

СВИДЕТЕЛЬСТВА ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО РАСТВОРЕНИЯ И ЗАМЕЩЕНИЯ АПАТИТА: ОБЗОР И ФАКТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ НА ПРИМЕРЕ МЕТАСОМАТИЗИРОВАННЫХ ПОРОД ДЕВОНСКО-КАМЕННОУГОЛЬНЫХ ИНТРУЗИЙ ЗАПАДНО-МАГНИТОГОРСКОЙ ЗОНЫ

© 2020 г. И. Р. Рахимов

Реферат. Выполнен обзор научных сведений о кристаллической структуре и особенностях химического состава апатита. Общая формула минерала $M_{10}(ZO_4)_6X_2$, где $M = Ca$, $Z = P$, $X = F, Cl, OH$. Для апатита характерно широкое многообразие изоморфных замещений, но главными его видами являются конечные члены изоморфного ряда «фторапатит – хлорапатит – гидроксилapatит». Проведены микроскопические и геохимические исследования апатита в метасоматизированных габброидах девонско-каменноугольных интрузивных комплексов Западно-Магнитогорской зоны (наурузовского fayзуллинского, утлыкташского, басаевского и худолазовского). Выявлена полигенная природа апатита в них, связанная с магматическим (ранне- и позднемагматическая стадии) и гидротермальным (ранняя гидротермальная стадия) этапами кристаллизации. Установлено, что на поздней гидротермальной стадии при возрастании окислительного потенциала флюидов происходит растворение и замещение апатита различными минеральными фазами (глинистые минералы, цеолиты, альбит, кварц, рудные минералы).

Ключевые слова: апатит, метасоматоз, замещение, гидротермальный флюид, псевдоморфозы.

EVIDENCE ON HYDROTHERMAL DISSOLUTION AND REPLACEMENT OF APATITE: A REVIEW AND FACTUAL DATA AT THE EXAMPLE OF METASOMATIZED ROCKS OF DEVONIAN-CARBONIFEROUS INTRUSIONS OF THE WEST MAGNITOGORSK ZONE

© 2020 I. Rakhimov

Abstract. A review of research data on the crystal structure and chemical composition of apatite was performed. The general formula of the mineral is $M_{10}(ZO_4)_6X_2$, where $M = Ca$, $Z = P$, $X = F, Cl, OH$. Apatite is characterized by a wide variety of isomorphic replacements, but its main species are the end members of the isomorphic series “fluoroapatite – chlorapatite – hydroxylapatite”. Microscopic and geochemical studies of apatite in metasomatized gabbroids of Devonian-Carboniferous intrusive complexes of the West Magnitogorsk zone (Nauruz, Fayzulla, Utlyktash, Basay and Khudolaz) were carried out. The polygenic nature of apatite in them was determined, that related with the magmatic (early and late magmatic substages) and hydrothermal (early hydrothermal substage) of crystallization process. It was defined that at the late hydrothermal substage, with an increase in the redox potential of fluids, apatite is dissolved and replaced by different mineral phases (clay, zeolites, albite, quartz, ore minerals).

Key words: apatite, metasomatism, replacement, hydrothermal fluid, pseudomorphs.

Для цитирования: Рахимов И.Р. Свидетельства гидротермального растворения и замещения апатита: обзор и фактические данные на примере метасоматизированных пород девонско-каменноугольных интрузий Западно-Магнитогорской зоны // Геологический вестник. 2020. № 2. С. 72–84. DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2020-2-6>.

For citation: Rakhimov I.R. Evidence on hydrothermal dissolution and replacement of apatite: a review and factual data on the example of metasomatized rocks of Devonian-Carboniferous intrusions of the West Magnitogorsk zone // Geologicheskii vestnik. 2020. No. 2. P. 72–84. DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2020-2-6>.

Введение

Апатит — широко распространенный акцессорный минерал в большинстве известных типов магматических пород. Индикаторная роль апатита для петро- и рудогенеза заключается, главным образом, в специфических особенностях химического состава этого минерала, зависящих от физико-химических условий минералообразования [Watson, 1980; Холоднов, Бушляков, 2002; Belousova et al., 2002; Brassinnes et al., 2005; Chelle-Michou, Chiaradia, 2017; Andersson et al., 2019; Zhang et al., 2020 и др.].

Апатит традиционно считался устойчивым минералом, не подвергающимся замещению при вторичных процессах. Однако со временем, благодаря развитию новых аналитических методов, появилось множество доказательств нестабильности данного минерала в определенных природных условиях. В научной литературе имеется относительно небольшое количество работ, посвященных процессам гидротермального замещения апатита различными вторичными минералами. В основном рассматриваются процессы изоструктурного и/или изохимического замещения апатита [Banfield, Eggleton, 1989; Yanagisawa et al., 1999; Harlov, Förster, 2002, 2003; El Agami et al., 2005; Harlov, 2015; Broom-Fendley et al., 2016 и др.].

В настоящей работе рассматриваются вопросы генезиса апатита в измененных породах основного состава ряда каменноугольных интрузивных комплексов Западно-Магнитогорской зоны. Приводятся свидетельства и признаки неоднократной кристаллизации, а также гидротермального изменения апатита, выраженного в растворении и замещении различными минеральными фазами.

Методы исследований

Микроскопическое изучение кристаллов апатита велось в прозрачных полированных шлифах (~60 обр.) при помощи поляризационного оптического микроскопа Axioskop 40 A и сканирующего электронного микроскопа Tescan Mira 3 (аналитик М.В. Хлестов) в ЦКП МИИ СО РАН. Определение составов минералов выполнялось при помощи приставки ЭДС Oxford Instruments и программного комплекса INCA Energy, а также электронно-зондового микроанализатора CAMECA SX100 (аналитики Д.А. Замятин и И.А. Даниленко) в ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН, оснащенного пятью волновыми спектрометрами Oxford Instruments. В качестве стандартных образцов использовались

apatит (F, Ca, P), галит (Cl), жадеит (Na), диопсид (Si), родонит (Mn) и синтетическое алюмосиликатное стекло REE1 (Y). Ускоряющее напряжение — 15 кВ, ток пучка — 30 нА; X-РНИ метод коррекции состава.

Общие сведения о структуре и химическом составе апатита

Апатит — главный представитель минералов группы апатита с общей формулой $M_{10}(ZO_4)_6X_2$, в которых роль катионов играют Ca^{2+} , Pb^{2+} и в виде изоморфных примесей иногда TR^{3+} , Y^{3+} , Mn^{2+} и Si^{2+} , а в качестве добавочных анионов (X) участвуют F^{-} , Cl^{-} , $[OH]^{-}$, O^{2-} и $[CO_3]^{2-}$. Особенностью этой группы является также то, что комплексный анион $[PO_4]^{3-}$ может быть частично замещен более инертным анионом $[SiO_4]^{4-}$, но в комбинации с более активным анионом $[SO_4]^{2-}$ (если при этом не происходит изменения зарядов в катионах) [Бетехтин, 1951]. Апатит *sensu stricto* объединяет три уникальных минерала: фторапатит, хлорапатит и гидроксил-apatит [Hughes, Rakovan, 2002]. Идеализированная формула апатита — $Ca_{10}(PO_4)_6F_2$, отвечающая элементарной ячейке с 42 атомами [Гишинская, Щербакова, 1975; Кнубовец, 1988], хотя определение реальной структуры минерала сильно осложнено из-за большого разнообразия возможных замещений в структуре кристалла. Апатит кристаллизуется в гексагональной сингонии с симметрией группы $R6_3/m$. Особенностью структуры апатита является наличие двух неэквивалентных катионных позиций (Ca-полиэдры): M1 с кратностью 4 и симметрией 3 (координационный полиэдр — девятивершинник, представленный искаженной трехшапочной тригональной призмой, объем которой равен 31.84 \AA^3), и M2 с кратностью 6 и симметрией m (координационный полиэдр — семивершинник, объем которого равен 21.54 \AA^3) (рис. 1а) [Гишинская, Щербакова, 1975; Горяева, 2013]. У катиона M1 все 9 лигандов представлены атомами кислорода, в то время как у катиона M2 только 6 из 7 лигандов являются кислородом, а 7-й — атом фтора, хлора или гидроксильная группа. Трехшапочные тригональные призмы, объединяясь по граням-основаниям призм, образуют колонки, вытянутые вдоль оси c (рис. 1б). Семивершинники, объединяясь по 3 через общий атом X (F, Cl, OH), располагаются по закону оси 6_3 , образуя «звездчатые» массивные колонки, вытянутые вдоль оси c (рис. 1б).

