

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ
МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ В ПЕГМАТИТАХ
ИЛЬМЕНОГОРСКОГО ЩЕЛОЧНОГО КОМПЛЕКСА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)
И АЛТАЕ-САЯНСКОЙ ОБЛАСТИ (ЮЖНАЯ СИБИРЬ)**

В.А. Симонов

*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, просп. Академика Коптюга 3,
г. Новосибирск, 630090 Россия; simonov@igm.nsc.ru, zima.simonova1989@yandex.ru
Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, ул. Пирогова 1,
г. Новосибирск 630090 Россия
Казанский федеральный университет, ул. Кремлевская 18, г. Казань, 420008 Россия*

**PHYSICO-CHEMICAL PARAMETERS OF MINERAL-FORMING PROCESSES
IN PEGMATITES OF THE ILMENOGORSK ALKALINE COMPLEX (SOUTH URALS)
AND ALTAI-SAYANY REGION (SOUTH SIBERIA)**

V.A. Simonov

*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, pr. Akademika Koptuyuga 3, Novosibirsk, 630090
Russia; simonov@igm.nsc.ru, zima.simonova1989@yandex.ru.
Novosibirsk National Research State University, ul. Pirogova 1, Novosibirsk, 630090 Russia
Kazan Federal University, ul. Kremlevskaya 18, Kazan, 420008 Russia*

В статье рассматриваются условия минералообразования в негранитных пегматитах Урала и Сибири. С помощью исследования включений минералообразующих сред в минералах, а также расчетного моделирования на основе данных по составу расплавных включений с использованием программ COMAGMAT, PETROLOG и PLUTON определены физико-химические параметры кристаллизации минералов в миаскит-пегматитах Ильменогорского щелочного комплекса (Южный Урал) и пироксенит-пегматитах из офиолитовых ассоциаций Алтае-Саянской области (Южная Сибирь). В результате изучения многофазных (силикатные и солевые кристаллы + газ и жидкость) включений установлено, что нефелин миаскит-пегматитов образовался при максимальных температурах 700–750 °С и давлениях 3100–3600 бар при участии расплавов-рассолов. В дальнейшем, в ходе снижения температур до 500–510 °С и давления до 1200 бар кристаллизуется канкринит из преимущественно флюидных систем. На заключительных стадиях пегматитообразования при температуре 370–440 °С и давлении до 1000 бар развивается содалит. В ходе анализа многофазных флюидных включений с солевыми фазами установлено, что в формировании пироксенит-пегматитов в серпентинитах участвовали высококонцентрированные растворы с температурами 445–455 °С. Данные по расплавным включениям в хромшпинелидах из офиолитовых ультрамафитов (включая клинопироксениты) свидетельствуют о возможной кристаллизации пироксенит-пегматитов, локализованных в обычных пироксенитах, при непосредственном участии высокотемпературных (от 1315–1245 до 1205–1100 °С) магматических систем.

Илл. 5. Табл. 2. Библ. 39.

Ключевые слова: миаскит-пегматиты, пироксенит-пегматиты, нефелин, клинопироксен, флюидные и расплавные включения.

The conditions of mineral formation in non-granite pegmatites of the Urals and Siberia are examined. The physico-chemical parameters of the crystallization of minerals in miaskite-pegmatites of the Ilmenogorsk alkaline complex (South Urals) and pyroxenite-pegmatites from ophiolite associations of the Altai-Sayan region (South Siberia) are determined using inclusions of mineral-forming media in minerals and computational modeling based on data on the composition of melt inclusions in COMAGMAT, PETROLOG and PLUTON programs. The study of multiphase (silicate and salt crystals + vapor and liquid) inclusions showed that nepheline miaskite-pegmatites formed from melts-brines at maximum temperatures of 700–750 °C and pressures of 3100–3600 bar. During further decrease in temperature (up to 500–510 °C) and pressure (up to 1200 bar), cancrinite crystallizes from mostly fluid systems. Sodalite forms at the final stages of the pegmatite-forming processes (370–440 °C, up to 1000 bar). The analysis of multiphase fluid inclusions with salt phases indicates the involvement of highly saline fluids with temperatures of 445–455 °C during the formation of pyroxenite-pegmatites in serpentinites. Data on melt inclusions in Cr-spinels from ophiolite ultramafic rocks (including clinopyroxenites) indicate the possible crystallization of pyroxenite-pegmatites (hosted in ordinary pyroxenites) in high-temperature (1315–1245 to 1205–1100 °C) magmatic systems.

Figures 5. Tables 10. References 39.

Keywords: miaskite-pegmatites, pyroxenite-pegmatites, nepheline, clinopyroxene, fluid and melt inclusions.

Введение

По сравнению с широко известными гранитными пегматитами, пегматиты негранитного состава изучены меньше. В то же время, они могут играть значительную роль при формировании щелочных и базит-гипербазитовых комплексов (Успенский, 1968; Симонов, 1981). По составу среди негранитных пегматитов выделяется целый ряд разновидностей: дунит-, пироксенит-, горнблендит-, габбро-, сиенит-, миаскит-пегматиты (Успенский, 1968). При этом дунит-, пироксенит-, горнблендит- и габбро-пегматиты связаны в основном с габбро-гипербазитовыми массивами, а сиенит- и миаскит-пегматиты – со щелочными комплексами. В обоих случаях, несмотря на многолетние исследования (Казакова, 1936; Минералы..., 1949; Виноградская, 1954; Заварицкий, 1958; Успенский, 1968; Симонов, 1975, 1976; Кузнецов, Симонов, 1978; Симонов, 1981; Иванов, 1986; Лопатин, Николаев, 2011; Головкин и др., 2019; Сорокина и др., 2019; Sorokina et al., 2016), многие вопросы, связанные с генезисом негранитных пегматитов, остаются дискуссионными.

Изучение включений минералообразующих сред в минералах может оказать существенную помощь в решении генетических проблем. Именно в этом направлении проведены исследования негранитных пегматитов Урала и Сибири, результаты которых приведены в данной статье. Как показали работы, наиболее интересными и важными для расшифровки особенностей пегматитообразующих процессов в щелочных комплексах являются

исследования миаскит-пегматитов, а в случае габбро-гипербазитовых массивов – пироксенит-пегматитов. В случае последних, результаты исследований относятся к породам, в составе которых преобладает клинопироксен.

Нами рассмотрены физико-химические параметры кристаллизации минералов в миаскит-пегматитах Ильменогорского щелочного комплекса на Южном Урале и пироксенит-пегматитах офиолитовых ассоциаций Алтае-Саянской области. Исследовались также габбро-гипербазитовые комплексы Урала и Дальнего Востока, но наиболее представительные данные по генезису пироксен-пегматитов получены для офиолитов юга Сибири. Все образцы негранитных пегматитов были отобраны автором статьи непосредственно на геологических объектах. Миаскит-пегматиты опробованы в период с 1975 по 1980 гг. совместно с сотрудником Ильменского заповедника В. О. Поляковым, без помощи которого проведение исследований было бы невозможно.

