

УДК 553.411+553.22+552.2 (470.21)

Мальявр – первое рудопроявление золота в архейских конгломератах Кольского региона

А. А. Калинин*, Н. М. Кудряшов, Е. Э. Савченко

*Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;
e-mail: kalinin@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-0333>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
21.12.2022;

получена
после доработки
18.01.2023;

принята к публикации
20.01.2023

Ключевые слова:

Урагубский
зеленокаменный пояс,
конгломераты,
метасоматоз,
золото,
арсенопирит

В статье рассматриваются особенности геологического строения и минералого-геохимические характеристики нового для Кольского региона типа проявления минерализации золота. Рудопроявление Мальявр расположено на юго-западном фланге Урагубского зеленокаменного пояса, в пределах толщи биотитовых гнейсов – метаморфизованных осадочных пород, представленных чередованием слоев полимиктовых конгломератов, гравелитов и песчаников. Золотосодержащая сульфидная минерализация связана с метасоматитами, образующими серию линзовидных тел, размещение которых контролируется сдвиговой зоной северо-северо-восточного простирания. Тела метасоматитов зональные: центральная часть сложена кварц-гранатовой породой, занимающей 50–80 % объема линзы, промежуточная зона имеет биотит-гранатовый состав, внешняя зона – геденбергит-амфиболовая, но она иногда бывает редуцирована. В составе породы при развитии метасоматитов возрастает содержание железа, снижается содержание алюминия, кремния и щелочных металлов – натрия и калия, кальций перераспределяется во внешние зоны метасоматических образований, наиболее инертно ведет себя магний. По сравнению с малоизмененными биотитовыми гнейсами в метасоматитах снижается концентрация Rb, Cs, Sr, Ba, Zr, Nb, легких редкоземельных элементов, U, Pb, возрастает содержание Cu, Zn, Mn, As, Ag, Te, W, Bi, т. е. элементов-спутников золота. Сульфидная минерализация с золотом характерна для всех зон метасоматической колонки. В составе минерализации преобладают пирротин, ильменит и арсенопирит, второстепенные и редкие минералы – халькопирит, пентландит, магнетит, точилинит, самородное золото, поздние пирит и марказит. Развитие метасоматитов и минерализации в них происходило при высокой температуре (> 600 °С), более поздние процессы – около 400 °С. Предполагается, что золото-арсенопиритовая минерализация формировалась за счет мышьяка и золота, мобилизованных из вмещающих биотитовых гнейсов при региональном метаморфизме или при внедрении пегматитов.

Для цитирования

Калинин А. А. и др. Мальявр – первое рудопроявление золота в архейских конгломератах Кольского региона. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 1. С. 5–17. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-1-5-17>.

Mal'javr – the first gold prospect in the Archean conglomerates, the Kola region

Arkadiy A. Kalinin*, Nikolay M. Kudryashov, Yevgeniy E. Savchenko

*Geological Institute KSC RAS, Apatity, Murmansk Region, Russia;
e-mail: kalinin@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-0333>

Article info

Received
21.12.2022;

received
in revised form
18.01.2023;

accepted
20.01.2023

Key words:

Uragubsky
greenstone belt,
conglomerate,
alteration,
gold,
arsenopyrite

Abstract

A new type of prospects of gold mineralization in the Kola region is considered in the paper. The Mal'javr prospect is located in the south-western flank of the Uragubsky greenstone belt in biotite gneiss – the metamorphosed sedimentary rocks with interlayering of polymictic conglomerate, gravelite, and sandstone. Gold-bearing sulfide mineralization was found in altered rocks, which form a series of lens-shaped bodies, concentrated along a shear zone of NNE strike. The bodies of altered rocks are zonal: the central zone makes 50–80 % of the lens volume, it consists of garnet and quartz, the intermediate zone is of garnet-biotite mineral composition, and in the outer zone, which is often reduced, the main minerals are hedenbergite, hornblende, and grunerite. The metasomatic alteration is connected with an increase of iron content, decrease of Al, Si, and alkaline metals Na and K, redistribution of calcium to the outer zone of metasomatic lenses; and magnesium is inert. If compared to the unaltered gneiss, the altered rocks are depleted in Rb, Cs, Sr, Ba, Zr, Nb; and content of Cu, Zn, Mn, As, Ag, Te, W, Bi (all these elements are known to associate with gold) increases. All zones of altered rocks are rich in sulfide mineralization. Pyrrhotite and arsenopyrite are the main sulfide minerals, minor minerals are chalcopyrite, pentlandite, magnetite, tochiinite, native gold, and late pyrite and marcasite. Rock alteration and formation of sulfide mineralization happened at a high temperature > 600 °С, and the late alteration processes at ~400 °С. The arsenopyrite-gold mineralization probably formed with As and Au mobilized from the host biotite gneiss during regional metamorphism or due to pegmatite vein intrusion.

For citation

Kalinin, A. A. et al. 2023. Mal'javr – the first gold prospect in the Archean conglomerates, the Kola region. *Vestnik of MSTU*, 26(1), pp. 5–17. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-1-5-17>.

Введение

Конгломераты докембрия являются одним из основных источников золота на Земле: половина всего добытого из недр золота была извлечена из конгломератов бассейна Витватерсранд в Южной Африке (Tucker et al., 2016). Месторождения золота в конгломератах известны и в других регионах мира, в частности, в Гане (Западная Африка) – Тарква (Smith et al., 2016), Австралии – в кратоне Пилбара (Munroe et al., 2018), Бразилии – Якобина (Milesi et al., 2002), Индии – в кратоне Сингхбхум (Chakravarti et al., 2017), Канаде – Пардо (Ulrich et al., 2011; Long et al., 2011).

Общими для месторождений золота в конгломератах раннего докембрия являются следующие характеристики:

- золотоносными могут быть конгломераты как кварцевые, так и полимиктовые с галькой разного состава вплоть до гальки ультраосновных пород;
- в большинстве случаев золото связано с аллювиальными россыпями, вытянутыми по речным палеодолинам, но известны и морские переработанные россыпи;
- золото отмечается только в цементе конгломератов, гальки всегда безрудные;
- цемент может быть разным – глинистым, песчанистым, вплоть до грубообломочных песков;
- как правило, золото палеороссыпей переработано и переотложено в ходе более поздних гидротермально-метасоматических процессов.

На Фенноскандинавском щите месторождения золота в конгломератах не разрабатываются, но проявления этой генетической группы известны в Онежской и Лехтинской структурах палеопротерозойского возраста в Карелии, данные проявления связаны с переработанными россыпями в пределах веерных палеодельт¹.

В северо-восточной части Фенноскандинавского щита минерализация золота, связанная с конгломератами, до последнего времени не была известна, и рудопоявление Мальявр является первым объектом этого рода в Кольском регионе.

Цель работы – изучение особенностей геологического строения и минералого-геохимических характеристик нового для Кольского региона типа проявления минерализации золота – рудопоявления Мальявр.

Методы исследований

Материал для исследований собран авторами во время проведения полевых работ в Урагубском поясе летом 2022 г. В ходе геологических маршрутов изучались геолого-структурные особенности участка рудопоявления золота Мальявр, геологические взаимоотношения рудоносных и вмещающих пород, отбирались штупные и сколковые пробы, образцы, сколки на шлифы и аншлифы.

