ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геология*

Лампрофиры золоторудного месторождения Пещерное, их геологическое положение, вещественный состав и метасоматические преобразования (Северный Урал)

Д.В.Кузнецов[1]✉, **С.Ю.Степанов**[2], **А.В.Бутняков**[3], **В.С.Игошева**[1]
[1] *Институт геологии и геохимии им. академика А.Н.Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия*
[2] *Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Ильменский государственный заповедник, Миасс, Россия*
[3] *Уральский филиал «Полиметалл УК», Екатеринбург, Россия*

Как цитировать эту статью: Кузнецов Д.В., Степанов С.Ю., Бутняков А.В., Игошева В.С. Лампрофиры золоторудного месторождения Пещерное, их геологическое положение, вещественный состав и метасоматические преобразования (Северный Урал) // Записки Горного института. 2025. Т. 271. № 16393. С. 22-41. EDN MPTXFV

Аннотация
Приведены первые данные о биотит-роговообманковых лампрофирах, обнаруженных на месторождении рудного золота Пещерное. Рассмотрено геологическое положение лампрофировых даек в структуре месторождения, обсуждается связь этих пород с тектонически ослабленными и минерализованными зонами. Данные по геолого-структурной позиции минерализованных рудных зон, разрывных нарушений, дайковых тел, метасоматических ореолов и вмещающих вулканогенно-осадочных пород подтверждают тектоногенную природу гидротермально-метасоматической системы месторождения Пещерное. Дайки лампрофиров являются дорудными, о чем свидетельствуют наложенные метасоматические минеральные ассоциации. Предположено, что по разломной зоне северо-восточного простирания в разное геологическое время внедрялись дайки пород андезитового состава, лампрофиров, а впоследствии гидротермальные флюиды, в том числе и рудоносные. Приведено описание минералогических и химических преобразований лампрофиров, произошедших в результате гидротермально-метасоматических процессов. Выделены две стадии метасоматоза: углекислотная (березитизация-лиственитизация) и последующая за ней щелочная (натровый метасоматоз). При углекислотном метасоматозе темноцветные минералы замещаются хлоритом, происходит альбитизация и серицитизация плагиоклаза, под влиянием значительного привноса CO_2 образуется железистый доломит. Щелочной (натровый) метасоматоз накладывается на минеральный метасоматический парагенезис первой стадии. Рассмотрена метасоматическая зональность при натровом метасоматозе, проявленная в одной из спессартитовых даек. Хлорит и реликты магматических темноцветных минералов замещаются магнезитом, привнос Na приводит к появлению новообразованного альбита, а привнос S – образованию пирита, в который концентрируется железо из других минералов. В результате процессов щелочной стадии метасоматоза содержание железа в карбонатах уменьшается по направлению от внешней метасоматической зоны к внутренней. Сделано заключение, что именно щелочно-сульфидные натровые растворы выполнили рудоносную функцию, а процессами березитизации-лиственитизации подготовлена благоприятная среда для рудоотложения.

Ключевые слова
золото; месторождение Пещерное; лампрофиры; березитизация-лиственитизация; натровый метасоматоз; Краснотурьинский рудный узел; Северный Урал

Финансирование
Работа выполнена в рамках госбюджетной темы Института геологии и геохимии УрО РАН (№ 123011800009-9); часть аналитических работ и полевых исследований выполнена за счет госбюджетной темы ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (№ 122040600006-1).

Поступила: 01.03.2023 ***Принята: 03.06.2024*** ***Онлайн: 30.09.2024*** ***Опубликована: 25.02.2025***

Введение

В пределах рудных полей месторождений золота часто присутствуют рои даек различного состава, в том числе и лампрофиров. Лампрофиры установлены в сложении золоторудных месторождений различного генетического типа: орогенных [1, 2], спорного типа между орогенными или связанными с интрузиями [3-5], эпитермальных [6-8], «карлинского» типа [9-11], связанных с восстановленными интрузиями RIRGS [12, 13] и др. [14, 15]. На основе частых пространственно-

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

временных связей между лампрофирами и золотым оруденением высказывалось предположение о том, что они могут играть важную роль в процессе рудообразования в мезотермальных месторождениях золота [16-18].

На Урале в качестве примеров месторождений, в области которых распространены дайки биотит-роговообманковых лампрофиров, можно привести Кочкарское [19], Березовское [20-22] и Воронцовское [23-25] золоторудные месторождения. Как правило, сообщается о том, что дайки лампрофиров являются дозолоторудными [19, 21, 23], о чем свидетельствуют наложенные на них гидротермально-метасоматические изменения. В случае Кочкарского месторождения большая часть золотой минерализации залегает в метасоматически измененных дайках лампрофиров [19], которые получили собственное название – «табашки». На Воронцовском месторождении содержания золота в дайках не превышают 0,2 г/т [26].

Месторождение Пещерное находится на восточном склоне Северного Урала, в 4,5 км на юго-запад от г. Краснотурьинск. В минерагеническом плане оно относится к Краснотурьинскому рудному узлу, включающему скарново-магнетитовые и медно-скарновые месторождения, а также крупное месторождение золота Воронцовское [23, 27]. Область месторождения расположена на западном крыле Турьинской брахисинклинали, сложенной вулканогенно-осадочными породами туринской свиты (S_2-D_1tr), имеющими пологое (10-20°) восточное, северо-восточное падение (рис.1, *б*). Турьинская брахисинклиналь, в свою очередь, находится в восточной части Тагило-Магнитогорской мегазоны (рис.1, *а*), в южном сегменте Ауэрбаховского вулкано-плутонического пояса, сложенного позднесилурийско-девонскими вулканогенно-осадочными породами среднего состава [28]. В 800 м на восток от месторождения находится Полуденский диоритовый массив (рис.1, *в*), ранне-среднедевонского габбро-диорит-гранитового ауэрбаховского комплекса [29]. На самом месторождении присутствуют малые диоритовые тела, предположительно, этого же комплекса.

Золоторудное месторождение Пещерное было открыто Уральским филиалом АО «Полиметалл УК» и сейчас отрабатывается ЗАО «Золото Северного Урала». Оруденение месторождения относят к золото-малосульфидно-кварцевой формации [30]. Из числа вулканогенно-осадочных пород в строении месторождения принимают участие туфоалевролиты и туфопесчаники с прослоями туфогравелитов, которые прорваны многочисленными дайками пород основного и среднего состава. По химическому составу туфоалевролиты и туфопесчаники отвечают вулканитам среднего состава нормального петрохимического ряда. Золотое оруденение представляет минерализованные зоны, локализованные в метасоматически измененных вулканогенно-осадочных породах (туфоалевролитах и туфопесчаниках), реже в андезитах, андезибазальтах. Наиболее продуктивные рудные участки содержат минералы полиметаллического парагенезиса (пирит, арсенопирит, галенит, блеклая руда, халькопирит, сфалерит), а золото находится преимущественно в виде самородных обособлений, часто выполняя трещины в сульфидах.

Положение минерализованных зон на месторождении контролируется разрывными нарушениями северо-восточного простирания, залегающими субсогласно с контактом вулканогенно-осадочных пород туринской свиты и одновозрастной базальтовой толщи (рис.2, *а*, *б*). Разломные нарушения сопровождаются зонами катаклаза и дробления и, согласно наблюдениям, маркируются дайками лампрофиров. Благодаря отбору азимутально ориентированного керна у нескольких лампрофировых даек измерены элементы залегания. Азимут падения (а.п.) даек составляет 120-125° с углом падения 55-60°, что субсогласно с направлением и углом падения рудной зоны. Тела лампрофиров пересекают толщу туфоалевролитов, которая согласно слоистости (рис.2, *в*) имеет северо-восточное падение под углом 10-15°. Мощность даек составляет от первых десятков сантиметров до трех метров. Контакты даек и вмещающих туфоалевролитов резкие, с зонами закалки мощностью до 5 см.

Золотое оруденение может иметь пространственную, временную, структурную, парагенетическую или генетическую связи с дайковыми комплексами. Изучение лампрофиров как составной части дайковых узлов на золоторудных месторождениях может предоставить информацию о возрастных границах рудообразования, характере и природе метасоматизирующих флюидов, в том числе и рудоносных. В связи с тем, что лампрофиры имеют выдержанный минеральный и химический состав, они более представительны для изучения наложенных минералого-химических метасоматических преобразований по сравнению с вулканогенно-осадочными породами.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

