

УДК 549.752.14+549.618.6+549.744 (470.21)

## Минералы редкоземельных элементов и иттрия в измененных гранит-порфирах и вмещающих глиноземистых сланцах на медно-молибденовом рудопоявлении Пеллапахк (пояс Колмозеро-Воронья)

А. А. Калинин\*, М. Г. Хачатрян, Е. Э. Савченко

\*Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;

e-mail: a.kalinin@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-0333>

Информация о статье Реферат

Поступила  
в редакцию  
16.01.2026;

получена  
после доработки  
17.02.2026;

принята  
к публикации  
18.02.2026

Ключевые слова:

пояс  
Колмозеро-Воронья,  
рудопоявление  
Пеллапахк,  
монацит,  
ксенотим,  
алланит

Изучены минералы редкоземельных элементов, установленные в метаморфических породах северо-западной части зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья на участке медно-молибден-порфирового рудопоявления Пеллапахк – фосфаты монацит-(Ce) и ксенотим-(Y), фторкарбонаты синхизит-(Ce) и паризит-(Ce), силикаты – алланит-(Ce). В глиноземистых сланцах поросозерской серии монацит и ксенотим образуют равномерную вкрапленность мелких изометричных зерен среди породообразующих силикатов и в кварце. В измененных гранит-порфирах с Cu-Mo минерализацией минералы редкоземельных элементов встречаются преимущественно в виде зональных образований: монацит и ксенотим слагают их центральную часть и последовательно обрастают апатитом-F, фторкарбонатами REE, алланитом и эпидотом. Микровключения монацита и ксенотима были отмечены в метакристаллах пирита. Для монацита и ксенотима из глиноземистых сланцев поросозерской серии предполагается метаморфический генезис – формирование за счет перераспределения редкоземельных элементов из изоморфных примесей в силикатах в собственные фазы. Монациты и ксенотимы из измененных гранит-порфиров, скорее всего, магматического происхождения, но позже были частично или полностью замещены карбонатами и силикатами REE в ходе гидротермальных процессов при развитии Cu-Mo и полиметаллической минерализации. Для монацитов характерны две схемы гетеровалентного изоморфизма – чералитовая и хаттонитовая. В монацитах из глиноземистых сланцев преобладает комбинация чералитового замещения с хаттонитовым ( $3\text{LREE}^{3+} + \text{P}^{5+} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{Th}^{4+} + \text{Si}^{4+}$ ), а в монацитах из измененных гранит-порфиров – хаттонитовое (Th, Si). В монацитах метаморфического генезиса из глиноземистых сланцев сумма редких земель, в целом, ниже, а содержание тория выше, чем в гидротермально измененных монацитах из метасоматитов по гранит-порфирам.

Для цитирования

Калинин А. А. и др. Минералы редкоземельных элементов и иттрия в измененных гранит-порфирах и вмещающих глиноземистых сланцах на медно-молибденовом рудопоявлении Пеллапахк (пояс Колмозеро-Воронья). Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 1. С. 16–28. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-16-28>.

## Rare earth elements and yttrium minerals in altered granite-porphyry and hosting high-alumina schists in the Pellapahk Cu-Mo occurrence (Kolmozero-Voronya Belt)

Arkadiy A. Kalinin\*, Mariam G. Khachatryan, Yevgeny E. Savchenko

\*Geological Institute KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;

e-mail: a.kalinin@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-0333>

Article info

Received  
16.01.2026;

received  
in revised form  
17.02.2026;

accepted  
18.02.2026

Key words:

Kolmozero-Voronya  
Belt,  
Pellapahk occurrence,  
monazite,  
xenotime,  
allanite

Abstract

Rare Earth Elements (REE) and yttrium phosphates monazite-(Ce) and xenotime-(Y), fluorine carbonates synchysite-(Ce) and parisite-(Ce), silicate allanite-(Ce) have been studied in the metamorphic rocks in the area of the Pellapahk Cu-Mo porphyry occurrence in the north-western part of the Kolmozero-Voronya greenstone belt. Monazite-(Ce) and xenotime-(Y) form regular dissemination of fine grains in interstitions in rock-forming silicates and quartz in high-alumina gneisses and schists of the Porosozero series. In the altered granite-porphyry with Cu-Mo mineralization, REE minerals form zonal grains with monazite or xenotime in the core, surrounded by apatite-(F), then by fluorine carbonates synchysite-(Ce) and parisite-(Ce), and by silicates allanite-(Ce) and epidote in the outer parts. Besides, monazite-(Ce) and xenotime-(Y) have been found in inclusions in pyrite metacrystals. In the high-alumina schists, monazite and xenotime are of metamorphic genesis, they are formed due to re-distribution of REE and Y from isomorphic impurities in silicates to proper minerals. In the altered granite-porphyry, monazite and xenotime are supposed to be of magmatic genesis, but altered later during hydrothermal processes and partly or fully substituted by apatite, REE carbonates and silicates. Two schemes of heterovalent isomorphic substitutions are defined in monazites. Combination of "cheralite" and "huttonite" types of substitution ( $3\text{LREE}^{3+} + \text{P}^{5+} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{Th}^{4+} + \text{Si}^{4+}$ ) prevails in monazites from the high-alumina schists, and "huttonite" type ( $\text{REE}^{3+} + \text{P}^{5+} \leftrightarrow \text{Th}^{2+} + \text{Si}^{2+}$ ) is more typical for monazites in altered granite-porphyry. Monazites of metamorphic genesis in high-alumina schists differ from primary magmatic in lower content of total REE and higher thorium impurity.

For citation

Kalinin, A. A. et al. 2026. Rare earth elements and yttrium minerals in altered granite-porphyry and hosting high-alumina schists in the Pellapahk Cu-Mo occurrence (Kolmozero-Voronya Belt). *Vestnik of MSTU*, 29(1), pp. 16–28. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-16-28>.

## Введение

Акцессорные минералы в магматических и метаморфических породах и в гидротермальных образованиях в настоящее время рассматриваются как важные компоненты петрологического анализа и все чаще используются при построении петрологических и геохимических моделей геологических процессов (Larson et al., 2022; Volante et al., 2024; Schultz, 2021 и др.). Особое внимание при этом уделяется минералам, содержащим редкоземельные элементы либо как минералообразующие элементы, либо в виде примесей – таким, как циркон, монацит, ксенотим, апатит.

Монациты (LREE)PO<sub>4</sub> представляют собой моноклинный ортофосфат легких редкоземельных элементов. Ксенотимы (Y,HREE)PO<sub>4</sub> – ортофосфаты тяжелых редкоземельных элементов, имеют тетрагональную сингонию и являются структурным аналогом циркона, гафнона, торита и коффинита. Монациты и ксенотимы – наиболее часто используемые минералы-геохронометры при химическом датировании, поскольку содержание в них нерадиогенного Pb минимально по сравнению с радиогенным, а потери U, Th и Pb после кристаллизации минералов малы. Различаются монациты и ксенотимы магматического, метаморфического и гидротермального генезиса, и минералы могут быть использованы для датирования соответствующих процессов минералообразования (Вотьяков и др., 2011а, б и ссылки там).

В измененных гранит-порфирах Cu-Mo рудопроявления Пеллапахк и во вмещающих глиноземистых сланцах-метапелитах установлена акцессорная минерализация, представленная фосфатами (монацит-Се, ксенотим-Y, апатит-F), фтор-карбонатами (синхизит-Се, паризит-Се) и силикатом (алланит-Се)<sup>1</sup> редких земель. Настоящая статья посвящена описанию и интерпретации взаимоотношений акцессорных REE-минералов с другими минералами метаморфических комплексов зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья и изучению типохимических особенностей монацитов различного генезиса.

