

УДК 552+549+550.4

## ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ РЕДКИХ МИНЕРАЛОВ ПРИ МАЛОГЛУБИННОМ МЕТАМОРФИЗМЕ И МЕТАСОМАТОЗЕ

© 2023 г. Академик РАН В. В. Ревердатто<sup>1</sup>, И. И. Лиханов<sup>1,\*</sup>, О. П. Полянский<sup>1</sup>

Поступило 08.06.2023 г.  
После доработки 04.07.2023 г.  
Принято к публикации 12.07.2023 г.

Необычный состав протолита, его структурно-текстурная неоднородность, ограниченный массоперенос и высокие температуры являются причинами возникновения редких минералов и минеральных ассоциаций при метаморфизме и метасоматозе. Чаще всего это наблюдается в малоглубинных условиях (давление до 3 кбар) при поступлении в породы дополнительного тепла магматическими интрузиями. В статье эти вопросы обсуждаются на ряде отечественных примеров, в которых детально исследованы процессы минералообразования.

*Ключевые слова:* метаморфизм, метасоматоз, редкие минералы и минеральные ассоциации

DOI: 10.31857/S2686739723601254, EDN: LFUNOC

Изучение метаморфических пород в ряде районов России позволило обнаружить несколько редких минералов и минеральных ассоциаций, генезис которых необычен. Очевидно, что это обычно случается в неглубинных условиях при привносе в породы земной коры дополнительного тепла магматическими интрузиями. Причины необычного минералообразования могут быть разными, но они в той или иной мере экстремальны. Ниже мы проанализируем эти причины.

Начнем с высокотемпературного метаморфизма в контактах Анакитского траппового массива на р. Нижней Тунгуске в Красноярском крае [1]. Здесь между апофизами и дайками траппов метаморфизуются кремнистые известняки, что приводит к образованию волластонитовых нодул среди спуррит-кальцитовых мраморов. На границах между волластонитом и спурритом формировались узкие зоны ранкинита [2]. Рост температуры метаморфизма до экстремальных 900°C за 150 лет (см. рис. 1) сопровождался такими минеральными превращениями: кальцит + кварц → волластонит + CO<sub>2</sub>, волластонит + кальцит → спуррит + CO<sub>2</sub>, волластонит + спуррит → ранкинит + CO<sub>2</sub> [3]. Образование ларнита по реакции: ранкинит + спуррит → ларнит + CO<sub>2</sub>, не происходило, поскольку соответствующие температуры декарбонатизации не достигались [1, 4].