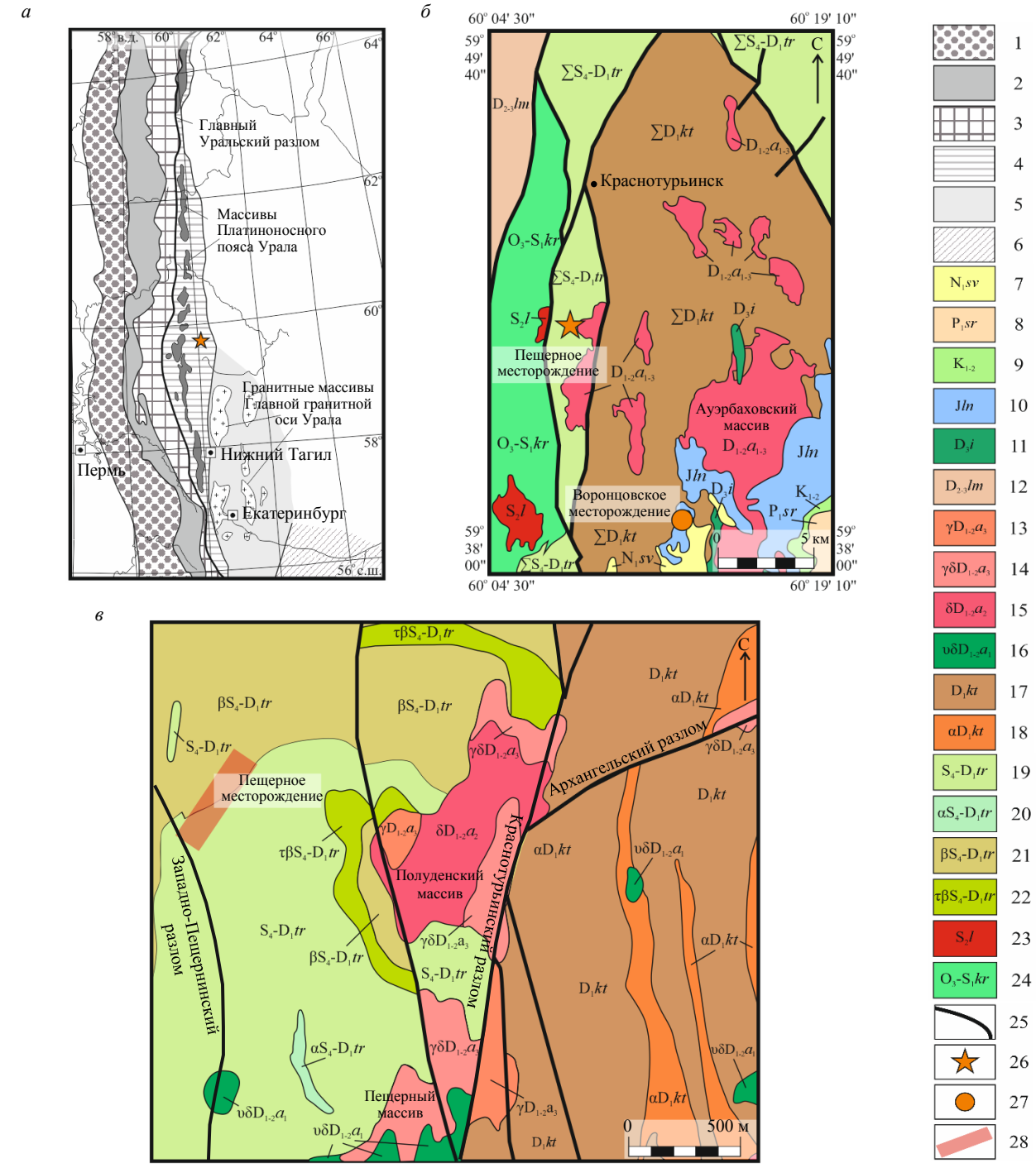


Рис.1. Схема тектонической зональности Среднего и Северного Урала (*а*) по [31], геологическая карта Турьинской брахисинклинали (*б*) и района месторождения Пещерное (*в*), составленные по материалам отчета[1] и работ [29, 30] с дополнениями

1 – Предуральский краевой прогиб; 2-6 – зоны: Западно-Уральская (2), Центрально-Уральская (3), Тагило-Магнитогорская (4), Восточно-Уральская (5), Зауральская (6); 7-10 – свиты: светлинская (7), серовская (8), мысовская, камышловская и зайковская (9), лангурская (10); 11 – габбродолериты ивдельского комплекса; 12 – лимкинская свита; 13-16 – гранитоиды ауэрбаховского комплекса ($D_{1\text{-}2}a_{1\text{-}3}$): граниты (13), гранодиориты (14), диориты (15), габбродиориты и габбро (16); 17, 18 – породы краснотурьинской свиты ($\sum D_1kt$): туфопесчаники и туфоалевролиты (17), андезиты и их туфы (18); 19-22 – породы туринской свиты ($\sum S_4\text{-}D_1tr$): туфопесчаники и туфоалевролиты (19), андезиты и их туфы (20), базальты и их туфы (21), трахибазальты и их туфы (22); 23 – гранитоиды левинского комплекса; 24 – красноуральская свита; 25 – разломные нарушения; 26 – Пещерное месторождение; 27 – Воронцовское месторождение; 28 – область месторождения Пещерное

[1] Отчет Серовской геологосъемочной партии по групповому геологическому доизучению масштаба 1:50 000 Серовской площади в пределах листов О-41-1-А (восточная четверть), О-41-1-Б (западная половина), О-41-1-В, О-41-1-Г (западная половина), О-41-13-А, О-41-13-Б (северо-западная четверть), О-41-13-В, проведенному в 1974-1978 годах.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

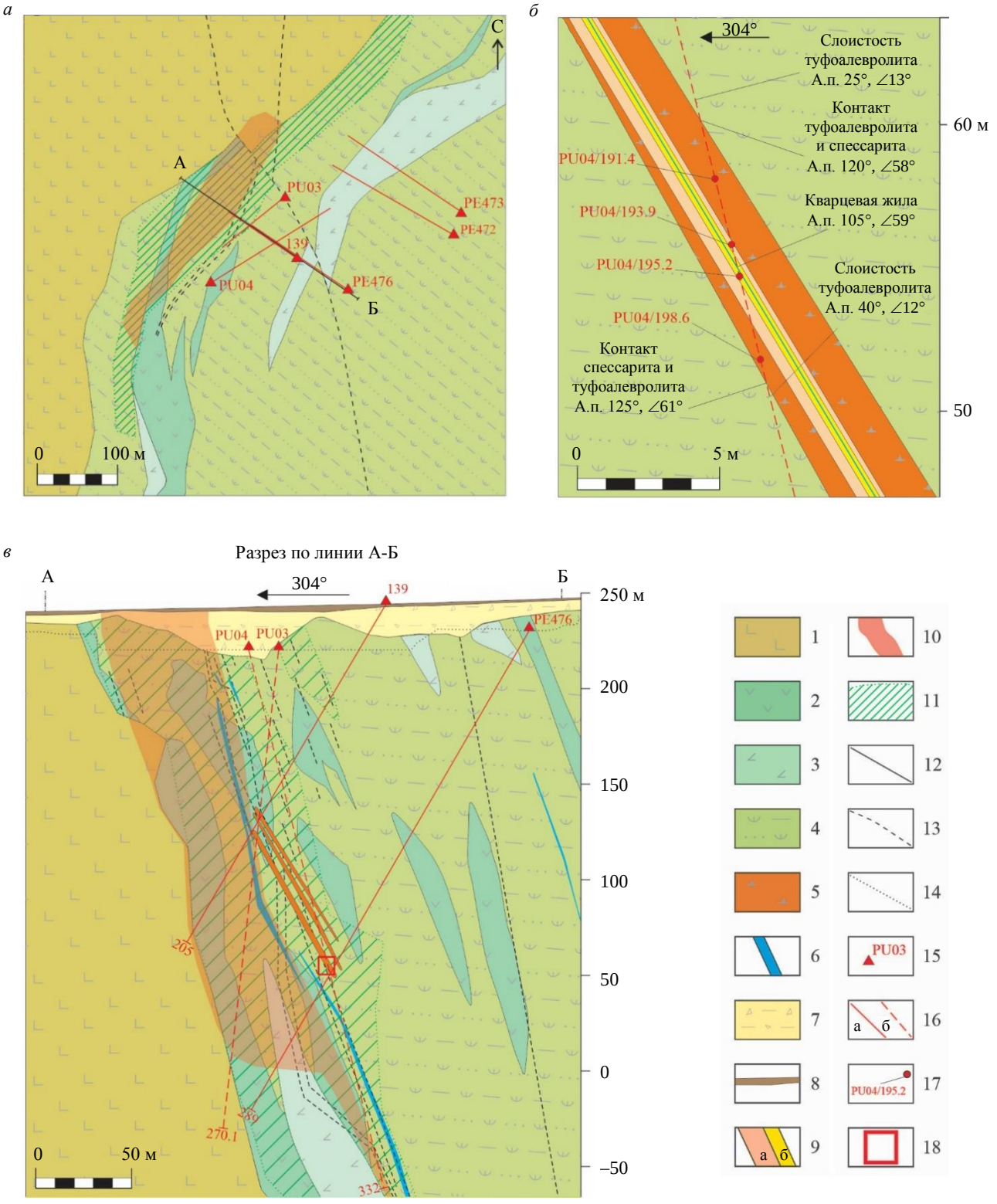


Рис.2. Геологический план (*а*) и разрез (*б, в*) месторождения Пещерное (по материалам ООО «Краснотурьинск-Полиметалл» с дополнениями)

1 – базальты; 2 – андезиты; 3 – андезибазальты; 4 – туфоалевролиты; 5 – спессартиты; 6 – кварцевые жилы; 7 – кора выветривания; 8 – делювиальные отложения; 9 – переходная (а) и внутренняя (б) метасоматические зоны в спессартитовой дайке; 10 – рудная зона; 11 – метасоматические изменения; 12 – геологические границы; 13 – тектонические нарушения; 14 – нижняя граница карьера на момент проходки разведочных скважин в 2022 г.; 15 – разведочные скважины; 16 – проекции осей разведочных скважин в плоскости разреза (*а*) и в крест (б); 17 – точки отбора проб (PU04/191.4 – краевая часть дайки, висячий бок, внешняя метасоматическая зона; PU04/193.9 – переходная метасоматическая зона; PU04/195.2 – центральная часть дайки, внутренняя метасоматическая зона; PU04/198.6 – краевая часть дайки, лежачий бок, внешняя метасоматическая зона); 18 – область разреза, показанная в укрупненном масштабе на рис.2, *б*

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Д.В.Кузнецов, С.Ю.Степанов, А.В.Бутняков, В.С.Игошева, 2025

Методы и материал исследований

Материалом для изучения вещественного состава лампрофиров послужили образцы из нескольких даек, отобранные из керна разведочных скважин, расположение которых указано на геологическом плане месторождения (рис.2, *а*). Первая часть номера образцов и проб соответствует обозначению разведочной скважины, а вторая – глубине отбора. Состав минералов определен в полированных шлифах на сканирующем электронном микроскопе TESCAN Mira LMS с использованием ЭДС-детектора в ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН, Екатеринбург. При съемке применялись следующие установки: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток электронного пучка 0,8 нА, диаметр пучка 8-9 нм. Содержания петрогенных компонентов в породах определялись методом рентгенофлюоресцентного анализа на многоканальном спектрометре СРМ-35. Пределы обнаружения для основной части петрогенных компонентов при использовании этого метода находятся в диапазоне 0,006-0,09 мас.%. Диагностика микроэлементного состава пород выполнялась методом ИСП-МС на масс-спектрометре Agilent 7700x в ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, Миасс. Произведен термический анализ на термическом анализаторе Diamond TG-DTA и полуколичественный рентгенофазовый анализ на рентгеновском дифрактометре XRD-7000 в ЦКП «Геоаналитик». По нескольким пробам определены содержания золота методом атомно-абсорбционной спектрометрии с электротермической атомизацией на спектрометре ContrAA 700. Предел обнаружения золота составил 0,8 мг/т, а погрешность не превысила 40 отн.%.