## Геологическое строение северо-западной части пояса Колмозеро-Воронья

Метаморфизованные вулканогенно-осадочные комплексы зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья представлены метавулканидами коматиит-толеитовой и базальт-андезит-дацитовый серий, а также метаосадочными породами – метапелитами и метапесчаниками (Гавриленко и др., 2002). Согласно принятой стратиграфической схеме (Государственная..., 2008), они отнесены к колмозерской и к поросозерской сериям. Колмозерская серия включает лязозерскую толщу метаосадочных пород (биотитовых гнейсов), полмостундровскую свиту метавулканических пород основного состава коматиит-толеитовой серии и вороньетундровскую свиту метавулканических пород средне-кислого состава. Поросозерская серия сложена метаосадочными толщами биотитовых плагиогнейсов с гранатом, ставролитом, кианитом или андалузитом. Для поросозерской серии установлены следующие значения возраста слагающих ее пород: конгломераты из района оз. Лица – 2845 ± 28 млн лет, кварциты из того же района – 2839 ± 11 млн лет (Кудряшов и др., 2023).

На участке г. Пеллапахк породы поросозерской серии представлены порфиروبластическими биотит-андалузитовыми, ставролит-биотит-андалузитовыми, биотит-кордиеритовыми плагиосланцами. Основная мелкозернистая ткань этих пород сложена плагиоклазом, кварцем, биотитом и мусковитом, а минералы глинозема (андалузит, ставролит, кордиерит, редко гранат) образуют порфиробласты размером до 1 см. Первичный состав глиноземистых сланцев реконструируется как гидрослюдистые глины – метапелиты (Белолитецкий и др., 1980).

Гранит-порфиры г. Пеллапахк интродуцируют основные и средние метавулканиды колмозерской серии, а также высокоглиноземистые сланцы поросозерской серии, что подтверждается секущим характером контактов гранит-порфиров и наличием ксенолитов сланцев поросозерской серии в южной части интрузии (Калинин и др., 2012). Возраст интрузии гранит-порфиров, определенный классическим U-Pb методом по циркону, составил 2828 ± 8 млн лет, СКВО = 0,86 (Калинин и др., 2010). Таким образом, внедрение кварцевых порфиров связано с завершающей стадией формирования комплекса вулканогенно-осадочных пород пояса до регионального метаморфизма амфиболитовой фации.

Метасоматически измененные породы развиваются в виде полосы мощностью около 700 м вдоль границы кварцевых порфиров и высокоглиноземистых сланцев поросозерской серии. Отмечается следующая зональность измененных пород: (0) – слабоизмененные гранит-порфиры, (1) – микроклин-кварцевые и кварц-микроклиновые породы, (2) – кварц-мусковитовые и мусковит-кварцевые сланцы, (3) – кианит (андалузит)-мусковит-кварцевые сланцы, (4) – жедрит-кордиеритовые породы по сланцам поросозерской серии, (5) – слабоизмененные андалузит-биотитовые плагиосланцы поросозерской серии (Калинин, 2021). В измененных гранит-порфирах г. Пеллапахк установлена Cu-Mo минерализация, которая отнесена к метаморфизованному порфиоровому типу (Калинин, 2021; Kalinin et al., 2021). Продуктивная минерализация связана с минерализованным штокверком кварцевых и кальцит-эпидот-кварцевых прожилков, охватывающим измененные породы зон (1–3) (Калинин и др., 2012).

<sup>1</sup> Поскольку в породах установлено только по одной разновидности каждого из указанных минералов, то ниже они именуется просто монацит, ксенотим, апатит, алланит, синхизит и паризит.

### Методика исследований

Исследования проведены на основе материала из коллекции авторов, собранного в ходе полевых работ в зеленокаменном поясе Колмозеро-Воронья в 2023 г., а также из керна скважин, пробуренных компанией Блэк Фокс в 2005–2008 гг. В коллекцию входили протолочные пробы горных пород, образцы и сколки на шлифы, прозрачно-полированные шлифы и аншлифы из материала коренных пород. Кроме того, из шлиховых концентратов протолочных проб были изготовлены искусственные аншлифы.

Исследования фазовой и внутрифазовой неоднородности минеральных индивидов, изучение химического состава минералов осуществлялось методами оптической и электронной микроскопии. Минералогические и петрографические исследования выполнялись с помощью оптического микроскопа Axioplan, снабженного блоком видеорегистрации, в отраженном и проходящем поляризованном свете.

Химический анализ (или оценка состава при малых размерах зерен) минералов выполнялся при помощи энергодисперсионного рентгеновского спектрометра UltimMax-100 (Oxford Instruments), установленного на сканирующем электронном микроскопе LEO-1450 (Carl Zeiss) в программе AZtec в Лаборатории физических исследований пород руд и минералов в Геологическом институте КНЦ РАН (аналитик Е. Э. Савченко). Параметры работы прибора: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток электронного зонда 2 нА, время накопления спектров 50–100 с. Часть микронзондовых анализов выполнена в СПбГУ в ресурсном центре "Геомодель" на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N с аналитической приставкой для энергодисперсионного анализа – спектрометром Oxford Instruments X-Max 20 (аналитик Н. С. Власенко). Параметры работы прибора приведены на официальном сайте ресурсного центра "Геомодель" (<https://researchpark.spbu.ru/index.php/equipment-geomodel-rus/>).

### Результаты исследований

В глиноземистых сланцах и гнейсах поросозерской серии апатит-*F* встречается очень редко, значительно чаще отмечаются монацит-*Се* и ксенотим-*У*. При этом в одних образцах отмечен исключительно монацит, в других – только ксенотим, в третьих установлены оба минерала. Монацит и ксенотим образуют редкую вкрапленность изометричных зерен размером чаще менее 10 мкм, максимально до 50 мкм (рис. 1). Обычно выделения фосфатов редкоземельных элементов располагаются в интерстициях между зернами кварца и силикатных минералов (биотит, хлорит, кордиерит, плагиоклаз, андалузит, ставролит), реже во включениях в названных минералах.