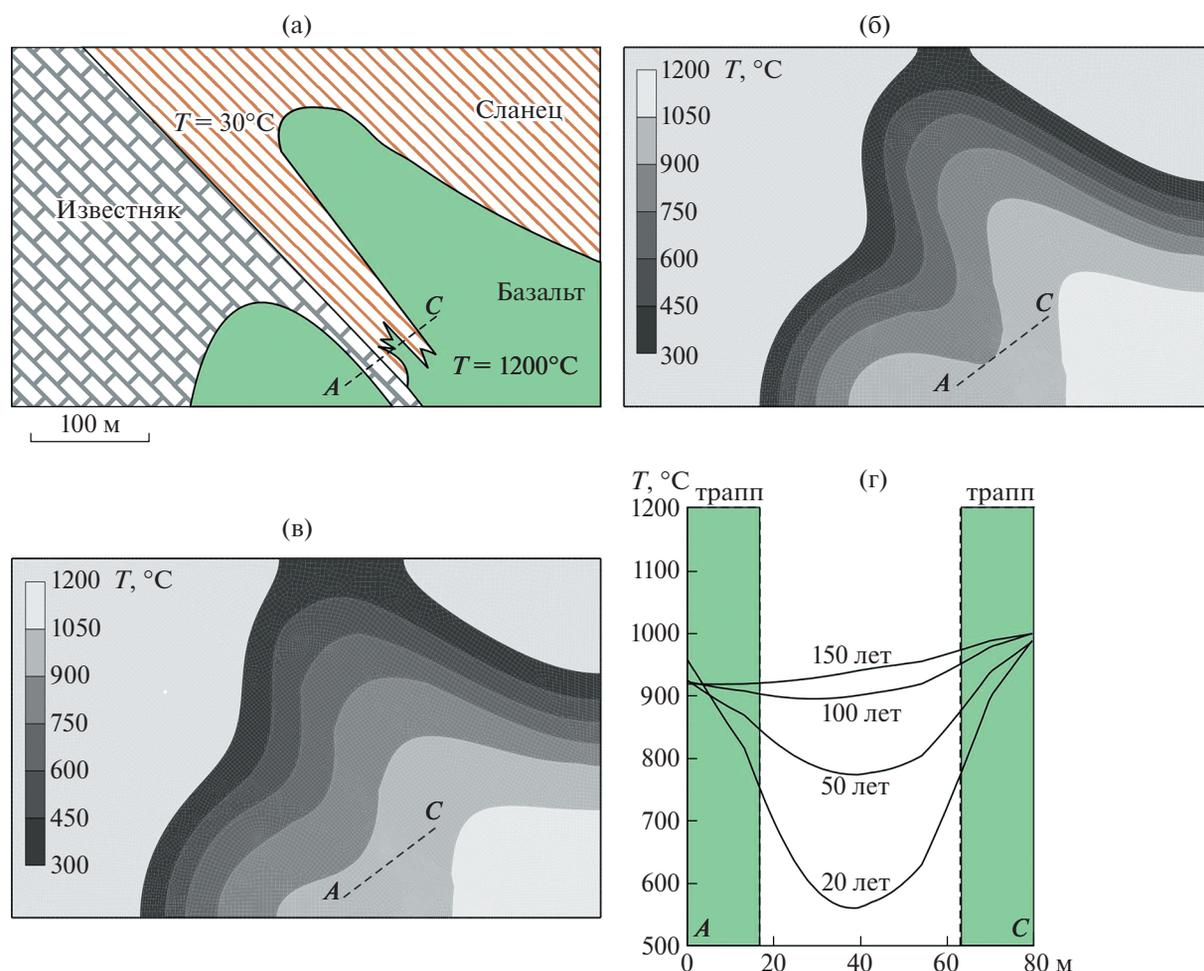
Возможно, что  $P_{\text{CO}_2}$  составляло только часть  $P_{\text{общ}}$  (до 0.6–0.8  $P_{\text{общ}}$ ) из-за выделения воды при метаморфизме близлежащих алевролитов и добавления летучих компонентов из базальтовой магмы [2]. Однако базальтовая магма недосыщена водой, и выделение ее во вмещающие породы происходит только после затвердевания большей части расплава. В чем необычность появления ранкинита в контактах Анакитского траппового массива? На плоском контакте тела спокойно остывающей базальтовой магмы (без конвекции и течения) температура составляет 600–700°C [5]. В контактах Анакитского массива имело место сложение температурных полей между соседними базальтовыми апофизами, что, согласно расчетам, повысило температуру экзоконтактовых пород до 900°C [3] (рис. 1). Именно это обстоятельство, а также попадание в контакт с траппами не столь уж часто встречающихся в природе кремнистых известняков, позволяет считать данный случай образования ранкинита и спуррита необычным.

Следующий пример высокотемпературного метаморфизма также связан с траппами. Дайководное пологозалегающее тело троктолитовых долеритов на р. Кочумдек, правом притоке р. Подкаменной Тунгуски, мощностью около 60 м, залегают среди полосчатых мергелей [6, 7]. В кровле дайки мергеля метаморфизуются с образованием 4 зон (рис. 2).

Во внутренней зоне устойчива ассоциация: мервинит + спуррит + геленит ± ранкинит ± бредигит, в следующей зоне – спуррит, в третьей зоне: тиллиит + волластонит + мелилит, во внеш-