Пространственное расположение атомов в 3-х разновидностях апатита различается в позиции z

(в элементарной ячейке с параметрами x, y, z), [Hughes, Rakovan, 2002]. На рис. 1в–д показаны суперпозиции Ca I, Ca II и P (для фтор-, хлор- и гидроксилapatита), определяющие симметрию кристалла апатита. Основные структурные искажения с замещением 3 анионных «колонок» происходят в этом полиэдре.

В апатитах Ca^{2+} может быть замещен на многие катионы: Pb^{2+} , U^{2+} , Na^+ , K^+ , Sr^{2+} , Ba^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Cd^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Ba^{2+} , REE^{3+} и др. [Hughes, Rakovan, 2002]. Согласно идеализированной структурной модели, в апатите имеется два типа катионных позиций — Ca I и Ca II (рис. 1). Распределение примесных катионов между этими позициями зависит от типа катиона, его количества, а также от анионных замещений в апатите [Кнубовец, 1988].

Ортофосфатные группы $(\text{PO}_4)^{3-}$ в апатите могут быть замещены многими анионами: $(\text{SiO}_4)^4$, $(\text{SO}_4)^{2-}$, $(\text{AsO}_4)^{3-}$, $(\text{VO}_4)^{3-}$, $(\text{AlO}_4)^{5-}$, $(\text{CrO}_4)^{3-}$ и др. [Hughes, Rakovan, 2002]. Известны парные замещения P на Si и S в фосфатных минералах, $(\text{PO}_4)^{3-}$ на $(\text{SiO}_4)^4$ и $(\text{CO}_3)^{2-}$ или $(\text{PO}_4)^{3-}$ на $(\text{SiO}_4)^4$ и $\text{CO}_3\text{OH}^{3-}$. Анионы

F, Cl, OH могут взаимно замещаться, образуя непрерывный изоморфный ряд. Фторapatит в природе является наиболее распространенным.

В анионных колонках X кроме главных анионов F^{1-} , Cl^{1-} и OH^- могут быть включены одновалентные анионы (Br^- , I^- , O_2^- , O_3^- , BO_2^- , NCO^- , NO_3^- и NO_2^-), двухвалентные анионы (O^{2-} , CO_3^{2-} , O_2^{2-} , S^{2-} , NCN^{2-} и NO_2^{2-}), вакансии $\square\square$ и кластеры вакансий, а также нейтральные и органические молекулы [Pan, Fleet, 2002].

Результаты и их обсуждение. Особенности морфологии и F-Cl-S состава апатита в исследуемых объектах

Апатит кристаллизуется в широком интервале температур и давлений [Green, Watson, 1982; Tacker, 1989; Иванов, 2012]. Экспериментальными работами установлено, что момент насыщения магм апатитом зависит, главным образом, от содержания в них кремнезема (SiO_2) и в меньшей степени от исходной концентрации P_2O_5 в магме [Green, Watson,

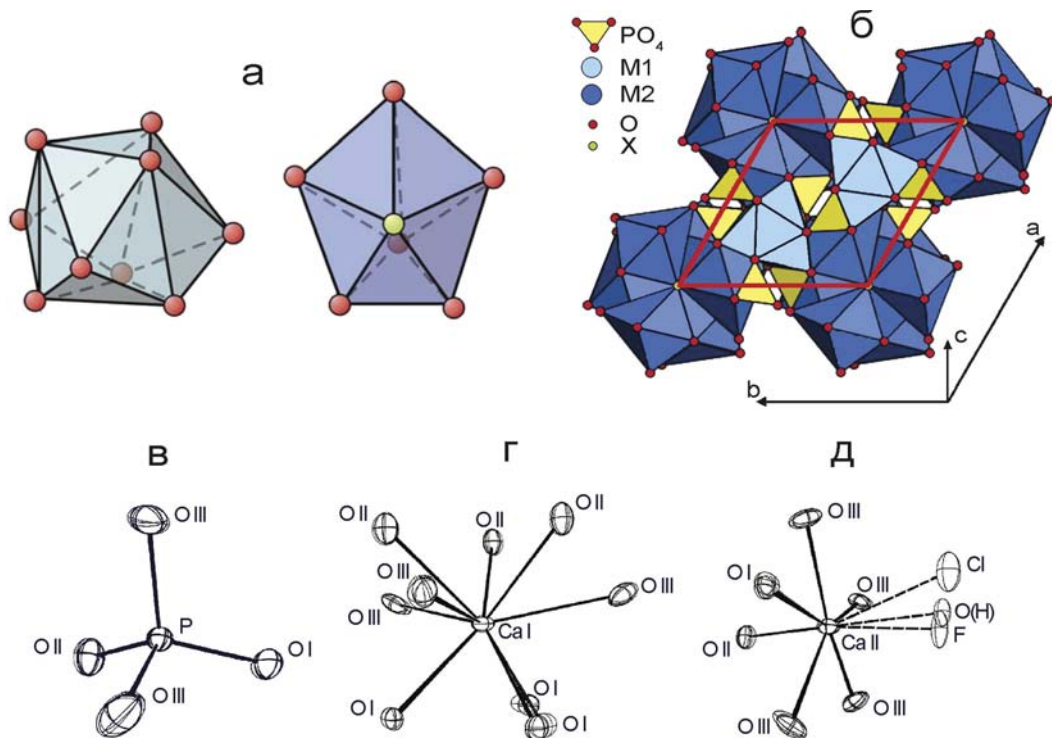


Рис. 1. Графическое отображение элементов кристаллической структуры апатита по [Hughes, Rakovan, 2002; Горяева, 2013]: а) координационные полиэдры M1 (слева) и M2 (справа), б) полиэдрическая модель структуры апатита, в) тетраэдр PO_4 , г) девятивершинный полиэдр с центром Ca I, д) семивершинный полиэдр с центром Ca II

Fig. 1. Drawings of apatite lattice structure properties according to [Hughes, Rakovan, 2002; Goryaeva, 2013]: а) coordination polyhedrons M1 (to left) and M2 (to right), б) polyhedron model of apatite structure, в) PO_4 tetrahedron, г) nine-vertex polyhedron with the Ca I central cation, д) seven-vertex polyhedron with the Ca II central cation

1982]. Среди магматических пород наиболее богаты апатитом щелочные комплексы, с которыми связаны ассоциации нефелиновых сиенитов, карбонатитов, пегматитов, а также комплексных магнетитовых месторождений. Соответственно, в таких комплексах физические свойства и особенности химического состава апатита изучены лучше всего [Nabatian et al., 2014; Arukhtina et al., 2016; Ladenburger et al., 2016; Kogarko, 2018; Попов, 2019; Palma et al., 2019]. Менее изучен аксессуарный апатит из безрудных габброидных комплексов.

Многочисленные литературные данные демонстрируют особую значимость уровня концентраций F, Cl и S в апатите, в меньшей степени — H_2O , для моделирования химических свойств силикатных расплавов и гидротермальных флюидов. Действительно, имеющиеся экспериментальные данные показывают высокую совместимость фтора и хлора с апатитом, при этом коэффициент распределения (D) для F (4.4–19) гораздо выше, чем для Cl (1.1–5) [McCubbin et al., 2015]. Хотя эти данные были получены для богатых железом базальтовых расплавов, судя по наблюдаемым в природе процессам, они вполне применимы и для других магматических систем базитового состава. В гидротермальных системах различия в коэффициентах распределения «апатит/водный флюид» еще выше: $D_{\text{апатит/флюид}}^F = 75\text{--}300$ (зависит от исходной концентрации фтора в минералообразующем флюиде), $D_{\text{апатит/флюид}}^{Cl} \sim 2.3$ (практически не зависит от исходной концентрации хлора) [Kusebauch et al., 2015]. Для серы таких данных меньше, но, к примеру, в кислых расплавах в окислительных условиях присутствие серы увеличивает растворимость фосфора, при этом в недосыщенных сульфатом условиях величина $D_{\text{апатит/расплав}}^S$ (4.5–14.2) растет с падением температуры [Parat, Holtz, 2005].