Химический анализ горных пород выполнен в химико-аналитической лаборатории Геологического института КНЦ РАН (ГИ КНЦ РАН) по методикам, разработанным в лаборатории и приведенным на сайте института. Содержание благородных металлов определялось также в химико-аналитической лаборатории Геологического института КНЦ РАН методом атомной абсорбции с предварительным концентрированием алкиланилином и сульфидами нефти. ИСП-анализ пород на малые элементы выполнен в ЦКП "Геоаналитик" Института геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург.

Минералогические и петрографические исследования проводились с помощью оптического микроскопа AxioPlan, снабженного блоком видеорегистрации, в отраженном и проходящем поляризованном свете.

Исследования фазовой и внутрифазовой неоднородности минеральных индивидов, изучение химического состава минералов осуществлялось методами электронной микроскопии и электроннозондового микроанализа в лаборатории физических исследований пород руд и минералов в ГИ КНЦ РАН. Предварительная оценка состава минералов выполнялась с помощью энергодисперсионных приставок Röntec и Bruker X Flash-5010, установленных на сканирующем микроскопе LEO-1450 методом нестандартного анализа при помощи программного обеспечения QUANTAX 200 (что позволяет уточнить перечень элементов для последующего микронзондового анализа). При этом также получались изображения анализируемого материала в обратно рассеянных электронах.

Микронзондовый анализ для определения содержания основных компонентов и элементов-примесей выполнялся на микроанализаторе MS-46 CAMECA для зерен размером более 20 мкм. Условия съемки: ускоряющее напряжение – 22 кВ; ток зонда 30–40 нА, диаметр пучка зонда от 2 до 10 мкм в зависимости от устойчивости материала к току зонда. Время измерения – 10 с для главных элементов, 20 с – для элементов-примесей. Результаты 4–5 измерений усреднялись.

Результаты исследований

Рудопоявление золота Мальявр было обнаружено в ходе работ ВСЕГЕИ по геологическому доизучению поверхности в масштабе 1 : 200000 в пределах листов R-36-XXVII, XXVIII (Мурманск), первая информация о нем опубликована в работе (Вороняева и др., 2021).

¹ Сайт Управления недропользования Министерства по природопользованию и экологии Республики Карелия. URL: http://nedrark.karelia.ru/mnia/au_karelia.htm <http://gtkdata.gtk.fi/MDaE/>.

Рудопроявление Мальярв расположено в Титовско-Поросозерской шовной зоне, трассирующей сочленение Мурманского и Кольского мегаблоков Фенноскандинавского щита, в Урагубском зеленокаменном поясе, который является северо-западным продолжением зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья.

Слагающие Урагубский пояс супракристалльные породы отнесены к титовской толще среднего лопия, которая по геологическому положению и возрасту пород сопоставляется с колмозерской серией пояса Колмозеро-Воронья, но отличается от последней преобладанием в ее составе метаосадочных пород – биотитовых гнейсов – при подчиненной роли метавулканитов от ультраосновного до кислого состава, доля которых постепенно увеличивается вверх по разрезу толщи. В составе титовской толщи присутствуют также горизонты железистых кварцитов. Возраст вулканитов титовской толщи получен по магматическим цирконам из глиноземистых гнейсов (метадацитов), он составляет $2\,838 \pm 23$ млн лет (U-Pb, SHRIMP II) (Мыскова и др., 2005).

В основании разреза вулканогенно-осадочных пород зеленокаменного пояса на тектонизированном контакте с гранито-гнейсами Кольского мегаблока залегают галечные конгломераты (Богданова и др., 1965). Линзы аналогичных конгломератов отмечаются среди биотитовых гнейсов также и выше по разрезу. На таких участках породы сохранили элементы первичной слоистости – в разрезе чередуются песчаники, гравелиты, галечные конгломераты (рис. 1). Мощность отдельных слоев составляет десятки сантиметров. Обломочный материал песчаников, гравий в гравелитах и гальки в конгломератах имеют эллипсоидальную форму, представлены преимущественно материалом плагиогранитов (до диоритов), реже отмечаются кварцевые гальки. Гальки и гравий плагиогранитов сложены крупнозернистым олигоклазом № 11–20, частью серицитизированным (около 50 об.%), кварцем и биотитом (менее 5 %), отмечен также турмалин. Состав цемента конгломератов (кварц, плагиоклаз-лабрадор, биотит) аналогичен составу вмещающих и вышележащих биотитовых парагнейсов. Из аксессуарных минералов были установлены апатит, циркон, эпидот, хлорит, турмалин, алланит. Породы иногда в значительной степени мусковитизированы.



Рис. 1. Первичная осадочная слоистость в толще биотитовых гнейсов в расчистке (слева) и в глыбах (справа)
Fig. 1. Primary sedimentary bedding in biotite gneisses in clearing (left) and in blocks (right)

Вулканогенно-осадочные породы пояса метаморфизованы в условиях амфиболитовой фации; возраст метаморфизма, установленный по цирконам метаморфического генезиса, составил $2\,786 \pm 31$ и $2\,774 \pm 12$ млн лет (Мыскова и др., 2005).

Золоторудное проявление расположено на юго-западном фланге пояса на участке, где биотитовые гнейсы прорываются жиллой турмалиновых пегматитов. Простириание биотитовых гнейсов (и пегматитовой жилы) субмеридиональное до 10° СВ, т. е. секущее по отношению к простирианию пояса в целом: супракристалльные породы образуют здесь открытую антиклинальную складку с шарниром, погружающимся на юго-запад.

Пегматитовая жила субмеридионального простириания достигает примерно 40 м мощности. В составе пегматитов преобладают кварц и плагиоклаз (альбит-олигоклаз), турмалин (шерл), мусковит, кроме того, отмечены биотит, апатит, циркон. Западный контакт пегматитовой жилы с гнейсами – резкий линейный, согласный простирианию вмещающих пород, восточный – через зоны интенсивной мигматизации мощностью

до 10 м и смятия гнейсов (рис. 2, 3). В зоне смятия гальки кварц-плаггиоклазового состава деформированы вместе с цементом.

