

## К ВОПРОСУ О МЕТАМОРФИЗМЕ ПОРОД ШАТАКСКОГО КОМПЛЕКСА (БАШКИРСКИЙ МЕГАНТИКЛИНОРИЙ)

- © **С.И. Высоцкий,**  
младший научный сотрудник,  
Институт геологии,  
ул. Карла Маркса, 16/2,  
450077, г. Уфа,  
Российская Федерация  
e-mail: kovalev@ufaras.ru
- © **С.Г. Ковалев,**  
доктор геолого-минералогических  
наук,  
Врио директора,  
Институт геологии,  
ул. К. Маркса, 16/2,  
450077, г. Уфа,  
Российская Федерация,
- © **С.С. Ковалев,**  
младший научный сотрудник,  
Институт геологии,  
ул. К. Маркса, 16/2,  
450077, г. Уфа,  
Российская Федерация

В статье приводятся материалы по изучению метаморфизма пород Шатакского комплекса, который представляет собой стратифицированную вулканогенно-осадочную ассоциацию, залегающую в основании среднерифейского разреза Башкирского мегантиклинория. В результате проведенных исследований установлено, что по эпигенетическим минеральным парагенезисам, петро- и геохимическим особенностям среди пород комплекса выделяются производные субщелочного (пропилитизация, скарнирование), кислотно-щелочного (березитизация), щелочного и кремнещелочного (серицитизация, калишпатизация, альбитизация) метасоматоза и кислотного выщелачивания (окварцевание).

Рассчитанные температуры образования хлоритов из пород Шатакского комплекса позволили установить, что минералы подразделяются на две группы – «высокомагнезиальные» (магматические) и «низкомагнезиальные» (терригенные), температурные интервалы образования которых близки (~300–350°C для первых и ~300–400°C для вторых). Оценка термобарических параметров образования мусковита из конгломератовых горизонтов кузьелгинской подсвиты показала, что максимальные температура и давление соответствовали  $T = \sim 470^\circ\text{C}$ ,  $P = \sim 8$  кбар, а минимальные составляли:  $T = \sim 380^\circ\text{C}$ ,  $P = \sim 3$  кбар.

На основании установленных термобарических параметров делается вывод о том, что процесс изменения пород был многоэтапным. Первый этап был обусловлен «автометаморфическими» процессами, которые реализовывались при формировании вулканогенно-осадочных толщ в качестве «единого» комплекса. Второй – более поздний, определялся в первую очередь стрессовой нагрузкой, о чем свидетельствует высокое давление (~ 8 кбар), а также ассоциация мусковита с хлоритоидом.

Данные выводы свидетельствуют о том, что в поздневендское время территория Южного Урала развивалась в режиме сжатия, явившегося результатом орогенических движений в складчатой области тиманид, сформировавшихся на краю рифейского платформенного бассейна. При этом, специфика регионального метаморфизма, проявившегося в пределах Башкирского мегантиклинория выразилась в наличии стрессовой составляющей, проявившейся на значительной территории.

Ключевые слова: Шатакский комплекс, метаморфизм, пропилитизация, скарнирование, березитизация, дислокационный метаморфизм, хлорит, мусковит, термобарические параметры, стрессовое давление

© S.I. Vysotsky, S.G. Kovalev, S.S. Kovalev

## ON METAMORPHISM OF ROCKS IN THE SHATAK COMPLEX (BASHKIR MEGANTICLINORIUM)

Institute of Geology,  
Ufa Federal Research Centre,  
Russian Academy of Sciences,  
16/2, ulitsa K. Marksa,  
450077, Ufa, Russian Federation,  
e-mail: kovalev@ufaras.ru

The article presents research materials on metamorphism of rocks of the Shatak complex, a stratified volcanogenic-sedimentary association lying at the base of the Middle Riphean section of the Bashkir Meganticlinorium. As a result of the research, it has been found out that subalkaline (propylitization, skarning), acid-alkaline (berezitization), alkaline and silicate derivatives (sericitization, ka-lifeldsparization, albitization) of metasomatism and acid leaching (silification) can be recognized among the rocks of the complex, according to epigenetic mineral parageneses as well as petro- and geochemical features.