Методы исследования

Физико-химические параметры процессов минералообразования в негранитных пегматитах определены в результате исследований включений минералообразующих сред в минералах из образцов миаскит- и пироксенит-пегматитов, входящих в состав Ильменогорского щелочного комплекса и габбро-гипербазитовых офиолитовых комплексов Алтае-Саянской области. Для исследования вклю-

чений были подготовлены полированные с обеих сторон тонкие пластинки толщиной около 0.2 мм и отобраны монофракции хромшпинелидов.

Флюидные и расплавные включения в прозрачных минералах изучены методами термобарогеохимии в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск), рассмотренными в классических работах (Ермаков, 1972; Магматогенная..., 1975; Соболев и др., 1976; Ермаков, Долгов, 1979; Бакуменко, 1986; Реддер, 1987) с использованием серии термокамер и криокамер оригинальных конструкций (Симонов, 1981, 1993).

Расплавные включения в практически непрозрачных хромшпинелидах исследованы с помощью оригинальной методики экспериментов в микрокамере на основе силового нагревателя (Симонов и др., 2009а, 2011, 2017). Мономинеральная проба (до 100–200 зерен фракции 0.5–0.25 мм) помещалась в графитовый миниконтейнер с внутренними размерами первые миллиметры. Контейнеры закрывались графитовыми крышками и нагревались в микротермокамере. В ходе высокотемпературных опытов в миниконтейнерах при температурах свыше 1100 °С создавались фактически восстановительные условия в результате реакции кислорода воздуха с графитом, что позволило сохранять хромшпинелиды (и находящиеся в них включения), несмотря на экстремальные условия экспериментов. Опыты при высоких температурах проводились с учетом сведения к минимуму возможности растворения матрицы хромита-хозяина: нагрев до 1000–1100 °С (8–10 мин), постепенный нагрев до 1330–1340 °С (10 мин), закалка. Для максимального превращения расплава во включениях в гомогенное стекло проводилась закалка в воде. Закаленные включения вскрывались и изучались в отраженном свете на рудном микроскопе.

Стекла и отдельные фазы во включениях проанализированы в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск) на электронно-зондовом микроанализаторе JEOL JXA-8100 SuperProbe по методике (Королюк и др., 2008). Состав газовой фазы во включениях определялся методом, основанным на поглощении отдельных газовых компонентов своим собственным поглотителем. Включения вскрывались под микроскопом в индифферентной жидкости с помощью специального приспособления. Затем выделившиеся газовые пузырьки помещались последовательно в специальные поглотители (Долгов, Шугурова, 1966; Шугурова, 1968).

Давления минералообразующих сред оценивались с помощью изучения флюидных включений с солевыми кристаллами. Методика основана на том, что сначала при нагревании в микротермокамере происходит частичная гомогенизация (жидкости и газа). Полная гомогенизация (растворение последнего кристалла соли) наблюдается при значительно более высоких температурах. Разница этих температур меньше или равна поправке на давление (Леммлейн, 1973). Для флюидных включений 30 %-ных растворов NaCl поправка на давление к температуре гомогенизации варьирует от 75 до 90 °С на 1 кбар в зависимости от температуры частичной гомогенизации (Леммлейн, Клевцов, 1956, 1961). В нашем случае для включений с температурами частичной гомогенизации выше 400 °С поправка на давление принималась около 100 °С на 1 кбар. При температурах частичной гомогенизации включений менее 400 °С при определении давления использовалась *P-V-T* диаграмма для 30 %-ного раствора NaCl (Смит, 1968).

Физико-химические параметры магматогенной кристаллизации клинопироксенов оценены с помощью расчетного моделирования на основе данных по расплавным включениям с использованием программ COMAGMAT (Ariskin, Barmina, 2004), PETROLOG (Danyushevsky, Plechov, 2011) и PLUTON (Лавренчук, 2004).

Геологические особенности исследованных негранитных пегматитов

Миаскит-пегматиты наиболее широко распространены в южной части Ильменогорского щелочного массива, где они образуют жильные тела, как согласные с директивностью миаскитов, так и секущие ее. Большинство жил имеет субширотное простирание и крутое северное падение (Заварицкий, 1958; Успенский, 1968; Симонов, 1981). Миаскит-пегматиты Ильменогорского щелочного комплекса можно разделить на несколько главных видов (Минералы..., 1949; Заварицкий, 1958; Симонов, 1981), среди которых более детально изучены миаскит-пегматиты во внутренних частях миаскитового массива и миаскит-пегматиты в гранито-гнейсах.

Миаскит-пегматиты в миаскитах рассмотрены на примере копи № 115. Здесь границы между миаскитом и пегматитом не резкие. Наблюдается определенная зональность пегматитовой жилы. Краевые, в основном, полевошпатовые, зоны сме-

няются к центру существенно нефелиновым агрегатом (рис. 1). Крупнокристаллическая (до 20–30 см) структура пегматита образована разноцветным нефелином, полевым шпатом, канкринитом и вишневитом.

Миаскит-пегматиты в гранито-гнейсах копи № 120 также имеют зональное строение (рис. 2). Эта жила располагается среди эгирин-авгитовых гранито-гнейсов (Заварицкий, 1958) и амфиболитов. Краевые зоны сложены полевошпатовым агрегатом, который сменяется ближе к центру ассоциацией нефелина и полевого шпата. В самом центре наблюдается преимущественно нефелиновый миаскит-пегматит.

Пироксенит-пегматиты и тесно ассоциирующие с ними пироксениты наиболее детально изучались в офиолитовых комплексах Кузнецкого Алатау, Западного Саяна и Горного Алтая в Алтае-Саянской области. Приведенные результаты исследований относятся исключительно к клинопироксенитам.

Среди пироксенит-пегматитов можно выделить несколько основных разновидностей (Симонов, 1981), из которых нами рассмотрены пегматиты, образующие жилы в серпентинитах, а также пироксенит-пегматиты, располагающиеся среди обычных пироксенитов. Первые детально изучены в офиолитах Западного Саяна, а вторые – в офиолитах Кузнецкого Алатау. Генезис пироксенит-пегматитов, располагающихся в пироксенитах и имеющих с ними постепенные переходы, неизбежно связан с формированием обычных клинопироксенитов, исследование которых, в связи с этим, приобретает важное значение для выяснения условий образования пегматитов. Учитывая это, были изучены пироксениты не только из офиолитов Кузнецкого Алатау и Западного Саяна, но также из других офиолитовых ассоциаций Алтае-Саянской области. В итоге, несмотря на имеющиеся представительные коллекции офиолитовых пород, только в случае клинопироксенитов Чаган-Узунского массива (офиолиты Горного Алтая) удалось выяснить параметры кристаллизации с помощью анализа расплавных включений. В составе пироксенитов Чаган-Узунского массива преобладают клинопироксены и развивающиеся по ним амфиболы. Встречаются ортопироксены и коричневатые хромшпинелиды.