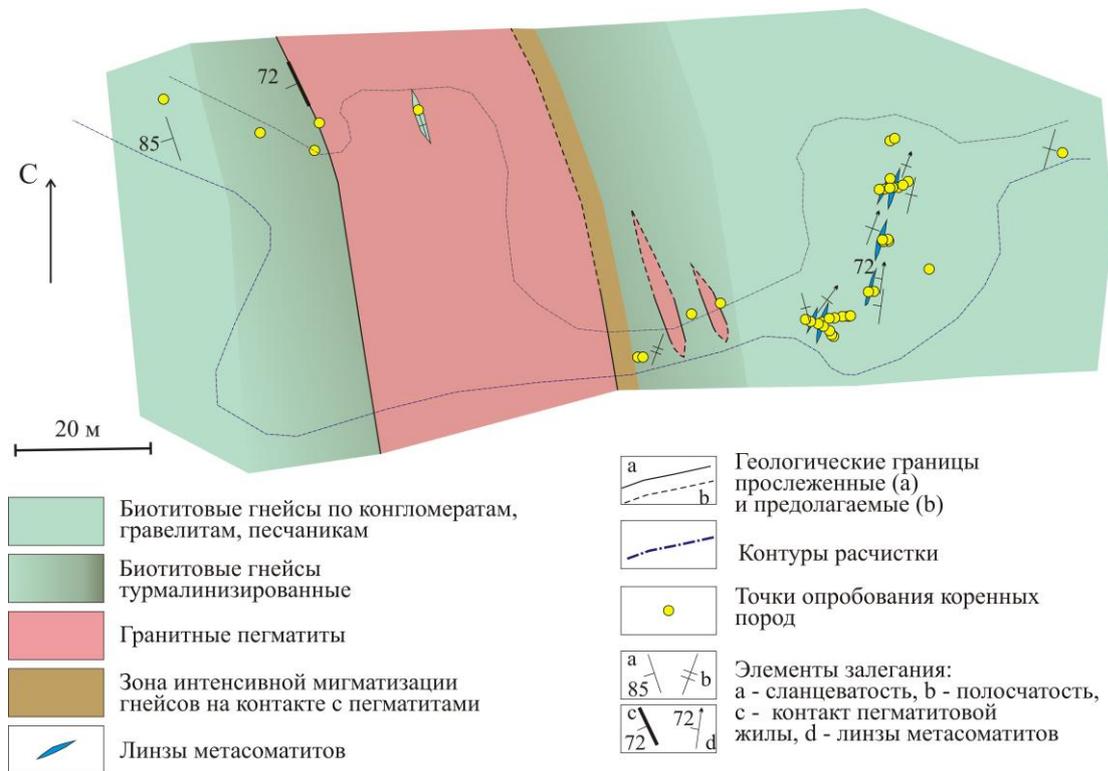


Рис. 2. Документация расчистки на г. Лисьей. Выполнена А. А. Калининым при участии студента МГТУ А. Ермолина

Fig. 2. Documentation of clearing on Lisya mountain. Made by A. A. Kalinin with the participation of A. Yermolin (MSTU student)



Рис. 3. Смятые в складки биотитовые гнейсы-метакогломераты (слева) и метагравелиты (справа)
Fig. 3. Wrinkled biotite gneisses-metaconglomerates (left) and metagravels (right)

В пегматитах установлены ксенолиты вмещающих гнейсов, а в гнейсах присутствуют линзовидные тела пегматитов размером от десятков сантиметров до 20 м по длинной оси, секущие слоистость вмещающих пород (рис. 4). Вмещающие гнейсы турмалинизированы под воздействием пегматитов. Интенсивность турмалинизации и степень деформированности в гнейсах снижаются по мере удаления от пегматитовой жилы, сходя на нет через ~20 м.

Серия линзовидных тел метасоматитов, несущих сульфидную с золотом минерализацию, прослеживается в виде зоны мощностью около 10 м северо-северо-восточного простирания (10–15° СВ) согласно простиранию и сланцеватости вмещающих биотитовых сланцев. Размеры отдельных линз по длинной оси достигают 10 м, по мощности – до 1 м (рис. 2). Строение линз зональное: внешняя зона геденбергит-роговообманковая, далее следует зона биотит-гранатовая, а центральная часть линз сложена кварц-гранатовыми породами,

вплоть до гранатитов (рис. 5). Границы зон в большинстве случаев резкие. Внешняя зона часто редуцирована и отмечена далеко не в каждом теле метасоматитов.



Рис. 4. Вверху – линзы турмалинсодержащих кварц-плагиоглазовых пегматитов в биотитовых гнейсах-метапесчаниках (слева) и метаконгломератах (справа), внизу слева – ксенолит биотитовых гнейсов в пегматите, справа – мигматизированный контакт пегматита с биотитовыми гнейсами

Fig. 4. Top – lenses of tourmaline-bearing quartz-plagioclase pegmatites in biotite gneisses-metasandstones (left) and metaconglomerates (right), bottom left – xenolith of biotite gneisses in pegmatite, right – migmatized contact of pegmatite with biotite gneisses



Рис. 5. Линзы метасоматических пород в биотитовых гнейсах-метаконгломератах
Fig. 5. Lenses of metasomatic rocks in biotite gneisses-metaconglomerates

Породы всех зон пронизаны более поздними кварцевыми прожилками (рис. 5), ориентированными преимущественно по простиранию линзы. Текстура метасоматических пород массивная, породы крупнозернистые: размер зерен граната достигает 1 см, остальных минералов – первые миллиметры.

Изменение химического состава пород при развитии метасоматитов заключается в возрастании содержания железа при снижении алюминия, кремния и щелочных металлов – натрия и калия (табл. 1, рис. 6). Натрий выносятся практически полностью, а содержание алюминия и калия зависит от содержания в породе граната и биотита соответственно. Геденбергит-роговообманковая зона несколько обогащена кальцием.

Таблица 1. Химический состав горных пород рудопроявления Мальявр, мас. %
Table 1. Chemical composition of rocks of the Mal'javr ore occurrence, wt. %

Компоненты	ТУ-1	ТУ-36	ТУ-25	ТУ-33	ТУ-28	ТУ-29	ТУ-30	ТУ-31	ТУ-32	ТУ-35
SiO ₂	65,62	65,23	60,00	59,83	50,96	53,35	57,28	55,32	55,98	53,34
TiO ₂	0,51	0,55	0,73	0,13	0,11	0,25	0,34	0,33	0,3	0,38
Al ₂ O ₃	14,46	15,82	17,61	8,55	6,99	8,17	9,94	12,64	12,61	16,72
Fe ₂ O ₃	1,85	0,00	1,12	5,74	10,05	3,10	3,18	2,68	0,73	4,07
FeO	5,62	6,15	7,05	11,52	16,56	22,58	17,25	19,05	20,63	13,80
FeO*	6,91	5,54	7,47	16,11	24,95	23,42	18,71	19,83	19,30	16,49
MnO	0,07	0,21	0,13	0,14	0,12	0,11	0,15	0,18	0,20	0,29
MgO	1,80	2,22	2,95	2,36	2,72	2,66	2,84	3,03	3,11	3,01
CaO	2,03	2,07	1,78	4,62	2,85	2,24	1,44	2,71	3,07	1,90
Na ₂ O	3,08	3,29	3,02	0,16	0,094	0,049	0,19	0,061	0,086	0,78
K ₂ O	2,72	2,20	2,81	0,32	0,28	0,48	1,28	0,85	0,50	1,51
H ₂ O	0,15	0,10	0,06	0,28	0,04	0,00	0,09	0,09	0,06	0,26
ппп	0,00	1,78	1,26	2,35	0,83	1,40	2,39	1,88	1,98	1,84
S	0,03	0,05	0,04	3,08	7,11	5,11	2,84	0,79	0,52	1,63
P ₂ O ₅	0,09	0,10	0,09	0,50	0,49	0,41	0,28	0,22	0,07	0,21
CO ₂	1,82	< 0,1	0,83	< 0,1	0,41	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,14	< 0,1
F	0,049	0,032	0,038	0,032	0,031	0,03	0,033	0,026	0,014	0,033
Cl	0,012	0,018	0,011	0,008	0,007	0,009	0,015	0,011	0,011	0,012
Сумма	99,96	99,85	99,57	99,63	99,66	99,96	99,55	99,88	100,02	99,80
Au	0,004	0,004	0,004	0,23	0,2	1,22	0,25	0,052	0,039	0,049
Ag	0,21	0,19	0,15	0,94	1,42	1,71	0,98	1,28	0,28	0,68

Примечание. ТУ-1 и ТУ-36 – биотитовые гнейсы-метапесчаники, ТУ-25 – биотитовые гнейсы с гранатом на контакте с линзой метасоматитов, ТУ-33 – метасоматическая порода из геденбергит-роговообманковой зоны, ТУ-28, 29, 30, 31, 32, 35 – породы из кварц-гранатовой зоны.

