

УДК 549.0:552.3 (470.55)

DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-1-2

ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ВОЗРАСТ АКЦЕССОРНЫХ МИНЕРАЛОВ В ПЕГМАТИТАХ ИЛЬМЕНСКИХ ГОР, ЮЖНЫЙ УРАЛ

В.А. Попов

*Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
Институт минералогии, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; popov@mineralogy.ru*

Статья поступила в редакцию 15.12.2020 г., принята к печати 19.02.2021 г.

RELATIVE AGE OF ACCESSORY MINERALS IN PEGMATITES OF THE ILMENY MOUNTAINS, SOUTH URALS

V.A. Popov

*South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Institute of Mineralogy, Miass,
Chelyabinsk oblast, 456317 Russia; popov@mineralogy.ru*

Received 15.12.2020, accepted 19.02.2021

Аннотация. Ретроспективное моделирование процессов минералообразования в природных системах эффективно осуществлять с учетом всех минералов – породообразующих, второстепенных и акцессорных. В Ильменских горах на Южном Урале онтогенез пегматитовых тел (гранитных, сиенитовых, карбонатитовых и ультрамафитовых) в общем случае выглядит сложным во времени и пространстве. На примере циркона, берилла и графита рассмотрен относительный возраст акцессорных минералов в агрегатах породообразующих минералов на фоне общей истории становления пегматитовых полей.

Ключевые слова: пегматиты, акцессорные минералы, онтогенез, Ильменские горы.

Abstract. Effective retrospective modeling of mineral formation in natural systems should take into account all minerals – rock-forming, secondary in abundance and accessory. In the Ilmeny Mountains (South Urals), the ontogeny of pegmatite bodies (granitic, syenitic, carbonatite, and ultramafic) is complex in time and space. Using several examples, the relative age of accessory minerals in aggregates of rock-forming minerals is considered against the background of a general evolution of formation of pegmatite fields.

Keywords: pegmatites, accessory minerals, ontogenesis, Ilmeny Mountains.

Для цитирования: Попов В.А. Относительный возраст акцессорных минералов в пегматитах Ильменских гор, Южный Урал, Минералогия, 7(1), 23–39. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-1-2.

For citation: Popov V.A. Relative age of accessory minerals in pegmatites of the Ilmeny mountains, South Urals Mineralogy, 7(1), 23–39. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-1-2.

Введение

Ильменские горы находятся на Южном Урале в Челябинской области, восточнее города Миасс. Здесь в 1920 г. был образован знаменитый Ильменский минералогический заповедник (рис. 1). Главное богатство заповедника – разнообразные пегматитовые жилы с длительной историей формирования, «записанной» более чем 340 минералами. Среди них присутствует 18 минеральных видов, открытых в заповеднике, самым известным из которых является ильменит. Многие минералы можно отнести к категории акцессорных, а время

их выделения в минералообразующих (пегматитовых) процессах имеет большой научный и практический интерес.

История исследований пегматитов Ильменских гор насчитывает уже более 250 лет. Большой вклад в минералогические исследования Ильменских гор внесли Й. Менге, Г. Розе, П.Н. Барбот де Марни, А.Б. Кеммерер, А. Брейтгаупт, И.Р. Лисенко, Н.И. Кокшаров, П.В. Еремеев, М.П. Мельников, В.И. Вернадский, А.Е. Ферсман, А.Н. Заварицкий, М.П. Русаков, Г.П. Барсанов, А.И. Симонов и многие другие (Крыжановский, 1949). Позднее работами Б.А. Макаровича, Л.К. Богомолловой, А.Г. Ба-

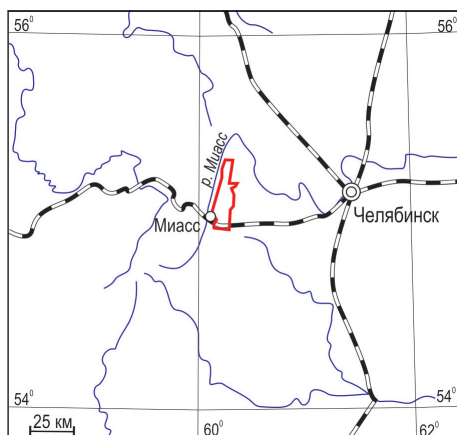


Рис. 1. Географическое положение Ильменских гор на Южном Урале в районе города Миасса (красный контур – границы Ильменского государственного заповедника).

Fig. 1. Geographical position of Ilmeny Mountains in the South Urals near the town of Miass (red contour corresponds to the boundaries of the Ilmeny State Reserve).

женова, И.А. Малахова, В.Я. Левина, В.А. Попова, В.И. Поповой, В.О. Полякова, Е.П. Щербаковой, Е.П. Макагонова, Е.В. Белогуб, М.А. Рассомахина, С.В. Чередниченко и многих других исследователей в 420 копиях получены дополнительные данные о пегматитах разного состава и относительного возраста, их строении и минералогии (Богомолва, 1961; Поляков, 1982; Попова и др., 1982 и др.). На пегматитах Ильменских гор разрабатывались разные генетические гипотезы, но относительный возраст акцессорных минералов в этих гипотезах специально не рассматривался.

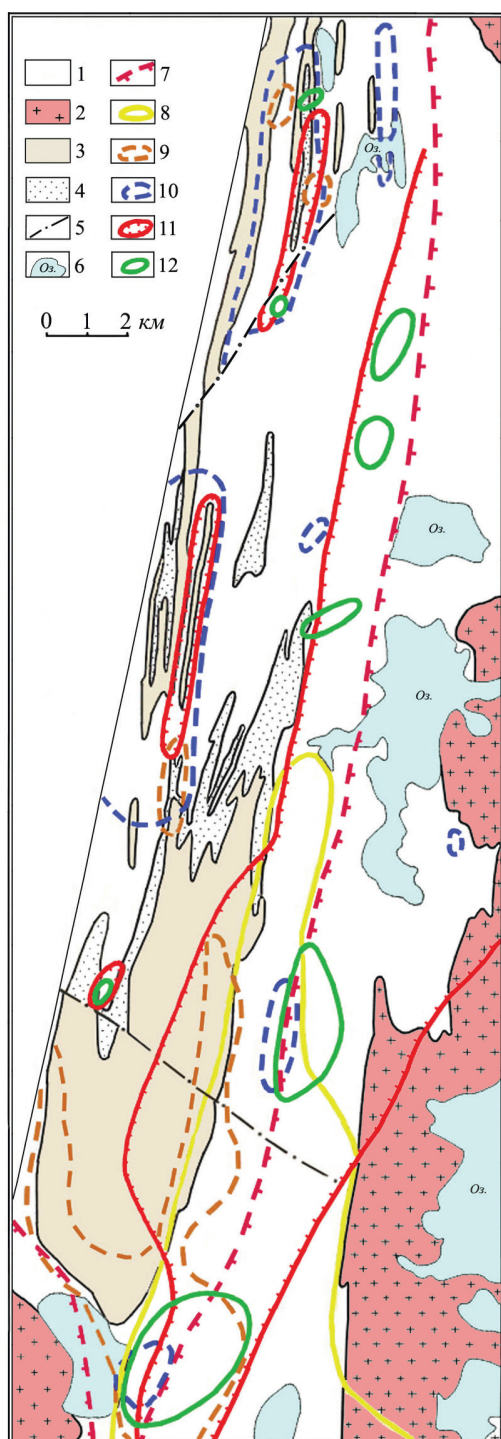
Геологическое строение и жильное поле Ильменских гор

Ильменские горы и их отроги сложены миаскитами Ильменогорского массива, телами сиенитов, гранитов, ультрамафитов и вмещающими их метаморфическими породами – гранитогнейсами, амфиболитами, кристаллическими сланцами, кварцитами, что объединяется в Ильменогорский комплекс магматических и метаморфических пород. Ильменогорский комплекс пород является частью Сысертско-Ильменогорского антиклинория и расположен в Восточно-Уральском поднятии, отделяемом с запада от Центрально-Уральского поднятия зоной Главного Уральского глубинного разлома. Длительная геологическая история формирования Ильменских гор и прилегающей территории привела к возникновению уникального комплекса минералов и горных пород, к разнообразию различных полезных ископаемых.

Среди пегматитов Ильменских гор А.Е. Ферсман (1940) выделял жилы: 1 – нефелин-сиенитовые (миаскитовые); 2 – полевошпатовые с эцинитом и цирконом в гранитогнейсах; 3 – полевошпатовые с пироксеном и цирконом в авгит-сиенитовой области; 4 – мигматически-контактового типа с корундом или ортитом, гранатом, эпидотом; 5 – жилы гранитные (топаз-берилловые). Гранитные пегматиты (и отдельные зоны в жилах) подразделялись на редкометалльные, шерлово-слюдистые, топаз-берилловые, лепидолит-альбитовые, криолитовые (Ферсман, 1940). При описании пегматитов А.Н. Заварицкий (1944) разделял их по условиям залегания (вмещающим породам) и минерализации. Так, среди сиенитовых пегматитов выделены эгириновые с молибденитом, биотитовые с цирконом, двуслюдяные с эцинитом, плагиоклазовые (антипертитовые) с алланитом, титанитом и роговой обманкой, корундовые сиенит-пегматиты. Сиенитовые пегматиты рассматривались как реакционные образования и миаскитовой, и гранитной магм. Уже в этой работе А.Н. Заварицкий среди гранитных пегматитов разделял линзовидные инъекции в гнейсах и крутопадающие дайки от пегматитов с пироксеном (секущих миаскиты) и иных жил (топаз-берилловых и других, принимая типизацию жил по А.Е. Ферсману). Характеризуя пегматиты южной части Ильменских гор, А.И. Симонов вычленил пегматиты чистой линии и линии скрещения, а среди них – по минеральному составу (Крыжановский, 1949). Отмечая, что внедрение Кисегачской гранитной интрузии предшествует миаскитовому массиву, он связывал формирование разных пегматитов с постмагматической стадией, практически не касаясь возрастных взаимоотношений пегматитов.