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
Новосибирск, Россия

\*E-mail: likh@igm.nsc.ru

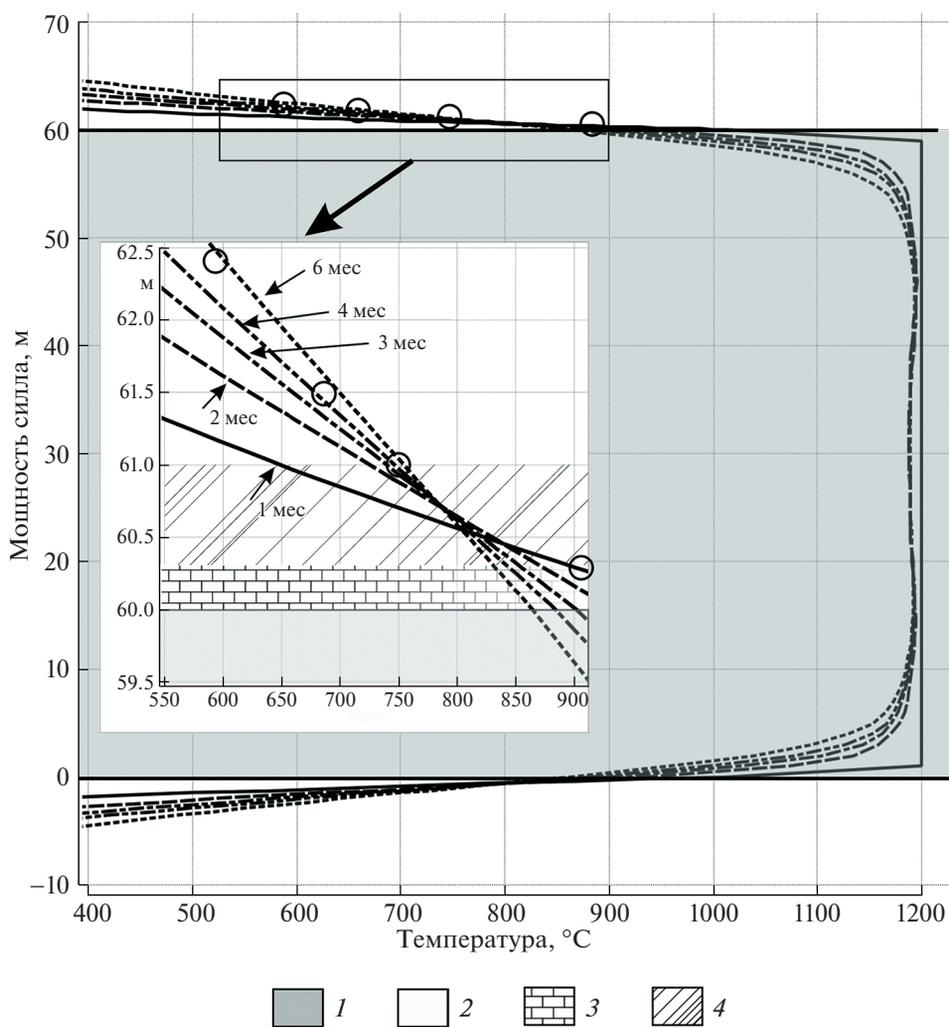


**Рис. 1.** Эволюция температуры в контактовой зоне северо-западной части Анакитского траппового массива. (а) Схема расположения траппов и вмещающих пород и начальное распределение температуры; принимается, что внедрившаяся базальтовая магма имеет температуру  $1200^\circ\text{C}$ , вмещающие породы –  $30^\circ\text{C}$ ; (б) распределение температуры спустя 100 лет после внедрения магмы; шкала температур в  $^\circ\text{C}$  показана слева в тонах от светло-серого (максимальные температуры) до черного (минимальные температуры); (в) распределение температуры спустя 150 лет; (г) распределение температур (кривые линии) вдоль разреза А–С на моменты времени 20, 50, 100 и 150 лет после внедрения магмы; температуры в  $^\circ\text{C}$  показаны на вертикальной оси, расстояние вдоль разреза А–С в метрах – на горизонтальной оси. Положение разреза А–С на рисунках а–в показано пунктиром.

ней зоне устойчивы диопсид, амфибол и гроссуляр. Данные с использованием соответствующих минеральных равновесий позволили оценить температуру образования минералов внутренней зоны –  $900^\circ\text{C}$  и более, во второй зоне – более  $750^\circ\text{C}$ , в третьей зоне – более  $700^\circ\text{C}$ , в четвертой зоне –  $500\text{--}550^\circ\text{C}$ . Показано, что при метаморфизме  $P_{\text{общ}} \approx 200$  бар,  $P_{\text{CO}_2} \approx 0.5P_{\text{общ}}$ . Математическое моделирование прогрева экзоконтактовых пород позволило установить, что температуры, полученные по силикатно-карбонатным минеральным равновесиям, достижимы только при следующих условиях. Начальная температура магмы –  $1200^\circ\text{C}$ , мощность дайки – 60 м, длительность прогрева экзоконтакта – 6 мес, включая время течения расплава по трещине в течение

1 мес (рис. 2). При отсутствии течения достижение на контакте температуры порядка  $900^\circ\text{C}$  невозможно [6].