Пироксенит-пегматиты в серпентинитах присутствуют в виде прямолинейных жил мощностью

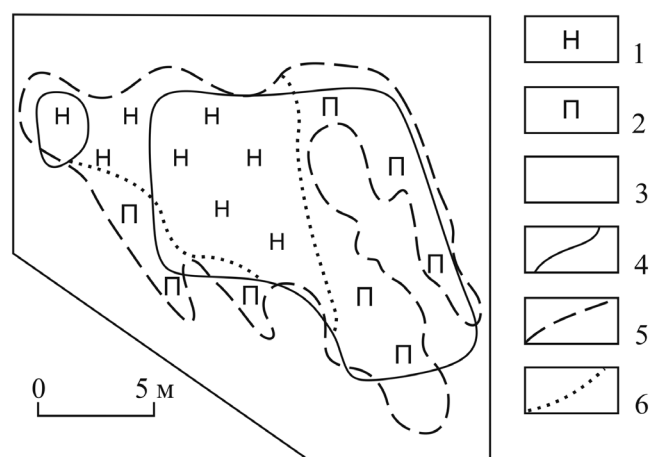


Рис. 1. Схема геологического строения миаскит-пегматита копи № 115 (составлена автором на основе оригинальных данных с использованием материалов В.А. Попова; Симонов, 1981).

1, 2 – миаскит-пегматит с преобладанием нефелина (1) и полевого шпата (2); 3 – миаскит; 4 – границы выработок; 5 – границы пегматита; 6 – примерные границы между различными зонами в пегматите.

Fig. 1. Geological scheme of miaskite-pegmatite of mine no 115 (composed by the author using data of V.A. Popov; Simonov, 1981).

1, 2 – miaskite-pegmatite mostly with nepheline (1) and feldspar (2); 3 – miaskite; 4 – boundaries of mines; 5 – boundaries of pegmatite; 6 – approximate boundaries between different zones in pegmatite.

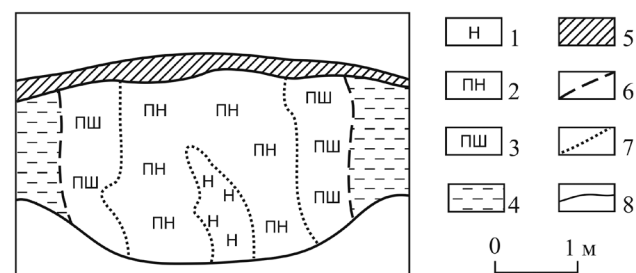


Рис. 2. Схема геологического строения миаскит-пегматита в копи № 120 (составлена автором).

1 – существенно нефелиновый миаскит-пегматит; 2, 3 – нефелин-полевошпатовый (2) и полевошпатовый (3) агрегаты; 4 – гранито-гнейсы, амфиболиты; 5 – почва; 6 – границы пегматита; 7 – примерные границы между различными зонами в пегматите; 8 – границы выработки.

Fig. 2. Geological scheme of miaskite-pegmatite of mine no 120 (composed by the author).

1 – mostly nepheline miaskite-pegmatite; 2, 3 – nepheline-feldspar (2) and feldspar (3) aggregates; 4 – granite gneisses, amphibolites; 5 – soil; 6 – boundaries of pegmatite; 7 – approximate boundaries between different zones in pegmatite; 8 – boundaries of the mine.

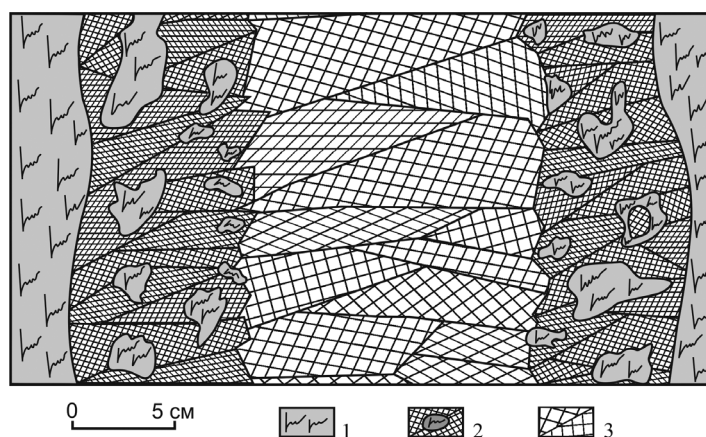


Рис. 3. Схема геологического строения пироксенит-пегматита в офиолитах Западного Саяна (составлена автором).

1 – серпентинит с отдельными мелкими кристаллами пироксена; 2, 3 – серпентин-пироксеновая (2) и пироксеновая (3) зоны.

Fig. 3. Geological scheme of pyroxenite-pegmatite of the West Sayan ophiolites (composed by the author).

1 – serpentine with fine pyroxene crystals; 2, 3 – serpentine-pyroxene (2) and pyroxene (3) zones.

до 0.5–1.0 м, обладающих как резкими границами, так и переходными зонами. На рис. 3 отчетливо видно, как серпентиниты с отдельными мелкими выделениями клинопироксена (1) сменяются зоной, в которой участки серпентина перемежаются с довольно крупными (до 2–3 см) кристаллами пироксена (2). Центр жилы выполнен очень крупными (до 20 см) кристаллами клинопироксена (3).

Пироксенит-пегматиты в пироксенитах образуют линзы, жилы и полосы различной мощности (до 10 м). Они располагаются среди обычных клинопироксенитов, отличаясь, главным образом, размером кристаллов. Контакты пегматитовых тел с вмещающими пироксенитами расплывчатые и часто трудно различимые.

Включения минералообразующих сред

Миаскит-пегматиты Ильменогорского щелочного комплекса обладают характерными особенностями включений минералообразующих сред в зависимости от геологического положения пегматитов. В миаскит-пегматитах копи № 115 включения изучены в мутном сером, прозрачном сером и прозрачном розовом нефелине, канкрините и содалите.

В мутном сером нефелине наибольший интерес представляют первичные многофазные включения, содержащие силикатные и солевые кристаллы, а также газ и жидкость. По классификации Н.П. Ермакова (1972) эти включения могут быть отнесены к кристалло-флюидным включениям расплавов-рассолов. При исследовании в микротермокамере частичная гомогенизация (газа и жидкости)

наблюдается при температурах 430–480 °С. Полная гомогенизация (растворение последнего кристаллика) происходит при температурах 700–740 °С. Давление в минералообразующей среде могло достигать 3100 бар.

В прозрачном сером нефелине наиболее информативными оказались многофазные включения расплавов-рассолов, сходные с включениями в сером мутном нефелине. Частичная гомогенизация в жидкость происходит при температурах 360–380 °С, полная – при 700–730 °С. Давление при этих температурах могло достигать 3500–3600 бар. В прозрачном розовом нефелине наиболее характерны многофазные трубчатые включения с температурами частичной (около 570 °С) и полной (670–700 °С) гомогенизаций, показывающие возможное давление около 1300 бар.

В канкрините найдены мнимовторичные флюидные включения с содержанием кристаллических фаз до 30–40 %, представленных (судя по кинетике растворения), в основном, солями. Температуры полной гомогенизации составляют 500–510 °С, давление – 1200 бар.

В содалите мнимовторичные флюидные включения, в основном, двухфазовые (водный раствор + газовый пузырек), но встречаются и таковые со значительным (до 50 %) содержанием солей. Полная гомогенизация многофазных включений обычно наблюдается при температурах 340–370 °С. Давление составляет около 1000 бар.