The temperatures calculated for the formation of chlorites from the rocks of the Shatak complex suggest the classification of the minerals into two groups. These are «high-magnesium» (magmatic) and «low-magnesium» (terrigenous) minerals, whose temperature intervals are close (~ 300–350°C for the former and ~ 300–400°C for the latter). The assessment of thermobaric parameters in generating muscovite from conglomerate horizons of the Kuzyelga Subformation shows that the maximum temperature and pressure correspond to  $T = \sim 470^\circ\text{C}$ ,  $P = \sim 8$  kbar, and the minimum ones are  $T = \sim 380^\circ\text{C}$ ,  $P = \sim 3$  kbar

Based on the thermobaric parameters, it is concluded that the process of metamorphization was multi-stage. The first stage was determined by «autometamorphic» processes occurred during the formation of volcano-sedimentary strata as a «single» complex. The second stage was determined primarily by stress, as evidenced by high pressure (~ 8 kbar) and also by the muscovite-chloritoid association.

These findings indicate that in the Late Vendian time, the territory of the South Urals developed in the compressive regime as a result of orogenic movements in the folded area of Timanides formed on the margin of the Riphean platform basin. At the same time, the specificity of regional metamorphism that manifested itself within the Bashkir Meganticlinorium was expressed in the presence of a stress component occurred over a vast area.

Key words: Shatak complex, metamorphism, propylitization, skarning, berezitization, dislocation metamorphism, chlorite, muscovite, thermobaric parameters, stress pressure

**Введение.** Метаморфизм пород Башкирского мегантиклинория вызывает повышенный интерес исследователей уже в течении длительного периода времени. Попытки объяснения его латеральной неоднородности (региональной, субмеридиональной зональ-

ности), которая заключается в слабом метаморфизме рифейско-вендских толщ западной части Башкирского мегантиклинория и повышенной интенсивности метаморфических преобразований в его восточной части, наталкиваются на отсутствие количественных

данных по термобарическим параметрам метаморфических преобразований пород, а выделение фаций основано лишь на литолого-петрографическом описании минеральных ассоциаций. Кроме того, метаморфизм является одной из важнейших причин рудообразования [1] и с этих позиций его изучение позволяет реальнее оценивать территорию на различные виды полезных ископаемых.

В последнее время нами были получены новые данные по метаморфизму пород Шатакского комплекса, что позволяет предложить решение некоторых дискуссионных вопросов метаморфической истории западного склона Южного Урала.

**1. Методы исследований.** Изучение минералогии пород проводилось на растровом электронном микроскопе РЭММ-202М с EDA в Институте минералогии УрО РАН (г. Миасс) и сканирующем электронном микроскопе CamScan-4 с анализирующей приставкой LINK OXFORD (ВНИИХТ, Москва). Химический анализ пород проводился в Институте геологии УФИЦ РАН по стандартной методике.

**2. Геологическое строение Шатакского комплекса.** Шатакский комплекс, совместно с Машакским, являются стратифицированными вулканогенно-осадочными ассоциациями пород, представляя собой машакскую свиту, служащую основанием среднерифейского разреза Башкирского мегантиклинория (рис. 1).

*Машакская свита (RF<sub>2</sub>ms)* выделена А.И. Ивановым в 1937 году на хребте (далее – хр.) Машак и горе Ямантау. Южнее на хр. Большой Шатак (далее – Бол. Шатак) аналогичные отложения были названы шатакской свитой [2]. В результате крупномасштабных геологосъемочных работ [3–5] было установлено, что шатакская и машакская свиты – суть одно и то же и могут рассматриваться как единая машакская свита, сформировавшаяся в период среднерифейского рифтогенеза [6–10].