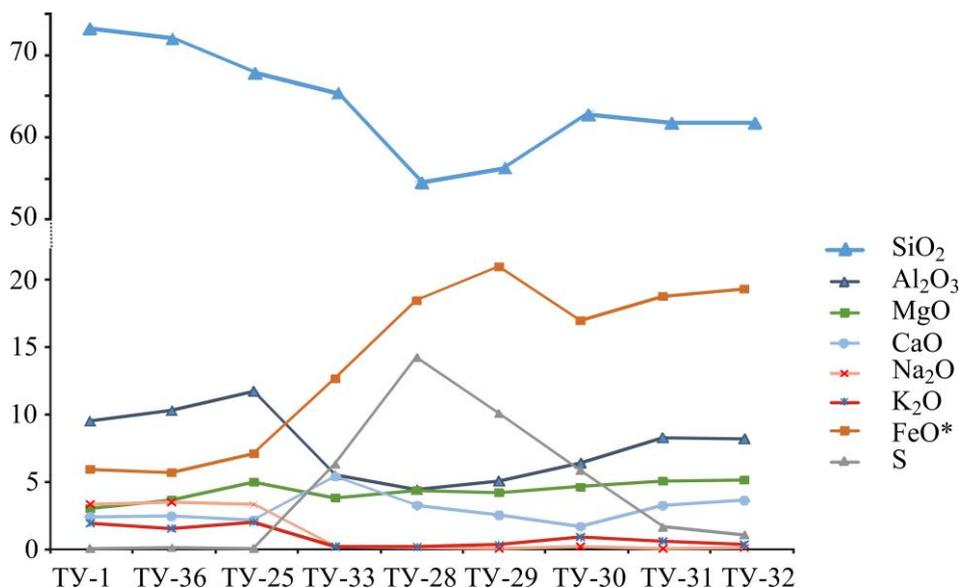


Рис. 6. Изменение содержания петрогенных элементов при формировании кварц-гранатовых метасоматитов, в мольных %. Типы пород – см. примечание к табл. 1. FeO* = FeO + 0,9×Fe₂O₃
Fig. 6. Change in the content of petrogenic elements during the formation of quartz-garnet metasomatites, in mole %. Rock types – see note to Table 1. FeO* = FeO + 0,9×Fe₂O₃

В метасоматитах по сравнению с биотитовыми гнейсами снижается концентрация Rb, Cs, Sr, Ba, Zr, Nb, легких редкоземельных элементов, U, Pb, возрастает содержание Cu, Zn, Mn, As, Ag, Te, W, Bi, Y (табл. 2), при этом для мышьяка и вольфрама характерен значительный разброс значений. Следует отметить высокий фон мышьяка в биотитовых гнейсах (табл. 2), в 3–15 раз превышающий кларковые значения для земной коры.

Таблица 2. Содержание малых элементов (в г/т) в породах рудопроявления Мальявр
 Table 2. The content of trace elements (in g/t) in the rocks of the Mal'javr ore occurrence

Компоненты	ТУ-1	ТУ-36	ТУ-25	ТУ-28	ТУ-33	ТУ-29	ТУ-30	ТУ-31	ТУ-32	ТУ-35
Li	40	26	30	16	23	23	50	30	30	80
Be	1,2	1	0,6	0,18	1,4	0,08	0,18	0,33	0,4	0,7
Sc	5	7	11	6	5	5	10	13	7	11
Ti	1 600	1 700	2 000	400	500	1 100	1 500	1 800	1 300	1 600
V	50	60	70	26	40	40	60	80	60	70
Cr	60	80	100	25	50	33	80	150	90	100
Mn	310	900	600	1 000	1 000	800	1 200	1 600	1 400	2 000
Co	13	17	22	50	27	24	28	19	10	31
Ni	38	60	80	110	80	70	90	110	32	130
Cu	13,8	24	12,2	600	460	370	380	500	150	500
Zn	40	60	60	60	120	60	90	70	70	90
Ga	14	15	17	8	15	9	13	12	13	15
Ge	1,9	1,5	1,3	4	3	3	3	5	6	3
As	83	15,6	203	1 920	7,8	21,1	224	87	21,9	6,8
Se	0,17	0,22	0,26	3,8	2,1	3,2	1,9	< 0,07	0,63	1,46
Rb	85	47	61	11	11	19	49	22	18	56
Sr	170	110	100	11	24	15	27	19	17	50
Y	3	4	9	8	8	10	11	9	8	10
Zr	78	65	76	18	13	54	50	40,5	38,8	40,4
Nb	4,1	5	5	0,9	1,1	2,1	2,6	2,2	2,1	2,5
Mo	0,8	1,6	1,3	2,9	1	1,6	2,4	2,6	0,8	3,1
Ag	0,25	0,3	0,25	0,76	0,57	0,79	0,67	0,66	0,25	0,56
Cd	0,18	0,26	0,18	0,2	0,19	0,3	0,3	0,4	0,3	0,5
Sn	2,4	1,7	1,8	0,9	2,9	0,8	1,2	1,3	1,5	1,3
Sb	0,04	0,07	0,04	0,08	0,12	0,06	0,08	0,1	0,08	0,07
Te	0,033	0,029	0,02	0,52	0,36	0,61	0,3	< 0,01	0,1	0,19
Cs	19	3,4	7,8	1,1	0,9	1,9	5,5	2,7	2,1	6
Ba	370	270	400	19	12	40	170	60	50	160
LREE	55,3	52,1	74	31	24,6	55,5	55,6	26,7	22,4	28,9
HREE	7,61	8,77	13,24	8,13	8,87	11,15	12,58	10,43	8,59	10,02
Hf	2,3	2	2,4	0,57	0,4	1,5	1,4	1,7	1,2	1,2
Ta	0,5	1	0,45	0,24	0,16	0,37	0,35	0,39	0,32	0,4
W	0,9	1,6	1,3	0,7	30	0,4	1	140	0,6	1,5
Tl	0,6	0,4	0,4	0,05	0,04	0,08	0,21	0,13	0,08	0,24
Pb	10	10	10	1,2	2,4	1,7	1,8	1,8	1,5	3
Bi	0,128	0,32	0,088	3,2	7	8	2,6	0,8	1,5	2
Th	3,2	2,5	4	2,2	1,2	4	3,8	3,2	2,2	2,3
U	1,9	2,1	3,1	0,8	0,8	1,1	0,9	0,8	0,6	0,9

Железо-магнезиальные силикаты в метасоматических породах относятся к железистым разновидностям этих минералов – к геденбергиту, феррогорнблендиту (железистая роговая обманка), шамозиту, железистому биотиту (табл. 3).

Гранат во вмещающих гнейсах в экзоконтактовой зоне линзы метасоматитов представлен альмандином. Во внутренней зоне кристалла альмандина из гнейсов на контакте с линзой метасоматитов доля пироповой составляющей около 10 %, спессартиновой – 8 %, гроссуляровой – менее 4 %, во внешней зоне – 8, 4 и 10 % соответственно. В метасоматических породах геденбергит-роговообманкой зоны гранат относится к ряду альмандин – гроссуляр, доля гроссулярового минала 14–28 %, пиропового до 5 %, спессартинового близка к 0. В кварц-гранатовой зоне пироповый и гроссуляровый миналы в альмандине составляют примерно по 10 % каждый (табл. 4). Зональность состава в зернах граната заключается в некотором увеличении гроссулярового минала во внешней зоне.