В результате работы Л.К. Богомолвой (1961) впервые достоверно выявлены три типа домиаскитовых и два – послемаскитовых гранитных пегматитов, а также пять типов полевошпатовых пегматитов и два – миаскитовых. Тогда же И.А. Малахов показал, что гранитные чевкинит-пироксеновые пегматиты относительно моложе циркон-полевошпатовых.

Анализ закономерностей формирования пегматитов Ильменских гор, проведенный за последние 50 лет коллективом Лаборатории минералогии Ильменского заповедника и Института минералогии, позволил существенно дополнить данные о составе, локализации и возрастных взаимоотношениях жильных тел. Основная информация получена при картировании более 100 пересечений разных жил в 65 копиях (рис. 2) (Попова и др., 1982).



По относительному возрасту и составу пегматиты подразделены нами на шесть возрастных групп: 1) домиаскитовые гранитные; 2) сиенитовые и миаскитовые; 3) щелочно-ультрамафитовые; 4) карбонатит-пегматиты; 5) постмиаскитовые гранитные; 6) амазонитовые и сходные с ними безамазонитовые гранитные пегматиты.

Усредненные величины «абсолютного» возраста пегматитов для 15 минералов из 28 копеек, сум-

Рис. 2. Площади локализации разновозрастных пегматитов Ильменских гор на схематической геологической карте по (Попова и др., 1982).

1 – гнейсы, сланцы, амфиболит; 2 – гранитоиды; 3 – миаскиты; 4 – сиениты; 5 – разломы; 6 – озера; 7–12 – районы развития пегматитов: 7 – гранитных домиаскитовых, 8 – полевошпатовых, 9 – миаскитовых, 10 – корундово-полевошпатовых, 11 – гранитных постмиаскитовых, 12 – гранитных амазонитовых.

Fig. 2. Areas of pegmatites of various ages in the Ilmeny Mountains on schematic geological map.

1 – gneiss, schist, amphibolite; 2 – granitoids; 3 – miaskite; 4 – syenite; 5 – faults; 6 – lakes; 7–12 – pegmatite fields: 7 – granitic premiaskite, 8 – feldspar, 9 – miaskite, 10 – corundum-feldspar, 11 – granitic postmiaskite, 12 – granitic amazonite.

мированные по радиологическим данным разных исследователей (Попова и др., 1982), согласуются с выявленной последовательностью формирования разных пегматитов в интервале 290–240 млн лет назад (цифры в скобках – число определений): сиенитовых – 287 млн лет (24), миаскитовых – 282 млн лет (32), корунд-полевошпатовых – 270 млн лет (11), гранитных амазонитовых – 240 млн лет (40). Для разных минералов из одной жилы данные радиологического возраста иногда явно противоречат наблюдаемым признакам последовательности кристаллизации.

В пределах возрастных групп и подгрупп выделены типы жильных образований, характеризующиеся общностью состава и/или структуры. Для большинства типов возрастные взаимоотношения пегматитов выявлены по пересечениям жил.

Гранитные домиаскитовые пегматиты развиты в эндо- и экзоконтактах Кисегачского гранитного массива, полевошпатовые сиенитовые пегматиты – преимущественно в восточном экзоконтакте Ильменогорского миаскитового массива (в породах кровли) и частью – в его эндоконтактовой зоне. Миаскитовые пегматиты локализованы в эндо- и экзоконтактах миаскитового массива, корунд-полевошпатовые – в сиенитах Центральной щелочной полосы и фенитах экзоконтактов миаскитового массива. Постмиаскитовые гранитные пегматиты, включая амазонитовые, распространены в метаморфических породах между Ильменогорским миаскитовым и Кисегачским гранитным массивами, а также участками – в Центральной щелочной полосе.

Распределение жил разного состава в южной части Ильменских гор показывает, что они приурочены к разновременным тектоническим зонам разной ориентировки. Положение активных тек-

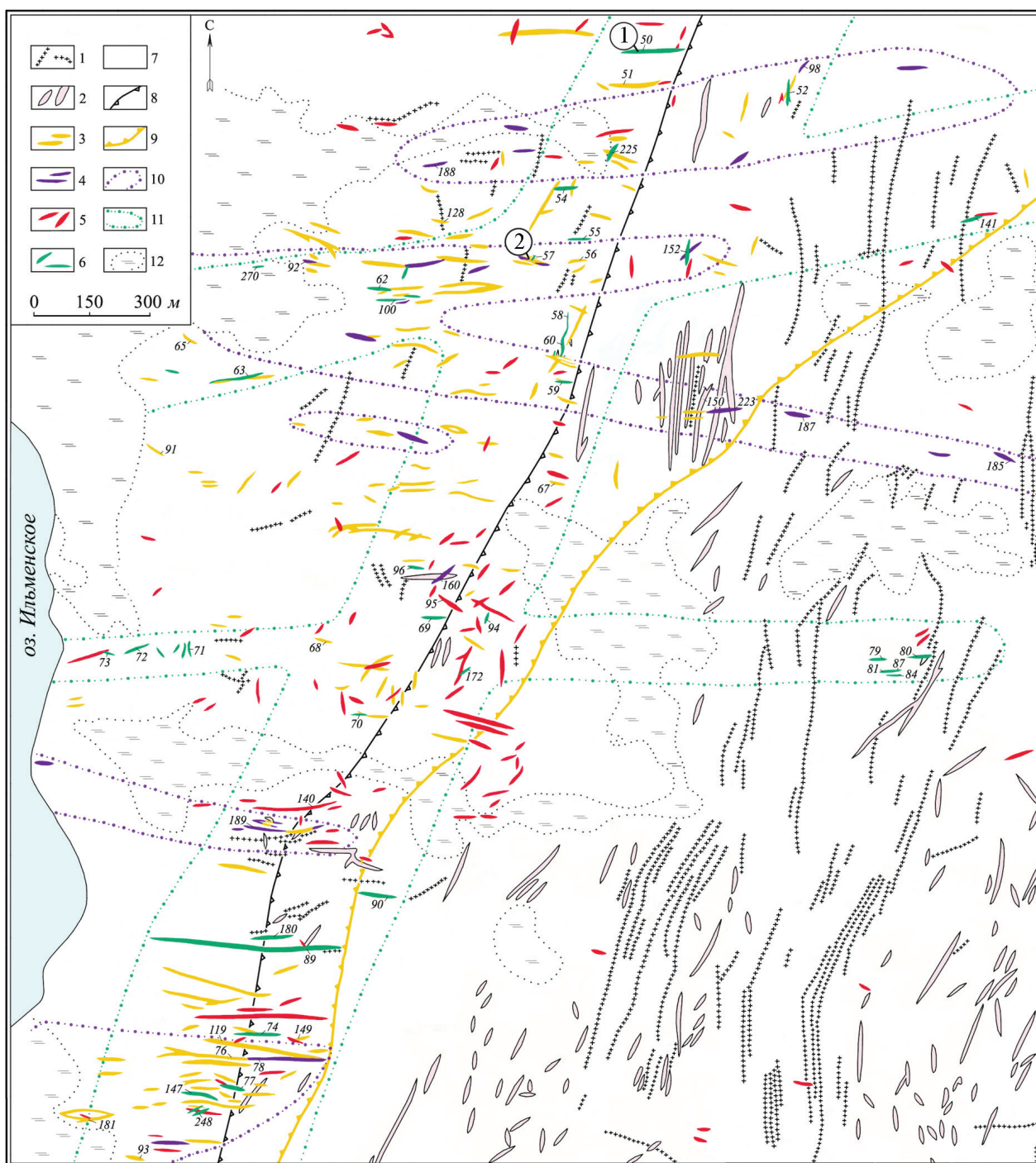


Рис. 3. Разновременные жильные (пегматитовые) поля южной части Ильменских гор. Схема составлена В.А. Поповым, В.И. Поповой, В.О. Поляковым (1980 г.).

1 – дайки гранитов; 2 – домиаскитовые гранитные пегматиты; 3 – полевошпатовые пегматиты; 4 – миаскитовые пегматиты; 5 – послемиаскитовые гранитные пегматиты; 6 – амазонитовые пегматиты; 7 – метаморфические породы (гнейсы, амфиболиты, кварциты); 8–11 – площади развития разновозрастных типов пегматитов; 12 – болота. Цифры – номера копей, цифры в кружочках – точки наблюдений экскурсии.

Fig. 3. Vein (pegmatite) fields of various ages in the southern part of the Ilmeny Mountains. Scheme is composed of V.A. Popov, V.I. Popova, V.O. Polyakov (1980).

1 – granite dikes; 2 – pre-miaskite granitic pegmatite; 3 – feldspar pegmatites; 4 – miaskite pegmatites; 5 – post-miaskite granitic pegmatite; 6 – amazonite pegmatite; 7 – metamorphic rocks (gneiss, amphibolite, quartzite); 8–11 – fields of pegmatites of various ages; 12 – swarms. Numbers – numbers of pits; numbers in circles – observation points of field trip.

тонических зон во времени смещалось с востока на запад, причем в ранних зонах преобладало субширотное растяжение (формировались субмеридиональные жилы), а более поздние щелочные сиенитовые и послемияскитовые гранитные пегматиты выполнили полости серий разнонаправленных (чаще широтных) трещин (рис. 3). Смена плана тектонических зон во времени отражает длительность становления жильного поля и различие (обособленность) магматических источников. Протяженность поля сиенитовых пегматитов на юг и юго-восток от миаскитового массива указывает на пологое погружение кровли массива.