При исследовании миаскит-пегматитов в гранито-гнейсах (коп № 120) включения удалось изучить только в нефелине. Частичная гомогени-

зация включений расплавов-рассолов наступает при температурах 270–290 °С, полная – при 630–650 °С. Давление при этих температурах достигает 3500 бар.

Пироксенит-пегматиты и пироксениты в офиолитах Алтае-Саянской области содержат различные типы включений минералообразующих флюидных и расплавных сред. В пироксенит-пегматитах в серпентинитах (офиолиты Западного Саяна) включения изучены в диопсиде и роговой обманке, замещающей клинопироксен.

В клинопироксене наибольший интерес представляют первичные многофазные включения с преобладанием солевых кристаллитов, округлыми газовыми пузырьками и температурами полной гомогенизации около 445–455 °С. В роговой обманке пироксенит-пегматитов первичные двухфазные (жидкость + газ) флюидные включения гомогенизируются при температурах 370–380 °С.

При исследовании пироксенит-пегматитов в пироксенитах (офиолиты Кузнецкого Алатау) включения минералообразующих сред в клинопироксенах не найдены. Помочь в данной ситуации могут особенности взаимоотношений пегматитов и вмещающих их пироксенитов. В большинстве случаев четких границ нет: обычно наблюдается постепенное увеличение размеров зерен клинопироксена с развитием крупнокристаллических пегматитовых структур. В итоге, связь основных параметров кристаллизации пироксенит-пегматитов с условиями формирования пироксенитов (от которых пегматиты отличаются исключительно только более крупными размерами кристаллов) несомненна. Поэтому были исследованы клинопироксениты не только в офиолитах Кузнецкого Алатау, но рассмотрены также пироксениты других офиолитовых ассоциаций Алтае-Саянской области. В результате удалось

найти расплавные включения в хромшпинелидах из клинопироксенитов офиолитов Горного Алтая.

В хромшпинелидах из клинопироксенитов офиолитов Горного Алтая найдены первичные силикатные многофазные включения (10–40 мкм), располагающиеся по зонам роста вдоль границ зерен хромита и имеющие равновесные округлые с некоторой огранкой формы. Во время высокотемпературных экспериментов содержимое включений переплавляется и после закалки практически весь их внутренний объем обычно заполнен гомогенным силикатным стеклом. Часть включений после опытов сохраняет фрагменты оливина, располагающиеся в закалочном стекле. В целом, результаты экспериментальных исследований первичных силикатных включений в хромшпинелидах с преобразованием их содержимого после высокотемпературных опытов (и закалки) в гомогенное стекло являются прямым доказательством кристаллизации шпинелей из расплава и формирования пироксенитов Чаган-Узунского массива при участии магматических систем.

Анализ расплавных включений (табл. 1) показал, что хромшпинелиды из пироксенитов Чаган-Узунского массива кристаллизовались из расплавов, отвечающих по содержанию MgO (14–29 мас. %) пикробазальтам и даже пикритам. По соотношению SiO₂–MgO эти магмы близки к самим пироксенитам (рис. 4), т.е. в формировании этих пород участвовали фактически пироксенитовые расплавы. В целом, подавляющее большинство расплавных включений в пироксенитах располагается в поле включений в хромшпинелидах из ультрамафитов других офиолитовых ассоциаций Алтае-Саянской области, показывая эволюцию расплавов с ростом SiO₂ (от 43 до 53 мас. %) и падением магнетиальности от пикритов к пикробазальтам (рис. 4).

Таблица 1

Представительные анализы (мас. %) расплавных включений в хромшпинелидах из пироксенитов офиолитов Горного Алтая

Table 1

Representative analyses (wt. %) of melt inclusions in Cr-spinels from pyroxenites of the Gorny Altai ophiolites

№ п/п	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Сумма
1	29	50.20	2.37	4.40	0.89	5.83	0.13	16.86	16.65	1.57	1.01	0.56	100.47
2	31	52.09	1.85	2.33	0.97	4.63	0.12	18.63	19.26	0.73	0.26	0.19	101.05
3	32	52.37	1.83	2.32	0.92	4.53	0.14	18.36	19.50	0.68	0.22	0.26	101.11
4	33	49.43	2.33	4.88	1.00	6.11	0.13	18.62	13.91	1.56	1.77	0.66	100.40
5	40	50.78	2.59	4.41	1.12	4.91	0.09	14.31	19.38	1.32	1.20	0.43	100.53
6	10	43.05	2.81	6.80	0.79	10.04	0.18	21.90	7.85	2.83	2.65	1.07	99.96
7	15	44.21	2.53	2.82	0.95	6.88	0.12	29.32	12.20	0.78	0.58	0.24	100.63

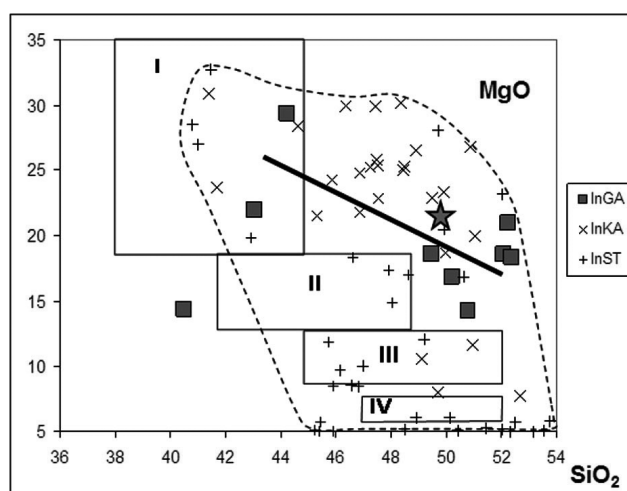


Рис. 4. Составы расплавных включений (мас. %) в хромшпинелидах из ультрамафитов в офиолитах Алтае-Саянской области (составлен на основе оригинальных данных с использованием информации из работ (Петрографический ..., 2009; Симонов и др., 2009б, 2019)).

Расплавные включения в хромшпинелидах из клинопироксенитов офиолитов Горного Алтая (InGA), а также дунитов офиолитов Кузнецкого Алатау (InKA) и Южной Тувы (InST). Звездой обозначен клинопироксенит из офиолитов Горного Алтая (Чаган-Узунский массив). Поля пород: I – пикриты; II – пикробазальты; III – магнезиальные базальты; IV – базальты. Пунктиром обозначено поле данных по расплавным включениям в хромшпинелидах из дунитов офиолитов Кузнецкого Алатау и Южной Тувы. Жирная линия – тренд расплавных включений в хромшпинелидах из клинопироксенитов офиолитов Горного Алтая.

Fig. 4. Composition of melt inclusions (wt. %) in Cr-spinels from ultramafic rocks of the Altai-Sayan ophiolites (composed using original data and those from (Petrographic ..., 2009; Simonov et al., 2009b, 2019)).