Результаты исследований

Петрографическая и минералогическая характеристика пород. Породы изучаемых даек имеют темно-серую окраску, массивную текстуру, порфировидную, лампрофировую и оцеллярную структуры. Практически все лампрофиры, слагающие дайки, в различной степени подвержены метасоматическому преобразованию, выраженному в замещении среднего плагиоклаза альбитом, развитии доломита, хлорита и серицита. Из сохранившегося первичного (магматического) минерального парагенезиса в породах присутствуют амфибол, биотит и реликты плагиоклаза. Согласно набору сохранившихся первичных минералов, а также текстурно-структурным признакам лампрофиры месторождения Пещерное соответствуют спессартитам и керсантитам [18]. Порфировые вкрапленники в спессартитах представлены амфиболом (рис.3, *б*, *в*), а в керсантитах – биотитом, который замещается минеральным агрегатом хлорита и серицита (рис.3, *а*). Оцелли имеют округлую форму размером 1-2 мм и сложены агрегатом доломита, кварца и альбита (рис.3, *в*). Основная масса породы состоит из плагиоклаза, доломита, кварца, хлорита и серицита. Содержание пирита в изученных образцах изменяется от 0,5 до 5 об.%. В виде небольших включений в пирите присутствуют сфалерит, пентландит, халькопирит. Из акцессорных минералов обнаружены монацит, апатит, рутил, хромшпинелид.

В центральной части одной из спессартитовых даек проходит трещина, выполненная кварцем, вероятно маркирующая зону проницаемости. Вдоль оси скважины мощность этой дайки составила 12,2 м, при истинной мощности 3,1 м (см. рис.2, *в*). Азимут падения трещины 105°, с углом падения 60°, что субсогласно с направлением падения самой дайки. От проницаемой зоны по направлению к краю дайки наблюдается смена нескольких зон метасоматических изменений: внутренней, переходной и внешней. Границы между метасоматическими зонами отчетливые. Иногда по ним проходят кварцевые прожилки мощностью 1-2 мм. Порода во внешней метасоматической зоне имеет темно-серую окраску. Минеральный состав подобен составу метасоматически измененных спессартитов из других даек, за исключением того, что амфибол, помимо хлорита, начинает замещаться магнезитом (рис.3, *г*). В переходной зоне спессартиты приобретают светло-серую окраску с зеленоватым оттенком. В этой зоне амфибол и биотит уже не сохраняются, исчезает хлорит, плагиоклаз полностью альбитизирован, увеличивается содержание магнезита. Характерной особенностью пород переходной метасоматической зоны является увеличение доли серицита в минеральном составе (рис.3, *д*). Часть серицита представлена фукситом ярко-зеленого цвета, что обуславливает зеленоватый оттенок породы. В переходной метасоматической зоне относительно внешней зоны увеличивается содержание пирита с 0,5 до 2 об.%. Спессартиты во внутренней метасоматической зоне имеют светло-серую окраску с бежевым оттенком. Минеральный состав пород внутренней метасоматической зоны упрощается, практически исчезают хлорит и серицит

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 271. С. 22-41
© Д.В.Кузнецов, С.Ю.Степанов, А.В.Бутняков, В.С.Игошева, 2025

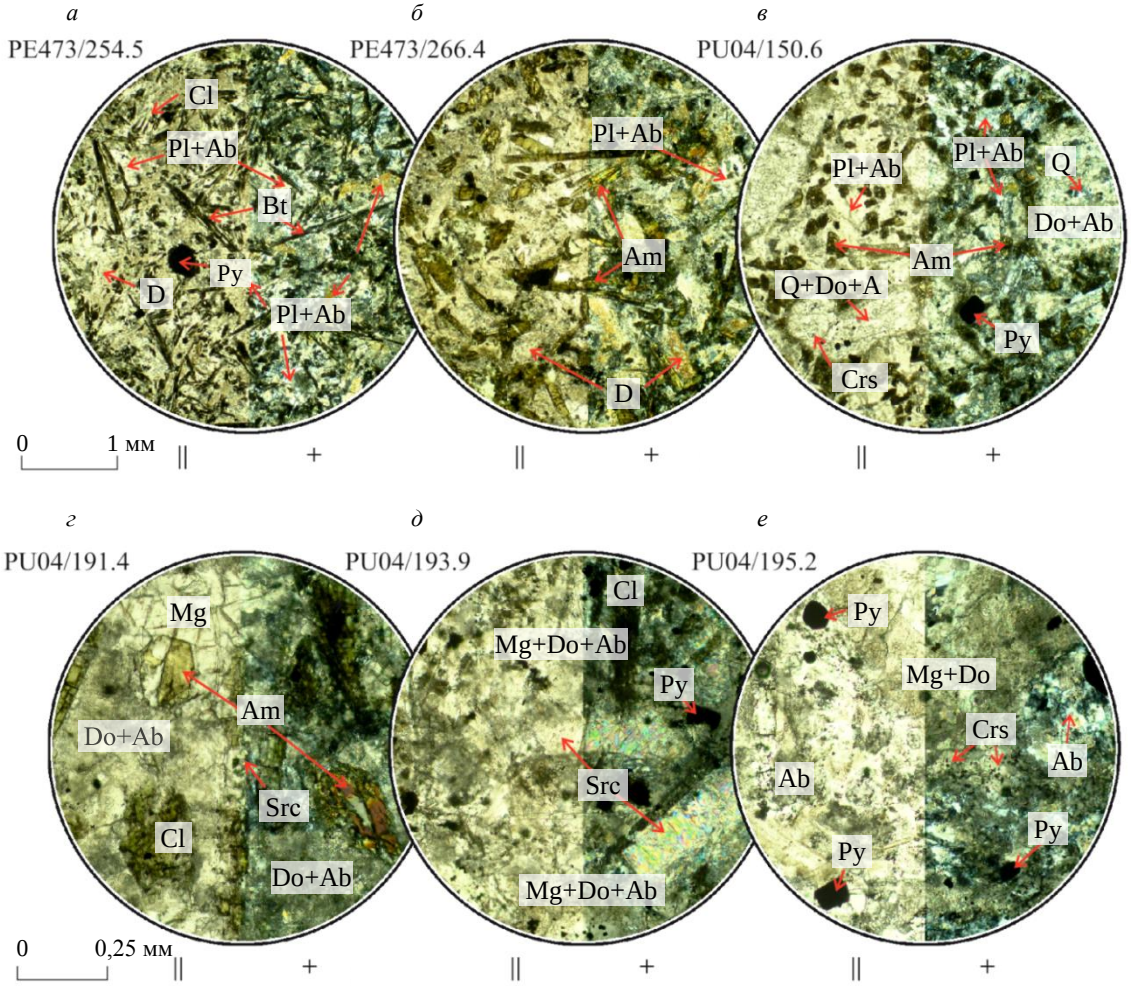


Рис.3. Микрофотографии шлифов керсантита (*а*), спессартита (*б*, *в*) и метасоматических зон в дайке измененных спессартитов: внешняя зона (*г*), переходная (*д*) и внутренняя (*е*)

|| – николи параллельны, + – николи скрещены; Ab – альбит, Am – амфибол, Bt – биотит, Cl – хлорит, Crs – хромшпинелид, Do – доломит, Mg – магнезит, Pl – плагиоклаз, Py – пирит, Q – кварц, Src – серицит

(рис.3, *е*). Содержания альбита в породах этой зоны превышают 50 об.%. Помимо альбита, развивающегося по плагиоклазу, появляются самостоятельные зерна – агрегаты этого минерала. Содержание пирита во внутренней метасоматической зоне увеличивается до 5 об.%. Доля кварца в минеральном составе спессартитов при переходе от внешней метасоматической зоны к внутренней незначительно уменьшается.