Выделяются жильные поля пегматитов – Южное, Черемшанское, Савелькульское, Миассово-Таткульское, Северо-Таткульское, Селянкинское, Ишкульское; в их пределах пегматиты имеют длительную и очень сложную историю становления. В зависимости от задач в каждой группе можно выделить типы и подтипы по строению жил и составу главных и акцессорных минералов. Например, в жильном поле южной части Ильменских гор на площади ~8 км² выявлено 470 крупных жильных тел, из них 350 – пегматиты разного состава (рис. 3); нередко ранние пегматиты секутся более поздними и вскрыты копиями №№ 52, 57, 60, 63, 73, 74, 89, 149, 150, 152, 160, 223, 225, 248. Для других районов Ильменских гор подобные карты еще не завершены (Попова и др., 1982).

Строение пегматитовых тел, явления кристаллизации, перекристаллизации и метасоматоза, модели генезиса пегматитов

По проблеме генезиса пегматитов Ильменских гор известны три различных гипотезы: 1) кристаллизации минеральных агрегатов в полостях из расплавов-растворов, остаточных от кристаллизации магм (Ферсман, 1940 и др.); 2) перекристаллизации (укрупнения) минеральных агрегатов из обычных магматических пород за счет газов, оставшихся в закрытой системе (Заварицкий, 1944 и др.); 3) для негранитных пегматитов – метасоматическая гипотеза (Успенский, 1965 и др.). Суммируя наши данные и данные разных исследователей пегматитов Ильменских гор, можно отметить, что морфологические признаки явлений пегматитообразования больше всего соответствуют модели А.Е. Ферсмана – прямой кристаллизации минеральных агрегатов в полостях. Одним из таких признаков в ряде случаев

является форма наименее деформированных жил, где вмещающие полосчатые метаморфические породы одного контакта жилы не совмещаются или не прослеживаются в другом ее контакте, а пегматитовое тело включает различно ориентированные крупные ксенолиты вмещающих пород, что напрямую указывает на тектоническую природу полости, локализовавшей пегматит. Последующими тектоническими деформациями первичная форма жил видоизменяется, приобретая линзовидную или более сложную форму, что наиболее характерно для сиенитовых (полевошпатовых, миаскитовых, корундово-полевошпатовых) пегматитов (рис. 4). В таких жилах, как и в абсолютном большинстве тел гранитных пегматитов, есть участки сохранившейся структуры пегматита с зонами геометрического отбора минералов от зальбандов жил к центру (рис. 5), что указывает на кристаллизацию минерального агрегата в открытой полости, а не путем замещения вмещающих пород.

Форма некоторых камер и полостей жил осложнена проявлением растворения (рис. 6). Признаки, указывающие на проявление гравитации (минералогические отвесы, уровни, газогравитация, расслоение, асимметрия строения в горизонтальных и наклонных телах) известны только для кристаллизации в камерах и полостях. Они не встречаются в метасоматических и перекристаллизационных образованиях. Минералогические отвесы обнаружены во многих пегматитовых телах Ильменских гор (рис. 7). Так, в гранитных пегматитах постоянно наблюдается повышенное количество тяжелых минералов (граната, титанониобатов, магнетита и др.) на верхних гранях кристаллов кварца, полевых шпатов, слюд, топазов, а также наличие кумулятивных агрегатов в лежащих частях (зонах) тел. Нередко проявление силы тяжести видно и в асимметричной картине графических структур, когда вроски альбита располагаются только с верхней стороны ихтиоглиптов кварца в калиевом полевошпате. Судя по данным документирования пегматитовых тел (Попова и др., 1982), в некоторых пегматитовых полостях происходило всплывание легких минералов в верхнюю часть полости (например, включения графита в полевошпате в жиле копи 14 – рис. 8) с образованием иногда «мониминеральных» графитовых агрегатов.

Признаки перекристаллизации минералов зафиксированы почти во всех типах пегматитов. Наиболее обычна и легко узнаваема перекристаллизация (рекристаллизация, грануляция) кварца и каль-

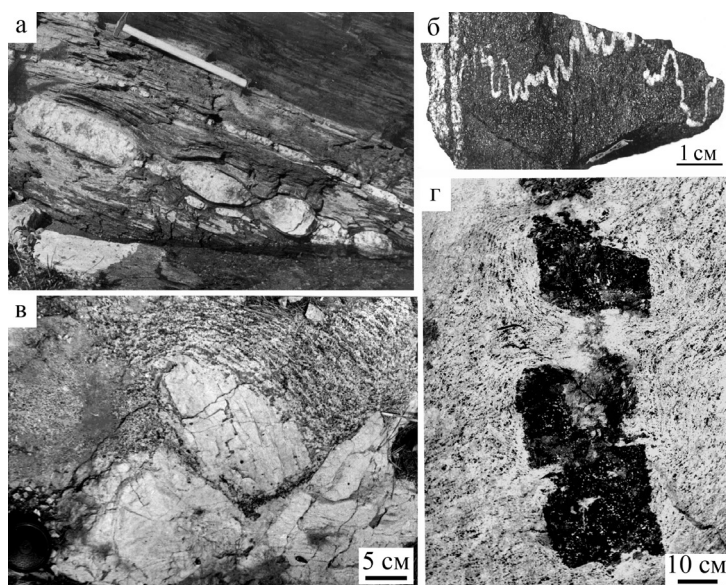


Рис. 4. Явления пластической и хрупкой деформации в пегматитах и вмещающих породах:

а – будинаж и расчленение пегматитовых тел; б – образование птигматитов; в – отрыв и разворот блоков крупных кристаллов полевого шпата в миаскитовых пегматитах; г – разрыв и смещения полевошпат-пироксеновой жилы в сиените.

Fig. 4. Phenomena of plastic and brittle deformation in pegmatites and host rocks:

а – boudinage and fragmentation of pegmatite bodies; б – formation of ptygmatic veins; в – fissure and reversal of blocks of large feldspar crystals in miaskite pegmatites; г – rupture and displacement of a feldspar-pyroxene vein in syenite.

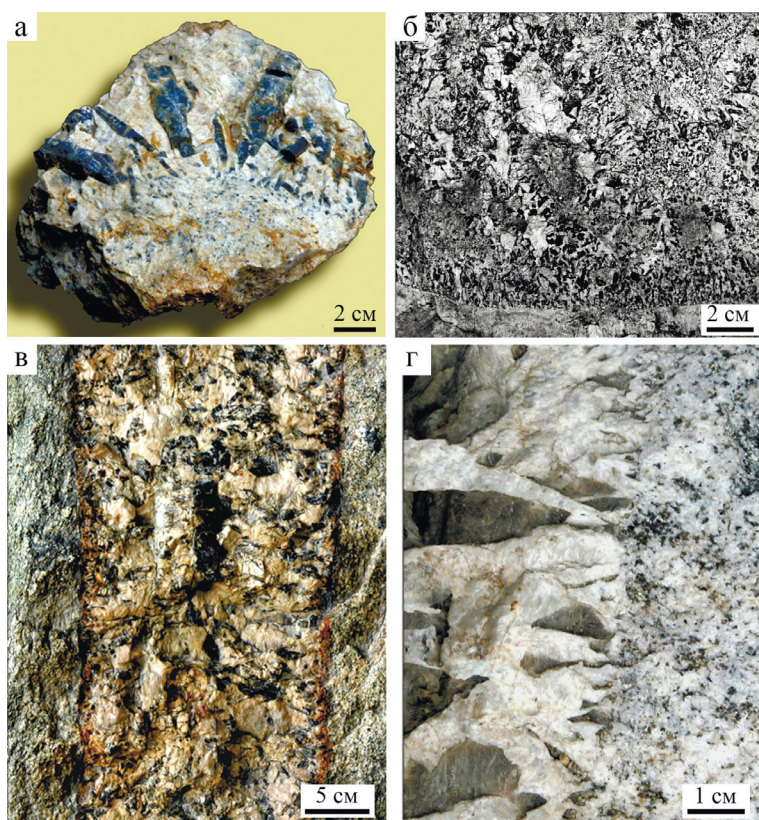


Рис. 5. Геометрический отбор в пегматитовых телах: сиенитовых корундовых (а), поздних гранитных (б), ранних гранитных (в), миаскитовых (г).

Fig. 5. Geometric selection in pegmatite bodies: syenitic corundum (а), late granitic (б), early granitic (в), miaskitic (г).

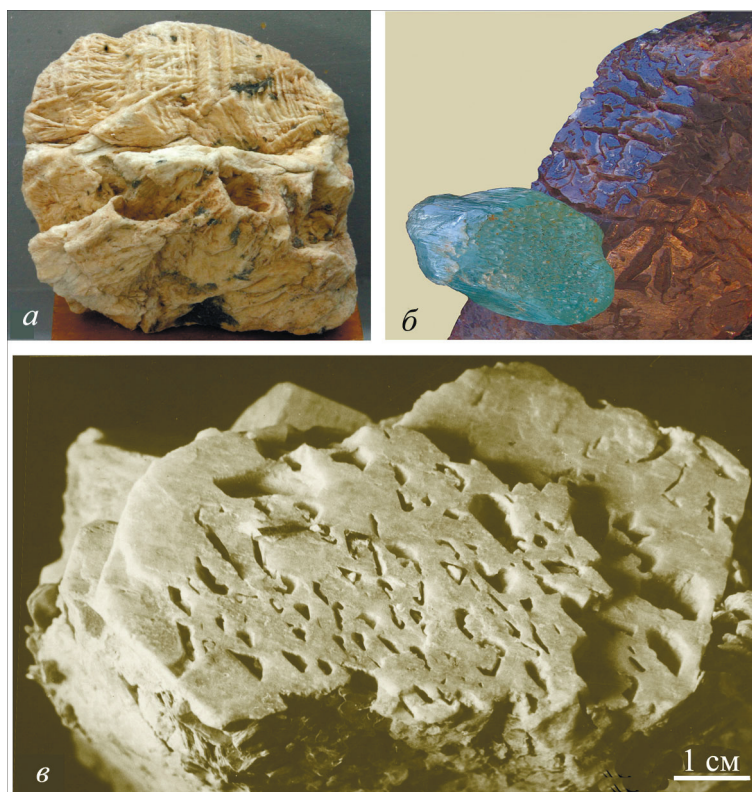


Рис. 6. Природное растворение минералов пегматитов:

а – кварца в сростке расщепленного альбита; б – берилла и дымчатого кварца; в – кварца из графических сростаний с калиевым полевым шпатом.

