



**МИНЕРАЛОГИЯ, КРИСТАЛЛОГРАФИЯ. ГЕОХИМИЯ, ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ/MINERALOGY, CRYSTALLOGRAPHY. GEOCHEMISTRY, GEOCHEMICAL
METHODS OF PROSPECTING FOR MINERALS**

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2026.8.1>

EDN: QIHIRB

РОЛЬ ФОСФОРА В ФОРМИРОВАНИИ ЗОЛОТО-КУЛАРИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Научная статья

Новиков М.П.¹, Горбачёв П.Н.^{2,*}, Некрасов А.Н.³³ORCID : 0000-0003-2045-0837;^{1, 2, 3} Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (p_gor[at]mail.ru)

Предложена: 23.04.2026; Принята: 22.07.2026; Опубликовано: 13.08.2026

Аннотация

В последнее время резко возрос спрос на редкоземельные элементы, следовательно, и их сырьевые источники. Одним из таких перспективных, на наш взгляд, проявлений может служить Куларское месторождение, уникальность которого состоит в том, что наряду с добычей золота существует возможность попутного извлечения и редкоземельных элементов, представленных минералом куларитом — фосфатом редких земель Се-подгруппы. В настоящей работе мы попытались поднять некоторые вопросы, связанные с составом и особенностью распределения редкоземельных элементов, характером зональности минерала, а также с условиями и спецификой формирования данного типа месторождений. В связи с перечисленными задачами были проведены три серии экспериментов. Установлено, что среднестатистическое распределение редкоземельных элементов в куларите такое же, как в монаците и рабдофаните, и носит кластерный характер, что обусловлено, на наш взгляд, совместной кристаллизацией с хаттонитом — ThSiO₄ моноклинной модификации. Генезис месторождений Куларского типа, вероятней всего, связан с высокотемпературным гидротермальными процессами, с последующим наложенный метаморфизмом.

Ключевые слова: куларит, золото, растворимость, осаждение, зональность, редкоземельные элементы, монацит, рабдофанит.

THE ROLE OF PHOSPHORUS IN THE FORMATION OF GOLD-KULARITE DEPOSITS

Research article

Novikov M.P.¹, Gorbachyov P.N.^{2,*}, Nekrasov A.N.³³ORCID : 0000-0003-2045-0837;^{1, 2, 3} Institute of Experimental Mineralogy RAS, Chernogolovka, Russian Federation

* Corresponding author (p_gor[at]mail.ru)

Suggested: 23.04.2026; Accepted: 22.07.2026; Published: 13.08.2026

Abstract

Demand for rare-earth elements has risen sharply in recent times, and consequently so has demand for their raw material sources. One such promising prospect, in our opinion, is the Kularsk deposit, the uniqueness of which lies in the fact that, alongside gold mining, there is the potential for the associated extraction of rare-earth elements in the form of the mineral kularite — a rare-earth phosphate of the Ce subgroup. In this work, we have attempted to address certain issues relating to the composition and distribution patterns of rare-earth elements, the zonation characteristics of the mineral, and the conditions and specific traits of the formation of this type of deposit. In light of these objectives, three series of experiments were conducted. It has been established that the average distribution of rare-earth elements in kularite is the same as in monazite and rhodophane, and exhibits a clustered pattern; in our opinion, this is due to co-crystallisation with hattonite — a monoclinic modification of ThSiO₄. The genesis of Kular-type deposits is most likely associated with high-temperature hydrothermal processes, followed by superimposed metamorphism.

Keywords: kularite, gold, solubility, precipitation, zoning, rare-earth elements, monazite, rhodophane.

Введение

Черносланцевым формациям, периодически образующимся в осадочной оболочке Земли, подчинены стратиформные месторождения многих рудных металлов. Их характерной особенностью является отсутствие видимой пространственной связи с интрузивными комплексами. Однако анализ парагенезисов рудных металлов раскрывает генетические связи с магматизмом, причём нередко определённого типа. Теоретическое и экспериментальное моделирование процессов, раскрывающих эти связи с глубинными магматическими системами, составляет фундаментальную научную проблему.