В наших исследованиях были использованы образцы пород следующих габброидных комплексов: наурузовского, файзуллинского, утлыкташского, басаевского, худолазовского. Выбор этих комплексов обусловлен их приуроченностью к единой региональной структуре, относительно близким абсолютным возрастом, а также общностью геодинамической и петролого-геохимической эволюции [Рахимов, 2019]. При этом они обладают различным металлогеническим потенциалом [Рахимов, 2017]. Апатит в выбранных образцах составляет обычно не более 1–2 об. %. Петрографическими исследованиями установлено, что апатит в этих породах ассоциирует с различными минералами магматического и гидротермально-метасоматического этапа.

Магматический апатит

Апатит магматогенного происхождения образует сростания с первичными магматическими минералами габброидов — плагиоклазом, пироксеном, роговой обманкой. В габброидах наурузовского, файзуллинского и утлыкташского комплексов, не содержащих первичную роговую обманку, в отличие от пород басаевского и худолазовского комплексов, имеются признаки раннемагматической кристаллизации апатита. В этих габброидах встречаются идиоморфные шестоватые и игольчатые кристаллы апатита длиной до 0.8 мм, захваченные плагиоклазом (рис. 2а) и другими минералами — например, пироксеном, ильменитом. Кроме того, в этих же породах наблюдается апатит, ассоциирующий с позднемагматическими минеральными агрегатами — например, с известковым мирмецитом в габброноритах (рис. 2б). Размер такого апатита нередко превышает 1 мм (в длину).

В породах басаевского и худолазовского комплексов апатит магматического этапа образует сростания с позднемагматическими водосодержащими минералами — роговой обманкой и биотитом (рис. 2в). Вероятно, содержащаяся в расплаве вода увеличивает растворимость фосфора, тем самым задерживая кристаллизацию апатита. Кроме того, в «свежих» габбро худолазовского комплекса были обнаружены кристаллы апатита, расположенные в межзерновом пространстве и часто четко ориентированные вдоль граней кристаллов плагиоклаза (рис. 2г). Это свидетельствует в пользу позднемагматической кристаллизации апатита.

По химическому составу апатиты из габброидов наурузовского и файзуллинского комплексов очень схожи, характеризуясь повышенными концентрациями F (2.1–2.9 мас. %) и Cl (до 1.1%) и очень низкими содержаниями S (<0.03%) [Рахимов и др., 2018]. Апатиты из пород утлыкташского комплекса при аналогичном содержании F (2.3–3.1 мас. %) и S (до 0.04%) отличаются несколько более низкими концентрациями Cl (до 0.7%). В породах басаевского комплекса магматогенный апатит характеризуется не только низкими содержаниями S (до 0.01 мас. %), но и F (1.3–2.4%) и Cl (0.2–0.5%).

Магматические апатиты худолазовского комплекса по химическому составу отличаются низкими концентрациями фтора (0.7–1.7 мас. %) при относительно высоком содержании Cl (до 1.5%) и умеренно-пониженном — S (до 0.07%).

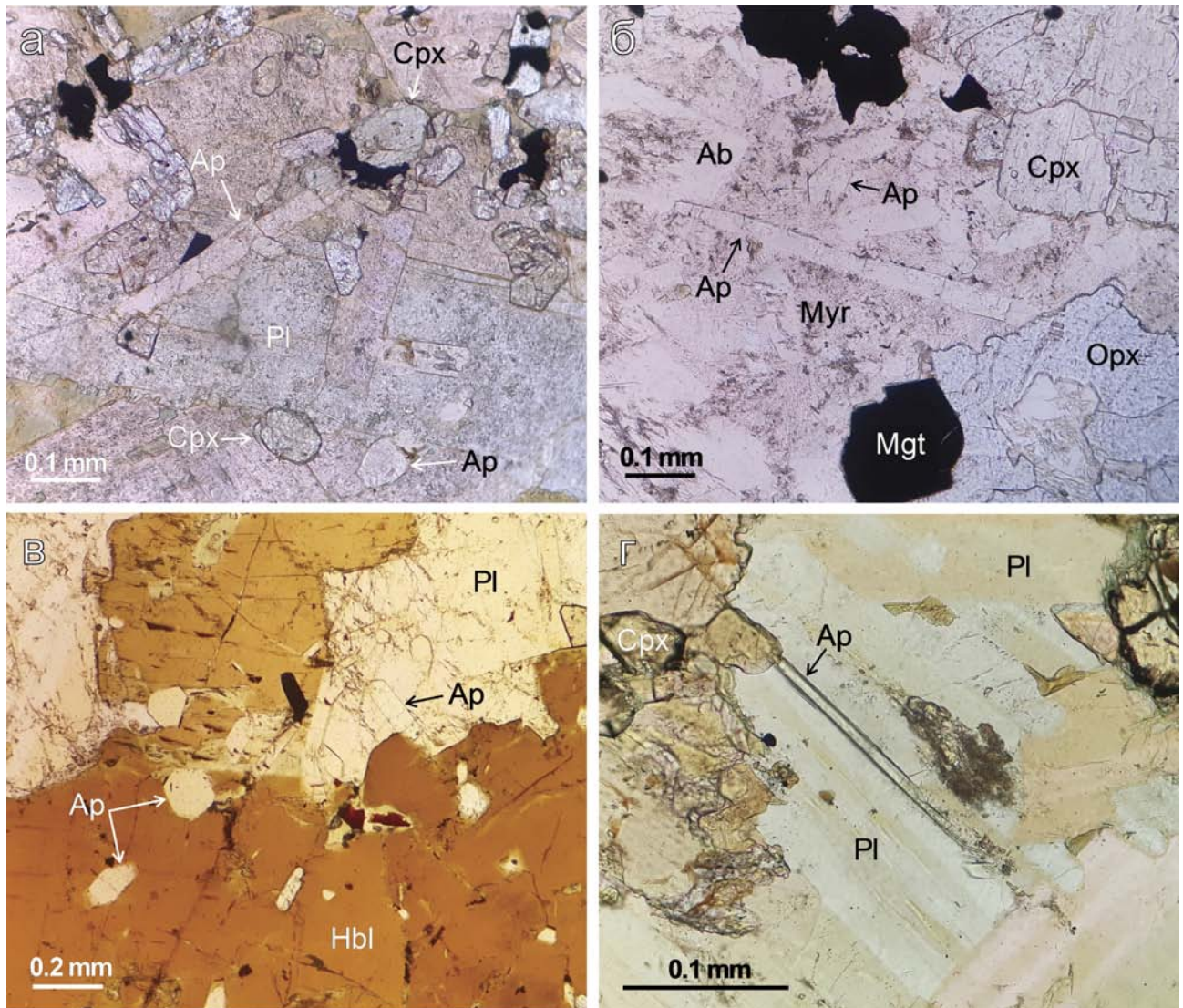


Рис. 2. Микрофотографии зерен апатита и ассоциирующих с ним минералов в габброидах девонско-каменноугольных интрузий Западно-Магнитогорской зоны (проходящий свет): а) апатит в срastании с плагиоклазом, б) апатит в мирмекитовом матриксе, в) апатит в срastании с роговой обманкой, г) апатит между кристаллами плагиоклаза

Примечание: Ab — альбит, Ap — апатит, Cpx — клинопироксен, Hbl — роговая обманка, Opx — ортопироксен, Mgt — магнетит, Myr — мирмекиит, Pl — плагиоклаз.

Fig. 2. Photomicrographs of apatite grains and minerals associated with it in the gabbroids of West Magnitogorsk Devonian-Carboniferous intrusions (PPL): а) apatite intergrown with plagioclase, б) apatite in myrmekite matrix, в) apatite intergrown with hornblende, г) apatite between plagioclase crystals

Note: Ab — albite, Ap — apatite, Cpx — clinopyroxene, Hbl — hornblende, Opx — orthopyroxene, Mgt — magnetite, Myr — myrmekite, Pl — plagioclase.