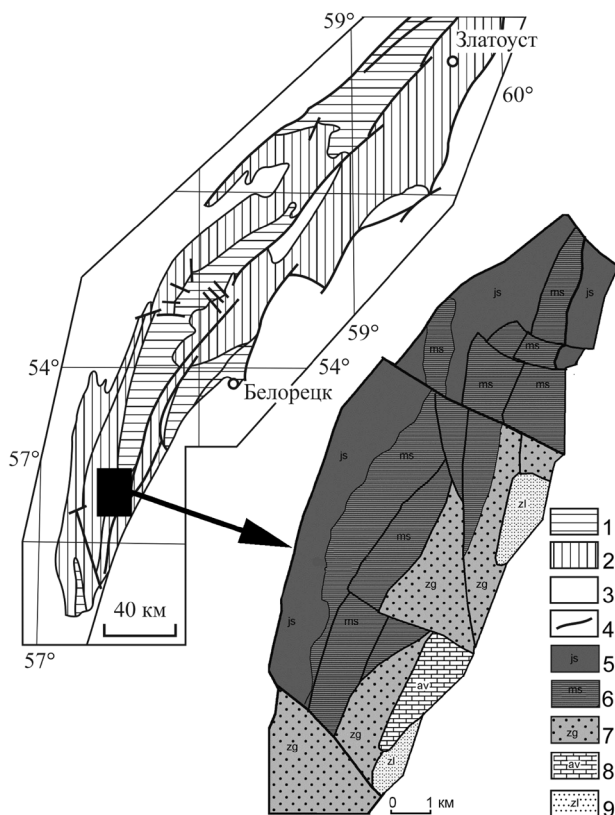


Рис. 1. Геологическая схема западного склона Южного Урала и Шатакского комплекса. Примечание: 1 – нижнерифейские отложения нерасчлененные, 2 – среднерифейские отложения нерасчлененные, 3 – палеозойские отложения нерасчлененные, 4 – тектонические нарушения, 5 – юшинская свита, 6 – машакская свита, 7 – зигальгинская свита, 8 – авзянская свита, 9 – зильмердакская свита.

В составе свиты выделяется 8 последовательно сменяющих друг друга в восходящем разрезе подсвит: кузьелгинская, казавдинская, быковская, калпакская, куянтавская, каранская, шакитарская и ямантауская.

*Кузьелгинская подсвита (RF<sub>2</sub>ms<sub>1</sub>)* залегает с угловым несогласием на различных горизонтах юшинской свиты и представлена переслаиванием конгломератов, кварцевых песчаников, основных и кислых эффузивов. В разрезах на хр. Бол. Шатак подсвита представлена в нижней части терригенными породами (85–100 м), в средней части преобладают metabазальты с пластами конгломератов (130–140 м), в верхней – риолиты мощностью до 180 м. Общая мощность отложений кузьелгинской подсвиты 400–450 м.

*Казавдинская подсвета* ( $RF_2ms_2$ ) сложена в основном мелкозернистыми и афировыми метабазами. Мощность 230–300 м.

*Быковская подсвета* ( $RF_2ms_3$ ) объединяет углеродисто-глинистые сланцы, алевролиты, а также кварцитовидные песчаники и туфопесчаники. Последние тяготеют в разрезах хр. Бол. Шатак к верхней части подсветы, образуя хорошо выраженную в рельефе пачку. Мощность отложений 130–200 м.

*Калтакская подсвета* ( $RF_2ms_4$ ) представлена лавами основного состава с прослоями гравелитов, песчаников и алевролитов. Мощность 250 м.

*Куянтавская подсвета* ( $RF_2ms_5$ ) сложена переслаиванием кварцевых песчаников и туфопесчаников с редкими (до 10 м) прослоями конгломератов. Мощность отложений 480 м.

*Каранская подсвета* ( $RF_2ms_6$ ) представлена эффузивами основного состава, песчаниками, туфопесчаниками, конгломератами и алевролитами. Мощность отложений до 570 м.

*Шакитарская подсвета* ( $RF_2ms_7$ ) сложена песчаниками и кварцито-песчаниками с прослоями туфопесчаников и алевролитов. Мощность отложений 460 м.

*Ямантауская подсвета* ( $RF_2ms_8$ ) представлена углисто-кварц-глинистыми сланцами, кварцито-песчаниками, туфами основного и кислого состава. Мощность отложений 350–450 м.

**3. Метаморфизм пород Шатакского комплекса.** По эпигенетическим минеральным парагенезисам, петро- и геохимическим особенностям среди пород Шатакского комплекса выделяются производные субщелочного (пропилитизация, скарнирование), кислотно-щелочного (березитизация), щелочного и кремнещелочного (серицитизация, калишпатизация, альбитизация) метасоматоза и кислотного выщелачивания (окварцевание).