Магматический минеральный парагенезис. Амфибол спессартитов распространен в виде зерен призматического облика, размером по удлинению до 2 мм, плеохроирует от бледно-зеленовато-желтого до коричневато-зеленого цвета. По химическому составу (табл.1) отвечает магнезиогастингситу [32]. Биотит присутствует в спессартитах и керсантитах, образует таблитчатые зерна размером по плоскости пинакоида до 1,5 мм при толщине не более 0,1 мм (рис.4, *а*). В шлифе плеохроирует от серовато-зеленого до темно-зеленовато-коричневого цвета. Биотит принадлежит аннит-флогопитовому изоморфному ряду с примесью истонит-сидерофиллитовой компоненты, (составы см. в табл.1). Плагиоклаз сохраняется в виде реликтов в основной массе (рис.4, *б*) и имеет состав андезина. К минералам магматического парагенезиса можно также отнести акцессорный хромшпинелид, который сохраняется на всех этапах метасоматических преобразований. Обычно хромшпинелид наблюдается внутри оцеллей в виде зерен округлой, изометричной формы (рис.4, *г*), а также октаэдров размером 0,01-0,05 мм. Реже в основной массе в виде зерен с квадратным сечением, размером до 0,2 мм (табл.1). Согласно классификации по конечным членам [33] этот минерал из спессартитов отвечает глиноземистому магнезиохромиту. Еще одним сквозным акцессорным минералом, который присутствует во всех изученных образцах лампрофиров,

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

является апатит. Апатит слагает вытянутые в одном направлении зерна длиной до 0,1 мм при ширине 0,01-0,02 мм (рис.4, *в*). По химическому составу соответствует фторапатиту [34], имеет повышенные содержания SiO_2 и SO_3, низкие содержания P_2O_5 и заниженные значения суммы. Низкие значения суммы могут свидетельствовать об обогащенности апатита гидроксильной группой и углеродом, но используемый метод электронной микроскопии позволяет сделать такой вывод только в качестве предположения. Состав апатита незначительно меняется в зависимости от нахождения в той или иной зоне метасоматических изменений спессартитов. От внешней метасоматической зоны к внутренней в апатите статистически увеличиваются содержания CaO, P_2O_5 и значения суммы, что может свидетельствовать об уменьшении в нем доли CO_2 и OH. В виде небольших включений в апатите присутствует минерал, содержащий Sr, Ba и S и вероятно являющийся сульфатом барит-целестинового ряда.

Таблица 1

Представительные химические составы минералов метасоматически измененных спессартитов, мас.%

Компонент	PU04/ 191.4	PU04/ 191.4	PU04/ 191.4	PU04/ 191.4	PU04/ 191.4	PU04/ 191.4	PU04/ 191.4	PU04/ 195.2	PU04/ 191.4	PU04/ 191.4	PU04/ 191.4	PU04/ 195.2
Минерал	Am	Am	Bt	Bt	Cl	Cl	Crs	Crs	An	Ab	Ap	Ap
SiO_2	41,04	40,23	37,14	37,81	33,93	34,55	0,83	0,42	53,53	67,62	1,74	1,53
TiO_2	1,48	1,86	0,93	0,92	–	–	0,3	0,43	–	–	–	–
Al_2O_3	14,14	14,30	16,70	16,98	15,86	14,95	18,94	20,32	29,74	20,31	0,27	0,19
Cr_2O_3	–	–	–	–	–	–	47,82	44,02	–	–	–	–
FeO*	11,28	11,87	12,89	12,14	15,61	14,38	17,64	21,67	0,56	–	0,66	0,35
MnO	0,23	0,16	–	0,16	–	–	–	–	–	–	–	–
MgO	13,82	13,53	18,41	18,40	21,52	23,71	13,41	12,98	–	–	0,50	0,43
CaO	11,82	11,90	0,18	0,18	0,11	0,35	–	–	10,41	0,08	52,11	55,28
Na_2O	2,43	2,47	0,65	0,90	–	–	–	–	5,34	11,99	0,73	0,46
K_2O	1,04	1,02	7,66	8,00	–	–	–	–	0,42	–	–	–
P_2O_5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	34,79	37,14
SO_3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2,16	1,57
SrO	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,01	0,98
F	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2,16	2,1
Cl	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,44	0,47
O = F, Cl*	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,01	0,99
H_2O*	2,05	2,04	4,06	4,11	12,09	12,27	–	–	–	–	–	–
Сумма	99,33	99,38	98,62	99,60	99,12	100,2	98,94	99,84	100*	100*	95,56	99,51
Рассчитанные формульные единицы												
	24 атома O		22 катиона		10 катионов		4 атома O		5 катионов и 8 анионов		17 катионов и 26 анионов	
Si	6,04	5,94	2,74	2,76	3,37	3,38	0,03	0,01	2,41	2,94	0,31	0,26
Ti	0,16	0,21	0,05	0,05	0,00	0,00	0,01	0,01	–	–	–	–
Al^{IV}	1,96	2,06	1,26	1,24	0,63	0,62	–	–	–	–	–	–
Al^{VI}	0,49	0,43	0,19	0,22	1,22	1,10	–	–	–	–	–	–
Al	–	–	–	–	–	–	0,70	0,74	1,41	1,04	0,06	0,04
Cr	–	–	–	–	–	–	1,18	1,08	–	–	–	–
Fe^{2+}	1,05	1,12	0,80	0,74	1,29	1,18	0,41	0,42	0,02	–	0,10	0,05
Fe^{3+}	0,34	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,14	–	–	–	–
Mn	0,03	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	–	–	–	–	–	–
Mg	3,03	2,98	2,02	2,00	3,18	3,45	0,63	0,60	–	–	0,13	0,11
Ca	1,86	1,88	0,01	0,01	0,01	0,04	–	–	0,31	0,00	9,78	9,99
Na	0,69	0,71	0,09	0,13	0,00	0,00	–	–	0,61	1,01	0,25	0,15
K	0,20	0,19	0,72	0,74	0,00	0,00	–	–	0,04	–	–	–
P	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	5,16	5,30
S	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,28	0,20
Sr	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,10	0,10
F	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,20	1,12
Cl	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,13	0,13

Примечание. FeO* – суммарное железо FeO и Fe_2O_3. O = F, Cl*, H_2O* – рассчитанные величины. 100* – содержания нормированы на 100 %. Расчет формульных единиц произведен программой MineralCalc с определением коэффициентов Fe^{2+} и Fe^{3+} по методу G.T.R.Droop [35].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 271. С. 22-41
© Д.В.Кузнецов, С.Ю.Степанов, А.В.Бутняков, В.С.Игошева, 2025

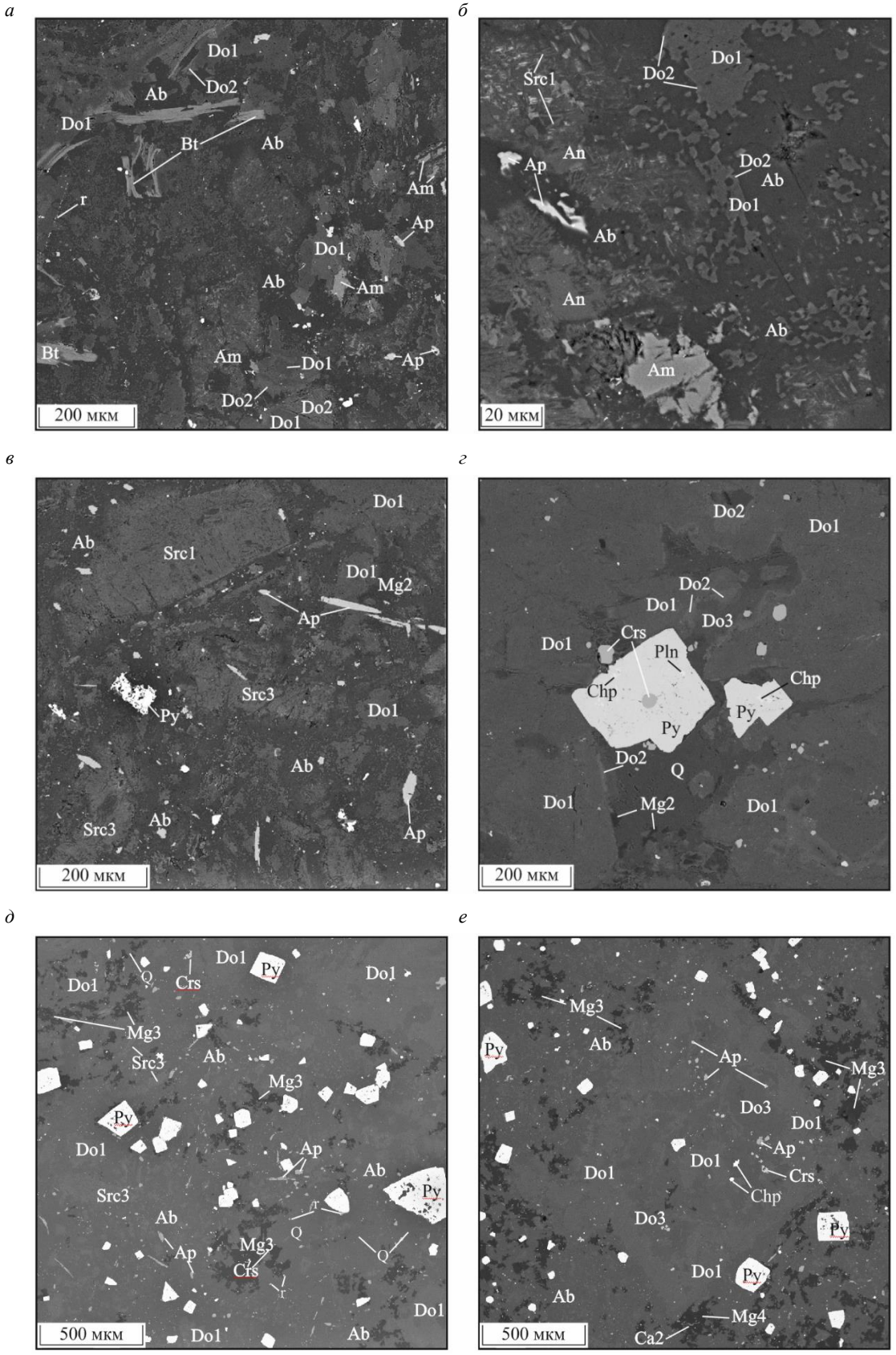


Рис.4. Микрофотографии метасоматически измененных спессартитов в обратно-рассеянных электронах. Внешняя метасоматическая зона, обр. PU04/191.4 (*а*, *б*); переходная метасоматическая зона, обр. PU04/193.9 (*в*, *г*); внутренняя метасоматическая зона, PU04/195.2 (*д*, *е*)