Fig. 6. Natural dissolution of pegmatite minerals:

а – quartz intergrown with split albite; б – beryl and smoky quartz; в – quartz from graphic aggregates with K-feldspar.



Рис. 7. Минералогический отвес: кристаллы альмандина на верхних гранях блочного альбита (с частичным одновременным ростом минералов) в копи № 257.

Fig. 7. Mineralogical plumb line: almandine crystals on upper faces of blocky albite (with partial simultaneous growth of minerals) in pit no. 257.



Рис. 8. Сферолиты графита, захваченные кристаллом калиевого полевого шпата в копи № 14.

Fig. 8. Spherulites of graphite captured by K-feldspar crystals in pit no. 14.

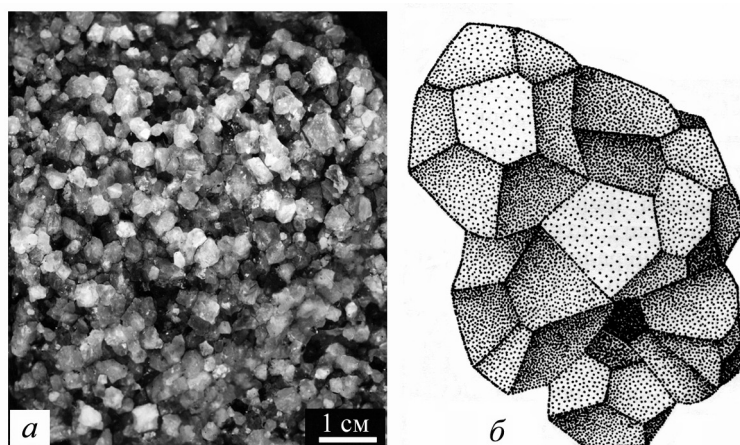


Рис. 9. Перекристаллизованный кальцит в карбонатит-пегматитах:

а – вид выветрелого агрегата полиэдров кальцита (копь № 154); б – модель полиэдров перекристаллизации по А.Г. Жабиню.

Fig. 9. Recrystallized calcite in carbonatite-pegmatite:

а – weathered aggregate of calcite polyhedra (pit no. 154); б – model of recrystallized polyhedra according to A.G. Zhabin.

цита (рис. 9); встречаются зернистые агрегаты полевых шпатов, апатита, титанита на месте бывших крупных и гигантских индивидов этих минералов. Фактически перекристаллизация в пегматитах привела к уменьшению величины зерен породообразующих минералов, возникшей ранее при кристаллизации (Попов, 2011).

Явление перекристаллизации (движение границ у всесторонне соприкасающихся индивидов в твердом агрегате) принципиально отличается от прямой кристаллизации как в полостях, так и при метасоматозе анатомическим строением и типом поверхностей индивидов. В соответствии с законами анатомии кристаллов, сформулированными Д.П. Григорьевым (1971) при росте (кристаллизации) возникают зональные, секториальные, блочные, расщепленные, скелетные, перистые, сдвоенные индивиды, т. е. отсутствуют признаки стремления к минимуму энергии минеральных индивидов (как того требуют теории равновесной кристаллизации). Многие минералы пегматитов Ильменских гор имеют эти первичные неоднородности (рис. 10). Полиэдры перекристаллизации изометричны и однородны по составу, поверхность их представлена плавно изогнутыми «гранями» изометричных зерен; величина полиэдров перекристаллизации, обусловленная поверхностной энергией, не превышает 10 мм (Попов, 2011). Перекристаллизационных пегматитов нет ни в Ильменских, ни в Вишнёвых горах и, вероятно, нигде в мире. Но явления перекристаллизации в первично

крупно-гигантозернистых структурах пегматитов наблюдаются часто, однако перекристаллизация уничтожает крупные индивиды, превращая их в мелко-среднезернистый агрегат.

Метасоматоз в пегматитах проявлен так же, как в любых других системах, т. е. устанавливается по присутствию псевдоморфоз и метакристаллов (рис. 11). Эти признаки метасоматоза ранее не были использованы при выделении так называемых «замещающих комплексов» – кварц-мусковитовых и альбитовых зон. Далеко не все мусковитовые и альбитовые агрегаты в пегматитах имеют метасоматическую природу. В пегматитах Ильменских гор обнаружены псевдоморфозы мусковита и иллита по кордиериту, топазу и корунду, титанита по ильмениту и ильменита по титаниту, гематита по магнетиту, канкринита по нефелину, содалита по нефелину, цеолитов по нефелину, пирита по пирротину и другие. Указания ряда исследователей (Н.М. Успенского, С.А. Руденко, В.Г. Фекличева; и др.) на метакристаллы мусковита, альбита, циркона, пирокла, корунда, берилла были основаны на признаках ровности границ метакристаллов в плоских сечениях агрегатов (шлифах, аншлифах, полировках). Объемное препарирование минералов показало, что в большинстве случаев минералы имеют индукционную (компромиссную) поверхность или комбинированную (часть поверхности индукционная, другая часть – идиоморфная). Мусковитовые и альбитовые парагенезисы обычно являются составной частью зональных пегматитовых тел, т. е.

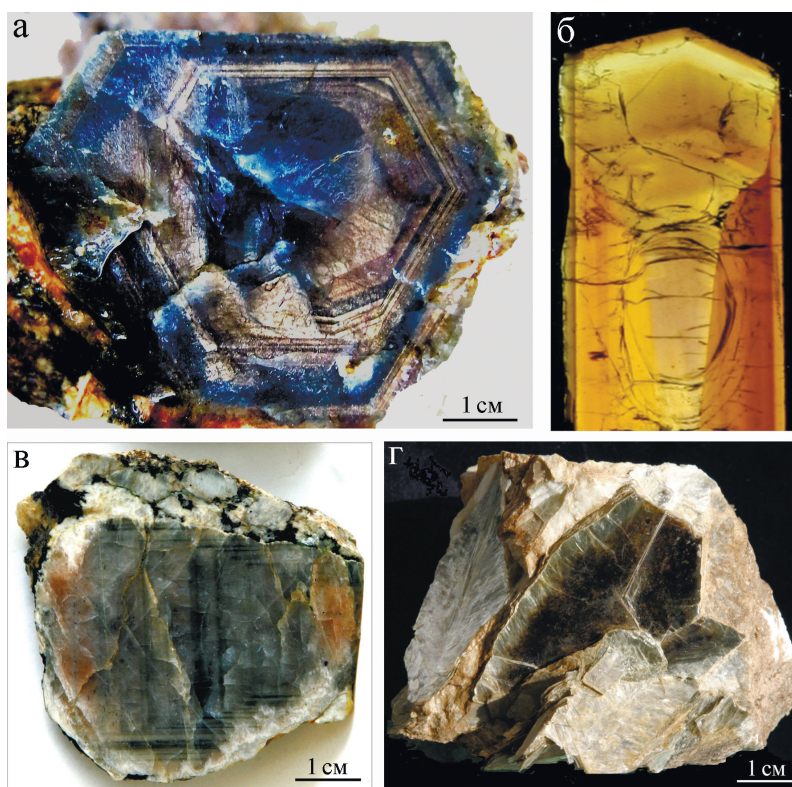


Рис. 10. Ростовая анатомия кристаллов из пегматитов Ильменских гор:

а – корунд, копь № 298; б – шерл, копь № 232; в – нефелин, копь № 240; г – блочный мусковит в виде зоны в альбит-калишпатовом пегматитовом агрегате, копь № 247.

Fig. 10. Growth anatomy of crystals from pegmatites of the Ilmeny Mountains:

а – corundum, pit no. 298; б – sherl, pit no. 232; в – nepheline, pit no. 240; г – blocky muscovite as a zone in albite-Feldspar pegmatite aggregate, pit no. 247.

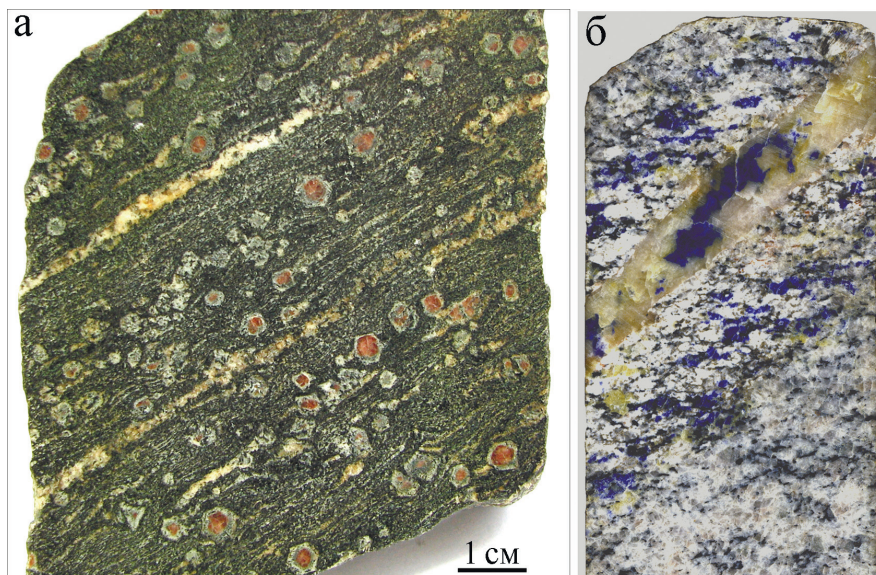


Рис. 11. Гранатовые амфиболиты (а) с частичными и полными магнетит-амфибол-плагиоклазовыми псевдоморфозами по гранату (вмещающие породы некоторых гранитных пегматитов на западном берегу озера Аргаяш) и содалит-канкринитовая жила заполнения в содалитизированном миаските (скв. 2000; б).