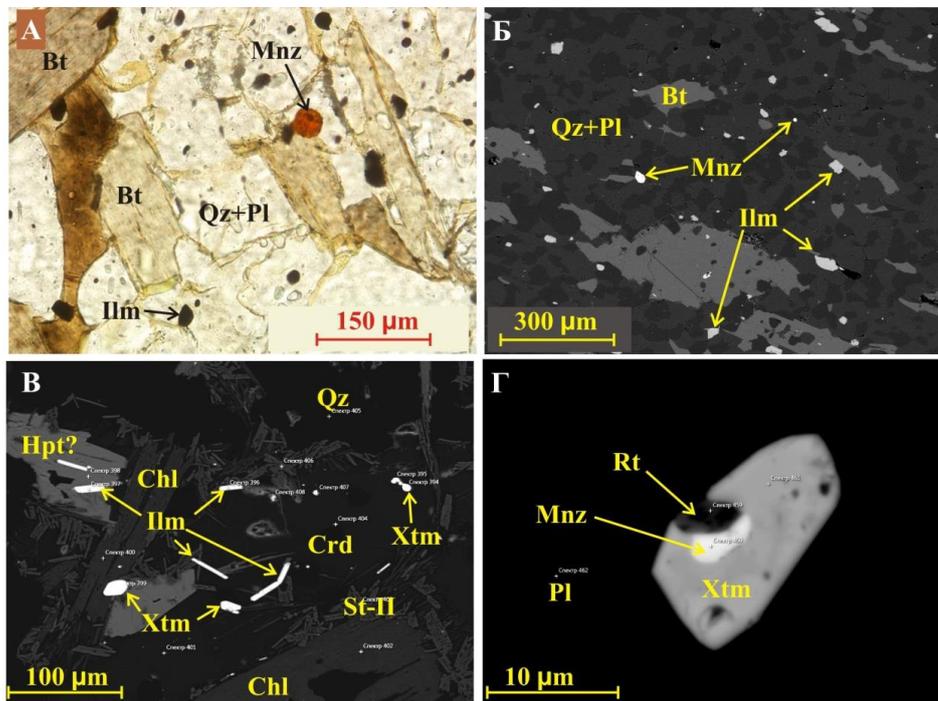


Рис. 1. Монацит и ксенотим в глиноземистых сланцах поросозерской серии: *a* – фото аншлифа, без анализатора; *б–г* – изображения в обратно-рассеянных электронах. Bt – биотит, Chl – хлорит, Crd – кордиерит, Hpt – гиперстен, Ilm – ильменит, Mnz – монацит, Pl – плагиоклаз, Qz – кварц, Rt – рутил, St-II – ставролит II генерации, замещающий кордиерит, Xtm – ксенотим

Fig. 1. Monazite and xenotime in the high-alumina schists of the Porosozero series: *a* – thin section photo, plane polarized light; *б–г* – BSE images. Bt – biotite, Chl – chlorite, Crd – cordierite, Hpt – hypersthene, Ilm – ilmenite, Mnz – monazite, Pl – plagioclase, Qz – quartz, Rt – rutile, St-II – staurolite of the II generation, substituting cordierite, Xtm – xenotime

Зональность в зернах изученных фосфатов не отмечалась, что, возможно, связано с малыми размерами зерен. В единичных случаях, когда монацит и ксенотим встречаются в сростаниях друг с другом (а также с рутилом и цирконом), видно, что монацит формировался после циркона и рутила, а затем обрастал ксенотимом (рис. 1, з). Замещение монацита и ксенотима другими минералами не отмечено.

В измененных гранит-порфирах (кианит-мусковитовых сланцах, в штокверке минерализованных прожилков) часто встречается апатит (типичный аксессуарный минерал), несколько реже отмечается монацит, еще реже – ксенотим (рис. 2). Содержание монацита и ксенотима повышено на участках развития сульфидной минерализации.

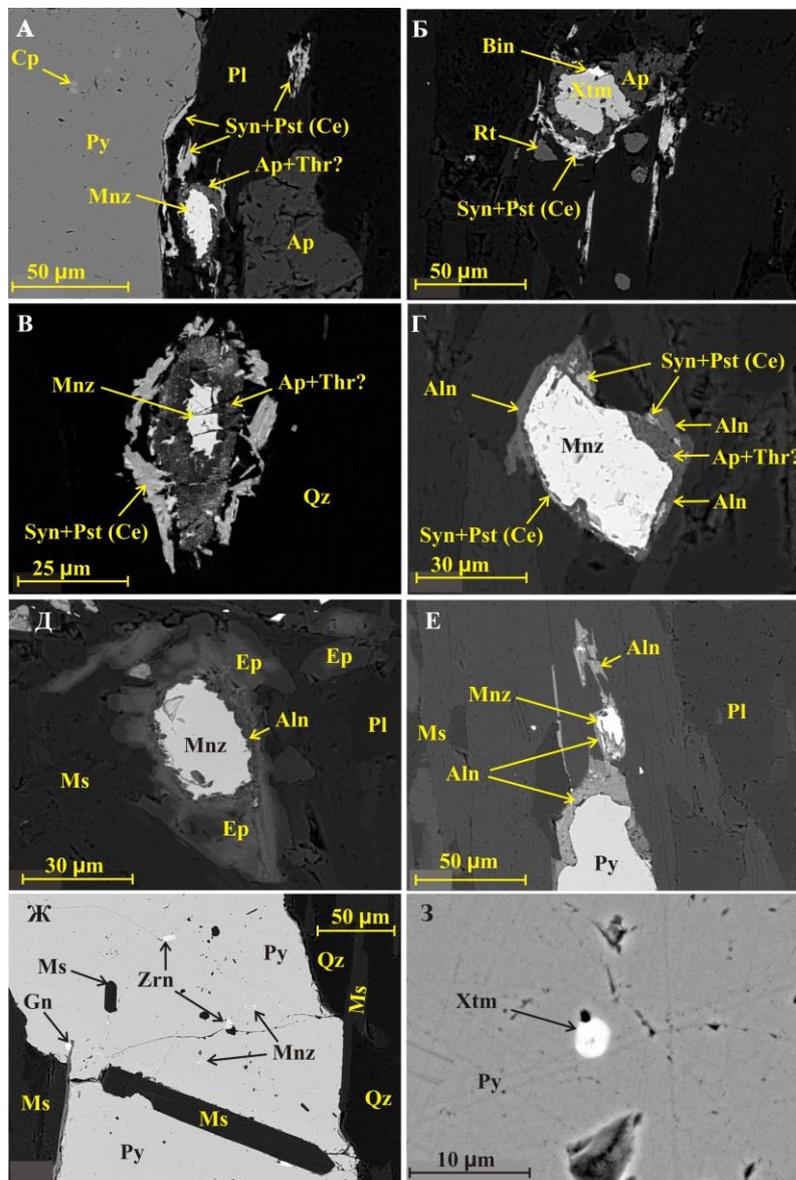


Рис. 2. Монацит и ксенотим в измененных гранит-порфирах: *a–d* – зональные зерна, где монацит и ксенотим замещаются апатитом, фтор-карбонатами редких земель, алланитом и эпидотом; *e* – кайма алланита по монациту и пириту; *ж–з* – включения монацита и ксенотима в пирите.

Aln – алланит, Ap – апатит, Bin – висмутин, Cp – халькопирит, Ep – эпидот, Gn – галенит, Mnz – монацит, Ms – мусковит, Pl – плагиоклаз, Pst – паризит, Py – пирит, Qz – кварц, Rt – рутил, Syn – синхизит, Thr – торит (хаттонит?), Xtm – ксенотим, Zrn – циркон.

Изображения в обратно-рассеянных электронах

Fig. 2. Monazite and xenotime in altered granite-porphyrus: *a–d* – zonal grains, partly substituted by apatite, synchysite and parisite, allanite and epidote; *e* – monazite and pyrite with a rim of allanite; *ж–з* – monazite and xenotime inclusions in pyrite. Aln – allanite, Ap – apatite, Bin – bismuthinite, Cp – chalcopyrite, Ep – epidote, Gn – galena, Mnz – monazite, Ms – muscovite, Pl – plagioclase, Pst – parisite, Py – pyrite, Qz – quartz, Rt – rutile, Syn – synchysite, Thr – thorite (huttonite?), Xtm – xenotime, Zrn – zircon. BSE images

Значительно реже в метасоматитах по гранит-порфирам отмечен монацит в виде изометричных зерен размером менее 50 мкм в кварц-силикатной матрице в зонах интенсивной вкрапленной сульфидной минерализации. Этот монацит весьма сходен по морфологии с монацитом из глиноземистых сланцев поросозерской серии.