Металлоносные черносланцевые горизонты слагают обширные пояса в складчатых областях. География и ареолы распространения связанных с ними куларитовых месторождений подробно описаны в работе [1]. Собственно куларит (ортофосфат редких земель Се-подгруппы) в массовом количестве был найден в Куларском кряже на северо-востоке Якутии в пределах Верхоянской складчатой системы пермских и триасовых черносланцевых отложений, обогащённых фосфатным веществом [2].

Открытие черносланцевых формаций с подчинёнными им уникальными золото-редкоземельно-фосфатными месторождениями является крупнейшим достижением настоящего времени. Но их генезис практически не получил освещения в научной литературе, отсутствуют и экспериментальные работы, направленные на изучение процессов их формирования. С этой целью были выполнены исследования по изучению состава куларита, особенностей распределения редких земель в минерале, а также по выяснению роли фосфора в образовании данного типа месторождений.

Методы и принципы исследования

Для детального исследования природного материала из различных месторождений Якутии нами были отобраны монацит, рабдофанит и три типа куларита, отличающиеся по цвету: серый, темно-серый и чёрный. Изучение образцов осуществлялось на цифровом сканирующем микроскопе Tescan Vega II XMU с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром (EDS) с полупроводниковым Si (Li) детектором INCA Energy 450 и волнодисперсионным спектрометром (WDS) INCA Wave 700 в режиме Energy Plus в ИЭМ РАН. Исследования выполнялись при ускоряющем напряжении 20 kV, ток поглощенных электронов на цилиндре Фарадея составлял 82 нА. Время набора данных WDS: стандартизация 40 сек; время набора спектра 70 сек. При этих условиях пределы обнаружения с вероятностью 95% равны 2σ . Результаты рентгеноспектрального микроанализа обрабатывались с помощью программы INCA ver. 4.06 с последующим пересчетом результатов с помощью пакета программ, разработанного в ИЭМ РАН. Эталоны на редкоземельные элементы были получены нами ранее в виде ортофосфатов TRPO_4 [3] и как образцы сравнения при количественном рентгеноспектральном анализе подробно изложены в работе [4].

Строение и особенности состава природного куларита

Во всех случаях куларит представляет собой эллипсоидные зёрна размером не более 1 мм (рис. 1). Несмотря на различие по цвету, среднестатистическое содержание оксидов РЗЭ (редкоземельные элементы) всех изученных образцов практически одинаковое, точнее, находится в пределах погрешности метода их определения (см. табл.1).