Fig. 11. Garnet amphibolites (а) with partial and complete magnetite-amphibole-plagioclase pseudomorphoses after garnet (host rocks of some granitic pegmatites in the western bank of Lake Argayash) and sodalite-cancrinite fill vein in sodalitized miaskite (borehole 2000; б).



Рис. 12. Бластомилонит (реологит) в амазонитовом гранитном пегматите копи № 63 (копь Гельвиновая).

Fig. 12. Blastomylonite (rheologite) in amazonite granite pegmatite of pit no. 63 (pit Gelvinovaya (Helvite)).

кристаллизовались в полостях, а не метасоматически. Явления метасоматоза и перекристаллизации обычно ведут к уничтожению крупно-гигантозернистой структуры в пегматитах, т. е. в общем случае не являются пегматитообразующими в смысле крупности индивидов.

Минеральные агрегаты всех типов пегматитов в Ильменских горах в той или иной мере подверглись пластической деформации. Давно известны изогнутые и скрученные кристаллы ильменита, апатита, полевого шпата в пегматитах и карбонатах гор Фирсовой и Лохматой. В наиболее поздней субмеридиональной жиле амазонитового пегматита копи № 59 выявлены четыре секущие друг друга разноориентированные зоны «бластомилонитов». Минеральные агрегаты, испытывавшие реологическое состояние, по нашему мнению, точнее называть «реологитами», а не «бластомилонитами», поскольку термин «бластез» морфологически не определен, а термин «милонит» предполагает тонкое механическое дробление. В реологитах нередко пластические деформации прошли без тонкого дробления, а перекристаллизация пластически деформированных индивидов приводит к более мелкозернистой структуре, чем исходный минеральный агрегат (рис. 12).

Пегматиты Ильменских гор – природный музей синтаксии и эпитахии минералов. Самыми классическими синтаксическими срастаниями является кварц-полевошпатовая «графика». Замечательны «солнечные» полевые шпаты, нефелины и канкриниты. Описаны ориентированные срастания разных полевых шпатов (синтаксические пертиты,

которые часто неверно относят к перекристаллизационным или метасоматическим), мусковита и биотита, амфибола и пироксена, биотита, пироксена и амфибола, лейхтенбергита и клинохлора, берилла и кордиерита, самарскита и колумбита и многих других. Диагностика синтаксии слюд, амфиболов и пироксенов (рис. 13), в отличие от метасоматических и распадовых соотношений, представляется весьма важным наблюдением для моделирования процессов минералообразования (рис. 14).

Телескопирование продуктов разных процессов характерно для пегматитов, подобно другим сложным минеральным телам. Совмещение ранних гранитных пегматитов с сиенит-пегматитами, сиенит-пегматитов с миаскит-пегматитами, щелочных гранит-пегматитов с амазонитовыми пегматитами не является редкостью в пегматитовых полях Ильменских гор. По пересечениям гранитов и гранитных пегматитов Кисегачского массива полевошпатовыми жилами, связанными со щелочным массивом, устанавливается более раннее формирование гранитов по сравнению с миаскитами. Разновозрастные пегматиты отличаются не только строением жил и наличием своеобразной акцессорной минерализации, но и составом некоторых характерных минералов. В пространстве пегматитового тела могут совмещаться не только продукты длительного пегматитового процесса, развивающегося в жильном поле, но и продукты более поздних процессов – грейзенизации, березитизации, аргиллизации, гипергенеза, интенсивность которых в Ильменских горах обычно мала.

Что касается источника расплавов-растворов в модели А.Е. Ферсмана, то этот вопрос следует отнести в «поле неопределенности». В ранних моделях метаморфизм горных пород связывали с интрузивными телами. В настоящее время более реальными кажутся модели, где метаморфизм и магматизм являются комплементарными (дополнительными до единого целого) явлениями в общем потоке тепла и масс. Конечно, нет данных о масштабах колонны тепломассопереноса (которая могла породить разные расплавы и флюиды), о ее структуре (зональности), количественных соотношениях магм (расплавов-растворов), (водных) растворов, газов и о многих других параметрах систем. Обнаруженные В.А. Симоновым (1978) в нефелине миаскитовых пегматитов многофазовые включения расплава-рассола гомогенизируются при 670–730 °С, расчетное давление при минералообразовании 2.5–3.3 кбар с резким падением до

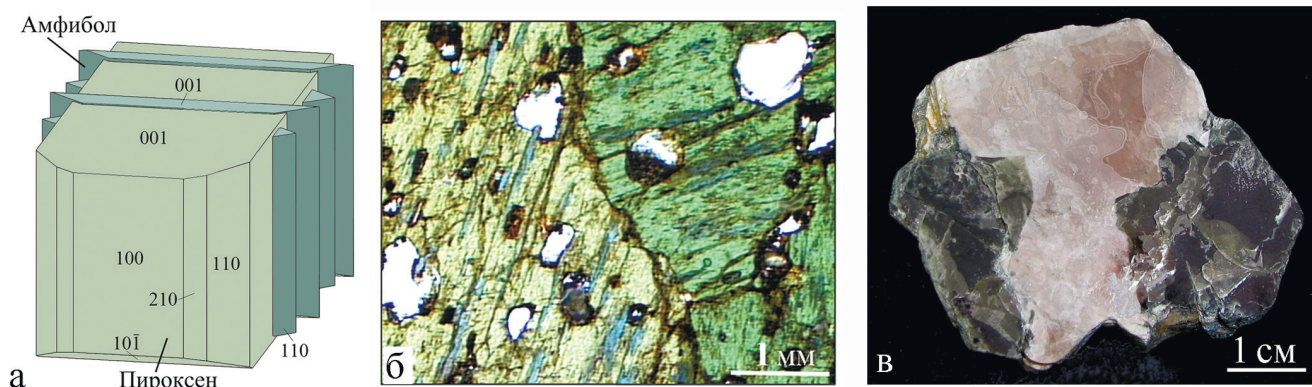


Рис. 13. Синтаксические сростания амфибола с пироксеном (а, б) и мусковита (розоватый) с биотитом (зелено-вато-серый) (в):

а – кристаллографическая модель; б – шлиф, без анализатора; в – штуф (спайность по {001} непрерывно прослеживается из одного минерала в другой).

Fig. 13. Syntactic intergrowths of amphibole with pyroxene (a, б) and muscovite (pinkish) with biotite (greenish gray) (в):

а – crystallographic model; б – thin section, without analyzer; в – hand specimen (cleavage after {001} is continuously traced from one mineral to another).

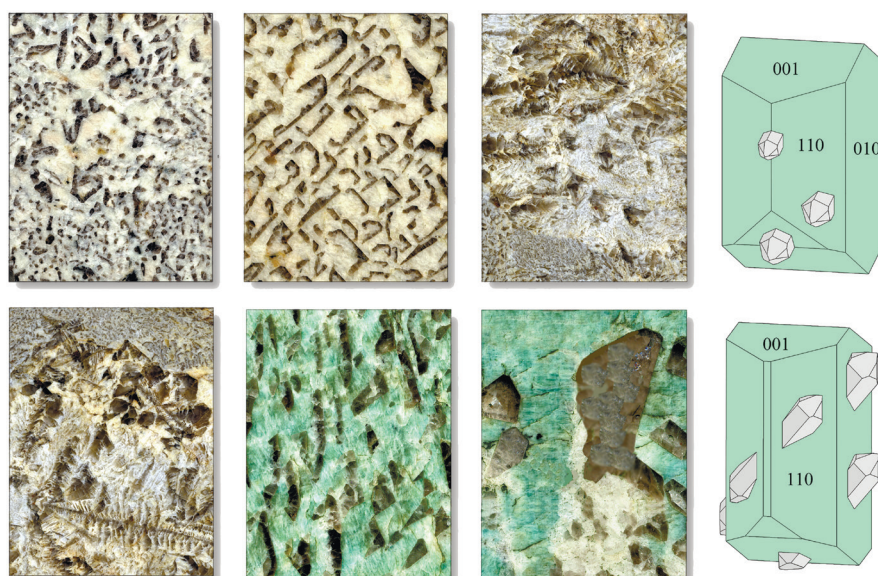


Рис. 14. Синтаксия кварца с полевыми шпатами:

слева – разнообразие структур синтаксических сростаний в плоском сечении; справа – объёмные модели разных кристаллографических законов сростаний.

Fig. 14. Syntaxy of quartz with feldspar:

on the left – a variety of structures of syntactic intergrowths in thin section; on the right – 3D models of various crystallographic laws of intergrowths.

1–1.3 кбар при трещинообразовании; в составе газовой фазы включений определены H_2S , SO_2 , SO_3 , HCl , CO_2 , CO , H_2 , N в переменном количестве. По совокупности имевшихся в начале XX века данных А.Е. Ферсман (1940) полагал, что более ранние высокотемпературные графические зоны пегматитов формировались при температурах $\sim 700^\circ C$,

промежуточные зоны – $600^\circ C$, центральные относительно низкотемпературные графические зоны – $500^\circ C$. Близкие к названным интервалы температур определены методом гомогенизации расплавных включений ($665\text{--}600^\circ C$) в кварце из графических амазонитовых зон пегматитов (устное сообщение О.Н. Косухина).