Комплекс разнообразных минералов, в том числе редких, найден в ксенолитах измененных известняков в риолитовых и риодацитовых игнибритах вблизи вулканического жерла в Верхнечегемской кальдере, на Северном Кавказе [8]. Авторы находки предполагают метасоматический генезис минерализации. Насыщение кислых магм водой обычно достигается на ранней стадии становления интрузивных тел. Минерализация формировалась в широком температурном интервале: от  $800\text{--}1000^\circ\text{C}$  до  $100^\circ\text{C}$ . К наиболее ранним минералам относятся кальцио-оливин ( $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ ), рондорфит ( $\text{CaMgSiO}_4 \cdot 4\text{Cl}_2$ ) и спур-



**Рис. 2.** Результат расчета в модели течения магмы с начальной температурой 1200°C по плоской трещине мощностью 60 м под действием избыточного входного давления 1 МПа. Показаны профили температуры в интервале времени 1–6 мес. На врезке увеличенный фрагмент верхнего экзоконтакта магматического тела. Кружками показаны оценки температуры на разном удалении от контакта, установленной по минеральным термометрам. Условные обозначения: 1 – магматическое тело, 2 – вмещающая порода, 3 – первая метаморфическая зона, 4 – вторая зона [7].

рит; отмечались также фассаит, монтичеллит и феррит кальция. Считается, что кальцио-оливин образовался по ларниту [9]. Более поздними минералами являются куспидин, вадалит, тиллиит и др. При низких температурах возникают гиллебрандит, афвилит, эттрингит, таумасит и бемит. Находка редких минералов – кальцио-оливина, заместившего ларнит, рандорфита и спуррита, возникших при высокотемпературном метасоматозе, связанном с кислым вулканизмом, является уникальной. Это экстремальное минералообразование еще недостаточно изучено, прежде всего, с точки зрения его генезиса. Возможно, метасоматозу предшествовал метаморфизм.

Также весьма необычная минеральная ассоциация: Fe-апатит + Fe-кордиерит + фаялит + куммингтонит + плагиоклаз, найдена в контакте габ-

бро-диоритового лакколита Аю-Даг на южном берегу Крыма. Содержание FeO в апатите – 6.16 мас. %, в кордиерите – 13.3 мас. %. Ассоциация образовалась при температуре около 600°C и общем давлении – 0.5–1.0 кбар. Контактному метаморфизму подверглась сидероплезитово (с кальцитом)-фосфатно-кремнисто-глинистая конкреция, залегающая в песчанико-алевролитовой толще [10, 11].

Появление арфведсонита при метаморфизме миндалекаменных диабазов вблизи Харловского габбрового массива в Алтайском крае [12, 13] также может рассматриваться как пример необычного минералообразования, т.к. этот минерал обычно не образуется при изохимическом метаморфизме горных пород. Это объясняется тем, что для его образования необходимо, чтобы исход-

ные породы были обогащены железом и натрием при существенном дефиците алюминия. Как правило, арфведсонит возникает при гидротермально-метасоматических процессах, сопровождающихся привнесом натрия и железа. В метаморфической зональности вблизи Харловского массива состав миндалекаменных диабазов, состоящих в основном из хлорита, роговой обманки, кальцита, плагиоклаза и магнетита, в целом оставался неизменным, здесь имели место изохимические минеральные преобразования. С учетом особенностей изменения характера зональности в зернах плагиоклаза, в которых происходило локальное замещение альбита олигоклазом, была рассчитана реакция образования арфведсонита при  $T = 520\text{--}550^\circ\text{C}$ : хлорит + кальцит + альбит + магнетит  $\rightarrow$  арфведсонит + олигоклаз +  $\text{CO}_2$  +  $\text{H}_2\text{O}$  [12]. Анализ баланса петрогенных компонентов показал, что перераспределение петрогенных компонентов с сохранением материального баланса ограничено локальным объемом  $0.07\text{--}0.1 \text{ мм}^3$  [14, 15]. Образование арфведсонита внутри и вблизи кальцит-хлоритовых миндалинов происходило в условиях локального насыщения порового раствора, состоящего из  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ , кремнеземом и щелочью из альбита и железом из магнетита, а повышение основности плагиоклаза связано с миграцией кальция из кальцита. Преобладающим механизмом этой реакции является инконгруэнтное растворение плагиоклаза с частичным выносом компонентов (Na и Si) в раствор и их миграцией к центрам роста новых устойчивых фаз. По-видимому, образование арфведсонита явилось следствием редкой комбинации состава кальцитсодержащих метабазитов, их минеральной неоднородности, *PT*-параметров ( $T = 520\text{--}550^\circ\text{C}$  при  $P = 0.5\text{--}1$  кбар) и ограниченной длительности метаморфизма. Рассчитанные кинетические параметры контролируемой диффузией реакции (эффективные коэффициенты диффузии и скорость метаморфической реакции), во многом определяющие, как быстро происходит перемещение значительного количества вещества, находятся между средними оценками значений скоростей, вычисленных для контактового метаморфизма с использованием модели простого нагревания и оценками значений скоростей для регионального метаморфизма в соответствующем интервале температур [15].