An – анортит, Ap – апатит, Ca – кальцит, Chp – халькопирит, Pln – пентландит. Остальные условные обозначения см. на рис.3

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Метасоматические минеральные парагенезисы. Хлорит в лампрофирах Пещерного месторождения замещает амфибол и биотит, по химическому составу соответствует клинохлору (табл.1). Замещение амфибола и биотита хлоритом сопровождается образованием тонкой вкрапленности рутила с размером отдельных зерен менее 0,01 мм. Основным метасоматическим минералом в измененных спессартитах является альбит, составляющий в породах около 40 об.% и являющийся продуктом замещения первичного плагиоклаза. Он находится как в самостоятельных обособлениях, так и в срастаниях с серицитом и реликтами плагиоклаза с размером отдельных индивидов 0,01-0,02 мм. В метасоматитах по спессартитам с выраженной метасоматической зональностью содержания альбита в переходной зоне возрастают до 50 об.% и во внутренней зоне до 55 об.%. В переходной и внутренней метасоматических зонах появляется новообразованный альбит, который, в отличие от аналогичного минерала, замещающего андезин, имеет самостоятельные более крупные зерна размером до 0,1 мм. Карбонат в измененных лампрофирах представлен железистым доломитом (табл.2) и составляет в породах 35-40 об.%. В зернах доломита наблюдается зональность, при которой центральная часть зерен доломита менее железистая, по сравнению с краевой частью (рис.4, *б*, *г*, *е*).

Таблица 2

Химический состав карбонатов, мас.%

№ п/п	Проба	Минерал	$FeCO_3$	$MnCO_3$	$MgCO_3$	$CaCO_3$	$SrCO_3$	Сумма
1	PE472/264.8	Do1	10,43	1,18	30,64	57,75	0,00	100,0
2	PU04/191.4	Do1	9,20	0,82	30,81	59,17	0,00	100,0
3	PU04/191.4	Do1	10,98	0,87	30,48	57,67	0,00	100,0
4	PU04/191.4	Do1 ц	8,83	1,71	31,26	58,20	0,00	100,0
5	PU04/191.4	Do2 к	17,99	0,67	27,20	53,01	1,12	100,0
6	PU04/193.9	Do1	9,90	0,52	30,56	59,02	0,00	100,0
7	PU04/193.9	Do1	10,16	0,66	29,24	59,95	0,00	100,0
8	PU04/193.9	Do1 ц	9,61	1,87	31,49	57,03	0,00	100,0
9	PU04/193.9	Do2 к	14,60	2,76	28,19	53,12	1,33	100,0
10	PU04/193.9	Do1 ц	11,00	0,51	31,07	57,09	0,32	100,0
11	PU04/193.9	Do2 к	12,49	3,23	29,23	53,84	1,20	100,0
12	PU04/193.9	Do3	5,67	1,02	35,38	56,40	1,53	100,0
13	PU04/195.2	Do1	8,94	1,40	31,11	58,56	0,00	100,0
14	PU04/195.2	Do3 ц	3,66	1,31	35,79	57,87	1,37	100,0
15	PU04/195.2	Do1 к	8,49	1,18	32,56	57,77	0,00	100,0
16	PU04/195.2	Do3 ц	4,26	1,03	35,77	57,59	1,36	100,0
17	PU04/195.2	Do1 к	10,90	1,79	29,65	57,38	0,29	100,0
18	PU04/191.4	Mg1	59,03	0,98	37,99	2,00	0,00	100,0
19	PU04/191.4	Mg1	56,50	1,30	40,48	1,73	0,00	100,0
20	PU04/193.9	Mg2	36,47	0,55	62,49	0,49	0,00	100,0
21	PU04/193.9	Mg2	33,94	1,94	62,89	1,23	0,00	100,0
22	PU04/195.2	Mg3	13,98	0,47	85,05	0,50	0,00	100,0
23	PU04/195.2	Mg3	13,12	0,00	86,67	0,22	0,00	100,0
24	PU04/195.2	Mg4	8,38	0,00	90,72	0,91	0,00	100,0
25	PU04/195.2	Ca1	1,88	0,00	4,09	94,03	0,00	100,0
26	PU04/195.2	Ca1	1,71	0,00	4,55	93,10	0,63	100,0
27	PU04/195.2	Ca2	1,49	0,39	1,03	97,10	0,00	100,0

Примечания: ц – центр зерна; к – край зерна; 18, 19 – замещает амфибол; 25, 26 – на границе между доломитом и магнезитом; 27 – выполняет трещину в магнезите.

Помимо изменения химического состава доломита внутри одного зерна, наблюдаются вариации состава при переходе от одной метасоматической зоны к другой. По химическому составу можно выделить три типа доломита. Во внешней и переходной метасоматических зонах центр зерен представлен доломитом-1 (Do1 в табл.2) с $FeCO_3$ 8,5-11,0 мас.%. Доломит-2 (Do2) из краевой части зерен более железистый. Во внешней метасоматической зоне содержания $FeCO_3$ в нем достигают 18,0 мас.%, в переходной – 12,5-14,6 мас.%. Помимо более высокого содержания железа,

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Do2 имеет содержания $SrCO_3$ 1,1-1,3 мас.%, тогда как в Do1 содержания этого компонента до 0,3 мас.%. Во внутренней метасоматической зоне центральную часть зерен выполняет доломит-3 (Do3), с содержанием $FeCO_3$ 3,7-4,3 мас.% и $SrCO_3$ около 1,5 мас.%. Краевая часть зерен доломита во внутренней метасоматической зоне по химическому составу подобна Do1. Помимо доломита во внешней метасоматической зоне появляется магнезит. Магнезит замещает порфировые вкрапленники амфибола и по химическому составу отвечает брейнериту (Mg1 в табл.2), с содержанием $FeCO_3$ 56-59 мас.%. В переходной метасоматической зоне магнезит становится менее железистым (Mg2) и имеет содержания $FeCO_3$ 34-36,5 мас.%. Во внутренней метасоматической зоне присутствует два типа магнезита (Mg3 и Mg4), отличающихся содержанием железа. В первом типе $FeCO_3$ от 13 до 14 мас.%, во втором – около 8,4 мас.%.

Таким образом, по направлению от внешней метасоматической зоны к внутренней железистость карбонатов в измененных спессартитах уменьшается. Во внутренней метасоматической зоне, помимо доломита и магнезита, обнаружены небольшие обособления кальцита. В одном случае кальцит находится между доломитом и магнезитом (Ca1 в табл.2), в другом выполняет микротрещину в магнезите (Ca2, рис.4, *е*). Серицит в метасоматически измененных спессартитах принадлежит изоморфному ряду мусковит – парагонит (табл.3). В различных частях метасоматического ореола процентное содержание серицита варьируется и меняется его химический состав. Во внешней метасоматической зоне серицит составляет 5 об.%. В нем преобладает парагонитовый минал с содержаниями Na_2O и K_2O по 5 мас.% (Src1 в табл.3). В переходной метасоматической зоне количество серицита увеличивается до 10 об.% с размером отдельных зерен 0,5-1 мм (рис.4, *в*).

По химическому составу в этой зоне выделяется серицит трех типов. Первый тип близок сериците из внешней зоны с незначительным преобладанием парагонитового минала и содержаниями Na_2O и K_2O по 3,2 и 7,0 мас.% соответственно. Во втором типе серицита (Src2) уже преобладает мусковитовый минал, а также отмечается до 10 мол.% фукситового минала. Содержания в нем составляют, мас.%: Na_2O 1,6-1,8, K_2O 5,5-5,7 и Cr_2O_3 до 1,6. Серицит третьего типа является мусковитом (Src3) с содержанием Na_2O около 0,6 мас.% и K_2O 9,4 мас.%. Во внутренней метасоматической зоне содержания серицита составляют 1-2 об.% и он представлен мусковитом.