Melt inclusions in Cr-spinels from clinopyroxenites of the Gorny Altai ophiolites (InGA) and dunites of ophiolites of the Kuznetsky Alatau (InKA) and South Tuva (InST). Star – clinopyroxenite from the Gorny Altai ophiolites (Chagan-Uzun massif). Fields: I – picrite; II – picritic basalt; III – Mg basalt; IV – basalt. Dotted line – field of melt inclusions in Cr-spinels from dunites of ophiolites of the Kuznetsky Alatau and South Tuva. Bold line – trend of melt inclusions in Cr-spinels from clinopyroxenites of the Gorny Altai Ophiolites.

По составу летучих компонентов (табл. 2) включения в минералах из миаскит-пегматитов в миаскитах Ильменогорского щелочного комплекса (совместно с данными по сиенит-пегматитам из этой же ассоциации) обладают гораздо более высокими содержаниями СО и углеводородов по сравнению с флюидами во включениях в минералах из пироксенит-пегматитов (и ассоциирующих с ними габбро-пегматитов) офиолитов Алтае-Саянской области (рис. 5).

Обсуждение результатов

Анализ литературы показывает, что неграбитные пегматиты, связанные со щелочными магматическими системами, включая миаскитовые пегматиты Ильмен, изучены более детально (Казакова, 1936; Минералы ..., 1949; Заварицкий, 1958; Успенский 1968; Симонов, 1981; Лопатин, Николаев, 2011; Головкин и др., 2019; Сорокина и др., 2019; Sorokina et al., 2016), чем пегматиты ультраоснов-

ного и основного составов в габбро-гипербазитовых ассоциациях (Виноградская, 1954; Успенский 1968; Кузнецов, Симонов, 1978; Симонов, 1981, 1993; Иванов, 1986). Так, для миаскит-пегматитов на основе изучения многофазных включений (преимущественно расплавов-рассолов) удалось определить физико-химические параметры кристаллизации минералов. В то же время, данные по включениям в клинопироксенах из пироксенит-пегматитов весьма ограничены, поэтому для выяснения характеристик магматических систем, наиболее вероятно участвовавших в процессах формирования этих пегматитов, обосновано проведение исследований также и обычных пироксенитов, в которых локализованы пироксенит-пегматиты, и отличающихся от них в основном только структурой.

Миаскит-пегматиты. Исследования включений минералообразующих сред в породообразующих минералах были выполнены для миаскит-пегматитов из миаскитов и гранито-гнейсов. Для

Таблица 2

Представительные анализы (объем. %) газовой фазы включений в минералах негранитных пегматитов

Table 2

Representative analyses (vol. %) of vapor phase of inclusions in minerals of non-granitic pegmatites

№ п/п	Пегматит	Минерал	CO ₂ + SG	CO	HC
1	Миаскит-пегматиты	нефелин	88.0	12.0	н.о.
2		нефелин	88.0	12.0	н.о.
3		нефелин	62.0	17.0	н.о.
4		канкринит	79.0	н.о.	21.0
5		канкринит	88.0	н.о.	12.0
6		нефелин	44.5	н.о.	19.1
7		нефелин	38.7	н.о.	19.0
8		канкринит	60.8	17.8	н.о.
9	Пироксенит-пегматиты	диопсид	49.5	10.0	8.50
10		диопсид	45.0	11.0	9.50
11		диопсид	92.5	6.5	10.5
12		амфибол	95.0	н.о.	5.0
13		амфибол	91.5	н.о.	3.50
14		амфибол	97.0	н.о.	3.00
15		амфибол	45.5	29.0	16.0
16	Сиенит-пегматиты	амфибол	49.0	н.о.	21.5
17		диопсид	33.0	29.5	25.0
18		диопсид	77.0	9.0	8.50
19		диопсид	79.5	н.о.	20.5
20		диопсид	47.5	18.5	29.0
21	Габбро-пегматиты	амфибол	77.4	8.70	13.9
22		кварц	66.5	н.о.	19.5
23		кварц	80.0	2.50	17.5
24		кварц	91.5	н.о.	8.50
25		кварц	90.0	н.о.	10.0
26		кварц	92.0	н.о.	8.0
27		диопсид	92.5	н.о.	7.50
28		диопсид	63.5	н.о.	6.50
29		амфибол	87.8	10.3	н.о.
30		амфибол	96.0	н.о.	4.00
31		амфибол	92.0	н.о.	8.00

Примечание. CO – окись углерода, HC – углеводороды, CO₂ – двуокись углерода, SG – сернистые газы; н.о. – не определялось.Note. CO – carbon oxide, HC – hydrocarbon, CO₂ – carbon dioxide, SG – sulfur gases; n.o. – not determined.

миаскит-пегматитов из миаскитов установлена последовательная смена параметров образования составляющих их минералов. Первым при температурах 700–740 °С и давлениях 3100 бар из расплавов-рассолов кристаллизовался мутный серый нефелин. Последующее формирование прозрачного серого нефелина происходило практически при тех же температурах (700–730 °С), но в условиях повышения давления до 3500–3600 бар. В дальнейшем, в ходе снижения температур (670–700 °С) и давления (до 1300 бар) кристаллизовалась основная масса прозрачного розового нефелина. При температурах 500–510 °С и давлении около 1200 бар по разноцветному нефелину образуется канкринит. На заключительных стадиях пегматитообразующих процессов (370–440 °С, до 1000 бар) развиваются прожилки и участки содалита.

В миаскит-пегматитах из гранито-гнейсов нефелин, независимо от положения в пегматите, формировался из расплавов-рассолов. Нефелин центральной части кристаллизовался при более высоких температурах (710–750 °С), чем нефелин краевых зон с минимальными температурами образования около 630–650 °С. Давление в общем было практически постоянным – 3500–3600 бар.

Полученные температуры кристаллизации нефелина не противоречат как опубликованной ранее информации, так и современным данным по миаскит-пегматитам, полученным с применением разных методов, располагаясь между двумя интервалами температур формирования миаскит-пегматитов: 550–650 °С (Лопатин, Николаев, 2011) и 750–900 °С (Базарова, 1969; Магматогенная ..., 1975; Головки и др., 2019).

Пироксенит-пегматиты. Исследования пироксенит-пегматитов в серпентинитах позволило найти включения минералообразующих сред и с их помощью оценить параметры генетических процессов.

Для пироксенит-пегматитов в серпентинитах из офиолитов Западного Саяна анализ флюидных включений с многочисленными солями в диопсиде показал, что минимальные температуры его кристаллизации составляют 445–455 °С. Эти параметры хорошо согласуются с экспериментальными работами (Калинин, 1967). Замещение диопсида роговой обманкой происходило при температурах 370–380 °С.

Исследования офиолитов Кузнецкого Алатау, содержащих пироксенит-пегматиты в пироксенитах, показали присутствие первичных расплавных включений в аксессуарных хромшпинелидах из дунитов, что прямо свидетельствует об участии магматических систем при образовании ультрамафитов (Симонов и др., 2019). Расчетное моделирование на основе данных по составам этих включений с помощью программ COMAGMAT (Ariskin, Barmina, 2004) и PLUTON (Лавренчук, 2004) показало магматогенную кристаллизацию клинопироксенов при температурах около 1220–1210 °С, что свидетельствует о возможности формирования пироксенитов офиолитов Кузнецкого Алатау из расплава.