Детальным петрологическим исследованием высокоглиноземистых и железистых пород вблизи Аяхтинского гранитоидного массива, расположенного в северной части Енисейского кряжа, в среднем течении р. Большой Пит, выявлено развитие редких для зонального метаморфизма умеренных давлений [16, 17] минеральных ассоциаций: хлоритоид + биотит, хлоритоид + биотит + андалузит и кордиерит + гранат + мусковит. По химическому составу эти породы классифи-

цируются как низкокальциевые ( $<1.5$  мас. %) и умеренно-насыщенные  $\text{K}_2\text{O}$  (3–4 мас. %) метапелиты, одновременно обогащенные железом ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  до 12 мас. %) и глиноземом ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  до 28 мас. %). На известных петрохимических диаграммах эти породы относятся к железистым ( $X_{\text{Fe}} = \text{FeO}/[\text{FeO} + \text{MgO} + \text{MnO}] = 0.6\text{--}0.8$  на мольной основе) и глиноземистым ( $X_{\text{Al}} = [\text{Al}_2\text{O}_3 - 3\text{K}_2\text{O}]/[\text{Al}_2\text{O}_3 - 3\text{K}_2\text{O} + \text{FeO} + \text{MgO} + \text{MnO}] = 0.4\text{--}0.6$ ) метапелитам по сравнению со средними составами типичных метапелитов, характеризующихся значениями  $X_{\text{Fe}} = 0.52$  и  $X_{\text{Al}} = 0.13$ . В отличие от обычных метапелитов, на треугольной диаграмме AFM область таких химических составов располагается выше конноды гранат–хлорит (рис. 3, вставка вверху слева). Метапелиты существенно железисто-глиноземистого состава изначально представляли собой переотложенные и метаморфизованные продукты докембрийских кор выветривания каолинитового типа [18]. Было установлено, что при метаморфизме вблизи Аяхтинского массива: (1) образование хлоритоида и его редких парагенезисов с биотитом и андалузитом объясняется сочетанием давления (около 3 кбар) с составом метапелитов, одновременно обогащенных алюминием и железом; (2) причиной появления парагенезиса кордиерит + гранат + мусковит служат не особые *PT*-условия метаморфизма, а особенности химических составов граната, обогащенного марганцем, и пород, характеризующихся высокой глиноземистостью и железистостью; (3) развитие кордиерит-андалузитовых парагенезисов и отсутствие ставролитсодержащих ассоциаций при метаморфизме связано с расширением области сосуществования марганцевого граната с хлоритом и сужением, до полного исчезновения, поля устойчивости St + Vt [17, 19] (рис. 3).

Полученные данные позволяют критически проанализировать информативность имеющихся петрогенетических решеток для метапелитов низких давлений, которые соответствуют в основном условиям контактового метаморфизма. Анализ литературных источников показывает, что причина противоречий состоит главным образом в определяющем влиянии химического состава метапелитов на возникновение тех или иных минеральных ассоциаций. Ключевым моментом являются железистость и глиноземистость сосуществующих минералов. С учетом этих данных был разработан новый вариант петрогенетической решетки для железисто-глиноземистых метапелитов в системе KFMASH [20]. Сравнение петрогенетических решеток для типичных и железисто-глиноземистых метапелитов позволило установить, что средне- и высокотемпературные области большинства известных диаграмм практически идентичны, за исключением появле-