Гидротермальный апатит

Постмагматический апатит широко развит в породах изучаемых комплексов, ассоциируя с различными вторичными минералами (хлоритом, эпидотом, кварцем, полевыми шпатами, смектитами, пумпеллитом). В габброидах худолозовского ком-

плекса апатит гидротермальной стадии образует как крупноигльчатые идиоморфные кристаллы (длиной до 1.5 мм), так и мелкие зерна (иногда ксеноморфные, размером <0.1 мм), часто образующие обильную вкрапленность в альбит-калишпат-хлоритовом матриксе (рис. 3). Температура кристаллизации гидротермального апатита была оценена

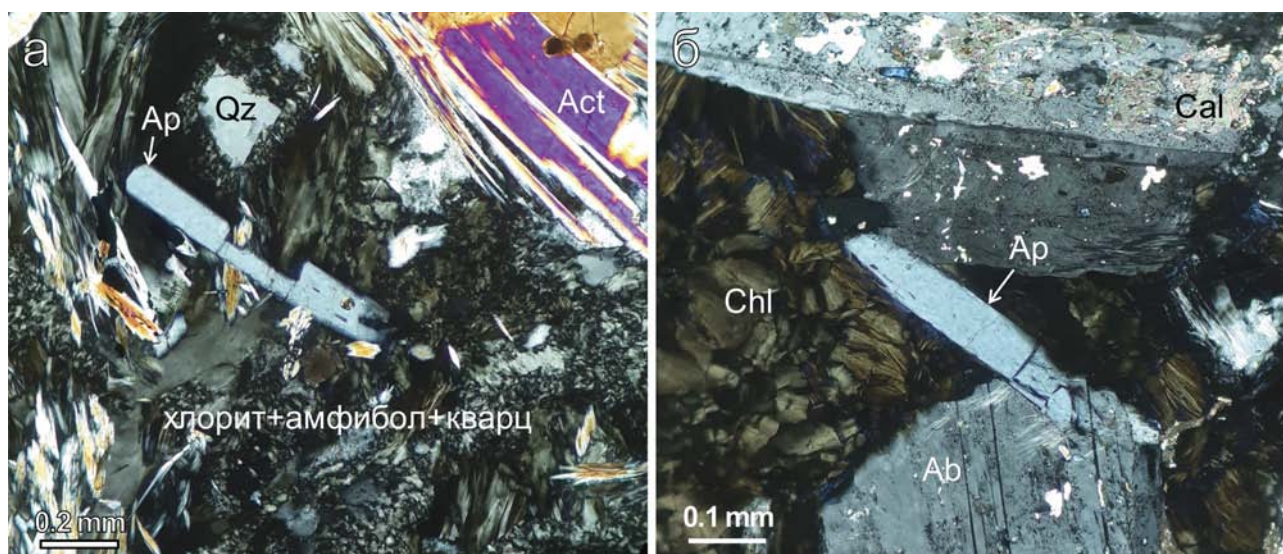


Рис. 3. Микрофотографии зерен апатита, ассоциирующего с различными вторичными минералами в габброидах худолазовского комплекса (проходящий свет, николи \times): а) апатит в кварц-амфибол-хлоритовом матриксе, б) апатит в сростании с альбитом и хлоритом

Примечание: Act — актинолит, Cal — кальцит, Chl — хлорит, Qz — кварц, остальные обозначения см. в подписи к рис. 2.

Fig. 3. Photomicrographs of apatite grains and minerals associated with it in the gabbroids of Khudolaz complex (XPL): а) apatite within quartz-amphibole-chlorite matrix, б) apatite intergrown with albite and chlorite

Note: Act — actynolite, Cal — calcite, Chl — chlorite, Qz — quartz, other abbreviations see in note to fig. 2.

по хлориту из метасоматизированных пород массива Малютка худолазовского комплекса, с которым апатит образует различные сростания. Хлориты, псевдоморфно замещающие биотит, пироксен и частично плагиоклаз с амфиболом, формировались при температурах 145–185 °С [Рахимов, в печати].

Химический состав постмагматического апатита в породах худолазовского комплекса сильно варьирует по величине Cl/F (от 0.1 до 2.1) и концентрации S (от 0.0n до 0.22 мас. %), что, вероятно, находится в зависимости от насыщенности гидротермального флюида сульфат- и/или бисульфид-ионами [Рахимов, Холоднов, 2019]. Известно, что массивы худолазовского комплекса несут сульфидную минерализацию, имеющую полигенную природу, и что на гидротермальном этапе происходили растворение и вторичная сульфидизация за счет переотложения первичных сульфидов [Рахимов, Вишневский, 2019]. Совсем недавно G. Sadove с коллегами [Sadove et al., 2019] на примере природного апатита удалось показать, что сера в нем может иметь разную степень окисления (S^{6+} , S^{4+} , S^{2-} , S^{-}), которая контролируется фугитивностью кислорода.

В породах других комплексов состав гидротермального апатита достоверно пока не изучен,

но было установлено, что в долеритах басаевского комплекса апатит гидротермальной стадии также характеризуется повышенным содержанием S (до 0.2 мас. %).

Признаки замещения апатита на поздней гидротермальной стадии

На поздней гидротермальной стадии в исследуемых габброидах происходило широкое развитие глинистых минералов. Свидетельством того, что пелитизация пород является продолжением гидротермального этапа, а не супергенным процессом, является ее неравномерное распространение в массивах комплементарно ранней гидротермальной стадии. Развитие глинистых минералов происходило вдоль путей миграции поздних окисленных флюидов, между этими метасоматическими жилами (сеть жил) сохранились не затронутые аргиллизацией фрагменты пород. Процесс неравномерной аргиллизации, выраженный в псевдоморфном замещении первичных (плагиоклаз, пироксен) и некоторых раннегидротермальных минералов (биотит, кислый плагиоклаз, серпентин, амфибол) глинистыми, был выявлен в породах всех отмеченных комплексов. На примере пород худолазовского и утыкташского

комплексов особенно четко наблюдается резкое сокращение количества апатита в интенсивно пелитизированных породах: с 1–2 до <0.1–0.2 об.%. Это указывает на растворение апатита во время аргиллизитовой стадии метасоматоза, характеризующейся низким рН (<5, до 1–3) [Сазонов, 2007]. Экспериментальными работами установлена зависимость растворимости апатита в водном флюиде от величины рН среды: чем она ниже, тем выше растворимость апатита (например, [Valsami-Jones et al., 1998]). Учитывая оценки температуры, при которой кристаллизовался ранний гидротермальный апатит, ассоциирующий с хлоритом (>150°C по хлоритовому геотермометру) [Рахимов, в печати], поздняя гидротермальная стадия происходила при температурах <150°C.

Признаки замещения апатита были выявлены в прозрачных полированных шлифах по частичным или полным псевдоморфозам позднегидротермальных минералов. Наиболее явные и разнообразные по составу фазы замещения наблюдаются в метасоматизированных породах худолазовского комплекса. К примеру, довольно часто встречаются участки замещения трещиновато-блочного апатита мелкодисперсной массой, состоящей, по-видимому, из смеси минералов (рис. 4а). В табл. 1 приведен состав данного апатита и мелкодисперсной фазы, заместившей один из его «блоков». Состав мелкодисперсной фазы близок к химическому составу альбита-олиго-

клаза, но характеризуется повышенным содержанием Fe, Mn, Mg.

На рис. 4б показаны трещиноватые зерна апатита в хлоритизированном биотите, испытавшие частичную пелитизацию на концах кристаллов и вдоль трещин. На рис. 4в представлены полные псевдоморфозы цеолита по призматическим кристаллам апатита в интенсивно пелитизированном габбро.

Кроме процесса замещения апатита минеральными фазами, стабильными в условиях окисленного флюида при низких температурах, были обнаружены и признаки изоморфных замещений ($\text{Cl}^- \rightarrow \text{F}^-$, $\text{SO}_3^{2-} \rightarrow \text{SiO}_4^{4-}$, $\text{SO}_3^{2-} \rightarrow \text{PO}_4^{3-}$) в структуре апатита, возникших при реагировании апатита с гидротермальным флюидом. В табл. 2 представлены составы двух точек микрозондирования из кристалла апатита, ассоциирующего с кварцево-глинистыми агрегатами (рис. 4г). По всей видимости, на поздней гидротермальной стадии осуществлялся вынос хлора и серы, исходное же формирование данного кристалла апатита (или как минимум начало кристаллизации) произошло на ранней гидротермальной стадии. Подобные значительные вариации содержания Cl в пределах единого зерна апатита отмечаются, например, в метасоматизированных диорит-гранитоидных массивах Среднего Урала, специализированных на медно-порфириновое оруденение [Грабежев и др., 2011].

Таблица 1

Химический состав зерна апатита и замещающей его фазы (на рис. 4а) по результатам микрозондового анализа (мас. %)

Table 1

Chemical composition of apatite crystal and its replaced matter (from fig. 4a) by microprobe analysis (wt. %)

№ ан.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	F	Cl	SO ₃	H ₂ O	Sum
1	0.56	–	–	0.37	0.13	0.19	54.25	0.35	–	39.89	0.97	0.18	0.93	1.24	99.06
2	65.1	0.04	19.83	0.56	1.32	1.37	1.34	10.04	0.34	–	0.11	0	0.01	–	100.06
3	67.68	0.07	21.3	0.7	0.01	0.72	1.45	5.87	0.26	–	0.12	0	0.01	–	98.19

Примечание: – не определялось.