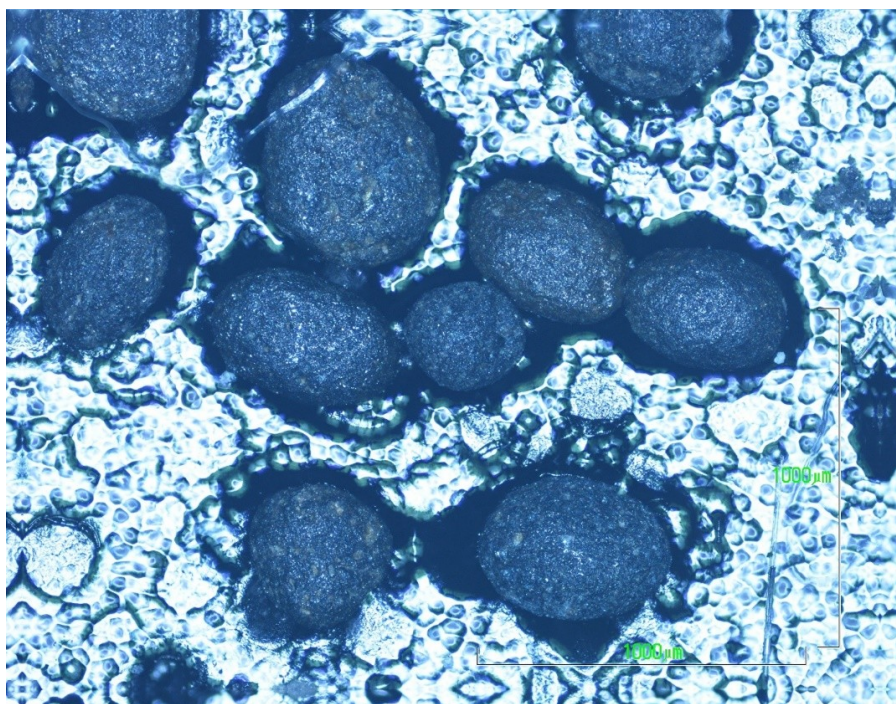


Рисунок 1 - Микроконкреции куларита под электронным микроскопом
DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2026.8.1.1>

Таблица 1 - Характер распределения оксидов редких земель в куларитах

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2026.8.1.2>

Оксид	Содержание, мас.% Интервал разброса
La_2O_3	5,55÷18,54
Ce_2O_3	21,68÷35,78
Pr_2O_3	2,39÷4,53
Nd_2O_3	8,32÷24,74
Sm_2O_3	0,23÷7,70

Оксид	Содержание, мас.% Интервал разброса
Eu ₂ O ₃	0,40÷1,52
Gd ₂ O ₃	0,48÷3,77
ThO ₂	0,10÷3,60

Отметим, что при изучении куларитов в одном и том же отдельно выбранном образце наблюдаются флуктуации по распределению РЗЭ (см. табл. 2).

Таблица 2 - Результаты рентгеноспектрального микроанализа куларита

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2026.8.1.3>

Оксид	черный	темно-серый	серый
P ₂ O ₅	30,67	30,61	30,15
La ₂ O ₃	9,08	11,54	6,13
Ce ₂ O ₃	31,37	34,33	27,30
Pr ₂ O ₃	4,07	4,06	4,43
Nd ₂ O ₃	18,30	14,95	21,52
Sm ₂ O ₃	2,67	1,80	3,18
Eu ₂ O ₃	1,01	0,45	0,40
Gd ₂ O ₃	1,89	1,46	1,71
ThO ₂	0	0,18	3,60
UO ₂	0,33	0,19	0
сумма	99,39	99,57	98,34

Примечание: средний состав куларита по 10 измерениям и 15 образцам

Скорее всего, распределение редких земель носит кластерный характер. В качестве примера (рис. 2) представлено распределение церия и кремния (рис. 3) на одном из участков зерна минерала. Впервые на зональное строение куларита было обращено внимание в работе [5].