Таблица 3. Химический состав железо-магнезиальных силикатных минералов, мас. %
Table 3. Chemical composition of iron-magnesian silicate minerals, wt. %

Компоненты	ТУ-25	ТУ-31	ТУ-43	ТУ-41	ТУ-41	ТУ-45	ТУ-43	ТУ-43	ТУ-31	ТУ-41	ТУ-45	ТУ-45
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO ₂	36,11	35,66	48,91	41,41	52,06	52,16	37,94	37,17	25,27	23,71	21,52	23,14
TiO ₂	1,45	1,50	0,03	0,23	0,05	0,00	0,07	0,07	0,06	0,08	0,03	0,06
Al ₂ O ₃	19,09	16,78	0,25	16,04	0,87	0,29	21,28	21,68	22,28	19,84	19,52	18,95
FeO	20,58	20,57	26,46	20,28	29,35	32,68	16,23	14,59	26,35	30,71	38,23	33,89
MgO	9,62	10,53	1,42	5,61	13,99	13,21	0,00	0,00	15,18	12,07	6,17	9,76
MnO	0,03	0,00	0,37	0,05	0,11	0,00	0,07	0,09	0,00	0,00	0,02	0,00
CaO	0,00	0,00	22,48	11,10	1,00	0,31	22,97	23,49	0,01	0,00	0,04	0,04
Na ₂ O	0,13	0,11	0,00	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K ₂ O	9,68	8,85	0,00	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03	0,03	0,00
V ₂ O ₃	0,04	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	не опр.	0,03	0,00	0,00
Cr ₂ O ₃	0,07	0,05	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	не опр.	0,00	0,00	0,00
NiO	0,07	0,00	не опр.	0,00	0,00	0,00	не опр.	не опр.	не опр.	0,00	не опр.	не опр.
ZnO	0,04	0,00	0,00	0,00	0,06	0,04	0,00	0,00	не опр.	0,00	не опр.	не опр.
Cl	0,05	0,08	не опр.	0,26	0,02	не опр.	не опр.	не опр.	не опр.	0,04	не опр.	не опр.
Сумма	96,94	94,17	99,91	97,40	97,51	99,09	98,55	97,08	89,39	86,89	85,82	85,95
Коэффициенты кристаллохимической формулы												
Si	3,029	3,075	1,997	6,370	7,860	7,881	3,150	3,128	2,626	2,627	2,536	2,638
Ti	0,091	0,097	0,001	0,026	0,006	0,000	0,004	0,004	0,004	0,006	0,003	0,005
Al ^{IV}	0,880	0,827	0,012	1,604	0,155	0,051	–	–	1,370	1,373	1,461	1,357
Al ^{VI}	1,007	0,878	–	1,284	–	–	2,082	2,150	1,359	1,218	1,250	1,189
Fe	1,444	1,484	0,904	2,609	3,706	4,130	1,014	0,924	2,290	2,846	3,766	3,231
Mg	1,202	1,354	0,086	1,286	3,148	2,977	0,000	0,000	2,352	1,994	1,083	1,659
Mn	0,002	0,000	0,013	0,006	0,014	0,000	0,005	0,006	0,000	0,000	0,002	0,000
Ca	0,000	0,000	0,984	1,830	0,162	0,050	2,043	2,118	0,001	0,000	0,004	0,004
Na	0,021	0,019	0,000	0,342	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	1,036	0,973	0,000	0,079	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,005	0,004	0,000
V	0,003	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	–	0,003	0,000	0,000
Cr	0,005	0,004	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	–	0,000	0,000	0,000
Ni	0,005	0,000	–	0,000	0,000	0,000	–	–	–	0,000	–	–
Zn	0,002	0,000	0,000	0,000	0,004	0,004	0,000	0,000	–	0,000	–	–

Примечание. 1, 2 – биотит, 3 – геденбергит, 4 – роговая обманка, 5–6 – грюнерит, 7–8 – эпидот, 9–12 – шамозит.

Таблица 4. Химический состав гранатов, мас. %
Table 4. Chemical composition of garnets, wt. %

Компоненты	ТУ-25	ТУ-25	ТУ-31	ТУ-31	ТУ-41	ТУ-41	ТУ-43	ТУ-43	ТУ-45	ТУ-45
SiO ₂	36,78	36,93	37,07	36,95	37,61	37,75	36,13	36,91	36,59	36,13
TiO ₂	0,00	0,04	0,00	0,00	0,05	0,00	0,05	0,09	0,05	0,00
Al ₂ O ₃	20,82	20,77	19,50	19,81	18,85	18,90	19,20	19,14	19,22	19,38
FeO	34,07	34,17	36,00	35,28	34,03	33,05	30,99	27,56	36,64	36,68
MgO	2,82	1,98	2,85	2,78	2,21	2,31	0,11	0,09	1,32	1,55
MnO	3,56	1,97	0,28	0,28	0,73	0,70	2,03	1,49	0,32	0,22
CaO	1,39	3,59	4,08	4,54	5,89	5,96	10,16	13,86	5,34	4,99
Сумма	99,43	99,46	99,88	99,69	99,46	98,74	98,67	99,14	99,90	99,39
Коэффициенты кристаллохимической формулы										
Si	2,991	3,001	3,012	3,001	3,062	3,082	2,991	3,012	3,011	2,989
Ti	0,000	0,002	0,000	0,000	0,003	0,000	0,003	0,005	0,003	0,000
Al	1,995	1,989	1,867	1,897	1,808	1,819	1,873	1,841	1,864	1,890
Fe	2,318	2,322	2,446	2,396	2,317	2,257	2,145	1,880	2,522	2,538
Mg	0,341	0,240	0,345	0,336	0,268	0,281	0,014	0,011	0,162	0,191
Mn	0,245	0,135	0,020	0,019	0,050	0,048	0,142	0,103	0,022	0,016
Ca	0,121	0,313	0,355	0,395	0,513	0,521	0,901	1,211	0,471	0,442

Доли миналов альмандина (Alm), пиропа (Pyр), спессартина (Sps) и гроссуляра (Grs), %										
Alm	77	77	77	76	74	73	67	59	79	80
Pyр	11	8	11	11	9	9	0	0	5	6
Sps	8	4	1	1	2	2	4	3	1	0
Grs	4	10	11	13	16	17	28	38	15	14

Примечание. ТУ-25 – гнейсы на контакте с линзой метасоматитов, ТУ-31 – кварц-гранатовый метасоматит, ТУ-41, 43, 45 – метасоматиты геденбергит-амфиболовой зоны. Формулы биотитов рассчитаны на 12 атомов кислорода, геденбергита – на 6, амфиболов – на 23, эпидотов – на 13, хлоритов – на 14, гранатов – на 12 атомов кислорода.

Сульфидная минерализация в слабоизмененных биотитовых гнейсах-метапесчаниках и в цементе конгломератов представлена единичными мелкими (сотые доли миллиметра) зернами арсенопирита, пирротина, халькопирита и позднего, наложенного пирита. Среди оксидов преобладает ильменит, отмечены также единичные зерна магнетита. В биотитовых гнейсах в зоне мигматизации на контакте с пегматитовой жилой сульфидная минерализация не отмечена.

В линзах метасоматитов содержание рудных минералов возрастает в отдельных пробах до 20 %, хотя распределены они крайне неравномерно, и богатые сульфидами участки могут встретиться в любой зоне метасоматической колонки. Текстура сульфидного оруденения прожилково-вкрапленная, гнездовая, минеральный состав очень простой.