Note: – not determined.

Таблица 2

Химический состав зерна апатита (на рис. 4г) по результатам микрозондового анализа (мас. %)

Table 2

Chemical composition of apatite crystal (from fig. 4г) by microprobe analysis (wt. %)

№ ан.	F	Cl	H ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	MnO	FeO	SrO	Y ₂ O ₃	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Total
4	1	0.44	1.19	0.36	0.11	54.56	0.17	0.19	0.06	0.06	0.1	0.21	0.3	41.58	0.92	101.25
5	1.47	0.02	1.09	0	0	56.12	0.04	0.06	0.03	0	0	0.16	0.06	43.18	0	102.23

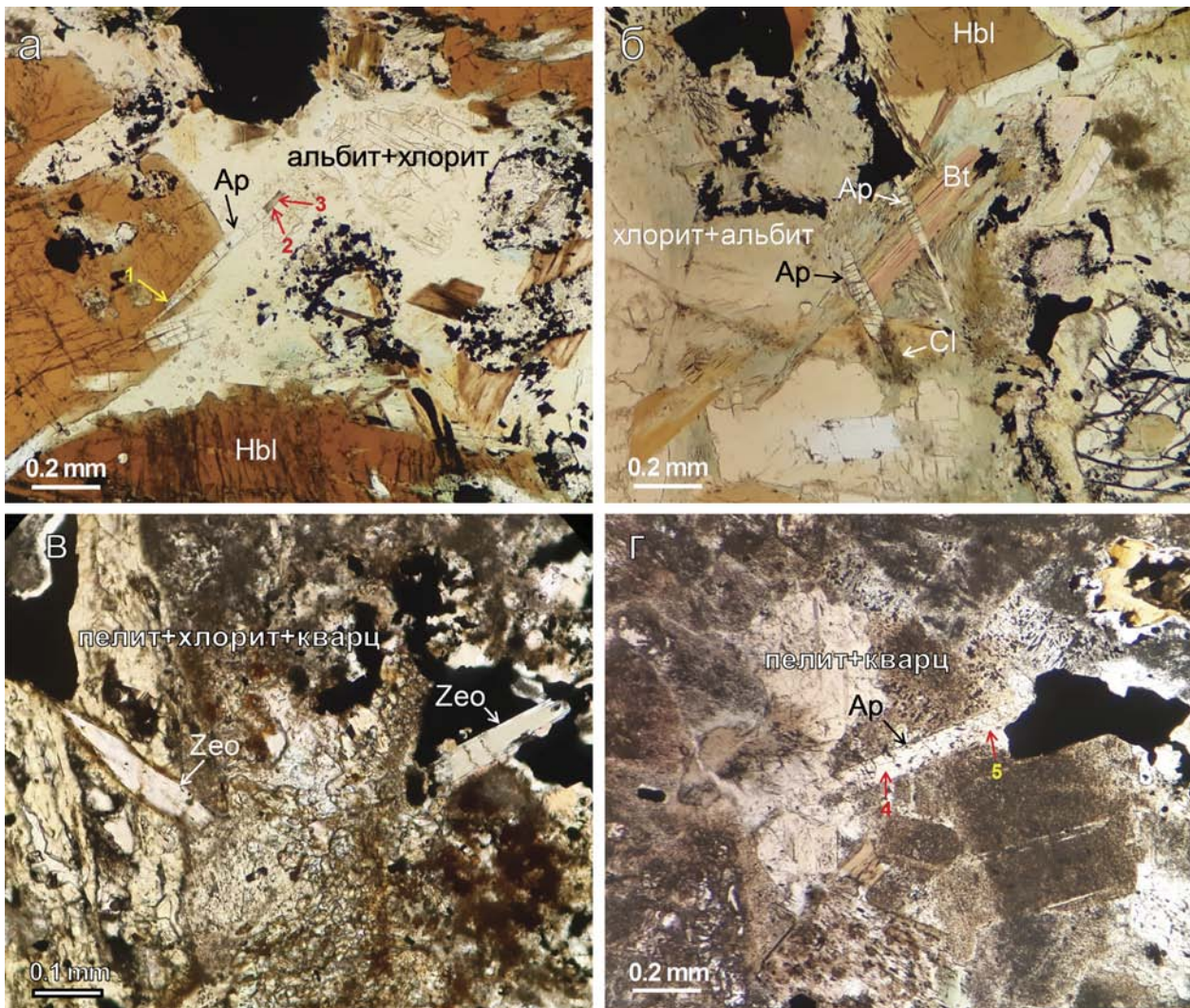


Рис. 4. Микрофотографии зерен частично замещенного апатита и псевдоморфозы по нему в габброидах худолазовского комплекса (проходящий свет): а) и б) пелитизированный апатит в альбит-хлоритовом матриксе; в) псевдоморфозы цеолита по апатиту; г) апатит в кварцево-глинистом матриксе

Примечание: Bt — биотит, Cl — глинистое вещество, Zeo — цеолит, остальные обозначения см. в подписях к рис. 2 и 3. Цифрами показаны точки анализов.

Fig. 4. Photomicrographs of partly replaced apatite grains and pseudomorphs formed by it in the gabbroids of Khudolaz complex (PPL): а) and б) pelitized apatite within quartz-chlorite matrix; в) zeolite pseudomorphs by apatite; г) apatite within quartz-clayish matrix

Note: Bt — biotite, Cl — clay, Zeo — zeolite, other abbreviations see in note to fig. 2 and 3. Numbers shows the points of analyses.

В научной литературе пока существует не много свидетельств замещения природного апатита различными минеральными фазами, осажденными из гидротермального раствора. При этом есть достаточно много данных об изоструктурных/«субизохимических» замещениях апатита, например, в процессе выделения редкоземельных минералов (монацита, анкилита, синхизита и др.) (рис. 5а) за счет сегрегации REE из апатита или минералов свинца (например, пироморфита) [Banfield, Eggleton, 1989;

El Agami et al., 2005; Harlov, 2015; Broom-Fendley et al., 2016; Santos et al., 2018]. Широко распространено явление замещения хлорапатита фторапатитом или гидроксилapatитом [Yanagisawa et al., 1999], практически не выражающееся в изменении кристаллической структуры, а также другие изоструктурные превращения. Тем не менее редкие свидетельства замещения апатита «ксеногенными» минеральными фазами все же имеются, например факт псевдоморфного замещения апатита пиритом

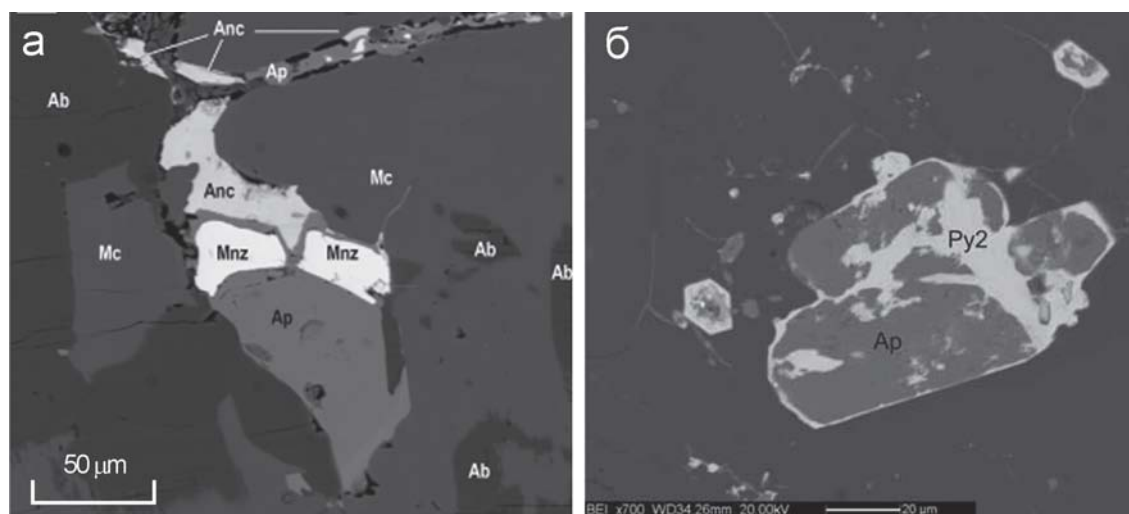


Рис. 5. Продукты замещения апатита в различных рудно-метасоматических ассоциациях (BSE-изображения): а) развитие монацита и анкилита по апатиту [Santos et al., 2018], б) псевдоморфное замещение апатита пиритом [Frizzo et al., 2010]

Примечание: Anc — анкилит, Mc — микроклин, Mnz — монацит, остальные обозначения см. в подписи к рис. 2.