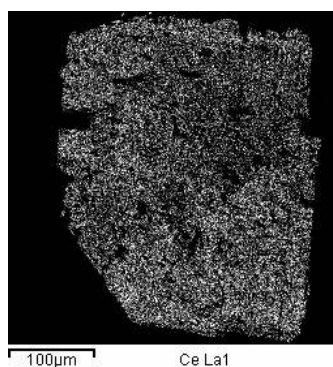


Рисунок 2 - Особенности распределения церия в куларите

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2026.8.1.4>

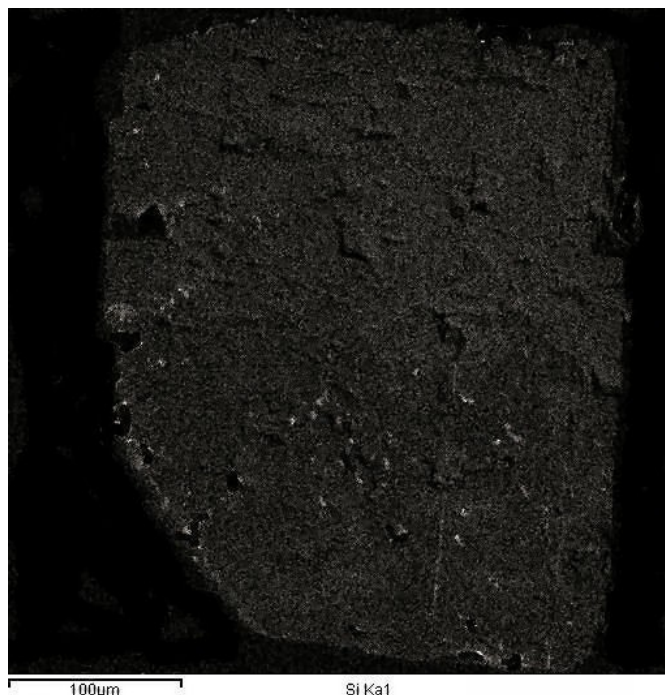
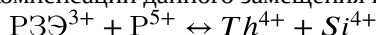


Рисунок 3 - Распределение кремния в куларите
DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2026.8.1.5>

Важно отметить, что в образцах куларита, где содержание ThO_2 составляет около 3,6 мас % наблюдается прямая корреляция ThO_2 с SiO_2 . Среднестатистическое содержание в процентном соотношении в пересчете на 1 формульную единицу составляет 50% ThO_2 и 50% SiO_2 . Данное обстоятельство даёт повод утверждать, что образуется самостоятельная фаза ThSiO_4 в виде хаттонита (хэттонита) [6]. Однако бытует распространенное мнение, что Th замещает редкие земли в монаците (куларите), что на наш взгляд сомнительно (замена четырех валентного тория на трехвалентный РЗЭ). Механизм зарядовой компенсации данного замещения правильнее описать упрощенной схемой:



Следовательно, куларит равно как и монацит представляют собой минералы, где наряду с фосфатной матрицей существует и силикатная. Таким образом, собственно микроконкреции куларита представляют собой поликристалл. Хаттонит кристаллизуется в моноклинной сингонии, т.е., изоструктурен кулариту, что и определяет возможность изоморфизма. Примечательно, что параметры элементарных ячеек обоих минералов практически совпадают. Так, для куларита $a=6,77\text{Å}$, $b=7,04\text{Å}$, $c=6,46\text{Å}$, а для хаттонита $a=6,77\text{Å}$, $b=6,96\text{Å}$, $c=6,49\text{Å}$. Сходство пространственных групп и параметров элементарных ячеек позволяет говорить об изотипии этих соединений. Такая же картина наблюдается и в природных монацитах с повышенным содержанием тория, которые, независимо от генезиса, также имеют зональное строение. Некоторые исследователи [7] связывают распределение РЗЭ с геохимической дифференциацией или объясняют зональность куларита и монацита термодинамической моделью различной геохимической подвижности лантаноидов [8]. Однако, как будет показано нами на основании экспериментальных данных, это предположение не оправдывается.

Постоянство состава и количественное содержание редкоземельных элементов в куларитах, монацитах и рабдофанах (рис. 4) по нашим и многочисленным литературным данным свидетельствует об их едином первоначальном источнике. Чтобы получить доказательства данного утверждения, была проведена серия опытов по синтезу монацита, где все РЗЭ от La до Gd первоначально задавались в равных количествах.