грация компонентов при минеральных превращениях незначительна. При диффузионном метасоматозе формируются узкие зоны обмена компонентами, если минеральная реакция сопровождается локальным массопереносом. При инфильтрационном метасоматозе массоперенос существенен и зависит от проницаемости пород и концентрации привносимого вещества во флюиде. Фильтрация межзернового флюида способствует эффективной передаче тепла. Состав протолита при метасоматозе может претерпеть сильные изменения. Вероятность образования редких минералов при метасоматозе представляется меньшей, чем при изохимическом метаморфизме. По всей вероятности, инфильтрация сглаживает резкие колебания концентраций в системе. Однако при высокотемпературном метасоматозе в неоднородном протолите, по-видимому, могут возникнуть благоприятные условия для образования редких минералов.

Необычный состав протолита, его структурно-текстурная неоднородность, ограниченный массоперенос и высокие температуры являются причинами образования редких минералов при метаморфизме.

Очевидно, что при контактовом метаморфизме может образовываться корунд за счет бокситов и графит за счет угля. Но это не является чем-то необычным. Однако в некоторых случаях причиной образования редких минералов и их ассоциаций является именно необычный состав протолита. Примерами могут служить вышеупомянутая уникальная Fe-апатит + Fe-кордиерит + + фаялитовая ассоциация, возникшая при метаморфизме железисто-кальциево-карбонатно-фосфатно-алюмосиликатной конкреции, и образованная нетипичного для зонального метаморфизма умеренных давлений хлоритоида и устойчивость редких парагенезисов (хлоритоид + биотит и хлоритоид + андалузит + биотит) в железисто-глиноземистых метапелитах вблизи Аяхтинского гранитоидного массива.

Необычно высокие температуры контактового метаморфизма при образовании редких минералов достигаются в случае течения жидкой магмы по подводющему каналу, при сложении температурных полей между апофизами (и дайками) или на вогнутом контакте (или в ксенолитах) магматического интрузива.

Особенности пространственного распределения растворяющихся твердых фаз в локальном объеме структурно-неоднородной метаморфизованной породы могут быть причиной для возникновения необычных минералов (например, вблизи Харловского массива). Это интересный факт, открывающий перспективы в исследованиях по кинетике метаморфизма.

Как видим, причины образования редких минералов при малоглубинном метаморфизме могут быть разными. Однако именно необычность условий, обстоятельств, состава среды или параметров обуславливают неординарную возможность их появления.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы глубоко признательны анонимным рецензентам за конструктивные замечания, плодотворную дискуссию и ценные рекомендации, способствующие значительному улучшению манускрипта.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по госзаданию ИГМ СО РАН (№ 122041400176-0) с поддержкой полевых работ за счет средств Российского научного фонда (проект № 21-77-20018).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ревердатто В.В.* Фации контактового метаморфизма. М.: Недра, 1970. 272 с.
2. *Королюк В.Н., Лаврентьев Ю.Г., Пальчик Н.А., Ревердатто В.В.* Первая находка ранкинита в СССР // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1974. Ч. 103. Вып. 1. С. 136–139.
3. *Ревердатто В.В., Бабичев А.В., Лиханов И.И., Полянский О.П.* Скорости движения фронтов метаморфизма в горных породах вблизи магматических интрузивных тел // ДАН. 2018. Т. 480. № 4. С. 466–468.
4. *Жариков В.А., Шмулович К.И.* Высокотемпературные минеральные равновесия в системе СаО–SiO<sub>2</sub>–CO<sub>2</sub> // Геохимия. 1969. № 9. С. 1039–1056.
5. *Ревердатто В.В., Лиханов И.И., Полянский О.П., Шеплев В.С., Колобов В.Ю.* Природа и модели метаморфизма. Новосибирск: СО РАН, 2017. 331 с.
6. *Сокол Э.В., Полянский О.П., Семенов А.Н., Ревердатто В.В., Кох С.Н., Девятярова А.С., Колобов В.Ю., Хворов П.В., Бабичев А.В.* Контактный метаморфизм на р. Кочумдек (бассейн р. Подкаменная Тунгуска, Восточная Сибирь): свидетельства режима течения расплава // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 4. С. 456–471.
7. *Сокол Э.В., Девятярова А.С., Кох С.Н., Ревердатто В.В., Артемьев Д.А., Колобов В.Ю.* Сульфидная минерализация мраморов спуррит–мервинитовой фации (р. Кочумдек, Восточная Сибирь) // ДАН. 2019. Т. 489. № 2. С. 174–178.
8. *Газеев В.М., Задов П.Е., Гурбанов П.Г., Перцев Н.Н., Мохов П.В., Докучаев П.Я.* Редкие минералы Верхнечегемской кальдеры // Вестник Владикавказского научного центра. 2006. Т. 6. № 1. С. 18–27.
9. *Задов А.Е., Газеев В.М., Перцев Н.Н., Гурбанов А.Г., Ямнова Н.А., Гобечия Е.Р., Чуканов Н.В.* Открытие и исследование природного аналога кальциооливина  $\gamma$ -Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> // ДАН. 2008. Т. 423. № 4. С. 520–523.