Прямые свидетельства кристаллизации клинопироксенитов из расплавов были установлены для офиолитов Горного Алтая в результате исследования расплавных включений в хромшпинелидах. Расчетное моделирование с помощью программ PETROLOG (Danyushevsky, Plechov, 2011) и PLUTON (Лавренчук, 2004) на основе данных по этим включениям свидетельствует о формировании рассмотренных пироксенитов в процессах кристаллизации в магматической камере из пикритовых и пикробазальтовых расплавов при снижении температур от 1315–1245 до 1205–1100 °С и давления от 4 до 2 кбар.

В целом, имеющиеся данные свидетельствуют о формировании пироксенитов в офиолитах Кузнецкого Алатау и Горного Алтая из высокотемпературных силикатных расплавов, что прямо свидетельствует о возможной кристаллизации пироксенит-пегматитов (находящихся в пироксенитах) при непосредственном участии магматических систем.

Выводы

1. Исследования включений минералообразующих сред в минералах, а также расчетное моделирование на основе данных по составам расплавных

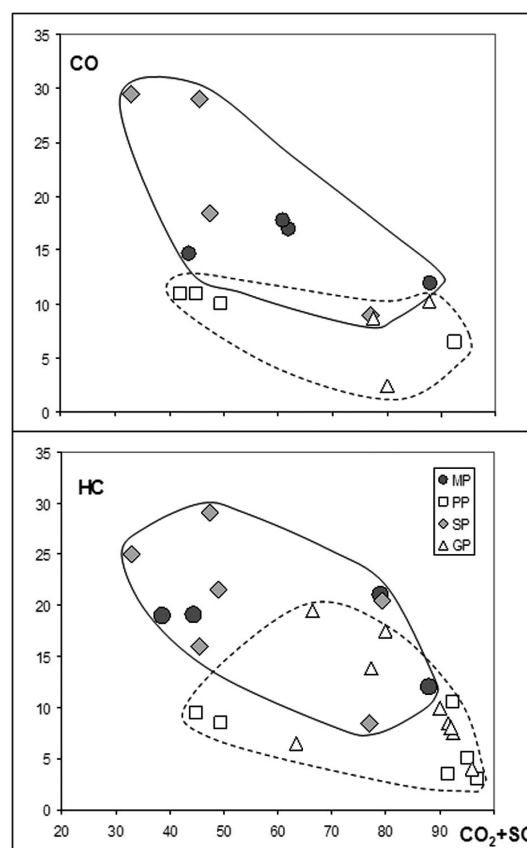


Рис. 5. Составы летучих компонентов (об. %) во включениях из минералов в негранитных пегматитах (составлен на основе оригинальных данных; Симонов, 1981).

CO – окись углерода, HC – углеводороды, CO₂ – двуокись углерода, SG – сернистые газы. Летучие компоненты во включениях в минералах из разных типов пегматитов: миаскитовых (MP), пироксенитовых (PP), сиенитовых (SP), габбро (GP).

Fig. 5. Compositions of volatiles (vol. %) in inclusions in minerals from non-granite pegmatites (composed using original data; Simonov, 1981).

CO – carbon oxide, HC – hydrocarbon, CO₂ – carbon dioxide, SG – sulfur gases. Volatiles in inclusions in minerals from miaskite (MP), pyroxenite (PP), syenite (SP) and gabbro (GP) pegmatites.

включений с использованием программ COMAGMAT, PETROLOG и PLUTON позволили установить физико-химические параметры процессов кристаллизации минералов в миаскит-пегматитах Ильменогорского щелочного комплекса (Южный Урал) и пироксенит-пегматитах из офиолитовых ассоциаций Алтае-Саянской области (Южная Сибирь).

2. С помощью исследования преимущественно многофазных (силикатные и солевые кристаллы + газ и жидкость) включений установлено, что нефелин миаскит-пегматитов кристаллизовался при мак-

симальных температурах 700–750 °С и давлениях 3100–3600 бар из расплавов-рассолов. В дальнейшем, в ходе снижения температур (до 500–510 °С) и давления (до 1200 бар) преимущественно из флюидов образовался канкринит. На заключительных стадиях пегматитообразующих процессов (370–440 °С, до 1000 бар) развивается содалит.

3. В результате анализа многофазных флюидных включений с солевыми фазами выяснено, что при формировании пироксенит-пегматитов в серпентинитах участвовали высококонцентрированные растворы с температурами 445–455 °С.

4. Данные по расплавленным включениям в хромшпинелидах из офиолитовых ультрамафитов (включая клинопироксениты) свидетельствуют о возможной кристаллизации пироксенит-пегматитов (находящихся в обычных пироксенитах) при непосредственном участии высокотемпературных (от 1315–1245 до 1205–1100 °С) магматических систем.

Автор выражает свою благодарность кандидату геолого-минералогических наук В.О. Полякову за помощь в проведении исследований (с 1975 по 1980 гг.) негравитных пегматитов в Ильменском заповеднике, а также профессору А.И. Чернышовой за критические замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМСО РАН и ИНГГ СО РАН, при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и договора № 14.У26.31.0029.

Литература

- Базарова Т.Ю. (1969) Термодинамические условия формирования некоторых нефелинсодержащих пород. М., Наука, 110 с.
- Бакуменко И.Т. (1986) Процессы магматического петрогенезиса по данным изучения включений минералообразующих сред. *Геология и геофизика*, (7), 125–133.
- Виноградская Г.М. (1954) Дунит-пегматиты ультраосновной формации на Урале. *Доклады АН СССР*, 97(5), 899–902.
- Головкин О.В., Верещагин О.С., Рассомахин М.А. (2019) Сравнительная минералого-геохимическая характеристика миаскитовых пегматитов Ильменских гор (Россия) и Лангесунфьорда (Норвегия). *Металлогения древних и современных океанов-2019. Четверть века достижений в изучении субмаринных месторождений*. Миасс, ИМин УрО РАН, 257–261.
- Долгов Ю.А., Шугурова Н.А. (1966) Исследования состава индивидуальных газовых включений. Материалы по генетической и экспериментальной минералогии. Новосибирск, Наука, т. 4, 173–181.
- Ермаков Н.П. (1972) Геохимические системы включений в минералах. М., Недра, 374 с.
- Ермаков Н.П., Долгов Ю.А. (1979) Термобарогеохимия. М., Недра, 272 с.
- Заварицкий А.Н. (1958) Геологический и петрографический очерк Ильменского минералогического заповедника и его копей. Избранные труды. Т. II. Москва, АН СССР, 5–307.
- Иванов О.К. (1986) Ультрамафические пегматиты пироксенит-дунитовых массивов платиноносного пояса Урала. Свердловск, УНЦ АН СССР, 58 с.
- Казакова А.А. (1936) К минералогии элеолито-полевошпатовых пегматитов Ильменских гор. *Труды Ильменского заповедника*. М.–Л., АН СССР, (5), 21–36.
- Калинин Д.В. (1967) О нижних температурных границах образования тремолита, диопсида и волластонита в гидротермальных условиях (экспериментальные данные). *Геология и геофизика*, (1), 57–83.
- Королюк В.Н., Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В., Нигматулина Е.Н. (2008) О точности электронно-зондового анализа пороодообразующих минералов на микроанализаторе JXA-8100. *Геология и геофизика*, 49(3), 221–225.
- Кузнецов П.П., Симонов В.А. (1978) О структурном положении негравитных пегматитов в разрезах габбро-гипербазитовых массивов Алтае-Саянской области. *Геология и геофизика*, (3), 63–72.
- Лавренчук А.В. (2004) Программа для расчета внутрикамерной дифференциации основной магмы «PLUTON». Тезисы докладов Второй сибирской международной конференции молодых ученых по наукам о Земле. Новосибирск, ИГМ СО РАН, 105–106.
- Леммлейн Г.Г. (1973) Морфология и генезис кристаллов. М., Наука, 328 с.
- Леммлейн Г.Г., Клевцов П.В. (1956) Соотношение термодинамических параметров P-V-T для воды и 30 %-ных водных раствором NaCl. *Записки Всесоюзного минералогического общества*, 85(4), 529–534.
- Леммлейн Г.Г., Клевцов П.В. (1961) Соотношение основных термодинамических параметров для части системы H₂O-NaCl. *Геохимия*, (2), 133–142.
- Лопатин О.Н., Николаев А.Г. (2011) Геологическое строение и минералогия пегматитов Ильменских гор. Учебно-методическое пособие. Казань, Казанский федеральный университет, 40 с.
- Магматогенная кристаллизация по данным изучения включений расплавов (1975) Под ред. В.С. Соболева, В.П. Костюка. Новосибирск, Наука, 232 с.
- Минералы Ильменского заповедника (1949) М.–Л., АН СССР, 656 с.
- Петрографический кодекс России (2009) Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ, 194 с.
- Реддер Э. (1987) Флюидные включения в минералах. М., Мир, 365 с.
- Симонов В.А. (1975) Применение методов термобарогеохимии к исследованиям условий образования