Третья морфологическая разновидность монацита и ксенотима – включения округлой формы размером менее 10 мкм в пирите (рис. 3, ж–з), в других сульфидах включения монацита и ксенотима не отмечены. Кроме монацита и ксенотима в пирите нередко встречаются микровключения циркона, халькопирита, сфалерита, галенита, недиагностированных соединений висмута с медью и серебром.

Анализ химического состава показывает устойчивость соотношения редкоземельных элементов в ранних и поздних минеральных фазах (табл. 1–3). На графиках нормированных спектров распределения редкоземельных элементов (рис. 3) можно отметить некоторое выполаживание спектров легких REE в поздних фазах (карбонаты и силикаты REE) относительно раннего монацита.

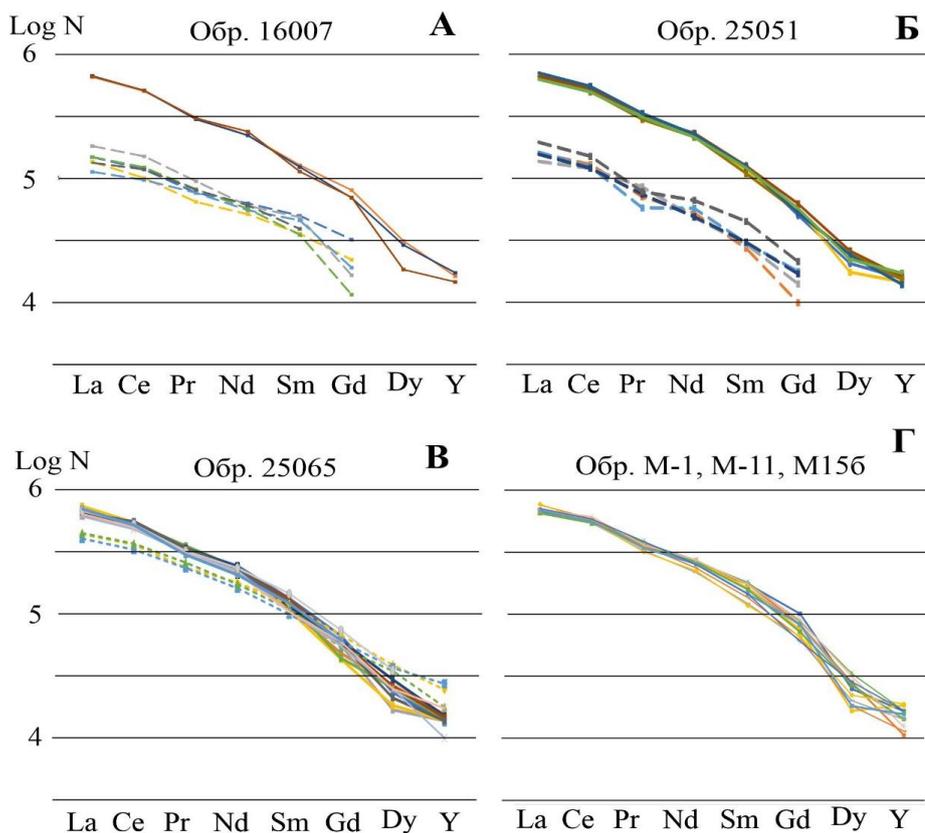


Рис. 3. Нормированные по хондритам (Тейлор и др., 1988) спектры легких редкоземельных элементов и иттрия в монаците (сплошная линия), в алланите (длинный пунктир), во фтор-карбонатах редких земель (короткий пунктир), построенные по результатам микрозондового анализа: а–в – спектры для минералов из измененных гранит-порфиров; г – для минералов из глиноземистых сланцев  
 Fig. 3. Chondrite-normalized REE and Y spectra of monazite (solid line), allanite (long dotted line), and REE fluorine carbonates (short dotted line) from granite porphyry (a–в) and high-alumina schist (г)

Сравнение химического состава монацитов из пород разного генезиса показывает, что сумма LREE в монацитах из метасоматитов по гранит-порфирам выше, чем в монацитах из глиноземистых сланцев (рис. 4), следовательно, монациты глиноземистых сланцев богаче элементами-примесями, замещающими LREE. Основной элемент, входящий в решетку монацита в виде примеси, – это торий. Как видно на рис. 5, б, содержание тория в монацитах глиноземистых сланцев, в целом, выше, чем в монацитах из гранит-порфиров и метасоматитов по ним.



Таблица 2. Химический состав алланита, синхизита и паризита из измененных гранит-порфиров, мас. %  
Table 2. Microprobe data for allanite, synhisite, and parisite from altered granite-porphyr, wt. %

№ пробы	16017				25051				C25	25065			25065	
	Алланит								Синхизит			Паризит		
CO <sub>2</sub>	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	27,59	24,59	24,59	20,08	20,08	
F	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	4,60	4,39	4,37	4,85	6,86	
MgO	0,79	0,51	0,62	н.п.о.	н.п.о.	0,54	0,81	1,16	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,55	18,28	20,07	19,67	22,40	21,77	22,63	21,93	0,25	0,17	0,26	0,22	0,49	
SiO <sub>2</sub>	34,39	35,69	35,66	35,88	34,92	36,89	35,45	34,05	0,60	0,33	0,70	0,32	0,76	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,60	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,10	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	
SO <sub>3</sub>	0,36	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,17	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,14	0,15	н.п.о.	н.п.о.	0,68	
Cl	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,06	н.п.о.	н.п.о.	
K <sub>2</sub> O	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,20	0,09	н.п.о.	
CaO	9,96	10,23	12,69	12,20	13,65	11,94	12,87	12,64	17,22	16,32	15,70	6,84	6,52	
TiO <sub>2</sub>	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,28	0,15	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	
MnO	1,62	1,81	1,72	0,32	1,82	2,10	2,47	2,29	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	
FeO	5,51	5,44	5,65	5,76	7,40	5,53	5,45	7,38	0,20	0,71	0,41	н.п.о.	0,25	
ZnO	0,64	0,78	0,48	0,32	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,16	0,31	0,79	0,26	0,36	н.п.о.	0,24	0,45	0,55	3,83	2,77	1,56	2,71	
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,32	3,22	2,68	3,17	3,68	3,17	3,75	4,42	15,58	10,38	10,58	14,43	15,08	
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,23	6,17	5,95	7,25	7,70	7,16	7,38	8,80	20,90	22,09	22,52	29,42	30,47	
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,88	0,60	0,71	0,75	0,64	0,77	0,52	0,69	2,19	2,18	2,40	2,87	2,87	
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,75	2,35	2,53	2,78	2,32	2,14	2,54	2,88	8,70	8,17	7,90	10,18	9,61	
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,72	0,53	0,68	0,58	0,39	0,42	0,43	0,63	1,24	1,76	1,60	1,54	1,53	
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,33	0,44	0,38	н.п.о.	0,19	0,27	0,34	0,40	0,60	1,34	1,06	1,09	1,18	
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,95	0,85	0,61	0,61	
PbO	4,74	6,34	3,22	3,65	н.п.о.	1,11	0,43	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	
ThO <sub>2</sub>	0,87	0,38	0,44	0,67	н.п.о.	0,44	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,41	0,46	н.п.о.	
Сумма	95,56	93,08	94,27	93,26	95,64	94,44	95,71	97,87	100,36	97,34	96,36	94,57	99,69	
Коэффициенты кристаллохимической формулы минерала (рассчитаны на 12,5 атомов кислорода для алланита, на 7 атомов кислорода и фтора для синхизита и на 11 атомов кислорода и фтора для паризита)														
C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,92	1,82	1,83	2,67	2,45	
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,74	0,76	0,76	1,51	1,95	
Mg	0,11	0,07	0,09	0,00	0,00	0,07	0,11	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Al	1,97	2,07	2,18	2,16	2,36	2,30	2,38	2,32	0,01	0,01	0,01	0,03	0,06	
Si	3,28	3,42	3,29	3,34	3,13	3,31	3,16	3,06	0,03	0,02	0,04	0,03	0,06	
P	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
S	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,03	
Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	
Ca	1,02	1,05	1,25	1,22	1,31	1,15	1,23	1,22	0,94	0,95	0,92	0,72	0,63	
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Mn	0,04	0,05	0,04	0,01	0,04	0,05	0,06	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Fe	0,44	0,44	0,44	0,45	0,55	0,41	0,41	0,55	0,01	0,04	0,02	0,00	0,03	
Zn	0,05	0,06	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Y	0,01	0,02	0,04	0,01	0,02	0,00	0,01	0,02	0,01	0,11	0,08	0,09	0,13	
La	0,15	0,11	0,09	0,11	0,12	0,10	0,12	0,15	0,29	0,21	0,21	0,53	0,50	
Ce	0,32	0,22	0,20	0,25	0,25	0,24	0,24	0,29	0,39	0,44	0,45	1,04	1,01	
Pr	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,04	0,04	0,05	0,09	0,09	
Nd	0,09	0,08	0,08	0,09	0,07	0,07	0,08	0,09	0,16	0,16	0,15	0,35	0,31	
Sm	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	0,03	0,06	0,03	
Gd	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	
Dy	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03	0,03	
Pb	0,12	0,16	0,08	0,09	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Th	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Примечание: н.п.о. – содержание элемента ниже предела его обнаружения.