10. *Ананьев В.А.* Контактный метаморфизм Аю-Дага. Автореф. канд. дисс. Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 1999. 20 с.
11. *Ананьев В.А., Ревердатто В.В.* Уникальная минеральная ассоциация Fe-апатит+Fe-кордиерит+фаялит на Аю-Даге как результат контактового метаморфизма // ДАН. 1997. Т. 353. № 6. С. 362–364.
12. *Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Memmi I.* The origin of arfvedsonite in metabasites from the contact aureole of the Kharlovo gabbro intrusion (Russia) // *European Journal of Mineralogy*. 1995. V. 7. № 2. P. 379–389.
13. *Ревердатто В.В., Бабичев А.В., Коробейников С.Н., Полянский О.П.* Определение глубины становления магматического интрузива на основании данных о распределении изоград в окружающей метаморфической зональности (модельное приближение) // ДАН. 2010. Т. 430. № 6. С. 802–805.
14. *Reverdatto V.V., Likhanov I.I., Polyansky O.P., Sheplev V.S., Kolobov V.Y.* The Nature and Models of Metamorphism. Cham: Springer, 2019. 330 p.
15. *Likhanov I.I.* Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei Ridge, Siberia. In: *Metamorphic Geology: Microscale to Mountain Belts* // *Geological Society of London Special Publications*. 2019. V. 478. P. 89–115.
16. *Лиханов И.И.* Минеральные реакции в высокоглиноземистых и железистых роговиках в связи с проблемой устойчивости редких минеральных парагенезисов контактового метаморфизма // *Геология и геофизика*. 2003. Т. 44. № 4. С. 305–316.
17. *Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Sheplev V.S., Vershinin A.E., Kozlov P.S.* Contact metamorphism of Fe- and Al-rich graphitic metapelites in the Transangarian Region of the Yenisey Ridge, eastern Siberia, Russia // *Lithos*. 2001. V. 58. № 1–2. P. 55–80.
18. *Лиханов И.И., Ревердатто В.В.* Геохимия, обстановки формирования, состав и возраст протолита железисто-глиноземистых метапелитов Северо-Енисейского кряжа // *Доклады Российской Академии Наук. Науки о Земле*. 2022. Т. 507. № 1. С. 46–55.
19. *Лиханов И.И.* Метаморфические индикаторы геодинамических обстановок коллизии, растяжения и сдвиговых зон земной коры // *Петрология*. 2020. Т. 28. № 1. С. 4–22.
20. *Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Селятицкий А.Ю.* Минеральные равновесия и *P-T* диаграмма для железисто-глиноземистых метапелитов в системе KFMASH // *Петрология*. 2005. Т. 13. № 1. С. 81–92.

## THE FEATURES OF FORMATION OF RARE MINERALS DURING SHALLOW METAMORPHISM AND METASOMATOSIS

Academician of the RAS V. V. Reverdatto<sup>a,#</sup>, I. I. Likhanov<sup>a</sup>, and O. P. Polyansky<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: rever@igm.nsc.ru*

The unusual composition of the protolith, its structural and textural heterogeneity, limited mass transfer and high temperatures are the causes of rare mineral formation and mineral associations during metamorphism and metasomatism. Most often, this is observed in shallow conditions (pressure up to 3 kbar) when additional heat is supplied to the rocks by magmatic intrusions. In the article, these issues are discussed on a number of geological complexes, in which the manifestations of metamorphism with the development of rare minerals and mineral associations have been studied in detail.

*Keywords:* metamorphism, metasomatism, rare minerals and mineral associations