081-1084.
- Frolova T.I., Burikova I.A. (1997) Magmatic formations of modern geodynamic environments. Moscow, MGU, 320 p. (In Russ.)
- Gomez-Pugnaire M.T., Karsten L., Sanchez-Vizcaino V.L. (1997) Phase relationships and *P-T* conditions of coexisting eclogite-blueschists and their transformation to greenschist-facies rocks in the Nerkau complex (Northern Ural). *Tectonophysics*, **276**(1-4), 195-216. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(97\)00055-3](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00055-3)
- Graham C.M., Powell R. (1984) A garnet-hornblende geothermometer: calibration, testing, and application to the Pelona Schist, Southern California. *J. Metamorphic Geol.*, **2**(1), 13-31.
- Green T.H., Hellman P.L. (1982) Fe-Mg partitioning between coexisting garnet and phengite at high pressure, and comments on a garnet-phengite geothermometer. *Lithos*, **15**(4), 253-266.
- Grigoriev S.I., Remizov D.N., Grigorieva N.G., Yudin V.V., Feofilaktov F.N. (2005) Thermodynamic conditions for the formation of metamorphic rocks of the Nerkay and Lemvin allochthons in the Polar Urals. *Petrology and mineralogy of the North of the Urals and Timan*. *Tr. IGG Komi NTs UrO RAN*, vyp. 119, 53-64. (In Russ.)
- Holland T.J.B., Powell R. (1998) An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *J. Metamorph. Geol.*, **16**(3), 309-343.
- Ivanov K.S. (1998) The main features of the geological history (1.6-0.2 billion years) and the structure of the Urals. Dokt. geol. and min. sci. diss. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 252 p. (In Russ.)
- Ivanov K.C., Karsten L.A., Malyuski G. (2000) The first data on the age of subduction (eclogite-glaucophanslant) metamorphism in the Polar Urals. *Paleozones of subduction: tectonics, metamorphism, sedimentation*. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 121-128. (In Russ.)
- Karsten L.A. (1989) Geology of metamorphic complexes in the zone of the Main Ural fault in the Circumpolar Urals. Abstract Dokt. geol. and min. sci. diss. Sverdlovsk, IGG UNTs AN SSSR, 23 p. (In Russ.)
- Le Bas M.J., Le Matric R.W., Streckeisen A., Zanettin B. (1986) A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J. Petrol.*, **27**(3), 745-750.
- Lennykh V.I. (1978) Eclogite-glaucophane belt of the Southern Urals. Moscow, Nauka Publ., 160 p. (In Russ.)
- Lepezin G.G., Korolyuk V.N. (1985) Types of zonality in garnades. *Geologiya i geofizika*, (6), 71-79. (In Russ.)
- Likhanov I.I. (2020) Metamorphic indicators of geodynamic environments of collision, stretching and shear zones of the Earth's crust. *Petrologiya*, **28**(1), 4-22. (In Russ.)
- Liu I., Perchuk A.L., Ariskin A.A. (2019) High-impact metamorphism in the peridotite cumulate of the Marun-Keu complex, Polar Urals. *Petrologiya*, **27**(2), 138-160. (In Russ.)
- Maruyama S., Cho M., Liou J.G. (1986). Experimental investigation of blueschistgreenschist transition equilibria: pressure dependence of Al₂O₃ contents in sodic amphiboles – a new geobarometer. *Geol. Soc. of America Memoir Blueschists and Eclogites*, **164**, 1-16.
- Miyashiro A. (1953) Calcium-poor garnet in relation to metamorphism. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **4**(4), 179-208.
- Molina J.F., Austrheim H., Glodny J., Rusin A. (2002) The eclogites of the Marun-Keu complex, Polar Urals (Russia): fluid control on reaction kinetics and metasomatism during highP metamorphism. *Lithos*, **61**(1), 55-78.
- Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on amphiboles of the International mineralogical association, commission on new minerals and mineral names (1997). *Canad. Miner.*, **35**, 219-246.
- Pearce J.A. (1983) Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Cambridge, Mass., Shiva Publishing Ltd., 230-249.
- Perchuk L.L. (1991) Derivation of a thermodynamically consistent set of geothermometers and geobarometers for metamorphic and magmatic rocks. *Progress in Metamorphic and Magmatic Petrology: A Memorial Volume in Honour of D.S. Korzhinskiy*. (Ed. by L.L. Perchuk). Cambridge, Cambridge University Press, 93-112.