Пропилитизация наиболее широко проявлена в магматических породах основного состава. В строении ореолов пропилитизации, как в самих магматитах, так и во вмещающих

их терригенных отложениях наблюдается вполне определенная зональность. В центральных частях метабазитов минеральные новообразования представлены альбит-эпидот-актинолит-пренит-хлоритовой ассоциацией, преимущественно в виде псевдоморфных выделений по первичным минералам. Из рудных минералов преобладают магнетит и тонкозернистый титанит в виде реликтов от структур распада титаномагнетита. Процессы преобразования первичного состава пород носят, в целом, изохимический характер за исключением поведения калия, характеризующегося высокой дисперсией содержания, что обусловлено его тенденцией к выносу из системы при субщелочном метасоматозе.

В эндо- и экзоконтактных зонах увеличивается степень метасоматических изменений при преобладающей роли хлоритизации, эпидотизации, амфиболизации, серитизации, окварцевания и локальном проявлении скарнирования. В отличие от центральных частей эпигенетическая минерализация представлена автоморфными формами выделений вплоть до образования эпидозитов и хлоритовых пропилитов.

Сводную метасоматическую колонку по базальтам можно представить в следующем виде (от внешней зоны к внутренней): метабаза → эпидотизированный метабаза → титанит-хлоритовый метасоматит → серицит-хлоритовый метасоматит → рудный метасоматит (серицитизированная порода с вкрапленной магнетит-гематитовой рудой). Анализ химического состава метасоматитов показывает усиление степени щелочно-метасоматической проработки от внешних зон к внутренним с одновременной сменой более сильных оснований более слабыми, т. е.  $Ca \rightarrow Mg \rightarrow Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$  и выносу за пределы зон кремнезема и натрия. Калий в процессе эпидотизации выносятся, при хлоритизации – инертен.

Корреляционным анализом установлено наличие прямой зависимости между содер-

жаниями Са и коэффициентом окисленности железа  $f$  ( $f = \text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ ) и обратной между Са и Mg, Mg и  $f$  (рис. 2).

Процессы калиевого метасоматоза (серицитизация) наложены на продукты субщелочного метасоматоза с замещением альбита,

хлорита и пренита серицитом, и магнетита гематитом, с образованием в наиболее проработанных участках рудных метасоматитов, содержащих магнетит-гематитовую минерализацию в количестве до 40%.