Таблица 3

Химический состав серицита, мас.%

Компонент	PU04/191.4	PU04/193.9	PU04/193.9	PU04/193.9	PU04/193.9	PU04/195.2	PU04/195.2	PU04/195.2
	Src1	Src1	Src2	Src2	Src3	Src3	Src3	Src3
SiO_2	54,66	52,49	49,80	49,69	48,63	48,98	49,38	49,65
Al_2O_3	28,62	30,14	35,25	35,34	32,64	32,05	32,98	31,15
Cr_2O_3	–	–	1,59	1,46	–	–	–	–
FeO*	1,13	1,39	0,30	0,45	2,5	2,48	1,85	2,98
MgO	0,36	1,25	0,82	0,83	1,74	2,29	1,98	1,81
CaO	0,92	–	0,30	0,28	–	–	–	–
Na_2O	4,72	3,16	1,60	1,83	0,58	0,45	0,31	0,28
K_2O	4,95	6,96	5,68	5,48	9,39	9,22	8,94	9,60
H_2O*	4,64	4,60	4,60	4,61	4,53	4,54	4,57	4,52
Сумма	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Содержание миналов, мол.%								
Мусковит	33	44	52	49	74	73	79	77
Парагонит	62	46	34	38	11	10	7	6
Селадонит	5	10	5	5	15	17	14	17
Фуксит	–	–	9	8	–	–	–	–

Примечание. В качестве миналов использованы мусковит $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH_2)$, парагонит $NaAl_2(AlSi_3O_{10})(OH_2)$, селадонит $K(Mg,Fe^{3+})(Si_4O_{10})(OH_2)$, фуксит $K(Al,Cr)_3(Si_3O_{10})(OH_2)$.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Д.В.Кузнецов, С.Ю.Степанов, А.В.Бутняков, В.С.Игошева, 2025

Сульфиды. В метасоматически измененных лампрофирах месторождения Пещерное сульфиды представлены главным образом пиритом, содержания которого составляют в среднем 0,5 об.%. Пирит имеет сечения преимущественно сложной формы, реже прямоугольной, со средним размером 0,01 мм, редко до 0,05 мм. В разных метасоматических зонах, развитых по дайке спессартитов, количество и морфология пирита варьируются. Во внешней метасоматической зоне содержания и характер пирита аналогичны наблюдаемым в остальных лампрофировых дайках. В переходной метасоматической зоне пирит увеличивается до 2 об.%, сечения также имеют преимущественно сложную форму с присутствием прямоугольников, размер сечений в среднем 0,01-0,03 мм, редко до 0,2 мм. Во внутренней метасоматической зоне пирит возрастает до 5 об.%, увеличивается средний размер зерен до 0,05 мм. Форма сечений пирита во внутренней зоне в основном прямоугольная, появляются сечения, соответствующие форме зерен в виде пентагондодекаэдров (рис.4, *д*). Химический состав пирита достаточно выдержанный, с небольшими вариациями по содержанию примесей Co, Ni. В единичном зерне из внутренней метасоматической зоны обнаружена примесь As. В виде включений в пирите, а также небольших самостоятельных зерен присутствуют сфалерит, халькопирит и пентландит (рис.4, *г*, *е*).

Петрохимическая характеристика пород. Содержания петрогенных компонентов и редких элементов в лампрофирах золоторудного месторождения Пещерное приведены в табл.4. Низкие содержания SiO_2 и высокие значения потерь при прокаливании (ППП) в лампрофирах свидетельствуют о метасоматических изменениях и могут служить критерием для оценки масштабов их проявления. В наименее измененных спессартитах содержания SiO_2 составляют, мас.%: 40-41 при ППП 12,5-13,5. В наиболее измененных образцах эти значения составляют 34,7-36 мас.% и 15,5-17,1 мас.%, соответственно. В керсантитах месторождения Пещерное значения SiO_2 выше, чем в спессартитах, от 42 до 45 мас.%, а ППП ниже – 8-10 мас.%.

Таблица 4

Содержание петрогенных компонентов (мас.%), золота (мг/т) и редких элементов (г/т) в лампрофирах Пещерного золоторудного месторождения

Компонент	Проба											
	PU03/ 96.6	PU04 150.6	PU04/ 167.9	PE472/ 264.8	PU04/ 191.4	PU04/ 193.9	PU04/ 195.2	PU04/ 198.6	PE472/ 179.5	PE473/ 254.5	Спес_В	Керс_В
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO_2	34,72	40,66	36,03	39,82	38,52	35,65	38,89	40,89	44,81	42,39	46,04	52,55
TiO_2	0,64	0,83	0,55	0,73	0,67	0,78	0,71	0,78	1,22	1,18	0,72	1,19
Al_2O_3	11,85	12,79	10,27	11,81	10,45	12,02	11,18	11,58	14,62	14,18	12,54	12,08
FeO*	5,17	7,54	6,20	7,53	7,76	6,39	5,27	7,54	7,34	7,24	9,82	5,90
MnO	0,12	0,13	0,13	0,16	0,14	0,13	0,11	0,13	0,19	0,14	0,16	0,12
MgO	8,12	9,62	12,23	13,44	12,44	10,22	11,28	10,46	9,59	8,04	13,02	8,34
CaO	15,38	10,60	11,68	10,12	10,75	10,29	9,89	11,43	8,03	9,48	8,17	6,7
Na_2O	4,67	3,04	3,92	2,72	2,75	4,24	5,01	3,07	3,19	4,98	2,1	2,4
K_2O	0,15	0,58	0,42	0,18	0,40	0,77	0,21	0,56	1,32	0,24	0,66	5,0
P_2O_5	0,15	0,40	0,21	0,30	0,29	0,31	0,27	0,34	0,71	0,72	0,15	0,84
ППП	15,42	13,05	16,06	12,44	15,02	17,11	13,37	12,57	7,96	10,21	5,8	4,3
S	3,15	0,33	1,94	0,30	0,28	1,73	3,24	0,21	0,44	0,64	0,22	0,16
Сумма	99,56	99,57	99,64	99,54	99,47	99,63	99,44	99,56	99,41	99,43	99,75	99,78
Au	–	–	–	<0,8	2,8	4,3	23,0	8,2	–	–	–	–
Li	0,86	25,1	11,4	22,5	22,2	2,77	7,82	17,6	6,53	14,6	–	–
Be	0,46	0,89	0,59	0,80	0,74	0,81	0,44	0,91	1,18	1,19	–	–
Sc	20,6	24,2	26,9	26,8	28,0	25,4	26,2	25,8	20,2	20,4	–	–
V	129	183	128	164	148	168	116	170	212	219	–	–
Cr	178	333	480	535	501	454	273	348	307	292	–	–
Co	30,6	34,1	38,6	39,3	41,4	36,2	39,6	36,4	28,3	29,7	–	–
Ni	175	185	265	254	253	215	254	232	136	131	–	–
Cu	40,9	54,7	49,1	49,3	35,6	53,8	55,4	50,1	85,2	80,6	–	–
Zn	45,6	56,8	47,3	58,5	50,1	51,2	46,0	58,0	64,8	69,9	–	–
Ga	11,6	13,0	10,0	11,7	11,0	11,0	10,8	12,4	14,8	15,2	–	–
As	212	9,07	110	3,80	2,93	63,7	191,1	2,55	9,32	6,67	–	–
Rb	2,51	9,15	6,16	1,91	6,52	10,7	3,08	6,46	6,37	19,8	–	–

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 271. С. 22-41
© Д.В.Кузнецов, С.Ю.Степанов, А.В.Бутняков, В.С.Игошева, 2025

Окончание табл.4

Компонент	Проба											
	PU03/ 96.6	PU04 150.6	PU04/ 167.9	PE472/ 264.8	PU04/ 191.4	PU04/ 193.9	PU04/ 195.2	PU04/ 198.6	PE472/ 179.5	PE473/ 254.5	Спес_В	Керс_В
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sr	1618	1060	851	665	969	732	820	1236	1091	702	–	–
Y	10,5	14,5	10,6	14,1	12,9	13,4	13,4	14,9	17,8	18,0	–	–
Zr	66,7	91,8	72,4	91,2	90,2	75,3	74,6	93,7	134	132	–	–
Nb	1,74	2,87	1,43	1,30	1,57	1,10	0,85	2,48	4,41	7,58	–	–
Mo	0,70	0,18	0,54	0,13	0,10	<0,10	<0,10	0,42	1,18	1,00	–	–
Cd	0,24	0,25	0,16	0,15	0,16	0,17	0,15	0,15	0,19	0,17	–	–
Sn	0,31	0,55	0,39	0,64	0,44	0,45	0,31	0,53	0,87	0,80	–	–
Sb	2,78	2,64	1,19	0,43	0,38	0,87	8,46	1,14	0,36	0,84	–	–
Cs	0,07	0,84	0,41	0,65	0,88	0,63	0,29	0,53	0,68	0,61	–	–
Ba	351	829	321	872	472	244	531	954	368	678	–	–
La	34,0	47,8	35,3	42,1	39,8	34,6	36,4	45,7	54,7	43,5	32,6	–
Ce	67,4	101	68,3	86,3	83,6	69,8	70,7	93,8	110	93,2	69,8	–
Pr	8,61	12,5	8,48	11,2	10,3	8,87	9,09	11,9	13,5	11,0	9,22	–
Nd	35,6	49,0	34,4	43,8	40,4	36,9	38,7	46,0	50,9	41,7	36,3	–
Sm	6,17	8,15	5,92	7,39	6,89	6,51	6,74	7,69	7,87	6,98	6,08	–
Eu	1,68	2,34	1,63	2,18	1,93	1,70	1,88	2,28	2,21	2,31	1,85	–
Gd	5,03	6,69	4,94	6,20	5,62	5,34	5,48	6,43	6,85	6,12	4,41	–
Tb	0,54	0,71	0,52	0,66	0,60	0,60	0,59	0,69	0,75	0,73	0,48	–
Dy	2,48	3,23	2,40	3,00	2,82	2,75	2,74	3,20	3,53	3,65	2,74	–
Ho	0,42	0,54	0,43	0,54	0,49	0,47	0,46	0,56	0,64	0,66	0,51	–
Er	1,23	1,55	1,20	1,49	1,42	1,38	1,36	1,58	1,81	1,82	1,43	–
Tm	0,14	0,18	0,16	0,18	0,17	0,15	0,15	0,19	0,22	0,23	0,20	–
Yb	0,99	1,19	0,97	1,16	1,11	1,05	1,07	1,25	1,48	1,50	1,36	–
Lu	0,14	0,17	0,13	0,18	0,16	0,17	0,15	0,18	0,22	0,20	0,21	–
Hf	1,80	2,21	1,68	2,15	2,24	1,80	1,85	2,26	3,07	2,96	–	–
Ta	2,65	0,64	0,37	0,33	0,34	0,31	0,34	0,40	0,39	0,53	–	–
W	0,82	0,14	0,09	<0,08	<0,08	0,16	0,21	<0,08	0,22	0,32	–	–
Pb	9,04	7,51	4,39	4,93	2,67	3,39	4,16	6,69	5,10	5,82	–	–
Th	5,00	6,54	5,00	5,69	5,60	5,16	4,97	6,43	5,53	5,55	–	–
U	1,10	1,49	1,17	1,34	1,29	1,15	1,10	1,45	1,28	1,30	–	–

Примечания: 1-4 – дайки спессартитов; 5-8 – пробы из одной дайки спессартита: 5 – краевая часть, висячий бок, внешняя метасоматическая зона, 6 – переходная метасоматическая зона, 7 – центральная часть, внутренняя метасоматическая зона, 8 – краевая часть, лежачий бок, внешняя метасоматическая зона; 9, 10 – дайки керсантитов; 11, 12 – породы Воронцовского золоторудного месторождения по [25, 36]: 11 – спессартит (петрогенные элементы – проба № 933, РЗЭ – проба № 34-2/17), 12 – керсантит. FeO* – суммарное железо FeO и Fe_2O_3.