Появление тория в монацитах связано с двумя главными типами изоморфного замещения в монацитах – "чералитовым"  $2\text{LREE}^{3+} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{Th}^{4+}$  и "хаттонитовым"  $\text{LREE}^{3+} + \text{P}^{5+} \leftrightarrow \text{Th}^{4+} + \text{Si}^{4+}$  (Вотьяков и др., 2011 а, б). Чералит  $\text{CaTh}(\text{PO}_4)_2$  и хаттонит  $\text{Th}(\text{SiO}_4)$  – изоструктурные с монацитом минералы, образующие с ним непрерывные изоморфные ряды (Вотьяков и др., 2011 а, б). Оба типа замещения гетеровалентные, позволяющие входить в решетку минерала двухвалентным ( $\text{Ca}^{2+}$ , а также  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ) и четырехвалентным ( $\text{Th}^{4+}$ ,  $\text{U}^{4+}$ ,  $\text{Si}^{4+}$ ) ионам. Как показывает рис. 5, а, в изученных монацитах из глиноземистых сланцев преобладающим типом является комбинация чералитового и хаттонитового замещения по схеме  $3\text{LREE}^{3+} + \text{P}^{5+} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{Th}^{4+} + \text{Si}^{4+}$ , а в монацитах из измененных гранит-порфиров преобладает хаттонитовое замещение, также отмечается хаттонитовое в комбинации с чералитовым.

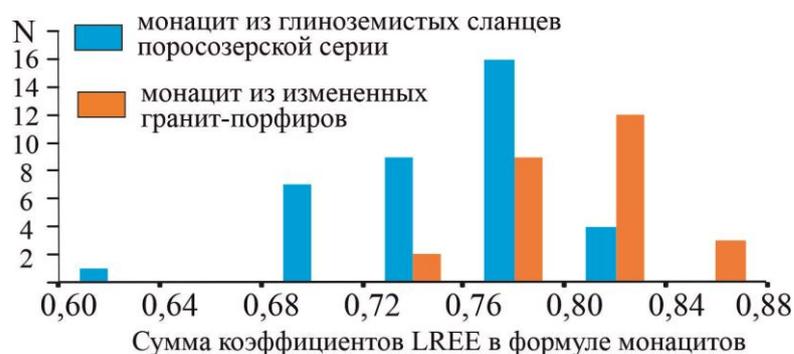


Рис. 4. Гистограмма распределения содержания суммы легких редкоземельных элементов (La-Nd) в монацитах  
 Fig. 4. Histogram for  $\Sigma\text{LREE}$  (La-Nd) in monazites

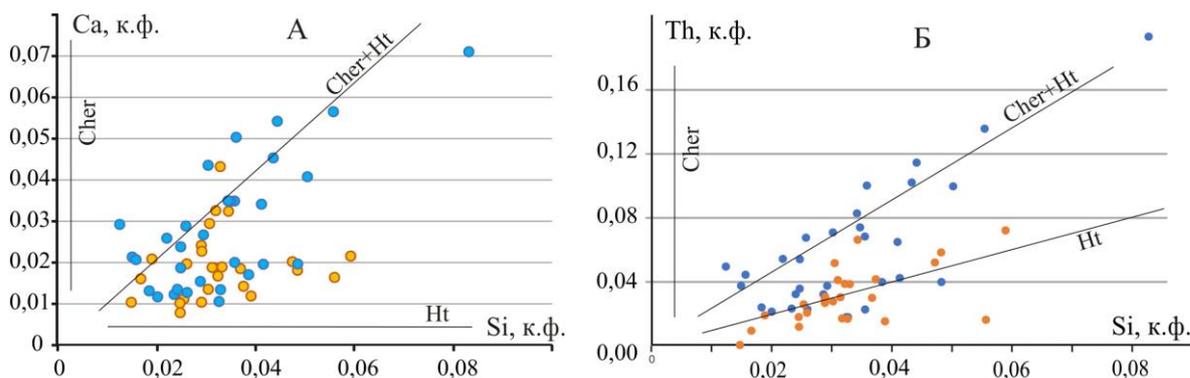


Рис. 5. Диаграммы Ca-Si (а) и Th-Si (б) для монацитов из глиноземистых сланцев (голубые точки) и измененных гранит-порфиров (оранжевые). Ht – хаттонитовый, Cher – чералитовый пути замещения  
 Fig. 5. Diagrams Th-Si (а) and Ca-Si (б) for monazites from high-alumina schists (blue dots) and altered granite porphyry (orange). Ht – huttonite, Cher – cheralite types of isomorphous substitution

В ряде публикаций (Wu et al., 2019; Schandl et al., 2004; Taylor et al., 2015 и др.) указывается, что магматический, гидротермальный и метаморфический монациты различаются по содержанию и соотношению примесей. В частности, монациты гидротермального происхождения бедны торием по сравнению с монацитами метаморфического и магматического генезиса. В статье (Wu et al., 2019) предложена дискриминационная диаграмма, позволяющая их отличить (рис. 6, а). Нанесенные на предложенный график составы изученных нами монацитов в абсолютном большинстве попали в область метаморфических и магматических, и только несколько монацитов из метасоматитов по гранит-порфирам – в поле гидротермальных (рис. 6, а).

В той же статье (Wu et al., 2019) предлагается диаграмма для разделения метаморфических и магматических монацитов (рис. 6, б). Все нанесенные точки составов изученных монацитов из измененных гранит-порфиров размещаются в поле магматических монацитов. Монациты из глиноземистых сланцев, в основном, попадают в область метаморфических, но около 30 % точек оказались при этом в поле монацитов магматического генезиса.