негранитных пегматитов / Методология и методика геологических и геофизических исследований в Сибири. Новосибирск, ИГМ СО АН СССР, 79–87.

Симонов В.А. (1976) Физико-химические особенности образования нефелинов миаскит-пегматитов. *Совещание молодых ученых по минералогии, геохимии и методам исследования минералов*. Владивосток, 35–36.

Симонов В.А. (1981) Условия минералообразования в негранитных пегматитах. Новосибирск, Наука, 168 с.

Симонов В.А. (1993) Петрогенезис офиолитов (термобарогеохимические исследования). Новосибирск, ОИГГМ СО РАН, 247 с.

Симонов В.А., Приходько В.С., Васильев Ю.Р., Котляров А.В. (2017) Физико-химические условия кристаллизации пород ультраосновных массивов Сибирской платформы. *Тихоокеанская геология*, **36**(6), 70–93.

Симонов В.А., Приходько В.С., Ковязин С.В. (2011) Условия формирования платиноносных ультраосновных массивов Юго-Востока Сибирской платформы. *Петрология*, **19**(6), 579–598.

Симонов В.А., Чернышов А.И., Котляров А.В. (2019) Условия формирования гипербазитов из офиолитов Кузнецкого Алатау: роль магматических систем и пластических деформаций / Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал. Иркутск, Оттиск, 251–256.

Симонов В.А., Шарков Е.В., Ковязин С.В. (2009а) Петрогенезис Fe-Ti интрузивных комплексов в районе Сьерра-Леоне, Центральная Атлантика. *Петрология*, **17**(5), 521–538.

Симонов В.А., Шелепаев Р.А., Котляров А.В. (2009б) Физико-химические параметры формирования расслоенного габбро-гипербазитового комплекса в офиолитах Южной Тувы / Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, т. 2, 195–198.

Смит Ф.Г. (1968) Физическая геохимия. М., Недра, 75 с.

Соболев В.С., Бакуменко И.Т., Костюк В.П. (1976) О возможности использования расплавных включений для петрологических реконструкций. *Геология и геофизика*, (5), 146–149.

Сорокина Е.С., Аносова М.О., Рассомахин М.А. (2019) Новые данные по генезису корунда – синего сапфира Ильменогорского комплекса, Южный Урал: предварительные результаты LA-ICP-MS микро-примесного картирования. *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*, (16), 555–558.

Успенский Н.М. (1968) Негранитные пегматиты. М., Недра, 320 с.

Шугурова Н.А. (1968) Химические обоснования методики газового анализа индивидуальных включений в минералах / Минералогическая термометрия и барометрия. М., Наука, Т. II, 18–23.

Ariskin A.A., Barmina G.S. (2004) COMAGMAT: Development of a magma crystallization model and its petrologic applications. *Geochemistry International*, **42** (Supp. 1), S1–S157.

Danyushevsky L.V., Plechov P.Yu. (2011) Petrolog 3: integrated software for modeling crystallization processes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **12**(7), Q07021.

Sorokina E.S., Karampelas S., Nishanbaev T.P., Nikandrov S.N., Muyl J. (2016) Blue sapphires in the syenite pegmatites from Ilmen Mountains, South Urals. *Proceedings of International Geological Congress general meeting*. Cape Town, Paper No 4015.

References

Bazarova T.Yu. (1969) [Thermodynamic formation conditions of some nepheline-bearing rocks]. Moscow, Nauka, 110 p. (in Russian)

Bakumenko I.T. (1986) [Magmatic petrogenetic processes according to the study of inclusions of mineral-forming media]. *Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]*, (7), 125–133. (in Russian)

Vinogradskaya G.M. (1954) [Dunite-pegmatites of ultramafic associations of the Urals]. *Doklady AN SSSR [Reports of Academy of Sciences of the USSR]* **97** (5), 899–902. (in Russian)

Golovko O.V., Vereshchagin O.S., Rassomakhin M.A. (2019) [Comparative mineralogical and geochemical characteristics of miassic pegmatites of the Ilmeny Mountains (Russia) and Langesundfjord (Norway)]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2019. Chetvert veka dostizheniy v izuchenii submarinnykh mestorozhdeniy [Metallogeny of ancient and modern oceans-2019. Twenty five years of study of submarine deposits]*. Miass, IMin UrO RAN, 257–261. (in Russian)

Dolgov Yu.A., Shugurova N.A. (1966) In: Materialy po geneticheskoy i spektral'noy mineralogii [Study of the composition of individual vapor inclusions]. [Materials on genetic and experimental mineralogy]. Novosibirsk, Nauka, **4**, 173–181. (in Russian)

Ermakov N.P. (1972) [Geochemical systems of inclusions in minerals]. Moscow, Nedra, 374 p. (in Russian)

Ermakov N.P., Dolgov Yu.A. (1979) [Thermobarogeochemistry]. Moscow, Nedra, 272 p. (in Russian)

Zavaritsky A.N. (1958) [Geological and petrographic sketch of the Ilmeny Mineralogical Reserve and its mines. Selected Works]. Moscow, AN SSSR, vol. II, 5–307. (in Russian)

Ivanov O.K. (1986) [Ultramafic pegmatites of pyroxenite-dunite massifs of the Urals platinum belt]. Sverdlovsk, UNTS AN SSSR, 58 p. (in Russian)