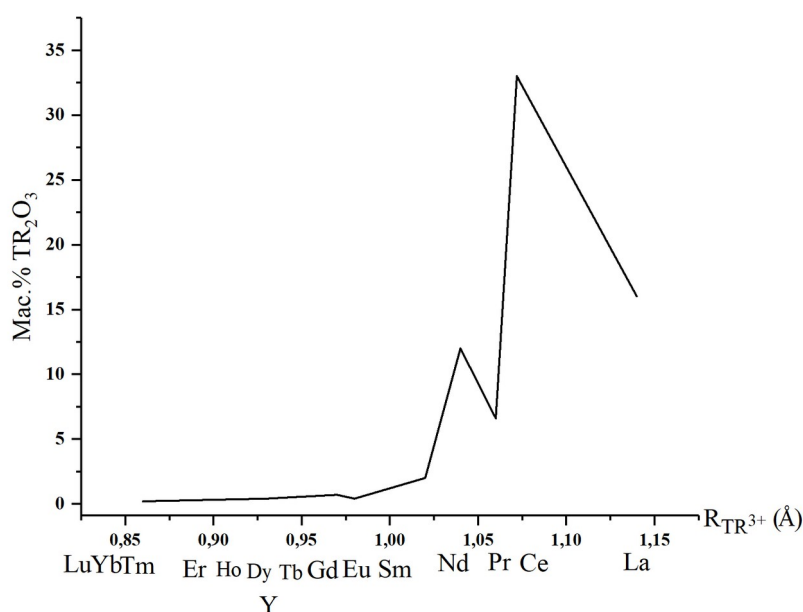


Рисунок 4 - Среднестатистическое распределение оксидов редкоземельных элементов в зависимости от ионного радиуса элемента в монацитах, куларитах и рабдофанитах

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2026.8.1.6>

Кристаллизация синтетических монацитов проводилась из раствор-расплава $K_2Mo_3O_{10}$ на воздухе при $T=1150 - 900^\circ C$. Состав синтезированного монацита приведен в табл. 3. Видно, что все РЗЭ вошли в растущий кристалл в одинаковом количестве, т.е. при кристаллизации не происходит фракционирование РЗЭ (табл. 3). Поскольку куларит изоструктурен монациту (они различаются только по цвету), можно утверждать, что это справедливо и для него. Подробно об изоморфной емкости редкоземельных элементов в синтетическом монаците представлено нами ранее в работе [9]. Эти данные указывают на то, что различия в спектрах РЗЭ природных ортофосфатов определяются исходным содержанием РЗЭ в материнской среде, а не кристаллохимическим фактором или значительными вариациями коэффициентов диффузии соответствующих оксидов, как предполагалось ранее [10].

Таблица 3 - Среднестатистический состав образцов синтетических монацитов с набором РЗЭ от La до Gd по данным PCMA

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2026.8.1.7>

Оксид	Исходный состав (мас.%)	Обнаружено в кристаллах (среднее по 10 образцам) (мас.%)
La_2O_3	10,0	10,12
Ce_2O_3	10,0	10,15
Pr_2O_3	10,0	9,13
Nd_2O_3	10,0	10,22
Sm_2O_3	10,0	10,00
Eu_2O_3	10,0	10,90
Gd_2O_3	10,0	10,87
P_2O_5	30,0	29,52
Сумма	100	100,91

С целью обоснования концепции формирования нового типа золото-редкоземельно-фосфатной минерализации как источника образования комплексных россыпей драгоценных и редких металлов и коренных месторождений золота, приуроченных к черносланцевым толщам Северо - Восточного редкоземельного пояса, были проведены эксперименты, моделирующие, процессы данного минералообразования.

Для оценки условий образования данного вида месторождений в первую очередь необходимы количественные характеристики содержания золота в различных водных средах. Поэтому первоначально были выполнены работы по изучению растворимости золота в чисто водном, хлоридном и фосфатном растворах. Растворимость золота в хлоридных растворах в гидротермальных условиях зависит от множества факторов: температуры, давления,

концентрации хлорид-ионов, окислительно-восстановительных условий (Eh), pH, а также от присутствия других компонентов в растворе. Детально о растворимости золота в водно-хлоридном флюиде при 350–500°C и давлении 500–1500 атм. изложено в работе [11], [12]. Наши эксперименты проводились при температуре 700°C и давлении флюида 100 МПа в золотых ампулах объемом 3 см³, в которые непосредственно заливали вышеуказанные растворы. Снаряжённые и запаянные ампулы помещались в автоклавы из специального жаропрочного сплава и нагревались до заданной температуры. Закалка автоклавов проводилась непосредственно в печи сжатым воздухом. Анализ закалочных растворов на содержание золота осуществлялся методом масс-спектрального анализа на приборе ICP/MS.