Составы фтор-карбонатов REE, приведенные в табл. 2, показывают некоторое отклонение от стехиометрических синхизита и паризита. Это можно объяснить сложностью анализа близких по составу фаз, находящихся в тонком сростании. В целом, для наложенных минералов редкоземельных элементов – фтор-карбонатов и минералов группы эпидота – характерны те же элементы-примеси, что и для монацитов.

Обращает на себя внимание высокое содержание свинца (до 6,3 мас.%), марганца (до 2,5 %) и цинка (до 0,8 %) в алланитах из карбонат-кварцевых прожилков с галенит-сфалеритовой минерализацией (табл. 2).

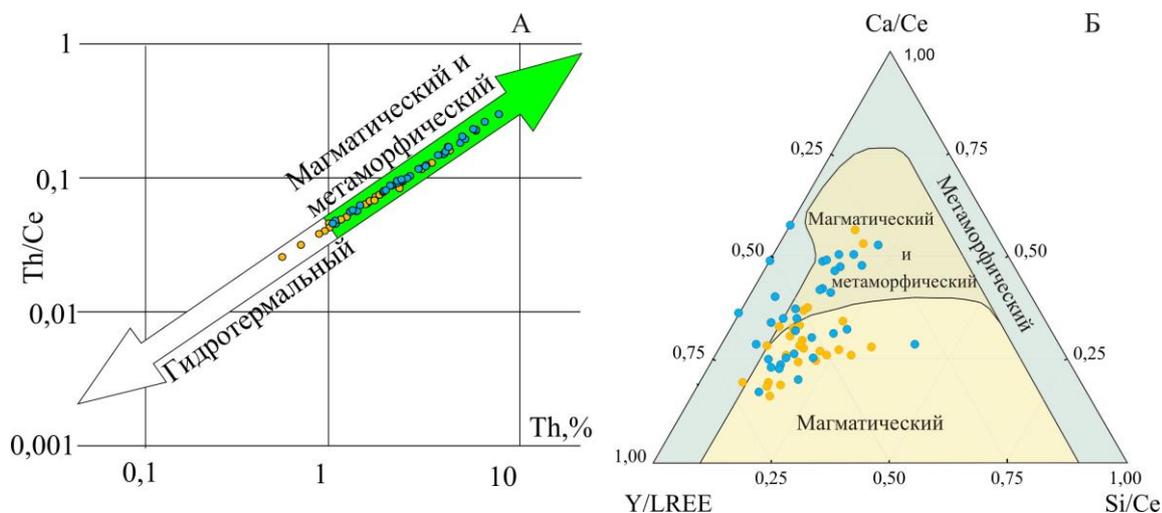


Рис. 6. Диаграммы Th/Ce – Th (а) и Y/LREE – Ca/Ce – Ca/Ce (б) для монацитов из глиноземистых сланцев (голубые точки) и измененных гранит-порфиоров (оранжевые) (отношения рассчитаны для мас.% содержания элементов). Стрелки на диаграмме и поля монацитов различного генезиса показаны согласно (Wu et al., 2019)

Fig. 6. Diagrams Th/Ce – Th (a) and Y/LREE – Ca/Ce – Ca/Ce (b) for monazites from high-alumina schists (blue) and altered granite porphyry (orange) (calculated for elements content in wt.%). Arrows in (a) and fields of monazites of different origin are exported from (Wu et al., 2019)

В составе ксенотимов (табл. 3) иттриевый минал составляет от 70 до 80 %. От 17 до 29 % позиции иттрия занимают тяжелые редкоземельные элементы, их содержание в изученных зернах ксенотима относительно стабильно, за исключением гадолиния, содержание которого варьирует от 1,8 до 7,1 мас.%. Незначительную долю позиции иттрия (1–3 %) занимают железо и стронций. Примесь кальция не установлена. Фосфор может замещаться кремнием: примесь SiO<sub>2</sub> составляет от 0,17 до 1,8 мас.%.

Таблица 3. Химический состав ксенотима по данным микрозондового анализа, масс.%  
Table 3. Microprobe data for xenotime, wt.%

Элемент	Глиноземистые сланцы поросозерской серии				Гранит-порфиры		Коэффициенты кристаллохимической формулы ксенотима (рассчитаны на 4 атома кислорода)							
	M1	M15b	M15b	M15b	25051	25065	Элемент	M1	M15b	M15b	M15b	25051	25065	
SiO <sub>2</sub>	0,17	0,45	0,34	0,59	1,80	0,63	Si	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	33,82	34,18	34,71	34,52	36,87	34,35	P	1,00	0,99	0,99	0,99	1,00	0,99	
K <sub>2</sub> O	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,20	н.п.о.	н.п.о.	K	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	
FeO	0,53	0,48	0,33	0,93	н.п.о.	н.п.о.	Fe	0,02	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01	
SrO	н.п.о.	0,53	0,38	0,23	н.п.о.	0,85	Sr	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37,30	41,91	43,89	41,32	43,85	44,73	Y	0,69	0,76	0,78	0,74	0,69	0,76	
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	н.п.о.	0,13	н.п.о.	0,26	н.п.о.	н.п.о.	Nd	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,33	0,37	0,33	0,56	н.п.о.	0,40	Sm	0,02	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,02	н.п.о.	н.п.о.	0,27	н.п.о.	н.п.о.	Eu	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,11	2,31	2,20	2,59	7,04	1,84	Gd	0,08	0,03	0,02	0,03	0,08	0,03	
Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,12	0,73	0,77	0,59	н.п.о.	0,31	Tb	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,57	6,13	5,77	6,00	5,84	5,65	Dy	0,09	0,07	0,06	0,07	0,09	0,07	
Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,15	1,39	1,25	1,18	н.п.о.	1,31	Ho	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,57	4,01	4,34	4,04	3,23	3,73	Er	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	
Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	н.п.о.	0,52	0,63	0,63	н.п.о.	н.п.о.	Tm	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,44	3,73	3,50	3,89	1,37	3,74	Yb	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	
Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	н.п.о.	0,26	0,11	0,31	н.п.о.	н.п.о.	Lu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
PbO	н.п.о.	0,20	0,13	0,21	н.п.о.	н.п.о.	PbO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
ThO <sub>2</sub>	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,56	Th	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
UO <sub>3</sub>	н.п.о.	0,67	0,49	0,41	н.п.о.	н.п.о.	U	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Сумма	97,14	98,00	99,17	98,74	100,00	98,10								

### Обсуждение результатов

В глиноземистых сланцах и гнейсах поросозерской серии монациты и ксенотимы образуют равномерную вкрапленность изометричных зерен, располагающихся в интерстициях и во включениях в породообразующих минералах метаморфических пород (рис. 2). По морфологическим особенностям и минеральным ассоциациям их можно рассматривать как фосфаты метаморфического генезиса. Их формирование связано с перераспределением редкоземельных элементов, находящихся в силикатах Ca, Fe, Mg, Al в виде изоморфных примесей в собственные минеральные фазы при метаморфизме.