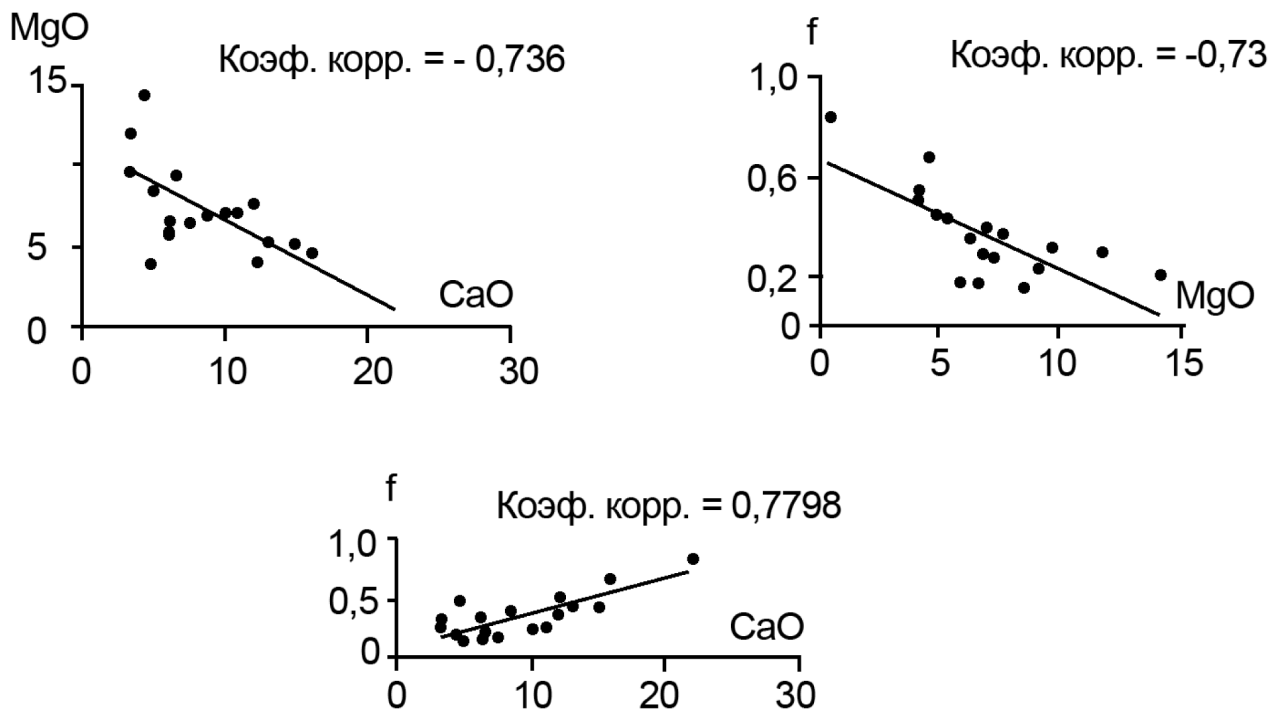


Рис. 2. Графики корреляционной зависимости содержаний MgO и CaO (а), MgO и  $f$  (б), CaO и  $f$  (в) в измененных метабазах.

Пропилитовый парагенезис установлен в конгломератах верхней толщи кузьелгинской подсветы. Минеральные новообразования представлены эпидот-хлоритовой ассоциацией с магнетитом, который развит в виде идиоморфных кристаллов, как в цементе, так и в гальках конгломератов. Наиболее высокие содержания магнетита приурочены к контактовым зонам с подстилающими метабазами. Кроме магнетита, в локальных участках отмечаются включения халькопирита и борнита [11].

Метасоматические изменения, близкие по химизму к березитоидным, характерны для терригенных отложений машакской свиты. Отличительной чертой их минерального состава является кварц-серицит-хлоритовый

парагенезис, причем хлорит наблюдается в виде прожилковых, струйчатых, шнуровидных выделений, наложенных на более раннюю кварц-мусковитовую ассоциацию. Наблюдается хлоритизация биотита с образованием по нему хлорит-мусковитовых агрегатов. Геохимические особенности проявляются в повышенных концентрациях калия (до 4%) и хрома (до 0,09%) и обусловлены привнесом и концентрацией этих элементов при березитизации. Среди рудных минералов в песчанико-конгломератовых толщах преобладают аллотриоморфозернистые агрегаты гематита, фиксируемые как в цементе, так и в гальках конгломератов.

Проявления кремнещелочного метасоматоза наиболее интенсивно проявлены в

кислых породах машакской свиты. Это предположение подкрепляется широким развитием в них процессов серицитизации, калишпатизации, альбитизации и окварцевания.

К продуктам кислотного выщелачивания относятся кварциты, кварцитовидные песчаники, развитые в составе куянтавской, каранской, шакитарской подсвит и зигальгинской свиты на хр. Яракташ, сопровождаемые кварцево-жильной минерализацией.

Характерной особенностью развития кварцитовидных пород является приуроченность к контактовым зонам песчаников и подстилающих metabазитов, наблюдаемых в куянтавской и каранской подсвитах. В этих зонах устанавливается следующая последовательность метасоматических изменений. Висячем эндоконтакте metabазиты рассланцованы и хлоритизированы. Среди рудных минералов преобладают окислы железа. В экзоконтакте песчаники преобразованы в кварциты, нередко сливного облика. Характерны многочисленные разноориентированные кварцевые прожилки и жилы. Рудная минерализация представлена пиритом кубического и пентагондодекаэдрического габитуса в количестве 3–5 %. Выше по разрезу квар-

циты сменяются кварцитопесчаниками с уже заметным зернистым строением, а затем нормальными кварцевыми или полимиктовыми песчаниками. Мощность зоны окварцевания в различных обнажениях колеблется от 5 до 15–20 м.

Наряду с проявлениями термального метаморфизма, относительно широким развитием пользуются также продукты *дислокационного метаморфизма*. К производным данного процесса относятся складчатость, узкие линейные зоны катаклаза, милонитизации, рассланцевания и брекчирования, приуроченные, как правило, к контактам литологических разностей пород и разрывным нарушениям (рис. 3). Среди индикаторных стресс-минералов наиболее широко развит хлоритоид, максимальное количество которого установлено в двух линейных зонах: на контакте углеродистых сланцев юшинской и грубообломочных отложений машакской свиты и в рассланцованных, милонитизированных алевропсаммитовых образованиях куянтавской подсвиты.