Как показывают результаты анализов, в растворах H₃PO₄ вплоть до концентрации кислоты 326 г/л растворимости Au не наблюдается, точнее находится ниже пределов его обнаружения (0,004–0,006 мг/л).

В растворах HCl растворимость золота растёт с увеличением кислотности раствора, а также в значительной степени зависит от фугитивности кислорода. Так, в опытах, в которых снаряжённые ампулы прокачивались аргоном, чтобы избавиться от атмосферного кислорода, растворимость золота в 11%-ной HCl не превышает 800 мг/л, тогда как в снаряжённых на воздухе достигает 1600 мг/л при одинаковых параметрах опыта. При добавлении в раствор HCl трехвалентных РЗЭ (в нашем случае La³⁺), наблюдается лишь незначительное изменение растворимости золота: при концентрации La в исходном растворе HCl 50 мг/л растворимость Au составляет 1800 мг/л, а при содержании элемента 100 мг/л достигает 2000 мг/л. Таким образом, присутствие в исходном хлоридном растворе TR³⁺ не должно оказывать существенного влияния на растворимость золота. Следует отметить, что возможность совместного переноса Au и редких земель хлоридными растворами, показанная в наших опытах, позволяет по-новому взглянуть на их миграционную способность в природных условиях.

Для объяснения совместного нахождения золота и куларита в аллювиальных отложениях Куларского кряжа была проведена серия экспериментов по соосаждению Au и TR. С этой целью к закалочному раствору, содержащему в растворённом виде Au и La, добавлялась разбавленная H₃PO₄. В данном случае при комнатной температуре происходит выпадение в осадок металлического золота (рис. 5) и водного фосфата лантана (LaPO₄·0.5H₂O), аналога минерала рабдофана (рабдофанита). Следовательно, фосфор является осадителем и золота, и редкоземельных элементов. Последнее обстоятельство и объясняет совместное нахождение золота и фосфатов РЗЭ на месторождениях Куларского типа.



Рисунок 5 - Кристаллы золота, полученные в результате взаимодействия хлоридных растворов Au с H₃PO₄ при комнатной температуре

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2026.8.1.8>

Принимая во внимание, что водный фосфат лантана, кристаллизующийся в гексагональной сингонии, как и его природный аналог — рабдофан, являются метастабильными фазами и с течением времени переходят в более устойчивую моноклинную модификацию, соответствующую кулариту, можно сделать предположение об образовании этого типа месторождений в процессе диагенеза осадков. Однако, наличие в шлиховом материале из сланцев по данным спектрального анализа таких тугоплавких элементов как молибден, ванадий, титан, висмут, цирконий наряду с золотом, скорее говорит о переносе гидротермальными флюидами растворимых форм этих элементов в осадочную толщу, обогащенную фосфатным веществом. Косвенным подтверждением переноса элементов гидротермальными растворами служит присутствие в большинстве микроконкреций куларита минерала хаттонита (ThSiO_4). Оба минерала кристаллизуются в одинаковой моноклинной сингонии, что, скорее всего, свидетельствует об их единовременном образовании. Следовательно, черносланцевые месторождения Куларского типа скорее всего имеют гидротермально-осадочное происхождение.

Таким образом, для формирования данного типа месторождений главным фактором является наличие в осадочных толщах фосфора, как главного осадителя золота и редких земель.