Акцессорные минералы пегматитов

Из 340 минералов, установленных к настоящему времени в пегматитах Ильменских гор, преобладают силикаты и алюмосиликаты (~ 50 %) и оксиды (~ 25 %); карбонаты, фосфаты, сульфаты, ванадаты и молибдаты в сумме составляют ~ 10 %; другие классы (сульфиды, самородные и др.) – единичны. Породообразующие минералы гранитных пегматитов – кварц и полевые шпаты; сиенитовых – полевые шпаты, слюды, пироксены, амфиболы и нефелин; в некоторых типах пегматитов к породообразующим можно отнести либо корунд, либо ильменит, либо биотит и Са-Mg-карбонаты. Практически все эти минералы в разных пегматитовых телах (гранитных, сиенитовых, ультрамафитовых, карбонатитовых, слюдитовых) встречаются в роли акцессорных (т. е. их объем менее 1–5 %).

Примеры распределения акцессорных минералов в пегматитовых телах

Циркон. Морфологические наблюдения размещения индивидов циркона в телах вмещающих пород и пегматитов производятся редко вследствие малой заметности их при макронаблюдениях. Если в шлихах из коры выветривания или искусственных протолочках отмечаются цирконы разной формы и цвета, всегда возникает вопрос об их относительном возрасте в сложном минеральном теле. Поскольку в шлихах и протолочках пространственные связи между минералами разрушены, решить вопрос о генерациях циркона весьма сложно. История исследований акцессорных минералов изобилует множеством примеров частичного решения вопроса об их генерациях в сложных телах, но полноты и надежности либо нет, либо вопрос о полноте не ставится. В пегматитах Ильменских гор проблема генераций минералов также не решена, но некоторые фрагменты онтогенеза намечены на основе имеющейся неполной информации.

В Блюмовской копии № 50 известен Академический ход, вскрывающий жилу амазонитового гранитного пегматита в поперечном сечении (рис. 15). Последовательность образования пегматитовых зон, сложенных породообразующими минералами, выстраивается вполне проверяемо. Циркон представлен мелкими редкими выделениями и в Академическом ходе макроскопически не отмечался. В отвалах его можно найти при просмотре образ-

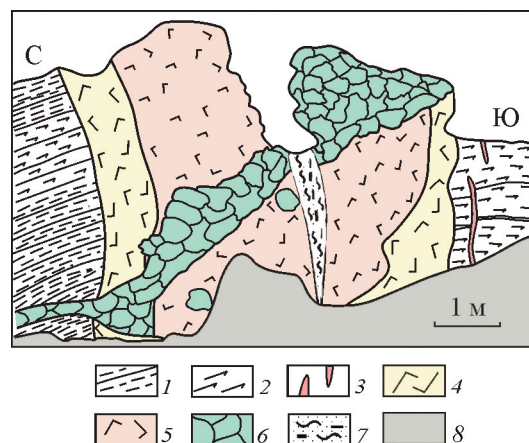


Рис. 15. Схема строения жилы амазонитового гранитного пегматита в разрезе по Академическому ходу в Блюмовской копии по (Поляков, 1982).

1 – гнейс; 2 – амфиболит; 3 – древний гранитный пегматит; 4 – ранняя крупнографическая зона пегматитовой жилы; 5 – мелкографическая зона пегматитовой жилы; 6 – блоковый амазонитовый пегматит с топазом и бериллом; 7 – пластически деформированный кварц-альбитовый агрегат с самарскитом; 8 – почва.

Fig. 15. Schematic structure of vein of amazonite granitic pegmatite in section of Akademichesky course in the Blyumov pit after (Polyakov, 1982).

1 – gneiss; 2 – amphibolite; 3 – ancient granite pegmatite; 4 – early coarse-graphic zone of pegmatite vein; 5 – small-graphic zone of pegmatite vein; 6 – block amazonite pegmatite with topaz and beryl; 7 – plastically deformed quartz-albite aggregate with samarskite; 8 – soil.

цов под биноклем. Неполный набор находок (наблюдения 70–80 гг. прошлого столетия) позволяет говорить минимум о четырех генерациях циркона (рис. 16). Две ранние генерации отличаются изометричным обликом, две поздние – столбчатым. Последний циркон имеет зеленый цвет и обладает «радиоактивным» двориком.

Поздний длиннопризматический циркон в Блюмовской копии был задокументирован в 1958 г. А.Г. Жабиным (рис. 17) в уникальном образце, в котором наблюдались индукционные поверхности одновременного роста между биотитом, полевым шпатом, гранатом, самарскитом, колумбитом, магнетитом, монацитом, цирконом и мусковитом. Генетическая интерпретация подобных образцов привела многих исследователей пегматитов к неправильной модели метасоматического образования акцессорных минералов. Это якобы следовало из того, что они синхронны с биотитом, а биотит (особенно – мечевидный) считался идиоморфным по отношению к кварцу и калиевому полево-

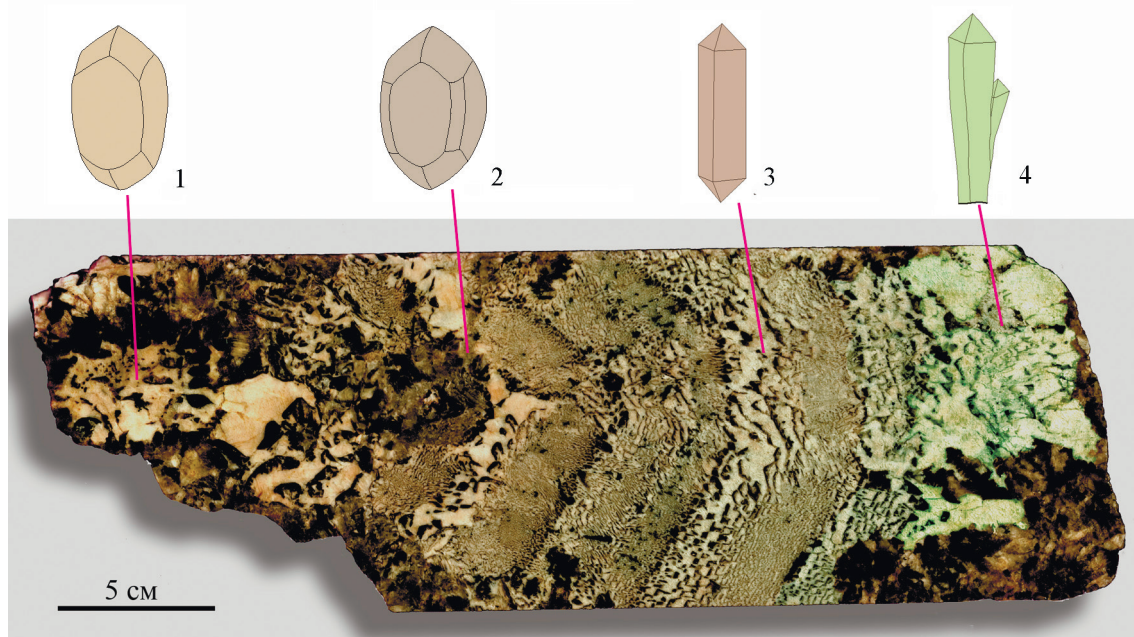


Рис. 16. Последовательные генерации циркона в гигантском индивиде калиевого полевого шпата с зонами кварцевой «графики» из копи № 59.

Fig. 16. Successive generations of zircon in a giant individual of K-feldspar with zones of quartz graphics from pit no. 59.

шпату и, следовательно, по этим представлениям являлся метакристаллом. Соответственно, если биотит является метакристаллом, то и синхронные с ним минералы – метасоматические. Ошибка заключалась в неправильной диагностике генетического типа поверхностей индивидов биотита. Его кристаллы имеют два типа поверхностей – индукционную и идиоморфную (в конце роста). На рисунке 17 показано несколько минералов, имеющих два типа поверхностей (гранат, самарскит, монацит, рис. 18). Ошибки в интерпретации типов поверхностей на кристаллах привели многих исследователей к убеждению, что в пегматитах абсолютно преобладают акцессорные минералы метасоматического генезиса (Успенский, 1965).

Еще одна сложность заключается в применении уран-свинцового метода для определения «абсолютного» возраста минералов, выросших в свинецсодержащих средах. В Блюмовской копи встречены парагенезисы циркона и монацита с амазонитом и галенитом (между минералами наблюдаются индукционные поверхности одновременного роста). Свинец входит в состав галенита и амазонита, в котором образует центры зеленой окраски. Следует ожидать, что свинец мог войти в каком-то количестве в кристаллическую решетку циркона и

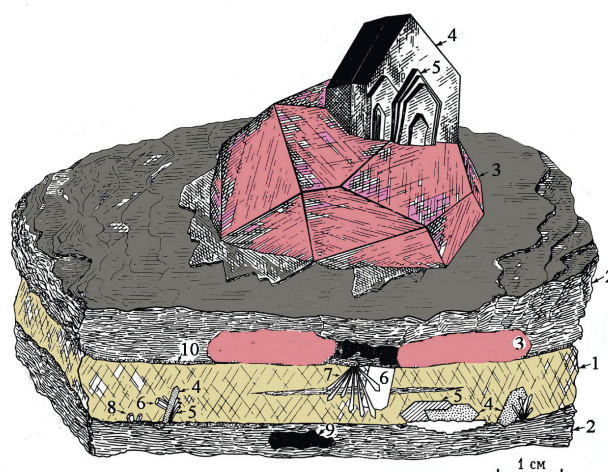


Рис. 17. Акцессорные минералы в крупном сростке калиевого полевого шпата с расщепленным биотитом из Блюмовской копи.