- Petrov G.A. (2007) Conditions for the formation of complexes of the Main Ural fault zone in the Northern Urals. Ekaterinburg, UGGU, 181 p. (In Russ.)
- Petrov G.A. (2022) Geochemical features of volcanites of the northern part of the Tagil structure as a reflection of the evolution of the paleozone of subduction. *Lithosphere (Russia)*, **22**(6), 709-740. (In Russ.)

- Petrov G.A., Nasedkina V.A. (2008) On the problem of correlation of Middle Ordovician deposits in the zone of the Main Ural fault in the Northern and Middle Urals. *Tr. IGG UrO RAN*, vyp. 155, 60-62. (In Russ.)
- Petrov G.A., Puchkov V.N. (1994) The Main Ural fault in the Northern Urals. *Geotektonika*, (1), 25-37. (In Russ.)
- Petrov G.A., Ronkin Yu.L., Maslov A.V., Svyazina I.A., Rybalka A.V., Lepikhina O.P. (2008) The time of the beginning of the collision in the Middle and Northern Urals. *Dokl. RAN*, **422**(3), 365-370. (In Russ.)
- Puchkov V.N. (2010) Geology of the Urals and the Urals (topical issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny). Ufa, Designpoligrafservice Publ., 280 p. (In Russ.)
- Pystin A.M. (1994) Polymetamorphic complexes of the western slope of the Urals. Saint Petersburg, Nauka Publ., 208 p. (In Russ.)
- Pystin A.M., Kushmanova E.V., Pystina Yu.I., Panfilov A.V. (2019) Age of protoliths and geochronology of metamorphism of the Nerkayu eclogite-shale complex of the Circumpolar Urals. *Vestn. Perm. un-ta. Geologiya*, **18**(2), 96-107. (In Russ.)
- Rusin A.I., Nikiforov O.B. (1991) Glaucophane-schist metamorphism of the Northern Urals. *Tr. IGG URO AN SSSR*, vyp. 138, 64-66. (In Russ.)
- Rusin A.I., Zvorygina A.A., Valizer P.M. (2021) Lawsonite eclogites and metasomatites of the Utarbaev Association of the Maksyutovsky complex. *Lithosphere (Russia)*, **21**(6), 867-883. (In Russ.)
- Salimgaraeva L.I., Berezin A.V. (2023) Granatites from the eclogite complex Marun-Keu (Polar Urals): geochemistry and problems of education. *Zap. Gorn. in-ta*, **262**, 509-525. (In Russ.)
- Selyatitsky A.Yu., Kulikova K.V. (2017) The first data on the manifestation of UHP metamorphism in the Polar Urals. *Dokl. RAN*, **476**(6), 681-684. (In Russ.)
- Shalaginov V.V. (1975) Glaucophane-containing shales of the eastern slope of the Northern Urals. *Tr. Sverdlovskogo Gorn. in-ta*, vyp. 116, 15-22. (In Russ.)
- Shatsky V.S., Simonov V.A., Yagoutts E. (2000) New data on the age of eclogites of the Polar Urals. *Dokl. RAN*, **371**(4), 519-523. (In Russ.)
- Sun S.-S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for the mantle composition and processes. *Magmatism in the oceanic basins*. (Ed. by A.D. Saunders, M.J. Norry). Geol. Soc. London. Spec. Publ., 313-345.
- Taylor S.R., McLennan S.M. (1985) The continental crust: its composition and evolution. Cambridge, Mass., Blackwell, 312 p.
- Tsai Ch., Yoshiyuki Y., Ernst W.G. (2013) Diverse mineral compositions, textures, and metamorphic *P-T* conditions of the glaucophane-bearing rocks in the Tamayen mélange, Yuli belt, eastern Taiwan. *J. Asian Earth Sci.*, **63**, 218-233.
- Udovkina N.G. (1971) Eclogites of the Polar Urals. Moscow, Nauka Publ., 193 p. (In Russ.)
- Valizer P.M., Lennykh V.I. (1988) Amphiboles of the blue shales of the Urals. Moscow, Nauka Publ., 203 p. (In Russ.)
- Valizer P.M., Krasnobaev A.A., Rusin A.I., Zvorygina A.A. (2015) Garnet-glaucophane shales of the Tashli block of the Maksyutovsky complex (Southern Urals). *Lithosphere (Russia)*, (5), 51-70. (In Russ.)