Заключение

Обнаруженное соосаждение металлического золота и водного фосфата лантана $\text{-LaPO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$, природного аналога минерала рабдофанита (рабдофана) при добавлении в закалочные растворы с содержащими в растворенном виде Au и La разбавленной H_3PO_4 объясняет совместное нахождение золота и фосфата редких земель на месторождениях Куларского типа, а фосфор-содержащие черносланцевые толщи — эффективным геохимическим барьером, на котором происходит разгрузка магматических гидротермальных растворов с образованием золото-редкоземельно-фосфатного оруденения. Таким образом, для формирования данного типа месторождений главным фактором является наличие в осадочных толщах фосфора, как главного осадителя золота и редких земель. Зональность же куларита скорее всего связана с единовременной кристаллизацией минерала с хаттонитом. Следовательно, кластерный характер в распределении редко-земельных-элементов в куларитах вероятней всего обусловлен различными скоростями роста обоих компонентов поликристалла, собственно куларита (TRPO_4) и хаттонита (ThSiO_4). Отметим, что несмотря на различный минералогический состав вмещающих пород и эволюцию растворов, из которых образовывались куларит, монацит и рабдофанит, среднестатистическое содержание в них редкоземельных элементов постоянно, а потому, как мы полагаем, определяется главным образом концентрацией РЗЭ в материнских средах.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Зотов А.В. Растворимость золота в водно-хлоридном флюиде при 350-500°C и давлении 500-1500 атм. и термодинамические свойства AuCl_2 (р-р) до 750°C давления 5000 атм / А.В. Зотов, Н.Н. Баранова [и др.] // Геохимия. — 1990. — № 7.
2. Колонин Г.Р. О зональном распределении РЗЭ в темных монацитах (куларитах) Тиманского кряжа / Г.Р. Колонин, Г.П. Широносова, И.В. Швецова // Доклады Академии Наук. — 2010. — Т. 432. — № 4. — С. 432.
3. Минеев Д.А. Геохимическая дифференциация редкоземельных элементов / Д.А. Минеев // Геохимия. — 1963. — № 12.
4. Некрасова Р.А. Новые данные о составе фосфатной матрицы куларита / Р.А. Некрасова // Доклады Академии Наук. — 1990. — Т. 312.
5. Некрасов И.Я. Генетические особенности куларита / И.Я. Некрасов, Р.А. Некрасова // Доклады Академии Наук. — 1995. — Т. 344.
6. Некрасова Р.А. Куларит — аутигенная разновидность монацита / Р.А. Некрасова, И.Я. Некрасов // Доклады Академии Наук. — 1982. — Т. 268.
7. Некрасов И.Я. Об изоморфной емкости редкоземельных элементов в монаците / И.Я. Некрасов, М.П. Новиков // Доклады Академии Наук. — 1991. — Т. 320.
8. А. с. 1473379 СССР. Способ получения монокристаллов редкоземельных элементов / М.П. Новиков, Р.А. Некрасова. — 1988.
9. Тагиров Б.Р. Комплексообразование Au (1) в хлоридных гидротермальных флюидах / Б.Р. Тагиров, Н.Н. Акинфеев, А.В. Зотов // Геология рудных месторождений. — 2024. — Т. 66. — № 5.
10. Хомяков А.П. О роли химического и кристаллохимического факторов в распределении редких земель / А.П. Хомяков // Геохимия. — 1967. — № 2.
11. Pabst A. Huttonit, a new monoclinic thorium silicate of its occurrence, analysis and properties / A. Pabst, C.O. Hutton // American Mineralogist. — 1951. — № 36.