1 – калишпат; 2 – биотит; 3 – гранат; 4 – самарскит; 5 – колумбит; 6 – монацит; 7 – циркон (циртолит); 8 – циркон (малакон), 9 – магнетит; 10 – мусковит. Рисунок А.Г. Жабина 1958 г., цвет добавлен В.А. Поповым.

Fig. 17. Accessory minerals in a large intergrowth of K-feldspar with split biotite from Blyum pit.

1 – calishpate; 2 – biotite; 3 – garnet; 4 – samarskite; 5 – columbite; 6 – monazite; 7 – zircon (cirtolite); 8 – zircon (malacone); 9 – magnetite; 10 – muscovite. Sketch by A.G. Zhabin of 1958; color is added by V.A. Popov.

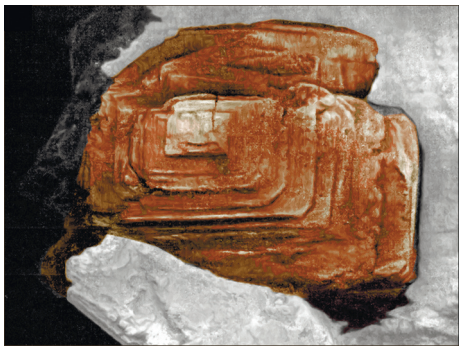


Рис. 18. Индукционная поверхность на монаците в кварце из Блюмовской копи.

Фото А.Г. Жабина, цвет добавлен В.И. Поповой.

Fig. 18. Compromise growth surface on monazite in quartz from Blyum pit.

Photo by A.G. Zhabin; color is added by V.I. Popova.

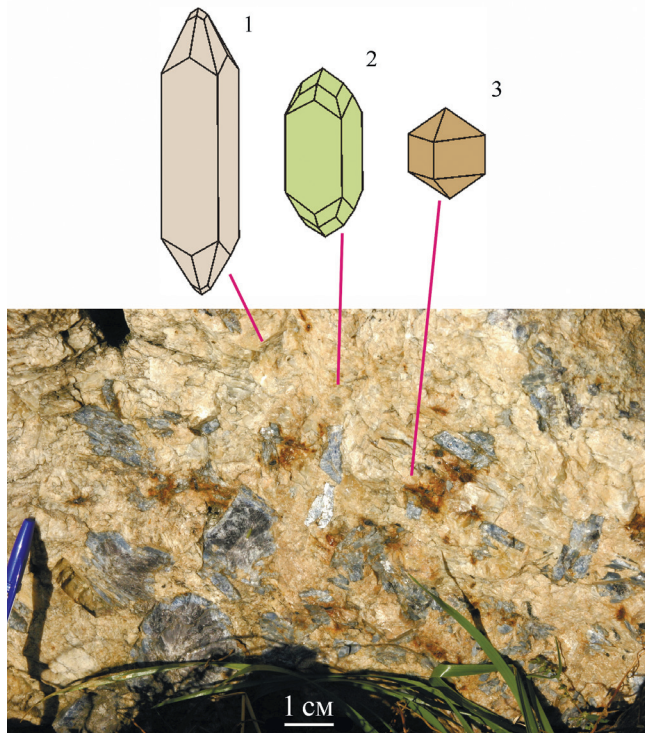


Рис. 20. Генерации циркона в корунд-полевошпатовом агрегате копи № 298 (по данным В.Ф. Жданова и В.О. Полякова).

Fig. 20. Zircon generations in corundum-feldspar aggregate of pit 298 (according to materials of V.F. Zhdanov and V.O. Polyakov).

монацита при их совместном росте с амазонитом и галенитом. Если это так, то использование уравнения распада урана для моделирования «абсолютного» возраста минералов может существенно измениться.

Другой пример с генерациями циркона относится к корунд-полевошпатовой пегматитовой



Рис. 19. Глыба корунд-полевошпатового пегматита из копи № 298.

Fig. 19. Block of corundum-feldspar pegmatite from pit no. 298.

жиле копи № 298. В этой жиле в центральной части концентрация корундовых кристаллов величиной до 15 см достигает иногда 50 % объема (рис. 19). Корунд большей частью кристаллизовался одновременно с полевым шпатом. В поздних зонах роста корунда часто отмечаются крупные кристаллы синхронных с ним колумбита (до 15 мм), самарскита (до 60 мм) и монацита (до 25 мм). Цирконы отмечались в корунде и синхронном с корундом полевым шпате. Цирконы имеют разный габитус и цвет. По относительному возрасту они расположились в порядок от ранних частей индивидов полевого шпата и корунда к поздним (схема на рис. 20). Габитус циркона менялся во времени от длинно- к короткопризматическому, а форма корунда изменялась от короткопризматического к таблитчатому, что может соответствовать некоторому увеличению щелочности среды кристаллизации к концу процесса в пегматитовой жиле (Попов, 2011).

Берилл. В гранитных пегматитах Ильменских гор акцессорный берилл отмечался нередко, но иногда встречались «занорышевые» участки с высокой концентрацией этого минерала. В разное время демонстрировались крупные аквамарины среди гигантозернистого кварца (рис. 21а, копь № 90), кристаллы зеленовато-желтого берилла величиной до 60 см в полости жилы копи № 232. Показательны скопления аквамарина по периферии полости, в которую позднее внедрился гранит-аплит: в некоторых сечениях агрегата создается впечатление, что кристаллы берилла полностью погружены в аплитовую массу (копь № 242, рис. 21б). Во всех случаях основания кристаллов берилла имеют ин-

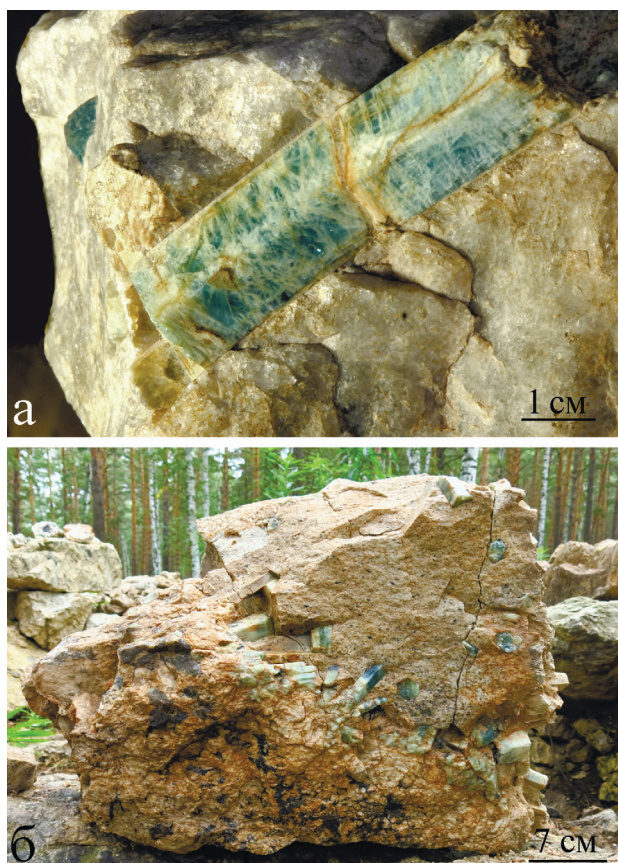


Рис. 21. Берилл (аквамарин) в ядерном кварце копи № 90 (а) и аплитовидном агрегате копи № 242 (б).

Fig. 21. Beryl (aquamarine) in a nuclear quartz of pit no. 90 (a) and aplite aggregate of pit no. 242 (b).

дукционную поверхность одновременного роста с кварцем и полевым шпатом, в то время как средняя часть и головки кристаллов имеют идиоморфную поверхность. Следовательно, их рост закончился, а вмещающие минералы продолжали расти (иногда с перерывом). Берилл, таким образом, остается акцессорным минералом при расчете на весь объем пегматитовой жилы, но в локальном участке он становится породообразующим минералом.

Графит. В пегматитовых телах (гранитных, сиенитовых, карбонатитовых) акцессорный графит встречается сравнительно редко, выделения его мелки (до 3–5 мм). В процессе картирования зафиксированы метасоматические зоны графитизации (копи №№ 120 и 210), которые пересекают и пегматитовые жилы, и вмещающие породы. В пегматитовой жиле копи № 14 наблюдались крупные скопления графита, синхронные с кварцем и полевым шпатом, в верхней части бывшей на момент формирования пегматитового тела полости вследствие всплытия его в расплаве-растворе благодаря малой плотности. Как любые другие минералы, графит в Ильменских горах встречается в кристаллах разного облика (пластинчатый, изометричный, столбчатый), есть двойники, расщепленные и блочные индивиды, сферокристаллы и сферолиты, отмечалась смена форм в одном зерне (рис. 22 а). Разнообразны парагенезисы графита. Наблюдались синтаксические сростки графита со слюдами по {001} (рис. 22б).

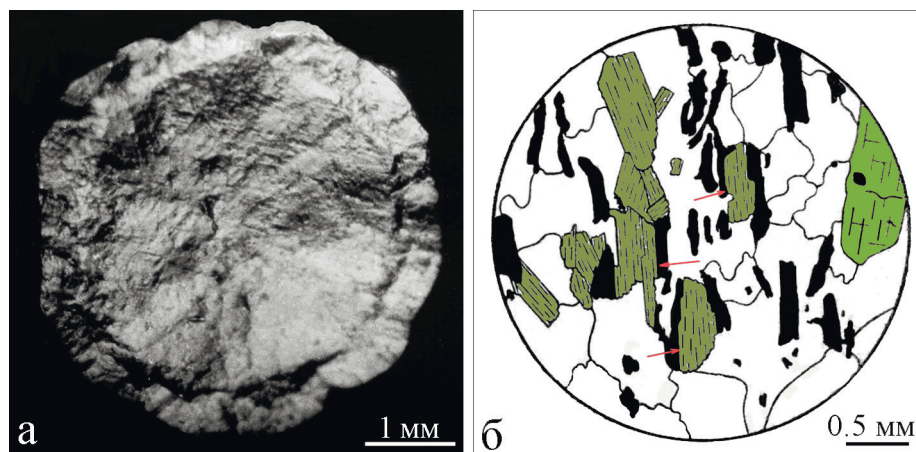


Рис. 22. Зональный кристалл графита (а, копь № 228) и синтаксический с биотитом графит Ильменских гор (б, рисунок по шлифу, копь № 14).