В первой зоне новообразования хлоритоида приурочены к горизонту бластомилонитов мощностью 0,2–1 м, представленному

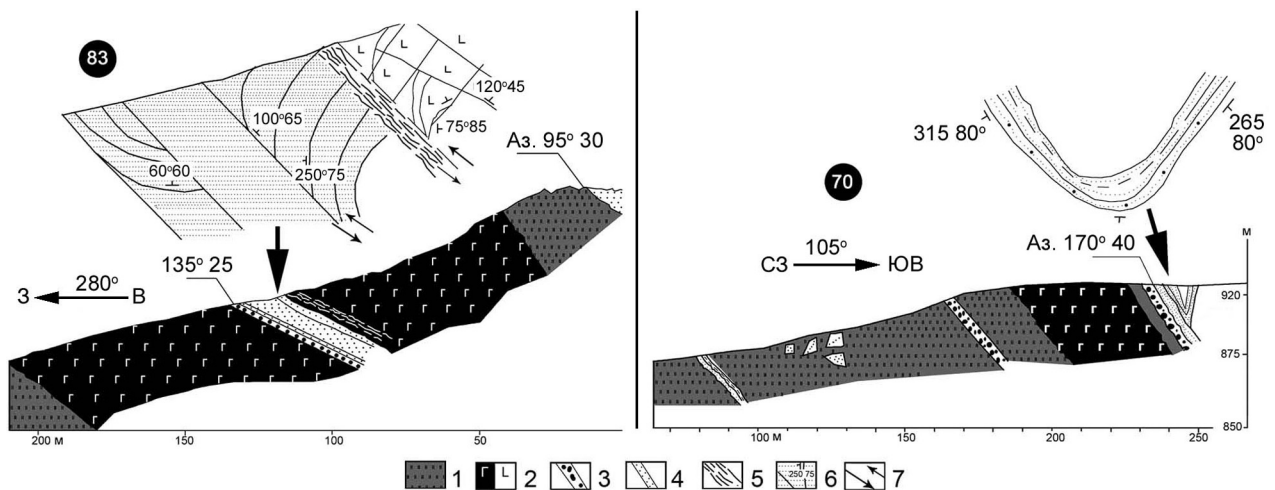


Рис. 3. Детальные зарисовки зон рассланцевания и складчатости (разрез 70 расположен на западном склоне хр. Бол. Шатак, ~ 1300 м к западу от хребта Яракташ; разрез 83 расположен на водораздельной части хр. Бол. Шатак, гора Катущка (отм. 1043,3 м).

Примечание: 1 – задернованные участки; 2 – метабаазальты; 3 – конгломераты; 4 – песчаники; 5 – зоны рассланцевания; 6 – элементы залегания; 7 – направления смещений.

тонкозернистым кварц-серицитовым агрегатом с включениями порфирибластов хлоритоида до 15–20%. Его присутствие установлено и в цементе вышележащих песчаников и конгломератов. Более обильны новообразования хлоритоида в рассланцованных терригенных отложениях куянтавской подсвиты в приводораздельной части хр. Бол. Шатак, где он установлен практически во всех литологических разностях, а также в эндоконтактных зонах, подстилающих пропилитизированных метабазитов казавдинской подсвиты. В зависимости от компетентности пород различаются следующие структурные особенности продуктов динамометаморфизма. Для грубообломочных толщ характерно широкое развитие микростилолитовых структур, вдавливания галек и валунов друг в друга, сколовых трещин, секущих как цемент, так и гальки конгломератов. Среди структурных элементов в алевропелитовых разностях преобладают трещины кливажа, ориентированные по простиранию согласно со слоистостью, но с более крутыми углами падениями. В левом борту руч. Бол. Ключ, в углеродистых сланцах ямантауской подсвиты, И.В. Высоцким (устное сообщение) было установлено более пологое, относительно слоистости, падение трещин кливажа (азимут падения слоистости ЮВ 130°∠30°, азимут падения кливажа ЮВ 130°∠15°), что может свидетельствовать об опрокинутом залегании образований ямантауской подсвиты.