Основным рудным минералом является пирротин, образующий ксеноморфные зерна размером до нескольких миллиметров с вростками халькопирита и пламенеvidного пентландита. В некоторых зернах пирротина отмечена структура распада с троилитом (рис. 7). Арсенопирит образует идиоморфные до идиоморфных зерна ромбического сечения размером до 1 мм, как правило, зонального строения (рис. 7): внутренние зоны зерен арсенопирита обогащены кобальтом и никелем, и характеризуются высоким отношением As/S (табл. 5), во внешних зонах содержание примесей Ni, Co и величина As/S отношения снижаются. Пирит встречается относительно редко, для него характерны агрегаты мелких кубических кристаллов, с другими сульфидами пирит не ассоциирует. Кроме указанных сульфидных минералов были отмечены леллингит и минерал группы валлериита (группа гидросульфидов), предположительно точилит. В статье (Вороняева и др., 2021) упоминаются также присутствующие в единичных знаках в протоличных пробах герсдорфит, молибденит, галенит, самородный висмут, теллуrowисмутит, золото и ауристобит.

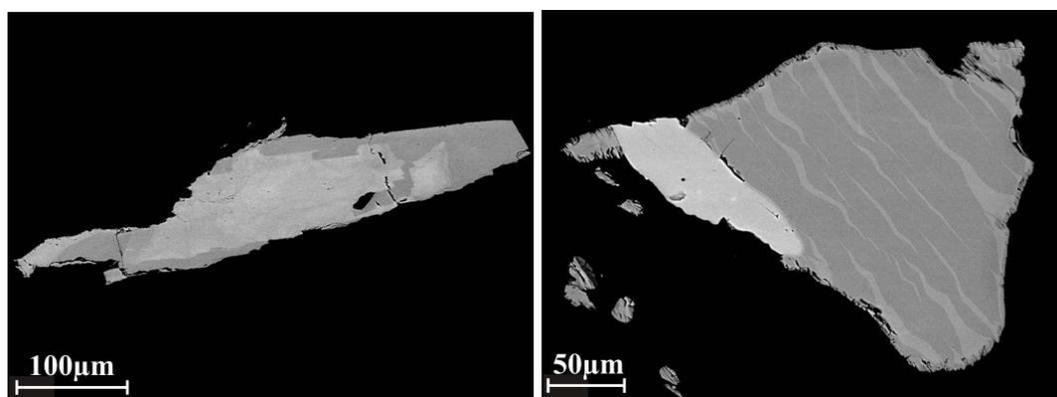


Рис. 7. Слева – зональное зерно арсенопирита, справа – вростки троилита в пирротине, светлое – арсенопирит. Фотографии сделаны в обратно-рассеянных электронах
Fig. 7. The left photo – zonal arsenopyrite grain, the right photo – troilite ingrowths in pyrrhotite, light color – arsenopyrite. Photographs are made in back-scattered electrons

Таблица 5. Химический состав арсенопирита рудопроявления Мальъявр, мас.%
Table 5. Chemical composition of arsenopyrite from the Mal'javr ore occurrence, wt.%

Номер пробы	ТУ-25 1С	ТУ-25 1R	ТУ-25 2С	ТУ-25 2R	ТУ-31 1С	ТУ-31 1R	ТУ-41 1С	ТУ-41 1R	ТУ-45 1С	ТУ-45 1R
Fe	26,46	31,40	27,92	30,56	27,73	31,49	33,15	34,61	31,89	33,65
Co	3,76	2,32	3,12	2,44	4,11	2,23	0,47	0,13	1,28	0,48
Ni	2,89	0,64	2,25	0,81	1,62	0,38	0,24	0,00	0,29	0,02
As	51,83	47,69	50,57	47,45	50,93	46,80	47,86	45,47	48,52	46,38
S	14,94	18,32	16,08	18,94	15,49	18,36	18,16	20,03	17,93	19,28
Сумма	99,88	100,37	99,93	100,20	99,88	99,26	99,88	100,25	99,91	99,81

Коэффициенты кристаллохимической формулы										
Fe	0,819	0,931	0,850	0,894	0,854	0,942	0,985	1,006	0,946	0,987
Co	0,110	0,065	0,090	0,068	0,120	0,063	0,013	0,004	0,036	0,013
Ni	0,085	0,018	0,065	0,023	0,048	0,011	0,007	0,000	0,008	0,001
As	1,195	1,054	1,148	1,035	1,169	1,043	1,060	0,986	1,073	1,014
S	0,805	0,946	0,852	0,965	0,831	0,957	0,940	1,014	0,927	0,986
at % As	39,7	35,0	38,2	34,7	38,7	34,6	35,3	32,7	35,9	33,8

Примечание. Индексами С и R в номере образца обозначены центр и край одного и того же проанализированного зерна.

Среди оксидов преобладает, как правило, ильменит, но в некоторых образцах метасоматитов из геденбергит-роговообманковой зоны отмечается обильная тонкая вкрапленность магнетита до 25 об. % породы.

Содержание золота в биотитовых гнейсах близко к кларковым значениям для этого элемента и возрастает в метасоматитах (табл. 1). Согласно (*Вороняева и др., 2021*) по результатам бороздowego опробования в одной из линз метасоматитов выявлено содержание золота 1,78 г/т на мощность 0,8 м, а в штучных пробах золото достигает 30 г/т. Золото – среднепробное до высокопробного: от Au 71,54, Ag 28,46 до Au 92,94, Ag 7,06 (*Вороняева и др., 2021*), из элементов примесей данными авторами упоминается только серебро.

Результаты и обсуждение

Размещение рудоносных метасоматитов на рудопроявлении Мальявр контролируется участками растяжения в сдвиговой зоне северо-северо-восточного простирания. Об условиях растяжения свидетельствуют, во-первых, отсутствие ориентировки чешуек биотита и кристаллов амфиболов в метасоматических породах среди рассланцованных метаосадочных пород, во-вторых, развитие поздних кварцевых прожилков, выполняющих согласные простиранию пород трещины.

В метасоматических телах сформировалась метасоматическая зональность: тыловая зона колонки представлена кварц-гранатовой породой, вплоть до гранатита, для промежуточной зоны характерна ассоциация граната, биотита и кварца, во фронтальной зоне колонки основными породообразующими минералами являются роговая обманка, геденбергит, присутствуют также эпидот, гранат. Химизм процесса можно охарактеризовать как железистый метасоматоз: содержание железа закономерно возрастает от внешних к внутренним зонам тел метасоматитов. При этом выносятся алюминий, кремний, титан и щелочные металлы, а наиболее инертное поведение характерно для магния (рис. 6). В ходе метасоматических процессов происходит разложение плагиоклаза и перекристаллизация биотита и кварца исходных пород. Высвободившийся при разложении плагиоклаза натрия выносятся и нигде не фиксируется, кальций перераспределяется во внешние геденбергит-амфиболовые зоны тел метасоматитов. Во внутренней и промежуточной зонах за счет глинозема плагиоклаза и привнесенного железа развивается гранат.

Рассматриваемые метасоматиты можно сравнить с метасоматическими образованиями Северо-Карельской зоны, также развивающимися по биотитовым плагиогнейсам, метаморфизованным в условиях амфиболитовой фации. В гнейсах Северо-Карельской зоны, как и в нашем случае, отмечаются кварц-гранатовые и биотит-гранатовые ассоциации во внутренних зонах метасоматической колонки. В целом, можно говорить о том, что развитие кварц-гранатовой ассоциации в центральных зонах метасоматических колонок является характерным для метасоматитов в глубоко метаморфизованных комплексах. Фронтальные зоны метасоматитов в Северо-Карельской зоне представлены минеральными ассоциациями с участием глиноземистых минералов (кианит, ставролит и др.), что объясняется инертным поведением глинозема при метасоматозе, тогда как на рудопроявлении Мальявр во внешних зонах метасоматических колонок развиваются кальцийсодержащие амфиболы и пироксены. Метасоматоз в Северо-Карельской зоне связан с метаморфизмом среднетемпературной амфиболитовой фации повышенных давлений, происходил в условиях его пика (600–650 °С, 7–8 кбар), а размещение метасоматитов контролируется участками растяжения в сдвиговых зонах, метасоматоз происходит одновременно с деформацией (*Азимов, 2012*), что также сближает метасоматиты Северо-Карельской зоны с рассматриваемыми нами образованиями.