Черное – графит, зеленое – биотит, бесцветное – кварц.

Fig. 22. Zonal graphite crystal (a, pit no. 228) and syntactic graphite with biotite of the Ilmeny Mountains (б, sketch after thin section, pit no. 14).

Black – graphite, green – biotite, colorless – quartz.

Некоторые замечания к методике исследования акцессорных минералов

Каменная летопись в пегматитах Ильменских гор очень сложная и частично отражает историю развития метаморфизма, гранитного и щелочного магматизма в этом блоке земной коры. Во всех типах пегматитов установлены явления гравитации и геометрического отбора от контактов внутрь пегматитовых тел, свидетельствующие о кристаллизации минералов в полостях. Жильные пегматитовые поля формировались длительно на протяжении крупных геологических отрезков времени становления магматических и метаморфических формаций. Конкретные пегматитовые тела отражают лишь часть истории развития пегматитовых полей. Полости в геологических телах возникали, очевидно, на протяжении всей истории деформаций. Все пегматитовые тела испытали многократные пластические и хрупкие деформации. Даже в наиболее поздних амазонитовых гранитных пегматитах наблюдалось до четырех систем бластомилонитов (по предложенной нами терминологии – реологитов), секущих друг друга. Все явления, установленные в пегматитовых телах, каким-то образом происходили и во вмещающих породах, где дополнительно были и другие явления, ярко не отмеченные природой в пегматитах.

Серии разновременных пегматитовых тел как бы «сшивают» геологические блоки с разной историей (онтогенезом) и позволяют выяснить относительный возраст их через задокументированные пересечения. В то же время разброс данных «абсолютного» возраста по ильменогорским миаскитам и кисегачским гранитам не позволяет надежно определить последовательность их образования (множества перекрываются).

Акцессорные минералы в пегматитовых телах жильных полей Ильменских гор возникали на протяжении всей длительной истории их формирования (онтогенеза). Если ставить задачу моделирования условий образования сложных минеральных тел и их «абсолютного» возраста по акцессорным минералам, необходимо непременно решить сначала задачу относительного возраста всех акцессорных минералов и их генераций с вмещающими породообразующими минералами (создать модель онтогенеза).

В процессе онтогенетических наблюдений выясняется, что акцессорные минералы могут оказывать: 1) протокристаллами, 2) частично синхронными

с породообразующими и 3) метакристаллами. При частично одновременной кристаллизации акцессорного и породообразующего минерала (например, циркона в зоне роста индивида полевого шпата) необходимо изучить анатомическое устройство обоих минералов с целью определения возможности каких-либо генетических интерпретаций. Оба минерала обязательно зональны и секториальны, и условия начала и конца кристаллизации могут существенно отличаться. Конкретные значения «абсолютного» возраста акцессорного минерала никогда нельзя приписывать породному телу в целом (дайке, жиле, штоку, толще, фации, зоне), пока не выявлен онтогенез этого тела и участие изучаемого акцессорного минерала в рассмотренном онтогенезе.

Если в процессе интерпретации результатов измерения соотношений изотопов в минерале приходится прибегать к размышлениям об открытости-закрытости изотопной системы, необходимо искать морфологические признаки диффузии изотопов в анатомической картине кристалла (размытость зон и границ секторов по периферии, в полостях деформации и около трещин).

Онтогенез тел горных пород является суперпозицией онтогенеза породообразующих и акцессорных минералов и их агрегатов. В телах горных пород минералы могут быть одновременными (парагенезисы), частично одновременными и разновременными (ассоциации). В зависимости от постановки задач исследований минеральных тел (технологических или генетических) определяется необходимость специальных исследований относительного возраста минералов. В генетических построениях определение относительного времени кристаллизации совместно находящихся минералов совершенно необходимо как для физико-химического моделирования, так и для моделирования «абсолютного» возраста. При использовании акцессорных минералов в генетических построениях важно не только устанавливать признаки синхронности их с породообразующими минералами, но и регистрировать их приуроченность к определенным последовательным зонам роста более крупных индивидов породообразующих минералов. Это связано с тем, что в общем случае начало роста минералов в кристаллизационных системах отличается чем-либо от условий кристаллизации в конце, что фиксируется в зонально-секториальном строении кристаллов. Сами акцессорные минералы тоже являются неоднородными – зональными и

секториальными, и требуют адекватного исследовательского подхода.

Относительный возраст акцессорных минералов определяет методику опробования и подсчета их «запасов» в неоднородных минеральных (геологических) телах. Синхронные с породообразующими акцессорные минералы позволяют вести подсчеты в соответствии с зонами пегматитовых (или других) тел, узнаваемых по породообразующим минералам. Метасоматические акцессорные минералы размещаются в зонах трещиноватости, рассекающих пегматитовые (или другие) тела, и их количество надо определять в соответствии с телами зон трещиноватости.

Литература

Богомолова Л.К. (1961) Жильное поле Ильменских гор. Путеводитель экскурсии Вишневые горы – Карабаш – Ильменские горы. Свердловск, 42–53.

Григорьев Д.П. (1971) О законах анатомии кристаллов. *Кристаллография*, **16**(6), 1226–1229.

Заварицкий А.Н. (1944) Основной вопрос физической химии процесса образования пегматитов. *Изв. АН СССР, сер. геол.*, **5**, 12–40.

Крыжановский В.И. (1949) История изучения Ильменских гор / Минералы Ильменского заповедника. М.–Л., 7–76.

Поляков В.О. (1982) Минералогия и генезис амазонитовых пегматитов Ильменских гор. *Дисс. канд. г.-м. н.* Миасс; ИГЗ, 287 с.

Попов В.А. (2011) Практическая генетическая минералогия. Екатеринбург, УрО РАН, 167 с.

Попова В.И., Попов В.А., Поляков В.О., Щербатова Е.П. (1982) Пегматиты Ильменских гор. Свердловск, УНЦ АН СССР, 48 с.

Симонов В.А. (1978) Условия кристаллизации разноцветных нефелинов в миаскит-пегматите копи 115 Ильменского заповедника / Исследования по минералогии и геохимии Урала. Свердловск, УНЦ АН СССР, 91–96.

Успенский Н.М. (1965) Негранитные пегматиты. М., Недра, 320 с.

Фекличев В.Г. (1981) О явлениях растворения акцессорного берилла в миаролоносных гранитных пегматитах Урала / Минералогические исследования в Ильменском заповеднике. Свердловск, УНЦ АН СССР, 45–62.

Ферсман А.Е. (1940) Пегматиты. Гранитные пегматиты. М.–Л.: Изд. АН, 712 с.

References

Bogomolova L.K. (1961) [Vein field of the Ilmeny Mountains]. In: *[A guidebook of field trip Vishnevye Mountains – Karabash–Ilmeny Mountains]*. Putevoditel' Vishnevye gory – Karabash_Ilmeny gory. Sverdlovsk, 42–53. (in Russian)

Feklichev V.G. (1981) [Phenomenon of dissolution of accessory beryl in miarol-bearing granitic pegmatites of the Urals]. In: *[Mineralogical studies in the Ilmeny Reserve]*. Mineralogicheskie issledovaniya v Il'menskom zapovednike. Sverdlovsk, UNTs AN SSSR, 45–62. (in Russian)

Fersman A.E. (1940) [Pegmatites. Granitic pegmatites]. Moscow–Leningrad, 712 p. (in Russian)

Grigoriev D.P. (1971) [Laws of crystal anatomy]. *Kristallografiya [Crystallography]*, **16**(6), 1226–1229. (in Russian)

Kryzhanovskiy V.I. (1949) [History of study of the Ilmeny Mountains]. In: *[Minerals of the Ilmeny Reserve]*. Mineraly Ilmenskogo zapovednika/ Moscow–Leningrad, 7–76. (in Russian)

Polyakov V.O. (1982) [Mineralogy and genesis of amazonite pegmatites of the Ilmeny Mountains]. *Dissertation of Candidate of Geological-Mineralogical Sciences*. Miass, 287 p. (in Russian)

Popov V.A. (2011) [Practical genetic mineralogy]. Ekaterinburg, UrO RAN, 167 p. (in Russian)

Popova V.I., Popov V.A., Polyakov V.O., Shcherbakova E.P. (1982) [Pegmatites of the Ilmeny Mountains]. Sverdlovsk, UNTs An SSSR, 48 p. (in Russian)

Simonov V.A. (1978) [Conditions of crystallization of multi-colored nephelins in miaskite-pegmatite of the Pit No. 115 in Ilmeny Reserve]. In: *[Research on Mineralogy and Geochemistry of the Urals]*. Issledovaniya po mineralogii i geohimii Urala. Sverdlovsk, UNTs AN SSSR, 91–96. (in Russian)

Uspenskiy N.M. (1965) [Nongranitic pegmatite]. Moscow, Nedra, 320 p. (in Russian)

Zavaritskiy A.N. (1944) A[main issue in physical chemistry of formation of pegmatites]. *Izvestiya AN SSSR, ser. geol.*, **5**, 12–40. (in Russian)