**4. Термобарические параметры метаморфизма.** Для оценки термических параметров метаморфизма нами использовалась формула  $T = -61,9229 + 321,9772 \times Al^{IV}$ , опубликованная в работе [12], по которой были рассчитаны температуры образования хлоритов из пород Шатакского комплекса. Как видно из приведенной диаграммы (рис. 4), минералы подразделяются на две группы – «высокомагнезиальные» (магматические) и «низкомагнезиальные» (терригенные), температурные интервалы образования которых близки

(~300–350°C для первых и ~300–400°C – для вторых). Низкотемпературные хлориты из терригенных пород (№6, №7, табл. 2), вероятнее всего являются кластогенными, либо сформированными на заключительных этапах метаморфизма.

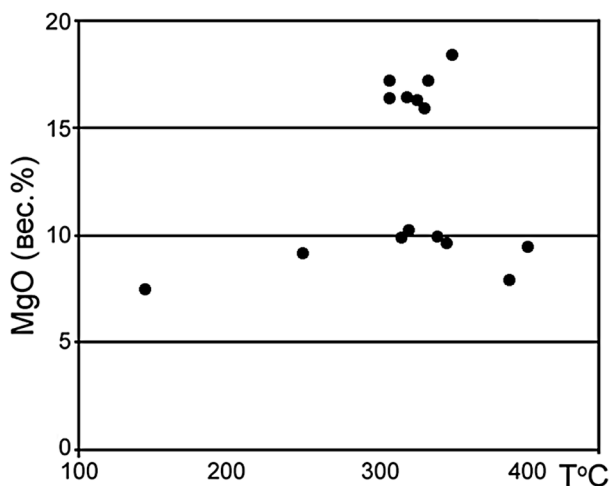


Рис. 4. Диаграмма MgO–T°C для хлоритов из вулканогенно-осадочных отложений Шатакского комплекса.

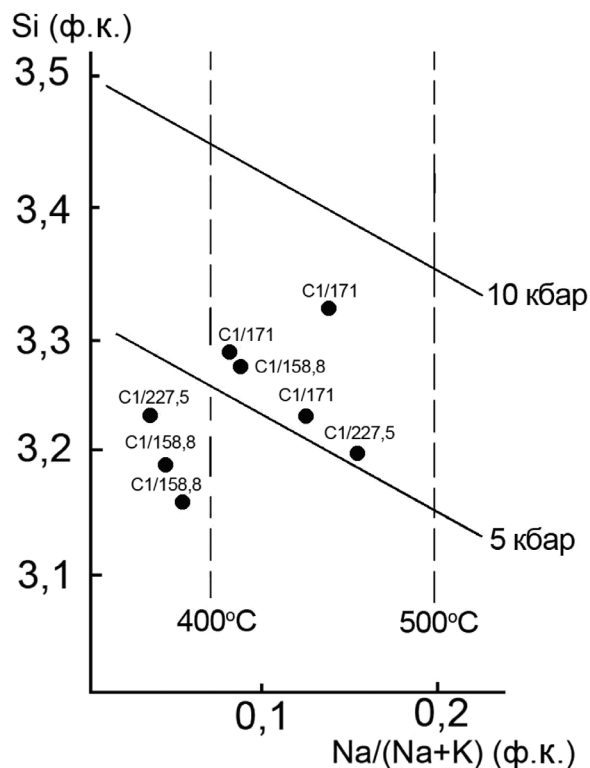


Рис. 5. Диаграмма Si формульные коэффициенты (ф.к.) – Na/Na+K (ф.к.) для светлых слюд из терригенных пород Шатакского комплекса. Изограды давления по [13, 14]; изограды температуры по [15, 16].