О высокой температуре развития метасоматических образований на рудопроявлении Мальявр говорит состав сосуществующих биотита и граната из образцов ТУ-25 и ТУ-31 (табл. 3 и 4), указывающий на температуру образования этой ассоциации 600–650 °С (гранат-биотитовый геотермометр – *Термо-и барометрия...*, 1977; *Гульбин, 2010*).

Подтверждается высокая температура минералообразования в метасоматитах и с помощью арсенопиритового геотермометра (*Kretschmar et al., 1976*). Использование состава арсенопирита для термометрии возможно только для зерен с содержанием примесей Ni и Co менее 0,5 мас. % (*Kretschmar et al., 1976; Тюкова и др., 2007*), поэтому оценка температуры проведена для арсенопирита из образцов ТУ-41 и ТУ-45 (рис. 8). Состав арсенопирита и его ассоциация с пирротинном говорят о температуре формирования

внутренних зон зерен арсенипирита в метасоматитах геденбергит-амфиболовой зоны от 500 до 600 °С, а внешних – 400–510 °С.

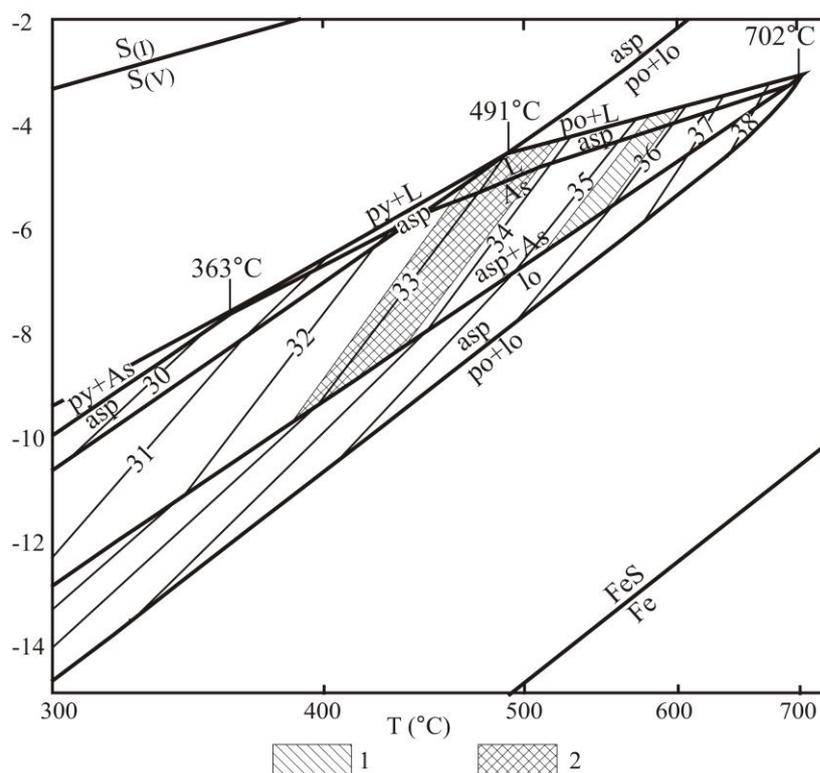


Рис. 8. Поля устойчивости арсенипиритов разных составов (As в ат.%) на диаграмме фугитивность серы – температура для системы Fe-As-S (no Kretschmar et al., 1976): 1 – поле арсенипиритов из внутренней части зерен; 2 – поле арсенипиритов из внешней части зерен.

Asp – арсенипирит; Lo – леллингит; Po – пирротин; Py – пирит

Fig. 8. Stability fields of arsenopyrites of different compositions (As in at.%) on the sulfur fugacity – temperature diagram for the Fe-As-S system (according to Kretschmar et al., 1976): 1 – arsenopyrite field from the inner part of the grains; 2 – arsenopyrite field from the outer part of the grains. Asp – arsenopyrite; Lo – lellingite; Po – pyrrhotite; Py – pyrite

Заключение

Рудопроявление Мальевр – первое в Кольском регионе проявление золота, связанное с конгломератами. Вполне вероятно, что формированию минерализации золота способствовала обогащенность вмещающих метасоматические образования парагнейсов-метаконогломератов и метапесчаников мышьяком – наиболее надежным геохимическим спутником и одновременно индикатором золотой минерализации. Мобилизация мышьяка из вмещающих толщ и перераспределение его в зону развития метасоматитов вполне могли способствовать концентрации золота в метасоматических новообразованиях. Следует отметить, что и другие малые элементы, которыми обогащены метасоматиты (за исключением иттрия), известны как элементы-спутники золота. Повышенное содержание иттрия в рассматриваемых породах, по всей видимости, обусловлено высоким содержанием граната, концентрирующего иттрий.

Пока не определена роль пегматитов в формировании рудопроявления. Нельзя исключать, что именно внедрение пегматитовых жил способствовало мобилизации компонентов из вмещающих толщ (в частности, выносу железа, мышьяка и серы из зоны мигматизации гнейсов), их миграции в зоны разуплотнения и дальнейшему формированию золотосодержащих метасоматических пород.

Благодарности

Авторы благодарят студента МГТУ Александра Ермолина за помощь в проведении полевых работ на объекте и канд. геол.-минерал. наук Е. А. Селиванову, заведующую лабораторией ГИ КНЦ РАН, за выполнение рентгеновских исследований минералов.