Другой парой компонентов, коррелирующей со степенью метасоматического преобразования лампрофиров, являются Na_2O и S. В менее измененных породах содержания Na_2O составляют, мас.%: 2,7-3,1, а S около 0,3, в более измененных образцах 4,7-5 и 3,2 соответственно. Не всегда приведенные выше две пары петрогенных компонентов коррелируют между собой. Например, спессартиты из внутренней метасоматической зоны, подвергшиеся фактически наибольшей метасоматической проработке, имеют высокие содержания Na_2O и S при средних значениях SiO_2 и ППП.

Содержания TiO_2 в лампрофирах варьируются в зависимости от типа породы, составляя в керсантитах 1,2 мас.%, в спессартитах 0,5-0,8 мас.%. Кроме этого, керсантиты имеют более высокие содержания Al_2O_3 по сравнению со спессартитами. Широко варьирующие содержания K_2O в керсантитах от 0,2 до 1,3 мас.% свидетельствуют о замещении биотита при метасоматозе вторичными минералами с выносом калия из породы, что подтверждается петрографическими наблюдениями. В измененных спессартитах K_2O – 0,2-0,8 мас.%. Содержания MnO, FeO, MgO и CaO в керсантитах и менее измененных спессартитах месторождения Пещерное имеют близкие значения. Вариации содержаний суммарного FeO в спессартитах коррелируют со степенью метасоматических изменений. В наименее измененных спессартитах FeO – 7,5 мас.%, уменьшаясь с ростом метасоматической проработки до 5,2 мас.%.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Для образцов из дайки спессартитов с проявленной зональностью метасоматических преобразований проведен термический анализ, что позволяет оценить содержания компонентов OH и CO_2 в этих породах. Потери в массе при разложении доломита и магнезита составили 12-17 %, из чего следует вывод о содержании CO_2 в породах 12-17 мас.%. Содержания OH были оценены по изменению массы при разложении хлорита и насчитывали до 1,3 мас.%. Часть уменьшения массы при термическом анализе обусловлена адсорбционной влагой в препарате и разложением пирита. Суммарные изменения массы в изученных образцах составили 14,2-18 мас.%, что достаточно близко с полученными значениями потерь при прокаливании, измеренными в рамках проведения рентгенофлюоресцентного анализа.

Геохимическая характеристика пород. Спессартиты и керсантиты золоторудного месторождения Пещерное различаются по содержанию отдельных редких элементов (табл.4, рис.5 и 6). Керсантиты имеют более высокие значения Be, V, Cu, Zn, Y, ТРЗЭ, Zr, Hf, Nb, Mo, Sn, W относительно спессартитов, тогда как вторые обладают более высокими содержаниями Cr, Co и Ni. В спессартитах наблюдаются вариации содержаний редких элементов в зависимости от степени метасоматического преобразования пород. Более измененные спессартиты имеют меньшие содержания Li, Zr, Hf и РЗЭ и повышенные – As, Sb и W. Обозначенные выше геохимические особенности лампрофиров отражены на рис.5 и 6, где абсолютные содержания элемента в породе нормированы на хондрит C1 [37] и среднее содержание в известково-щелочных лампрофирах по [18] соответственно. Спессартиты на этих диаграммах распределены на три группы: слабо, умеренно и сильно метасоматически измененные. Распределение образцов по степени метасоматического преобразования произведено согласно петрографическим, петрохимическим и геохимическим данным. Содержания Au были измерены в одной из даек менее измененных спессартитов, а также в метасоматитах по дайке спессартитов с выраженной метасоматической зональностью. В слабоизмененных спессартитах содержания Au оказались ниже предела обнаружения. Породы внутренней метасоматической зоны содержат, мг/т: 23 золота, в переходной зоне 4, во внешней зоне в висячем боку дайки 3, во внешней зоне в лежачем боку 8. Отметим, что метасоматиты внешней зоны в лежачем боку дайки имеют более высокие содержания Sb, Zn, Pb, Ba, Mo, Th и U, чем в висячем.

Обсуждение результатов

Согласно петрографическим и петрохимическим наблюдениям лампрофиры месторождения Пещерное соответствуют спессартитам и керсантитам, которые претерпели значительные метасоматические преобразования. Кроме даек лампрофиров на месторождении присутствуют дайки андезитового состава. Подобный пестрый по составу дайковый комплекс описан и на Воронцовском

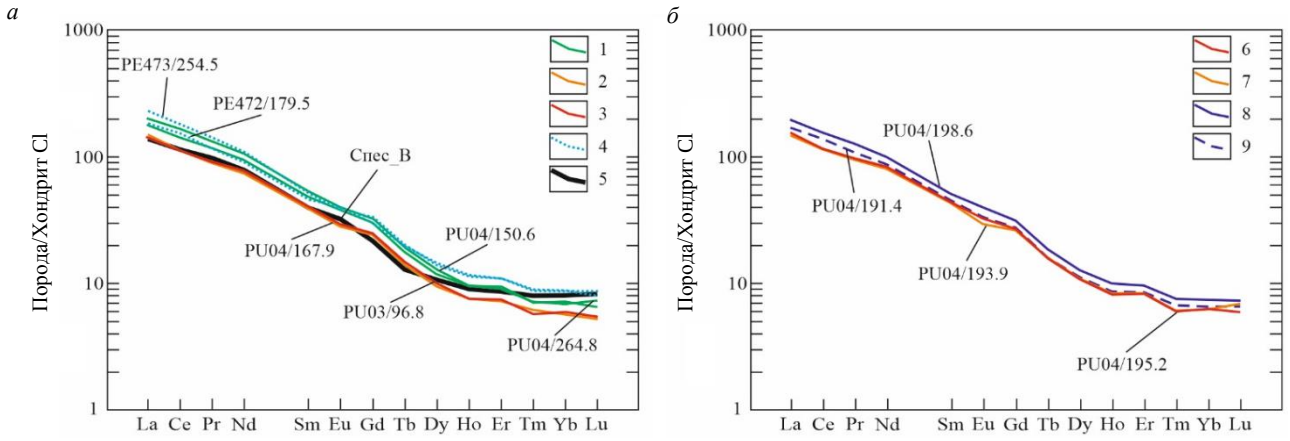


Рис.5. Содержания редкоземельных элементов в лампрофирах месторождения Пещерное, нормированные на хондрит C1 [37]:
а – отдельные дайки спессартитов и керсантитов
(1-3 – спессартиты месторождения Пещерное: 1 – слабо метасоматически измененные, 2 – умеренно измененные, 3 – сильно измененные; 4 – керсантиты месторождения Пещерное; 5 – спессартиты Воронцовского месторождения по [36]);
б – метасоматические зоны в дайке измененных спессартитов (6 – центральная часть дайки, внутренняя метасоматическая зона; 7 – переходная метасоматическая зона; 8 – краевая часть дайки, лежачий бок, внешняя метасоматическая зона; 9 – краевая часть дайки, висячий бок, внешняя метасоматическая зона)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 271. С. 22-41
© Д.В.Кузнецов, С.Ю.Степанов, А.В.Бутняков, В.С.Игошева, 2025