- stratigraphy and ancient orogenesis of the western slope of the South Urals]. Trudy Bashkirskogo geologicheskogo upravleniya – Proceedings of the Bashkir Geological Survey, 1937, issue 7, pp. 2–28. (In Russian).
7. Kovalev S.G. Dinamika formirovaniya srednerifeyskoy riftogennoy struktury (zapadnyy sklon Yuzhnogo Urala) [Formation dynamics of the Middle Riphean rift structure (western slope of the South Urals)]. Doklady Earth Sciences, 2004, vol. 396, no. 2, pp. 219–222. (In Russian).
  8. Parnachev V.P., Rotar A.F., Rotar Z.M. Srednerifeyskaya vulkanogenno-osadochnaya assotsiatsiya Bashkirskogo megantiklinoriya (Yuzhnyy Ural) [Middle Riphean volcano-sedimentary association of the Bashkir Meganticlinorium (South Urals)]. Sverdlovsk, UNTs AN SSSR, 1986. 105 p. (In Russian).
  9. Puchkov V.N. Paleogeodinamika Yuzhnogo i Srednego Urala. [Paleogeodynamics of the Southern and Middle Urals]. Ufa, Dauriya, 2000. 146 p. (In Russian).
  10. Ernst R.E., Pease V., Puchkov V.N. et al. Geokhimicheskaya kharakteristika dokembriyskikh magmaticheskikh svit yugo-vostochnogo kraya Vostochno-Evropeyskogo kratona, Yuzhnyy Ural, Rossiya [Geochemical characteristics of Precambrian igneous rocks of the southeastern region of the East European Craton, South Urals, Russia]. Collected papers in geology, no. 5. V.N. Puchkov, R.F. Abdrakhmanov, I.B. Sevavkin (eds). Ekaterinburg. IG UrO RAN, 2006, pp. 1–45. (In Russian).
  11. Kovalev S.G., Vysotskiy S.I., Kovalev S.S., Kotlyarov V.A. Sulfidno-selenidnaya mineralizatsiya v vulkanogenno-osadochnykh porodakh Shatakского комплекса (Bashkirskiy megantiklinoriy) [Sulfide-selenide mineralization in the volcano-sedimentary rocks of the Shatak complex (Bashkir Meganticlinorium)]. Vestnik Instituta geologii, Komi NTC, UrO RAN – Bulletin of the Institute of Geology, Komi Scientific Centre, Ural Branch, RAS, no. 7, 2017, pp. 21–27. (In Russian).
  12. Kranidiotis P., MacLean W.H. Systematic of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec. Economic Geology, 1987, vol. 82, pp. 1808–1911.
  13. Chopin C. Talc-phengite: A widespread assemblage in high-grade pelitic blueschists of the Western Alps. J. Petrol., 1981, vol. 22 (4), pp. 628–650.14.
  14. Massonne H.J., Schreyer W. Stability field of the high pressure assemblage talc + phengite and two new phengite barometers. Europ J. Mineral., vol. 1, 1989, pp. 391–410.
  15. Dobretsov N.L., Lavrentyev Yu.G., Ponomareva L.G., Pospelova L.N. Statisticheskie issledovaniya belykh slyud glaukofanslantsevyykh tolshch [Statistical studies of white micas in glaucophane schist strata]. Statisticheskie metody v geologii – Statistical Methods in Geology, Novosibirsk, 1974, issue 236, pp. 113–133. (In Russian).
  16. Krogh E.J., Raheim A. Temperature and pressure dependence of Fe–Mg partitioning between garnet and phengite, with particular reference eclogites. Contrib. Mineral Petrol., 1978, vol. 66, no. 1, pp. 7–580.
  17. Lennykh V.I. Eklogitovyy i glaukofanovyy metamorfizm v geologicheskoy istorii Urala [Eclogite and glaucophane metamorphism in the geological history of the Urals]. Magmatizm, metamorfizm i rudoobrazovanie v geologicheskoy istorii Urala [Magmatism, metamorphism and ore formation in the geological history of the Urals]. Sverdlovsk, UNTs AN SSSR, 1974, pp. 170–183. (In Russian).
  18. Alekseev A.A. Predordovikskoye metamorficheskoye nesoglasie i nekotoryye problemnye voprosy metamorficheskoy geologii pozdnego dokembriya zapadnogo sklona Urala [Pre-Ordovician metamorphic discordance and some problematic issues of Late Precambrian metamorphic geology on the western slope of the Urals]. Geologiya metamorficheskikh kompleksov [Geology of metamorphic complexes] Ekaterinburg, Uralskaya gosudarstvennaya gornaya akademiya, 1996, pp. 73–86. (In Russian).
  19. Ivanov S.N., Rusin A.I. Pozdnevendskaya stadiya razvitiya Urala [Late Vendian development stage of the Urals]. Geotektonika – Geotectonics, 2000, no. 3, pp. 21–32. (In Russian).

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 17-45-020045.*