12. Lavrent'ev Y. Yu.G. Synthetic TRPO_4 crystals as reference samples in the quantitative X-Ray electron probe microanalysis of Rare-Earth elements / Yu.G. Lavrent'ev Y., I.M. Romanenko, V.P. Novikov et al. // *Journal of Analytical Chemistry*. — 2011. — Vol. 66.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Zotov A.V. Rastvorimost zolota v vodno-khlordnom flyuide pri 350-500°S i davlenii 500-1500 atm. i termodinamicheskie svoistva AuCl_2 (r-r) do 750°S davlenii 5000 atm [The solubility of gold in an aqueous chloride fluid at 350–500 °C and a pressure of 500–1,500 atm, and the thermodynamic properties of AuCl_2 (solution) up to 750 °C at a pressure of 5,000 atm] / A.V. Zotov, N.N. Baranova [et al.] // *Geokhimiya* [Geochemistry]. — 1990. — № 7. [in Russian]
2. Kolonin G.R. O zonalnom raspredelenii RZE v temnikh monatsitakh (kularitakh) Timanskogo kryazha [On the spatial distribution of rare earth elements in dark monazites (kularites) from the Timan Ridge] / G.R. Kolonin, G.P. Shironosova, I.V. Shvetsova // *Dokladi Akademii Nauk* [Reports of the Academy of Sciences]. — 2010. — Vol. 432. — № 4. — P. 432. [in Russian]
3. Mineev D.A. Geoximicheskaya differenciatsiya redkozemel'ny'x e'lementov [Geochemical differentiation of rare-earth elements] / D.A. Mineev // *Geochemistry*. — 1963. — № 12. [in Russian]
4. Nekrasova R.A. Novie dannie o sostave fosfatnoi matritsi kularita [New data on the composition of the phosphate matrix of kularite] / R.A. Nekrasova // *Dokladi Akademii Nauk* [Reports of the Academy of Sciences]. — 1990. — Vol. 312. [in Russian]
5. Nekrasov I.Ya. Geneticheskie osobennosti kularita [Genetic characteristics of kularite] / I.Ya. Nekrasov, R.A. Nekrasova // *Dokladi Akademii Nauk* [Reports of the Academy of Sciences]. — 1995. — Vol. 344. [in Russian]
6. Nekrasova R.A. Kularit — autigennaya raznovidnost monazita [Kularite — an autogenous variety of monazite] / R.A. Nekrasova, I.Ya. Nekrasov // *Dokladi Akademii Nauk* [Reports of the Academy of Sciences]. — 1982. — Vol. 268. [in Russian]
7. Nekrasov I.Ya. Ob izomorfnoi yemkosti redkozemel'nykh elementov v monatsite [On the isomorphic capacity of rare-earth elements in monazite] / I.Ya. Nekrasov, M.P. Novikov // *Dokladi Akademii Nauk* [Reports of the Academy of Sciences]. — 1991. — Vol. 320. [in Russian]
8. A. s. 1473379 SSSR. Sposob polucheniya monokristallov redkozemel'nykh elementov [A method for producing single crystals of rare-earth elements] / M.P. Novikov, R.A. Nekrasova. — 1988. [in Russian]
9. Tagirov B.R. Kompleksoobrazovanie Au (1) v khlordnykh gidrotermal'nykh flyuidakh [Complex formation of Au (1) in chloride-bearing hydrothermal fluids] / B.R. Tagirov, N.N. Akinfeev, A.V. Zotov // *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits]. — 2024. — Vol. 66. — № 5. [in Russian]
10. Xomyakov A.P. O roli khimicheskogo i kristallokhimicheskogo faktorov v raspredelenii redkix zemel' [On the role of chemical and crystallochemical factors in the distribution of rare earth elements] / A.P. Xomyakov // *Geochemistry*. — 1967. — № 2. [in Russian]
11. Pabst A. Huttonit, a new monoclinic thorium silicate of its occurrence, analysis and properties / A. Pabst, C.O. Hutton // *American Mineralogist*. — 1951. — № 36.
12. Lavrent'ev Y. Yu.G. Synthetic TRPO_4 crystals as reference samples in the quantitative X-Ray electron probe microanalysis of Rare-Earth elements / Yu.G. Lavrent'ev Y., I.M. Romanenko, V.P. Novikov et al. // *Journal of Analytical Chemistry*. — 2011. — Vol. 66.