Fig. 5. Replacing phases of apatite from different ore-metamorphic associations (BSE-images): а) growing monazite and ancyllite on apatite [Santos et al., 2018], б) pseudomorphic replacement of apatite by pyrite [Frizzo et al., 2010]

Note: Anc — ancyllite, Mc — microcline, Mnz — monazite, other abbreviations see in note to fig. 2.

в метасоматитах Cu-W месторождения Бедовина (рис. 5б).

Заключение

В результате проведенных работ, включающих как обзор существующих литературных данных, так и собственные минералого-геохимические исследования, определена сложность химического состава апатита, отражающая многообразие изоморфных замещений в его структуре. Установлено, что в габброидах девонско-каменноугольных массивов Западно-Магнитогорской зоны имеется не менее двух генераций апатита, связанных как с магматическим, так и с гидротермальным этапами кристаллизации. Составы этих апатитов различаются, особенно в содержании F, Cl и S. Показано, что фторапатит является более стабильным в низкотемпературных окислительных условиях, чем хлор-апатит, и в целом фтор по отношению к апатиту имеет более высокий коэффициент распределения и в расплаве, и в водном флюиде, чем хлор. Концентрация серы в апатите контролируется как исходным содержанием ее в минералообразующей среде, так и фугитивностью кислорода.

Представлены свидетельства замещения апатита, как правило, на позднегидротермальной стадии, различными минеральными фазами, стабиль-

ными в отличие от апатита в условиях низкого pH среды. В исследуемых образцах чаще всего апатит замещается глинистой массой на аргиллизитовой стадии метасоматоза.

Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме № 0252-2017-0012 «Магматические системы в истории развития Южного Урала (геодинамические обстановки формирования и металлогеническая специализация)».

Список литературы:

Бетехтин А.Г. Курс минералогии. – М.: Гос. Изд-во геологической литературы, 1951. – 543 с.

Гилинская Л.Г., Щербакова М.Я. Изоморфные замещения и структурные нарушения в апатите по данным электронного парамагнитного резонанса // Физика апатита. – Новосибирск: Наука, 1975. – С. 7–63.

Горяева А.М. Атомистическое компьютерное моделирование локальной структуры и свойств смешения стронций-содержащего фторапатита: Магистерская работа. – М.: Изд-во МГУ, 2013. – 65 с.

Грабежьев А.И., Смирнов В.Н., Воронина Л.К., Гмыра В.Г. Галогены в апатитах рудно-магматических медно-порфиновых систем Среднего Урала // Труды Ин-та геологии и геофизики УрО РАН. – 2011. – Вып. 158. – С. 95–99.

Иванов О.К. Формы кристаллов апатита в зависимости от условий кристаллизации // Уральская минералогическая Школа-2012. – Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2012. – С. 48–51.

- Кнубовец Р.Г.* Кристаллохимия и свойства апатита. – М.: НИИТЭХИМ, 1988. – 41 с.
- Попов В.А.* Об апатите щелочных пород вишневогорского комплекса, Южный Урал // *Минералогия*. – 2019. – № 3. – С. 11–15.
- Рахимов И.Р.* Геология, петрология и рудоносность позднедевонско-карбового интрузивного магматизма Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Уфа, 2017. – 181 с.
- Рахимов И.Р.* Постостроводужный интрузивный магматизм Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала // *Вестник Пермского университета. Геология*. – 2019. – Т. 18, № 1. – С. 17–27.
- Рахимов И.Р., Вишневецкий А.В.* Сульфидно-платинометаллические ассоциации метасоматизированных рудоносных пород худозавского дифференцированного комплекса, Южный Урал // *Новое в познании процессов рудообразования: Сборник материалов 9-й Российской молодежной научно-практической Школы с международным участием*. Москва, 25–29 ноября 2019 г. – М: ИГЕМ РАН, 2019. – С. 319–323.
- Рахимов И.Р., Холоднов В.В.* Акцессорный апатит из метасоматизированных пород рудоносных и безрудных массивов худозавского комплекса: особенности морфологии и химического состава // *Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов АН РБ*. – 2019. – № 26. – С. 29–36.
- Рахимов И.Р., Холоднов В.В., Салихов Д.Н.* Акцессорные апатиты из габброидов позднего девона – раннего карбона Западно-Магнитогорской зоны: особенности морфологии и химического состава, индикаторная металло-генетическая роль // *Геологический Вестник*. – 2018. – № 3. – С. 109–123.
- Сазонов А.М.* Петрография и петрология метаморфических и метасоматических пород. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2007. – 324 с.
- Холоднов В.В., Бушляков И.Н.* Галогены в эндогенном рудообразовании. – Екатеринбург, 2002. – 390 с.
- Andersson S.S., Wagner T., Jonsson E., Fusswinkel T., Whitehouse M.J.* Apatite as a tracer of the source, chemistry and evolution of ore-forming fluids: The case of the Olserum-Djupedal REE-phosphate mineralisation, SE Sweden // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2019. – V. 255. – P. 163–187.
- Apukhtina O.B., Kamenetsky V.S., Ehrig K., Kamenetsky M.B., McPhie J., Maas R., Meffre S., Goemann K., Rodemann T., Cook N.J., Ciobanu C.L.* Postmagmatic magnetite–apatite assemblage in mafic intrusions: a case study of dolerite at Olympic Dam, South Australia // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2016. – V. 171, No. 2. – P. 1–15.
- Banfield J.F., Eggleton R.A.* Apatite Replacement and Rare Earth Mobilization, Fractionation, and Fixation During Weathering // *Clays and Clay Minerals*. – 1989. – V. 37. – P. 113–127.
- Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I.* Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: trace-element compositions and their relationship to host rock type // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2002. – V. 76, No. 1. – P. 45–69.
- Brassines S., Balaganskaya E., Demaiffe D.* Magmatic evolution of the differentiated ultramafic, alkaline and carbonate intrusion of Vuoriyarvi (Kola Peninsula, Russia). A LA-ICP-MS study of apatite // *Lithos*. – 2005. – V. 85, No. 1. – P. 76–92.
- Broom-Fendley S., Styles M.T., Don Appleton J., Gunn G., Wall F.* Evidence for dissolution-reprecipitation of apatite and preferential LREE mobility in carbonate-derived late-stage hydrothermal processes // *American Mineralogist*. – 2016. – V. 101, No. 3. – P. 596–611.
- Chelle-Michou C., Chiaradia M.* Amphibole and apatite insights into the evolution and mass balance of Cl and S in magmas associated with porphyry copper deposits // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2017. – V. 172. – P. 1–26.
- El Agami N.L., El Wahed A.A., Haroun Y.S.* Apatite alteration and its relation to REE fractionation and U-mineralization, a case study of Western Desert and Sinai, Egypt // *The Fourth International Conference on the geology of Africa*. – 2005. – V. 1. – P. 131–153.
- Frizzo P., Peruzzo L., Dellantonio E.* The copper-wolfram deposit of Bedovina (Trento, Italy) // *Geo. Alp.* – 2010. – V. 7. – P. 55–70.
- Green T.H., Watson E.B.* Crystallization of apatite in natural magmas under high pressure, hydrous conditions, with particular reference to “Orogenic” rock series // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1982. – V. 79. – P. 96–105.
- Harlov D.E.* Apatite: A Fingerprint for Metasomatic Processes // *Elements*. – 2015. – V. 11, No. 3. – P. 171–176.
- Harlov D.E., Förster H.-J., Nijland T.G.* Fluid-induced nucleation of REE-phosphate minerals in apatite: Nature and experiment. Part I. Chlorapatite // *American Mineralogist*. – 2002. – V. 87. – P. 245–261.
- Harlov D.E., Förster H.-J.* Fluid induced nucleation of (Y+REE)-phosphate minerals within apatite: Nature and experiment Part II. Fluorapatite // *American Mineralogist*. – 2003. – V. 88. – P. 1209–1229.
- Hughes J.M., Rakovan J.* The crystal structure of apatite, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{OH},\text{Cl})$ // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. – 2002. – V. 48, No. 1. – P. 1–12.
- Kogarko L.* Chemical Composition and Petrogenetic Implications of Apatite in the Khibiny Apatite-Nepheline Deposits (Kola Peninsula) // *Minerals*. – 2018. V. 8, Iss. 11, No. 532. – P. 1–13.
- Kusebauch C., John T., Whitehouse M., Klemme S., Putnis A.* Distribution of halogens between fluid and apatite during fluid-mediated replacement processes // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2015. – V. 170. – P. 225–246.
- Ladenburger S., Marks M.A., Upton B., Hill P., Wenzel T., Mark G.* Compositional variation of apatite from rift-related alkaline igneous rocks of the Gardar Province, South Greenland // *American Mineralogist*. – 2016. – V. 101, No. 3. – P. 612–626.
- McCubbin F.M., Vander Kaaden K.E., Tartese R., Boyce J.W., Mikhail S., Whitson E.S., Bell A.S., Anand M., Franchi I.A., Wang J., Hauri E.H.* Experimental investigation