Исследования проведены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-27-00589.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Азимов П. Я. Соотношение метасоматических образований и структурных элементов в зонах сдвиговых деформаций при метаморфизме: зона сочленения Беломорского подвижного пояса и Карельского кратона (Фенноскандинавский щит) // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: материалы докладов Всерос. конф., г. Москва, 8–12 октября 2012 г. В 2 т. / Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН. Москва, 2012. Т. 1. С. 341–342.
- Богданова В. С., Дагелайский В. Б. Возрастное положение пород тундровой серии и конгломератов района р. Уры (Кольский полуостров) / Абсолютный возраст докембрийских пород СССР : сб. ст. / отв. ред. С. В. Обручев. М. ; Л. : Наука, 1965. С. 74–83.
- Вороняева Л. В., Крупеник З. В. Новое проявление золота Титовско-Урагубской зеленокаменной структуры позднего архея (Кольский регион) // Региональная геология и металлогения. 2021. № 86. С. 82–91. DOI: https://doi.org/10.52349/08697892_2021_86_82-91. EDN: KOGXFY.
- Гульбин Ю. Л. Оптимизация гранат-биотитового термометра. I. Температурные тренды // Записки Российского минералогического общества. 2010. Т. 139, № 5. С. 1–17. EDN: MXTDOS.
- Мыскова Т. А., Милькевич Р. И., Богомолов Е. С., Гусева В. Ф. Новые данные о составе и возрасте протолита глиноземистых гнейсов кольской и тундровой серий Центрально-Кольского блока Балтийского щита // Геология и геодинамика архея: материалы I Российской конф. по проблемам геологии и геодинамики докембрия, 27–29 сентября 2005 г. Санкт-Петербург, 2005. С. 272–275.
- Термо- и барометрия метаморфических пород / отв. ред. В. А. Глебовицкий. Л. : Наука, 1977. 207 с.
- Тюкова Е. Э., Ворошин С. В. Состав и парагенезисы арсенопирита в месторождениях и вмещающих породах Верхне-Колымского региона (к интерпретации генезиса сульфидных ассоциаций). Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 2007. 108 с.
- Chakravarti R., Singh S., Venkatesh A. S. Gold mineralisation within quartz pebble conglomerates of Gorumahisani Badampahar Schist belt, Singhbhum Craton, Eastern India // Journal of Geosciences Research. 2017. Special Vol. 1. P. 27–34.
- Kretschmar U., Scott S. D. Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application // The Canadian Mineralogist. 1976. Vol. 14, Iss. 3. P. 364–386.
- Long D. G. F., Ulrich T., Kamber B. S. Laterally extensive modified placer gold deposits in the Paleoproterozoic Mississagi Formation, Clement and Pardo Townships, Ontario // Canadian Journal of Earth Sciences. 2011. Vol. 48, Iss. 5. P. 779–792. DOI: <https://doi.org/10.1139/e10-101>.
- Milesi J. P., Ledru P., Marcoux E., Mougeot R. [et al.]. The Jacobina Paleoproterozoic gold-bearing conglomerates, Bahia, Brazil: A "hydrothermal shear – reservoir" model // Ore Geology Reviews. 2002. Vol. 19, Iss. 1–2. P. 95–136. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(01\)00038-5](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(01)00038-5).
- Munroe S., Cunningham M. The Pilbara's conglomerate gold // Australian Resources and Investment. 2018. Vol. 12, N 2. P. 74–76.
- Smith A. J. B., Henry G., Frost-Killian S. A review of the Birimian Supergroup- and Tarkwaian Group-hosted gold deposits of Ghana // Episodes. 2016. Vol. 39, Iss. 2. P. 177–197. DOI: <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2016/v39i2/95775>.
- Tucker R. F., Viljoen R. P., Viljoen M. J. A review of the Witwatersrand basin – the world's greatest goldfield // Episodes. 2016. Vol. 39, Iss. 2. P. 105–133. DOI: <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2016/v39i2/95771>.
- Ulrich T., Long D. G. F., Kamber B. S., Whitehouse M. J. In situ trace element and sulfur isotope analysis of pyrite in a Paleoproterozoic gold placer deposit, Pardo and Clement Townships, Ontario, Canada // Economic Geology. 2011. Vol. 106, Iss. 4. P. 667–686. DOI: <https://doi.org/10.2113/econgeo.106.4.667>.

References

- Azimov, P. Ya. 2012. Interrelations of alteration and structural elements in shear zones of deformation during metamorphism: The zone of junction of the Belomorian mobile belt and the Karelian craton (the Fennoscandian Shield). In the 3rd Tectonophysics Conference *Tectonophysics and Actual Problems of the Earth Sciences*, 8–12 October, 2012. In 2 vol. Moscow, Vol. 1, pp. 341–342. (In Russ.)
- Bogdanova, V. S., Dagelayskiy, V. B. 1965. Age position of the rocks of the Tundrovaya series and conglomerates in the area of the Ura River (the Kola Peninsula). In coll. articles *Absolute age of the Precambrian rocks in the USSR*. Ed. S. V. Obruchev. Moscow; Leningrad, pp. 74–83. (In Russ.)
- Voronyayeva, L. V., Krupenik, Z. V. 2021. A new gold prospect in the Titovsko-Uragubskaya greenstone Late Archean structure (the Kola region). *Regional Geology and Metallogeny*, 86, pp. 82–91. DOI: https://doi.org/10.52349/08697892_2021_86_82-91. EDN: KOGXFY. (In Russ.)
- Gul'bin, Yu. L. 2010. Optimization of the garnet-biotite geothermometer. 1. Temperature trends. *Zapiski Rossiiskogo Mineralogicheskogo Obshchestva*, 139(5), pp. 1–17. EDN: MXTDOS. (In Russ.)

- Myskova, T. A., Mil'kevich, R. I., Bogomolov, Ye. S., Guseva, V. F. 2005. New data on composition and age of the protolith of the high-alumina gneisses of the Kolskaya and Tundrovaya series of the Central Kola block of the Baltic Shield. In *Geology and Geodynamics of the Archean: Proceedings of the I Russian Conference on the Problems in Geology and Geodynamics of the Precambrian*, 27–29 September, 2005. Saint-Petersburg, pp. 272–275. (In Russ.)
- Thermo- and barometry of metamorphic rocks. 1977. Ed. Glebovitsky V. A. Leningrad. (In Russ.)
- Tyukova, Ye. E., Voroshin, S. V. 2007. Arsenopyrite mineral composition and parageneses in ore deposits and host rocks throughout the Upper Kolyma River area (interpreting the genesis of sulfide mineral assemblages). Magadan. (In Russ.)
- Chakravarti, R., Singh, S., Venkatesh, A. S. 2017. Gold mineralisation within quartz pebble conglomerates of Gorumahisani Badampahar Schist belt, Singhbhum Craton, Eastern India. *Journal of Geosciences Research*, Special Vol., 1, pp. 27–34.
- Kretschmar, U., Scott, S. D. 1976. Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application. *The Canadian Mineralogist*, 14(3), pp. 364–386.
- Long, D. G. F., Ulrich, T., Kamber, B. S. 2011. Laterally extensive modified placer gold deposits in the Paleoproterozoic Mississagi Formation, Clement and Pardo Townships, Ontario. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 48(5), pp. 779–792. DOI: <https://doi.org/10.1139/e10-101>.
- Milesi, J. P., Ledru, P., Marcoux, E., Mougéot, R. et al. 2002. The Jacobina Paleoproterozoic gold-bearing conglomerates, Bahia, Brazil: A "hydrothermal shear – reservoir" model. *Ore Geology Reviews*, 19(1–2), pp. 95–136. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(01\)00038-5](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(01)00038-5).
- Munroe, S., Cunningham, M. 2018. The Pilbara's conglomerate gold. *Australian Resources and Investment*, 12(2), pp. 74–76.
- Smith, A. J. B., Henry, G., Frost-Killian, S. 2016. A review of the Birimian Supergroup- and Tarkwaian Group-hosted gold deposits of Ghana. *Episodes*, 39(2), pp. 177–197. DOI: <https://doi.org/10.18814/epiugs/2016/v39i2/95775>.
- Tucker, R. F., Viljoen, R. P., Viljoen, M. J. 2016. A review of the Witwatersrand basin – the world's greatest goldfield. *Episodes*, 39(2), pp. 105–133. DOI: <https://doi.org/10.18814/epiugs/2016/v39i2/95771>.
- Ulrich, T., Long, D. G. F., Kamber, B. S., Whitehouse, M. J. 2011. In situ trace element and sulfur isotope analysis of pyrite in a Paleoproterozoic gold placer deposit, Pardo and Clement Townships, Ontario, Canada. *Economic Geology*, 106(4), pp. 667–686. DOI: <https://doi.org/10.2113/econgeo.106.4.667>.

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: kalinin@geoksc.apatity.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. & Miner.), Leading Researcher; e-mail: kalinin@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-0333>

Николай Михайлович Кудряшов – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: nik@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0918-1995>

Nikolay M. Kudryashov – 14, Fersmana Str., Apatity, Murmansk Region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Geol. & Miner.), Leading Researcher; e-mail: nik@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0918-1995>

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

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