Kazakova A.A. (1936) [Mineralogy of eleolithic-feldspar pegmatites of the Ilmeny Mountains]. *Nrudy Il'menskogo zapovednika [Proceedings of the Ilmeny Reserve]*. Moscow–Leningrad, AN SSSR, (5), 21–36. (in Russian)

Kalinin D.V. (1967) [Low temperature limits for hydrothermal formation of tremolite, diopside and wollastonite: experimental data]. *Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]*, (1), 57–83. (in Russian)

- Korolyuk V.N., Lavrentiev Yu.G., Usova L.V., Nigmatulina E.N.** (2008) JXA-8100 microanalyzer: accuracy of analysis of rock forming minerals. *Russian Geology and Geophysics*, **49**(3), 165–168.
- Kuznetsov P.P., Simonov V.A.** (1978) [Structural position of non-granite pegmatites in sections of gabbro-ultramafic massifs of the Altai-Sayan region]. *Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]*, (3), 63–72. (in Russian)
- Lavrenchuk A.V.** (2004) [PLUTON software for calculation within chamber differentiation of mafic magmas]. Tezisy dokladov Vtoroy Sibirskoy mezhdunarodnoy Konferencii molodyh uchenykh po naukam o Zemle [Second Siberian international conference of young geoscientists]. Novosibirsk, IGM SO RAN, 105–106. (in Russian)
- Lemmlein G.G.** (1973) [Morphology and genesis of crystals]. Moscow, Nauka, 328 p. (in Russian)
- Lemmlein G.G., Klevtsov P.V.** (1956) [Correlation of thermodynamic parameters of P-V-T for water and 30 % aqueous NaCl solution]. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva [Proceedings of All-Union Mineralogical Society]*, **85**(4), 529–534. (in Russian)
- Lemmlein G.G., Klevtsov P.V.** (1961) [Correlation of main thermodynamic parameters for part of the H₂O-NaCl system]. *Geokhimiya [Geochemistry]*, (2), 133–142. (in Russian)
- Lopatin O.N., Nikolaev A.G.** (2011) [Geological structure and mineralogy of pegmatites of the Ilmeny Mountains]. Kazan, Kazanskiy Federalnyy universitet, 40 p. (in Russian)
- Magmatic crystallization according to the study of melt inclusions (1975) Eds. V.S. Sobolev, V.P. Kostyuk. Novosibirsk, Nauka, 232 p. (in Russian)
- Minerals of the Ilmeny Reserve (1949) Moscow–Leningrad, AN SSSR, 656 p. (in Russian)
- Petrographic code of Russia (2009) St. Petersburg, VSEGEI, 194 p. (in Russian)
- Roedder E.** (1987) [Fluid inclusions in minerals]. Moscow, Mir, 365 p. (in Russian)
- Simonov V.A.** (1975) [Application of thermobarogeochemistry to study of formation conditions of non-granite pegmatites]. In: Metallogiya i Metodika geologicheskikh issledovaniy v Sibiry [Methodology and methods of geological and geophysical research in Siberia]. Novosibirsk, ICM SB AS USSR, 79–87. (in Russian)
- Simonov V.A.** (1976) [Physico-chemical features of formation of nepheline from myaskite-pegmatites]. Sovershanie molodyh uchenykh po mineralogii geohimii i metodam issledovaniya mineralov [Meeting of young scientists on mineralogy, geochemistry and mineral research methods]. Vladivostok, 35–36. (in Russian)
- Simonov V.A.** (1981) [Mineralization conditions in non-granite pegmatites]. Novosibirsk, Nauka, 168 p. (in Russian)
- Simonov V.A.** (1993) [Petrogenesis of ophiolites: thermobarogeochemical studies]. Novosibirsk, OIGGM SO RAN, 247 p. (in Russian)
- Simonov V.A., Prikhod'ko V.S., Vasiliev Yu.R., Kotlyarov A.V.** (2017) Physicochemical conditions of crystallization of rocks from ultrabasic massifs of the Siberian Platform. *Russian Journal of Pacific Geology*, **11**(6), 447–468.
- Simonov V.A., Prikhod'ko V.S., Kovyazin S.V.** (2011) Genesis of platiniferous massifs in the southeastern Siberian Platform. *Petrology*, **19**(6), 549–567.
- Simonov V.A., Chernyshov A.I., Kotlyarov A.V.** (2019) [Conditions of the formation of ophiolite ultramafic rocks of the Kuznetsky Alatau: the role of magmatic systems and plastic deformations]. In: Ul'tramafit-mafitovye komplekсы: geologiya, stroenie, rudnyy potentsial [Ultramafic complexes: geology, structure, ore potential]. Irkutsk, Ottisk, 251–256. (in Russian)
- Simonov V.A., Sharkov E.V., Kovyazin S.V.** (2009a). Petrogenesis of the Fe-Ti intrusive complexes in the Sierra Leone Region, Central Atlantic. *Petrology*, **17**(5), 488–502.
- Simonov V.A., Shelepaev R.A., Kotlyarov A.V.** (2009b) [Physico-chemical parameters of the formation of ophiolite layered gabbro-ultramafic complex of South Tuva]. In: Ultrabazit-bazitovye komplekсы skladchatykh oblastey i svyazannye s nimi mestorozhdeniya [Mafic-ultramafic complexes of folded regions and related deposits]. Ekaterinburg, UB RAS, **2**, 195–198. (in Russian)
- Smith F.G.** (1968) [Physical geochemistry]. Moscow, Nedra, 475 p. (in Russian)
- Sobolev V.S., Bakumenko I.T., Kostyuk V.P.** (1976) [Possible using of melt inclusions for petrological interpretations]. *Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]*, (5), 146–149. (in Russian)
- Sorokina E.S., Anosova M.O., Rassomakhin M.A.** (2019) [New data on the genesis of corundum – blue sapphire of the Ilmenogorsky complex, South Urals: preliminary results of LA-ICP-MS trace mapping]. Trudy Fersmanovskoy nauchnoy serii GI KNT RAM [Proceedings of the Fersman Scientific Session of the Kirov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], (16), 555–558. (in Russian)
- Uspensky N.M.** (1968) [Non-granite pegmatites]. Moscow, Nedra, 320 p. (in Russian)
- Shugurova N.A.** (1968) [Chemical substantiation of gas analysis of individual inclusions in minerals]. In: Mineralogicheskaya termometriya i barometriya [Mineralogical thermometry and barometry]. Moscow, Nauka, vol. II, 18–23. (in Russian)
- Ariskin A.A., Barmina G.S.** (2004) COMAGMAT: Development of a magma crystallization model and its petrologic applications. *Geochemistry International*, **42** (Suppl. 1), S1–S157.
- Danyushevsky L.V., Plechov P.Yu.** (2011) Petrolog 3: integrated software for modeling crystallization processes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **12**(7), Q07021, doi: 10.1029/2011GC003516.
- Sorokina E.S., Karampelas S., Nishanbaev T.P., Nikandrov S.N., Muiyal J.** (2016) Blue sapphires in the syenite pegmatites from Ilmen Mountains, South Urals. *Proceedings of International Geological Congress general meeting*. Cape Town, Paper No 4015.

Статья поступила в редакцию 8 июня 2020 г.