Монациты и ксенотимы в метаморфизованных измененных породах гранит-порфировой интрузии могут быть как магматического, так и гидротермального и/или метаморфического генезиса. Наиболее вероятным представляется их магматическое происхождение и последующее гидротермальное изменение. Измененные монациты встречаются преимущественно на участках развития сульфидной минерализации в кианит-мусковитовых сланцах и в экзоконтактовой зоне минерализованных эпидот-кальцит-кварцевых прожилков. Замещение монацита и ксенотима другими минералами редких земель и соединениями кальция проходило в ходе гидротермальных процессов в определенной последовательности, отраженной на рис. 2. Сначала фосфаты редкоземельных элементов замещаются апатитом-F, т. е. редкоземельные элементы фосфатов замещаются кальцием под воздействием фторсодержащих растворов. Поскольку структура апатита имеет меньшую емкость к торью по сравнению с монацитом и ксенотимом, избыток тория "сбрасывается" в виде вкрапленности торита (или хаттонита) в апатите. Вынесенные при развитии апатита редкоземельные элементы отлагались во внешней зоне зерен в виде фтор-карбонатов REE синхизита и паризита. Наиболее поздними из минералов редких земель являются силикаты алланит, затем эпидот. Таким образом, в ходе изменения монацитов и ксенотимов в группе катионов отмечается смена редкоземельных элементов кальцием, а в анионной группе фосфаты REE сменяются карбонатами, затем силикатами. Весьма высокое содержание примесей свинца и цинка в алланитах из прожилков с галенит-сфалеритовой минерализацией позволяет предположить, что развитие алланита по монациту происходило под воздействием растворов, формировавших указанную минерализацию в прожилках.

Отмеченное выполаживание спектра редкоземельных элементов в поздних минералах (алланите, синхизите, паризите) (рис. 3) говорит о большей подвижности элементов левой части спектра (La, Ce, Nd) по сравнению с гадолинием, диспрозием, иттрием при гидротермальных процессах.

Монацит и ксенотим, отмеченные в виде включений в пиритах, предположительно, были "захвачены" пиритом при росте метакристаллов. Если это так, то монацит и ксенотим во включениях, скорее всего, являются минералами магматического генезиса.

Сопоставление химического состава монацитов различного генезиса показало следующее. На диаграмме Y/LREE – Ca/Ce – Ca/Ce все монациты из метасоматитов по гранит-порфирам попали в поле монацитов магматических пород (рис. 6, б), что соответствует их предположительному первично магматическому происхождению. Но около 30 % точек составов "метаморфических" монацитов из глиноземистых гнейсов выходят за пределы поля монацитов метаморфического генезиса и попадают в поле "магматических" монацитов. Скорее всего, предлагаемая диаграмма не может дать однозначный ответ о генетическом типе монацитов.

"Метаморфические" монациты из глиноземистых сланцев отличаются несколько пониженным уровнем содержания суммы редкоземельных элементов и, соответственно, повышенным уровнем содержания примесей, в первую очередь тория, по сравнению с гидротермально измененными монацитами из метасоматитов по гранит-порфирам. В целом, такое различие в уровне содержания тория является характерным для монацитов разного генезиса.

### Заключение

Фосфаты редкоземельных элементов монацит и ксенотим – распространенные акцессорные минералы в породах зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья.

В глиноземистых сланцах поросозерской серии монацит и ксенотим образуют равномерную вкрапленность изометричных зерен среди породообразующих силикатов. В измененных гранит-порфирах с Cu-Mo минерализацией монацит и ксенотим встречаются преимущественно в виде зональных зерен и слагают их центральную часть, затем последовательно обрастают апатитом, карбонатами REE, алланитом и эпидотом. Кроме того, микровключения монацита и ксенотима были отмечены в метакристаллах пирита.

Для монацита и ксенотима из глиноземистых сланцев поросозерской серии предполагается метаморфический генезис, монациты и ксенотимы из измененных гранит-порфиров, скорее всего, магматического происхождения, но позже были изменены гидротермальными процессами при развитии Cu-Mo и полиметаллической минерализации.

В изученных монацитах из глиноземистых сланцев преобладающим типом замещения является комбинация чералитовой и хаттонитовой схем:  $3\text{LREE}^{3+} + \text{P}^{5+} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{Th}^{4+} + \text{Si}^{4+}$ . В монацитах из измененных гранит-порфиров преобладает хаттонитовое замещение, наряду с ним отмечается комбинация хаттонитовой и чералитовой схем. В монацитах метаморфического генезиса из глиноземистых сланцев сумма редких земель, в целом, ниже, а содержание тория выше, чем в гидротермально измененных монацитах из метасоматитов по гранит-порфирам.

#### Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИР FMEZ-2024-0004.

Авторы выражают благодарность канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотруднику ГИ КНЦ РАН Н. М. Кудряшову и канд. геол.-минерал. наук, доценту кафедры геохимии СПбГУ Е. В. Баданиной за поддержку при проведении исследований, инженеру ресурсного центра "Геомодель" СПбГУ Н. С. Власенко за выполнение микронзондового анализа минералов, инженерам ГИ КНЦ РАН Т. С. Зыковой и Е. В. Галеевой за подготовку шлиховых концентратов проб и искусственных аншлифов.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Библиографический список

- Белолипецкий А. П., Гаскельберг В. Г., Гаскельберг Л. А., Антонюк Е. С. [и др.]. Геология и геохимия метаморфических комплексов раннего докембрия Кольского полуострова. Л. : Наука, 1980. 240 с.
- Вотяков С. Л., Хиллер В. В., Щапова Ю. В. Кристаллохимия и физика радиационно-термических эффектов в ряде U-Th-содержащих минералов как основа для их химического микронзондового датирования. Екатеринбург : Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2011а. 336 с.
- Вотяков С. Л., Хиллер В. В., Щапова Ю. В., Поротников А. В. Моделирование временной эволюции U-Th-Pb системы как основа для химического микронзондового датирования минералов-концентратов урана и тория // Доклады АН. 2011б. Т. 237, № 4. С. 526–529.
- Гавриленко Б. В., Никитин И. В., Зозуля Д. Р., Кудряшов Н. М. [и др.]. Геология, тектоника, возраст и металлогения архейской шовной зоны Колмозеро-Воронья, Кольский регион // Вестник МГТУ. 2002. Т. 5, № 1. С. 43–60.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист R-37, 38. м. Святой Нос, м. Канин Нос. Объяснительная записка. СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. 251 с.
- Калинин А. А. Зональность измененных минерализованных пород на медно-молибденовом порфириновом рудопроявлении Пеллапахк // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2021. Т. 18. С. 188–192. DOI: <https://doi.org/10.31241/FNS.2021.18.034>.
- Калинин А. А., Кудряшов Н. М., Галкин Н. Н. Рудопроявления золота, меди и молибдена в зеленокаменном поясе Колмозеро-Воронья (Кольский полуостров): геологические особенности и возраст // Золото Кольского полуострова и сопредельных территорий. Апатиты : К&М, 2010. С. 51–59.
- Калинин А. А., Галкин Н. Н. Докембрийское медно-молибден-порфириновое месторождение Пеллапахк (зеленокаменный пояс Колмозеро-Воронья) // Вестник Кольского НЦ РАН. 2012. № 1. С. 80–92.
- Кудряшов Н. М., Калинин А. А., Удоратина О. В. Последовательность формирования супракрустальных и интрузивных комплексов мезоархейского зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья (Кольский регион) // Стратиграфия докембрия: проблемы и пути решения. Материалы VIII Российской конференции по проблемам геологии докембрия (Санкт-Петербург, 25–29 сентября 2023 г.). СПб. : Свое издательство, 2023. С. 83–85.
- Тейлор С. Р., Мак-Леннан С. М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М. : Мир, 1988. 384 с.
- Kalinin A. A., Kudryashov N. M. Porphyry-related metamorphosed Au-Ag and Cu-Mo deposits in the Precambrian of the Fennoscandian Shield // Minerals. 2021. Vol. 11, Iss. 2. P. 1–26. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11020139>. EDN: DHUROB.
- Larson K. P., Shrestha S., Cottle J. M., Guilmette C. [et al.]. Re-evaluating monazite as a record of metamorphic reactions // Geoscience Frontiers. 2022. Vol. 13(2). Article number: 101340.
- Schandl E. S., Gorton M. P. A textural and geochemical guide to the identification of hydrothermal monazite: Criteria for selection of samples for dating epigenetic hydrothermal ore deposits // Economic Geology. 2004. Vol. 99, Iss. 5. P. 1027–1035. DOI: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.99.5.1027>.
- Schulz B. Monazite microstructures and their interpretation in petrochronology // Frontiers Earth Science. 2021. Vol. 9. Article number: 668566. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.668566>.