of F, Cl, and OH partitioning between apatite and Fe-rich basaltic melt at 1.0–1.2 GPa and 950–1000°C // *American Mineralogist*. – 2015. – V. 199. – P. 1790–1802.

Nabatian G., Ghaderi M., Corfu F., Neubauer F., Bernroider M., Prokofiev V., Honarmand M. Geology, alteration, age, and origin of iron oxide–apatite deposits in Upper Eocene quartz monzonite, Zanjan district, NW Iran // *Mineralium Deposita*. – 2014. – V. 49. – P. 217–234.

Palma G., Barra F., Reich M., Valencia V., Simon A.C., Vervoort J., Leisen M., Romero R. Halogens, trace element concentrations, and Sr–Nd isotopes in apatite from iron oxide–apatite (IOA) deposits in the Chilean iron belt: Evidence for magmatic and hydrothermal stages of mineralization // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2019. – V. 246. – P. 515–540.

Pan Y., Fleet M.E. Compositions of the Apatite-Group Minerals: Substitution Mechanisms and Controlling Factors // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. – 2002. – V. 48, No. 1. – P. 13–49.

Parat F., Holtz F. Sulfur partition coefficient between apatite and rhyolite: The role of bulk S content // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2005. – V. 150, No. 6. – P. 643–651.

Sadove G., Konecke B.A., Fiege A., Simon A.C. Structurally bound S²⁻, S¹⁻, S⁴⁺, S⁶⁺ in terrestrial apatite: The redox evolution of hydrothermal fluids at the Phillips mine, New York, USA // *Ore Geology Reviews*. – 2019. – V. 107. – P. 1084–1096.

Santos J.J., Conceicao H., Leandro M., Silva Rosa M.L. Formation of monazite-(Ce, La) by fluid–apatite interaction: the Floresta Azul Alkaline Complex, Bahia, Brazil // *Brazilian Journal of Geology*. – 2018. – V. 48, No. 4. – P. 721–733.

Tacker C.R. A thermodynamic model for apatite solid solutions, applicable to high-temperature geologic problems // *American Mineralogist*. – 1989. – V. 74. – P. 877–888.

Valsami-Jones E., Ragnarsdottir K.V., Putnis A., Bosbach D., Kemp A.J., Cressey G. The dissolution of apatite in the presence of aqueous metal cations at pH 2–7 // *Chemical Geology*. – 1998. – V. 151. – P. 215–233.

Watson B. Apatite and phosphorus in mantle source regions: an experimental of apatite/melt equilibria at pressures to 25 kbar // *Earth and Planetary Letters*. – 1980. – V. 51. – P. 322–335.

Yanagisawa K., Rendon-Angeles J.C., Ishizawa N., Oishi S. Topotaxial replacement of chlorapatite by hydroxyapatite during hydrothermal ion exchange // *American Mineralogist*. – 1999. – V. 84. – P. 1861–1869.

Zhang X., Guo F., Zhang B., Zhao L., Wu Y., Wang G., Alemayehu M. Magmatic evolution and post-crystallization hydrothermal activity in the early Cretaceous Pingtan intrusive complex, SE China: records from apatite geochemistry // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2020. – V. 175, Iss. 35. – P. 1–18.

References:

Andersson S.S., Wagner T., Jonsson E., Fusswinkel T., Whitehouse M.J. Apatite as a tracer of the source, chemistry and evolution of ore-forming fluids: The case of the Olsersum-

Djupedal REE-phosphate mineralisation, SE Sweden // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2019. V. 255. P. 163–187.

Apukhtina O.B., Kamenetsky V.S., Ehrig K., Kamenetsky M.B., McPhie J., Maas R., Meffre S., Goemann K., Rodemann T., Cook N.J., Ciobanu C.L. Postmagmatic magnetite–apatite assemblage in mafic intrusions: a case study of dolerite at Olympic Dam, South Australia // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2016. V. 171, No. 2. P. 1–15.

Banfield J.F., Eggleton R.A. Apatite Replacement and Rare Earth Mobilization, Fractionation, and Fixation During Weathering // *Clays and Clay Minerals*. 1989. V. 37. P. 113–127.

Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: trace-element compositions and their relationship to host rock type // *Journal of Geochemical Exploration*. 2002. V. 76, No. 1. P. 45–69.

Betekhtin A.G. Kurs mineralogii [Mineralogy course]. M.: Gosudarstvennoe izdatel'stvo geolochiskoy literatury, 1951. 543 p. (In Russian)

Brassines S., Balaganskaya E., Demaiffe D. Magmatic evolution of the differentiated ultramafic, alkaline and carbonatite intrusion of Vuoriyarvi (Kola Peninsula, Russia). A LA-ICP-MS study of apatite // *Lithos*. 2005. V. 85, No. 1. P. 76–92.

Broom-Fendley S., Styles M.T., Don Appleton J., Gunn G., Wall F. Evidence for dissolution–reprecipitation of apatite and preferential LREE mobility in carbonatite-derived late-stage hydrothermal processes // *American Mineralogist*. 2016. V. 101, No. 3. P. 596–611.

Chelle-Michou C., Chiaradia M. Amphibole and apatite insights into the evolution and mass balance of Cl and S in magmas associated with porphyry copper deposits // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2017. V. 172. P. 1–26.

El Agami N.L., El Wahed A.A., Haroun Y.S. Apatite alteration and its relation to REE fractionation and U-mineralization, a case study of Western Desert and Sinai, Egypt // *The Fourth International Conference on the geology of Africa*. 2005. V. 1. P. 131–153.

Friszo P., Peruzzo L., Dellantonio E. The copper–wolfram deposit of Bedovina (Trento, Italy) // *Geo. Alp.* 2010. V. 7. P. 55–70.

Gilinskaya L.G., Shcherbakova M.Ya. Izomorfnye zameshcheniya i strukturnye narusheniya v apatite po dannym elektronnoho paramagnitnogo rezonansa [Isomorphous substitution and structural defects in apatites as found by EPR investigation] // *Fizika apatita*. Novosibirsk: Nauka, 1975. P. 7–63. (In Russian)

Goryaeva A.M. Atomisticheskoe komp'yuternoe modelirovanie lokal'noy struktury i svoystv smesheniya strontsiy-soderzhashchego fluorapatita [Atomistic computer simulation of the local structure and mixing properties of strontium-containing fluorapatite]. Magister thesis. M.: MSU Press, 2013. 65 p. (In Russian)

Grabazhev A.I., Smirnov V.N., Voronina L.K., Gmyra V.G. Galogeny v apatitakh rudno-magmatischenkikh medno-porfirovyykh system Srednego Urala [Halogens in apatites from ore-magmatic copper-porphyry systems of Middle Urals] // *Tr. IGG UrO RAN*. 2011. Iss. 158. P. 95–99. (In Russian)

Green T.H., Watson E.B. Crystallization of apatite in natural magmas under high pressure, hydrous conditions, with particular reference to "Orogenic" rock series // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1982. V. 79. P. 96–105.

Harlov D.E. Apatite: A Fingerprint for Metasomatic Processes // Elements. 2015. V. 11, No. 3. P. 171–176.

Harlov D.E., Förster H.-J. Fluid induced nucleation of (Y+REE)-phosphate minerals within apatite: Nature and experiment Part II. Fluorapatite // American Mineralogist. 2003. V. 88. P. 1209–1229.

Harlov D.E., Förster H.-J., Nijland T.G. Fluid-induced nucleation of REE-phosphate minerals in apatite: Nature and experiment. Part I. Chlorapatite // American Mineralogist. 2002. V. 87. P. 245–261.

Hughes J.M., Rakovan J. The crystal structure of apatite, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{OH},\text{Cl})$ // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2002. V. 48, No. 1. P. 1–12.

Ivanov O.K. Formy kristallov apatita v zavisimosti ot usloviy kristallizatsii [Apatite crystal morphology depend of crystallization conditions] // Ural mineralogical School–2012. Yekaterinburg: IGG UrO RAN Publ., 2012. P.48–51. (In Russian).

Kholodnov V.V., Bushlyakov I.N. Galogeny v endogenom rudoobrazovanii [Halogens in endogenetic mineralization]. Yekaterinburg: UrO RAN, 2002. 394 p. (In Russian).

Knubovetz R.G. Crystallochemistry and properties of apatite. M.: NIITECUM, 1988. 41 p. (In Russian).

Kogarko L. Chemical Composition and Petrogenetic Implications of Apatite in the Khibiny Apatite-Nepheline Deposits (Kola Peninsula) // Minerals. 2018. V. 8, Iss. 11, No. 532. P. 1–13.

Kusebauch C., John T., Whitehouse M., Klemme S., Putnis A. Distribution of halogens between fluid and apatite during fluid-mediated replacement processes // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2015. V. 170. P. 225–246.

Ladenburger S., Marks M.A., Upton B., Hill P., Wenzel T., Mark G. Compositional variation of apatite from rift-related alkaline igneous rocks of the Gardar Province, South Greenland // American Mineralogist. 2016. V. 101, No. 3. P. 612–626.

McCubbin F.M., Vander Kaaden K.E., Tartese R., Boyce J.W., Mikhail S., Whitson E.S., Bell A.S., Anand M., Franchi I.A., Wang J., Hauri E.H. Experimental investigation of F, Cl, and OH partitioning between apatite and Fe-rich basaltic melt at 1.0–1.2 GPa and 950–1000°C // American Mineralogist. 2015 V. 199. P. 1790–1802.

Nabatian G., Ghaderi M., Corfu F., Neubauer F., Bernroider M., Prokofiev V., Honarmand M. Geology, alteration, age, and origin of iron oxide–apatite deposits in Upper Eocene quartz monzonite, Zanjan district, NW Iran // Mineralium Deposita. 2014. V. 49. P. 217–234.

Palma G., Barra F., Reich M., Valencia V., Simon A.C., Vervoort J., Leisen M., Romero R. Halogens, trace element concentrations, and Sr-Nd isotopes in apatite from iron oxide-apatite (IOA) deposits in the Chilean iron belt: Evidence for magmatic and hydrothermal stages of mineralization // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2019. V. 246. P. 515–540.

Pan Y., Fleet M.E. Compositions of the Apatite-Group Minerals: Substitution Mechanisms and Controlling Factors // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2002. V. 48, No. 1. P. 13–49.

Parat F., Holtz F. Sulfur partition coefficient between apatite and rhyolite: The role of bulk S content // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2005. V. 150, No. 6. P. 643–651.

Popov V.A. Ob apatite shchelochnykh porod vishnyovogorskogo kompleksa, Yuzhnyi Ural [Apatite of alkaline rocks of the Vishnevogorsky complex, South Urals] // Mineralogiya. 2019. No. 3. P. 11–15. (In Russian with English Abstract).

Rakhimov I.R. Geologiya, petrologiya i rudonosnost' pozdne-devonsko-karbonovogo intruzivnogo magmatizma Zapadno-Magnitogorskoi zony Yuzhnogo Urala [Geology, petrology and mineralization of Late Devonian-Carboniferous magmatism of Western Magnitogorsk Zone in the Southern Urals]: Cand. geol. and min. sci. dis. Ufa: IG UNC RAN, 2017. 181 p. (In Russian).

Rakhimov I.R. Postostrovoduzhnyi intruzivnyi magmatizm Zapadno-Magnitogorskoy zony Yuzhnogo Urala [Post-island-arc intrusive magmatism of the Western Magnitogorsk Zone: Southern Urals] // Vestnik of Perm University. Geologiya. 2019. T. 18, No. 1. P. 17–27. (In Russian with English Abstract).

Rakhimov I.R., Vishnevskiy A.V. Sul'fidno-platinometal'nye assotsiatsii metasomatizirovannykh rudonosnykh porod khudolazovskogo differentsirovannogo kompleksa, [Sulfide-platinum metal associations of metasomatized ore-bearing rocks of Khudolaz differentiated complex, South Urals] // New in ore-forming processes cognition: Ninth Russian youth scientific and practical School with international participation. Moscow: IGEM RAS, 2019. P. 319–323. (In Russian).

Rakhimov I.R., Kholodnov V.V. Aktssornyi apatit iz metasomatizirovannykh porod rudonosnykh i bezrudnykh massivov khudolazovskogo kompleksa: osobennosti morfologii i khimicheskogo sostava [Accessory apatite from metasomatized rocks of ore-bearing and weak ore massifs of Khudolaz complex: features of morphology and chemical composition] // Geologiya. Izvestiya Otdeleniya nauk o Zemle i prirodnykh resursov AN RB. 2019. No. 26. P. 29–36. (In Russian with English Abstract).

Rakhimov I.R., Kholodnov V.V., Salikhov D.N. Aktssornye apatity iz gabbroidov pozdnego devona–rannego karbona Zapadno-Magnitogorskoy zony: osobennosti morfologii i khimicheskogo sostava, indikatornaya metallogenicheskaya rol' [Accessory apatites from the gabbroids of Late Devonian–Early Carboniferous gabbroids of the Western Magnitogorsk zone: peculiarities of the morphology and chemical composition, indicative metallogenic role] // Geologicheskii Vestnik. 2018. No. 3. P. 109–123. (In Russian with English Abstract).

Sadove G., Konecke B.A., Fiege A., Simon A.C. Structurally bound S^{2-} , S^{1-} , S^{4+} , S^{6+} in terrestrial apatite: The redox evolution of hydrothermal fluids at the Phillips mine, New York, USA // Ore Geology Reviews. 2019. V. 107. P. 1084–1096.

Santos J.J., Conceicao H., Leandro M., Silva Rosa M.L. Formation of monazite-(Ce, La) by fluid-apatite interaction: the Floresta Azul Alkaline Complex, Bahia, Brazil // Brazilian Journal of Geology. 2018. V. 48, No. 4. P. 721–733.

Sazonov A.M. Petrografiya i petrologiya metamorficheskikh i metasomaticheskikh porod [Petrography and petrology of metamorphic and metasomatic rocks]. Krasnoyarsk: SFU Press, 2007. 324 p. (In Russian).

Tacker C.R. A thermodynamic model for apatite solid solutions, applicable to high-temperature geologic problems // *American Mineralogist*. 1989. V. 74. P. 877–888.

Valsami-Jones E., Ragnarsdottir K.V., Putnis A., Bosbach D., Kemp A.J., Cressey G. The dissolution of apatite in the presence of aqueous metal cations at pH 2–7 // *Chemical Geology*. 1998. V. 151. P. 215–233.

Watson B. Apatite and phosphorus in mantle source regions: an experimental of apatite/melt equilibria at pressures to 25 kbar // *Earth and Planetary Let.* 1980. V. 51. P. 322–335.

Yanagisawa K., Rendon-Angeles J.C., Ishizawa N., Oishi S. Topotaxial replacement of chlorapatite by hydroxyapatite during hydrothermal ion exchange // *American Mineralogist*. 1999. V. 84. P. 1861–1869.

Zhang X., Guo F., Zhang B., Zhao L., Wu Y., Wang G., Alemayehu M. Magmatic evolution and post-crystallization hydrothermal activity in the early Cretaceous Pingtan intrusive complex, SE China: records from apatite geochemistry // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2020. V. 175, Iss. 35. P. 1–18.

Сведения об авторе:

Рахимов Ильдар Рашитович, канд. геол.-мин. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: rigel92@mail.ru

About the author:

Rakhimov Ildar Rashitovich, Candidate of geological and mineralogical sciences, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: rigel92@mail.ru