- Taylor R. D., Goldfarb R. J., Monecke T., Fletcher I. R. [et al.]. Application of U-Th-Pb phosphate geochronology to young orogenic gold deposits: New age constraints on the formation of the Grass Valley Gold District, Sierra Nevada Foothills Province, California // *Economic Geology*. 2015. Vol. 110. P. 1313–1337.
- Volante S., Blereau E., Guitreau M., Tedeschi M. [et al.]. Current applications using key mineral phases in igneous and metamorphic geology: Perspectives for the future. *Geological Society Special Publications*. 2024. Vol. 537, Iss. 1. P. 57–121. DOI: <https://doi.org/10.1144/SP537-2022-254>. EDN: AOGUDU.
- Wu L.-G., Li X.-H., Ling X.-X., Yang Y.-H. [et al.]. Further characterization of the RW-1 monazite: New working reference material for oxygen and neodymium isotopic microanalysis // *Minerals*. 2019. Vol. 9. Article number: 583. DOI: <https://doi.org/10.3390/min9100583>.

## References

- Belolipetsky, A. P., Gaskel'berg, V. G., Gaskel'berg, L. A., Antonyuk, Ye. S. et al. 1980. Geology and geochemistry of the Early Precambrian metamorphic complexes of the Kola Peninsula. Leningrad. (In Russ.)
- Votyakov, S. L., Khiller, V. V., Schapova, Yu. V. 2011a. Crystallochemistry and physics of the radiation-thermal effects in a series of U-Th-bearing minerals as a basement for their chemical microprobe dating. Yekaterinburg. (In Russ.)
- Votyakov, S. L., Khiller, V. V., Schapova, Yu. V., Porotnikov, A. V. 2011b. Modelling of temporal evolution of the U-Th-Pb system as a basement for chemical microprobe dating of minerals-concentrators of uranium and thorium. *Doklady AN*, 237(4), pp. 526–529. (In Russ.)
- Gavrilenko, B. V., Nikitin, I. V., Zozulya, D. R., Kudryashov, N. M. et al. 2002. Geology, tectonics, age, and metallogeny of the Archean suture zone Kolmozero-Voron'ya. *Vestnik MGTU*, 5(1), pp. 43–60. (In Russ.)
- State geological map of Russian Federation. 2008. Scale 1:1000000 (the third generation) Series Severo-Karsko-Barentsevomorskaya. Sheet R-37, 38 – cape Svyatoy Nos, cape Kanin Nos. Explanatory note. Saint Petersburg. (In Russ.)
- Kalinin, A. A. 2021. Zonation of altered mineralized rocks in the Pellapahk Copper-Molybdenum porphyry occurrence. *Proceedings of the Fersman Scientific Session of the Geological Institute*, 18, pp. 188–192. DOI: <https://doi.org/10.31241/FNS.2021.18.034>. (In Russ.)
- Kalinin, A. A., Kudryashov, N. M., Galkin, N. N. 2010. Occurrences of gold, copper, and molybdenum mineralization in the Kolmozero-Voron'ya greenstone belt (Kola Peninsula): Geological characteristics and age. In coll. articles *Gold in the Kola Peninsula and adjacent territories*, Apatity, K&M, pp. 51–59. (In Russ.)
- Kalinin, A. A., Galkin, N. N. 2012. The Precambrian Copper-Molybdenum porphyry deposit Pellapahk (Kolmozero-Voron'ya greenstone belt). *Vestnik KNTs RAN*, 1, pp. 80–92. (In Russ.)
- Kudryashov, N. M., Kalinin, A. A., Udoratina O. V. 2023. Succession of formation of supracrustal and intrusive complexes in the Mesoarchean greenstone belt Kolmozero-Voronya (Kola region). *Proceedings of the VIII Russian conference on the problems of the Precambrian geology Stratigraphy of the Precambrian: problems and the ways to solutions*. Saint Petersburg, 25–29 September, 2023, pp. 83–85. (In Russ.)
- Taylor, S. R., McLennan, S. M. 1988. The continental crust: Its composition and evolution. Moscow. (In Russ.)
- Kalinin, A. A., Kudryashov, N. M. 2021. Porphyry-related metamorphosed Au-Ag and Cu-Mo deposits in the Precambrian of the Fennoscandian Shield. *Minerals*, 11(2), pp. 1–26. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11020139>. EDN: DHUROB.
- Larson, K. P., Shrestha, S., Cottle, J. M., Guilmette, C. et al. 2022. Re-evaluating monazite as a record of metamorphic reactions. *Geoscience Frontiers*, 13(2). Article number: 101340.
- Schandl, E. S., Gorton, M. P. 2004. A textural and geochemical guide to the identification of hydrothermal monazite: Criteria for selection of samples for dating epigenetic hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, 99(5), pp. 1027–1035. DOI: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.99.5.1027>.
- Schulz, B. 2021. Monazite microstructures and their interpretation in petrochronology. *Frontiers Earth Science*, 9. Article number: 668566. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.668566>.
- Taylor, R. D., Goldfarb, R. J., Monecke, T., Fletcher, I. R. et al. 2015. Application of U-Th-Pb phosphate geochronology to young orogenic gold deposits: New age constraints on the formation of the Grass Valley Gold District, Sierra Nevada Foothills Province, California. *Economic Geology*, 110, pp. 1313–1337.
- Volante, S., Blereau, E., Guitreau, M., Tedeschi, M. et al. 2024. Current applications using key mineral phases in igneous and metamorphic geology: Perspectives for the future. *Geological Society Special Publications*, 537(1), pp. 57–121. DOI: <https://doi.org/10.1144/SP537-2022-254>. EDN: AOGUDU.
- Wu, L.-G., Li, X.-H., Ling, X.-X., Yang, Y.-H. et al. 2019. Further characterization of the RW-1 monazite: New working reference material for oxygen and neodymium isotopic microanalysis. *Minerals*, 9. Article number: 583. DOI: <https://doi.org/10.3390/min9100583>.

### Сведения об авторах

**Аркадий Авенирович Калинин** – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209;  
Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник;  
e-mail: a.kalinin@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-0333>

**Arkadiy A. Kalinin** – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk Region, Russia, 184209;  
Geological Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Leading Researcher;  
e-mail: a.kalinin@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-0333>

**Мариам Гарушевна Хачатрян** – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209;  
КНЦ РАН, магистрант;  
e-mail: mariamkhachatryan51@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1308-732X>

**Mariam G. Khachatryan** – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk Region, Russia, 184209;  
KSC RAS, Master's Student;  
e-mail: mariamkhachatryan51@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1308-732X>

**Евгений Элланович Савченко** – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209;  
Геологический институт КНЦ РАН, ст. науч. сотрудник;  
e-mail: ye.savchenko@geoksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5639-1907>

**Yevgeny E. Savchenko** – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk Region, Russia, 184209;  
Geological Institute KSC RAS, Senior Researcher;  
e-mail: evsav@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5639-1907>