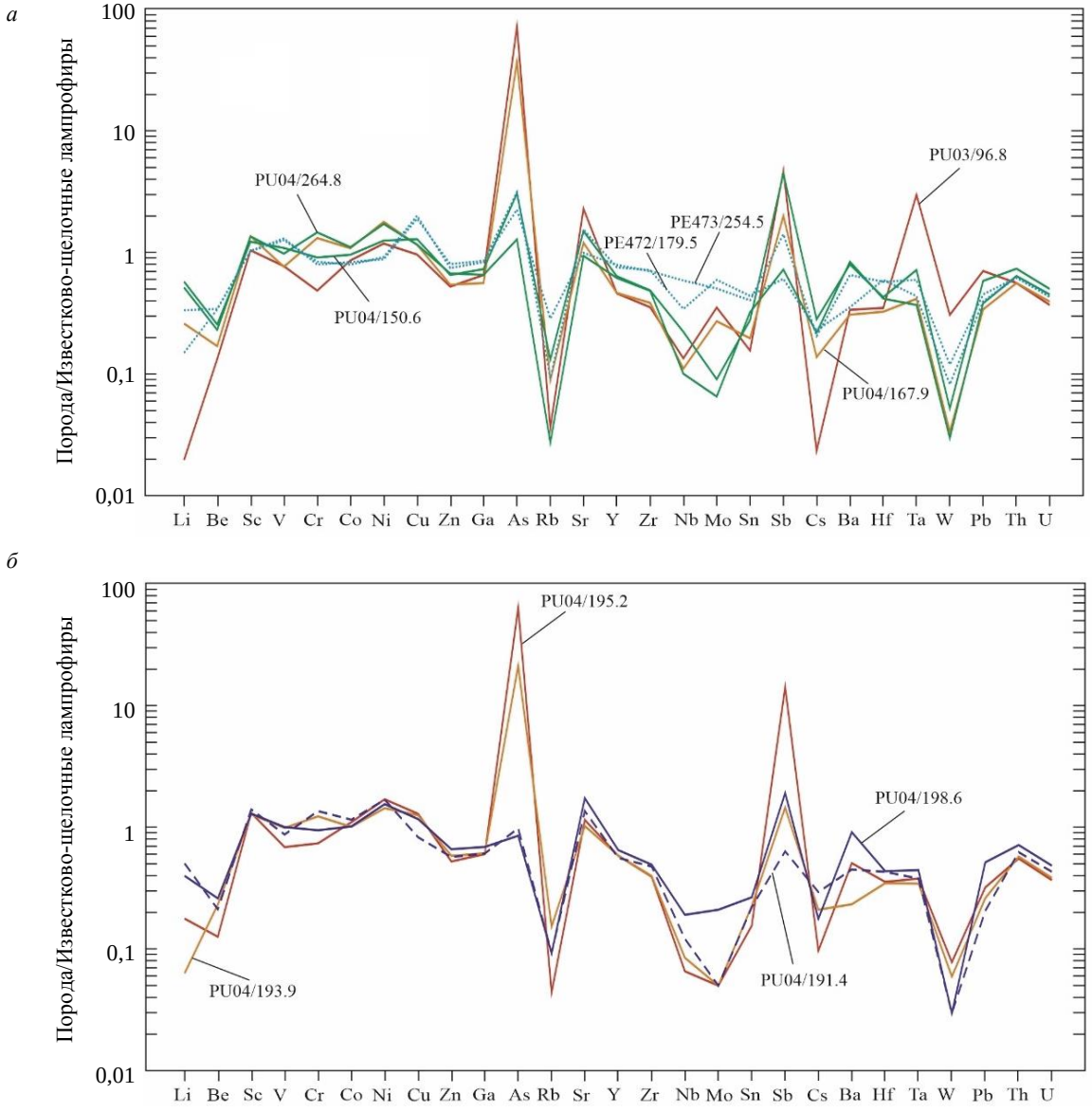


Рис.6. Содержания редких элементов в лампрофирах месторождения Пещерное, нормированные на среднее содержание в известково-щелочных лампрофирах по [18]:
а – отдельные дайки спессартитов и керсантитов; *б* – метасоматические зоны в дайке измененных спессартитов
Условные обозначения см. на рис.5

золоторудном месторождении [25, 36], расположенном примерно в 8 км на юго-восток от месторождения Пещерное. Наблюдаемая пространственная связь золотого оруденения и дайковых серий, включающих спессартиты, керсантиты и породы андезитового состава, может выступать в качестве поискового критерия для данного района.

Измеренные элементы залегания лампрофировых даек совпадают с направлением и углом падения рудоконтролирующих разломных нарушений. Наличие разрывных нарушений, являющихся флюидопроводниками и выполненных обычно дайками лампрофиров, отмечается на многих золоторудных месторождениях [11, 17]. Дайки лампрофиров и пород андезитового состава являются дорудными, о чем свидетельствуют наложенные метасоматические минеральные ассоциации. Метасоматические преобразования на месторождении Пещерное контролируются главным образом серией разрывных нарушений северо-восточного простирания, формируя метасоматический ореол, облекающий разломную зону. Структурно разломы юго-восточного падения под углом около 60°, дайковые тела, метасоматические ореолы и минерализованные зоны представляют собой одну систему, а вмещающие вулканогенно-осадочные породы, пологопадающие на северо-восток, – другую.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

На схеме расположения аддитивных геохимических ореолов Ag + Sb + As [30] к югу от месторождения Пещерное отражена серия линейных, субмеридионально вытянутых геохимических аномалий, которые пространственно совпадают с Западно-Пещернинским разломом. Можно предположить, что геохимические ореолы фиксируют влияние флюидов, поступающих по разломным системам. В области месторождения вытянутость геохимических ореолов приобретает северо-восточное направление и совпадает с ориентировкой разрывных нарушений, в которых локализованы рудные минерализованные зоны. Разломная зона северо-восточного простирания залегает субсогласно с контактом вулканогенно-осадочных пород туринской свиты и одновозрастной базальтовой толщи. Вероятно, базальты послужили экранирующей структурой для гидротермальных растворов.

Суммируя данные по геолого-структурной позиции минерализованных рудных зон, разрывных нарушений, дайковых тел, метасоматических ореолов и вмещающих вулканогенно-осадочных пород можно заключить, что гидротермально-метасоматическая система месторождения Пещерное является тектоногенной. Вероятно, по разломной зоне северо-восточного простирания в разное геологическое время внедрялись дайки пород андезитового состава, лампрофиров, а впоследствии она стала каналом для гидротермальных флюидов, в том числе и рудоносных. Влияние первичной специализации на золото вулканогенно-осадочных пород, как это было предложено для Воронцовского [24], в области месторождения Пещерное представляется маловероятным.

Для оценки влияния метасоматоза на химический состав лампрофиров необходимо определиться с составом первичной породы. В керне скважин месторождения Пещерное обнаружить неизмененные лампрофиры не удалось. Средний состав лампрофиров Воронцовского рудного поля [25, 36] и известково-щелочных лампрофиров по [18] достаточно близок, что может свидетельствовать о незначительной степени их преобразования в результате метасоматических процессов. Поэтому составы спессартитов и керсантитов Воронцовского месторождения [25, 36] были приняты нами в качестве возможного эдукта. Отдельные составы этих пород приведены в табл.4.

Наименее измененные спессартиты и керсантиты месторождения Пещерное отличаются от аналогичных пород Воронцовского меньшим содержанием SiO_2 и более высокими значениями CaO, Na_2O, ППП. Кроме этого, спессартиты Пещерного имеют меньшее содержание суммарного FeO, по сравнению со спессартитами Воронцовского месторождения. В керсантитах Пещерного содержится меньше K_2O, относительно керсантитов Воронцовского месторождения. Содержания РЗЭ в спессартитах Пещерного и Воронцовского месторождений практически идентичны (см. рис.5). Отличия содержаний петрогенных компонентов в лампрофирах Пещерного и Воронцовского месторождений являются результатом более высокой степени метасоматических преобразований в первых. Соответственно, начальная метасоматическая стадия, фиксируемая в лампрофирах месторождения Пещерное, сопровождалась выносом из пород SiO_2, FeO, K_2O и привносом CaO, Na_2O, CO_2. При этом содержания РЗЭ остались без существенных изменений.

Более детально можно проанализировать баланс вещества во время следующей стадии метасоматоза, выраженной в развитии метасоматических минеральных парагенезисов, формирующих отдельные метасоматические зоны в одной из даек измененных спессартитов. Преобразования, произошедшие в ходе формирования метасоматитов этой стадии, привели к изменению плотности пород. Спессартиты внешней метасоматической зоны (обр. PU04/191.4) имеют плотность 2,8 г/см^3, в переходной (обр. PU04/193.9) она увеличивается до 2,85 г/см^3 и во внутренней (обр. PU04/195.2) составляет 2,86 г/см^3. Результаты вычислений приведены в табл.5; N_i^v – число атомов элемента в геометрическом объеме породы в 10000 Å^3: $N_i^v{}_1$ – в метасоматически измененных спессартитах внешней, $N_i^v{}_2$ – переходной, $N_i^v{}_3$ – внутренней зонами; ΔN_i^v – разница между количеством атомов элемента в геометрическом объеме породы в 10000 Å^3 исходной и конечной породы: $\Delta N_i^v{}_{1\text{-}2}$ – внешней и переходной, $\Delta N_i^v{}_{2\text{-}3}$ – переходной и внутренней, $\Delta N_i^v{}_{1\text{-}3}$ – внешней и внутренней зонами; ΔN_i^v обозначается с плюсом, если элемент привносится, и с минусом при выносе; $\Delta N_i^v/N_i^v{}_1$ – относительное изменение количества атомов элемента в процентах к количеству атомов элемента в исходной породе, в нашем случае к количеству атомов элемента в метасоматически

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 271. С. 22-41
© Д.В.Кузнецов, С.Ю.Степанов, А.В.Бутняков, В.С.Игошева, 2025

измененных спессартитах внешней зоны. На рис.7 показаны относительные изменения количества атомов элемента при переходе от внешней метасоматической зоны к переходной и от переходной к внутренней, линией – результирующая этих изменений, соответствующая разнице в количествах атомов элементов между внешней и внутренней метасоматическими зонами.

Таблица 5

Расчет баланса вещества при изменении спессартитов во время щелочной стадии метасоматоза

Элементы	Количество атомов в 10000 Å^3			Привнос-вынос на 10000 Å^3					
	PU04/191.4	PU04/193.9	PU04/195.2	Абсолютные разности			Относительно $N_i^v{}_1$, %		
	$N_i^v{}_1$	$N_i^v{}_2$	$N_i^v{}_3$	$\Delta N_i^v{}_{1-2}$	$\Delta N_i^v{}_{2-3}$	$\Delta N_i^v{}_{1-3}$	$\Delta N_i^v{}_{1-2}/N_i^v{}_1$	$\Delta N_i^v{}_{2-3}/N_i^v{}_1$	$\Delta N_i^v{}_{1-3}/N_i^v{}_1$
Si	110	103	112	–7	+9	+2	–6,36	+8,18	+1,82
Ti	1,43	1,70	1,57	+0,27	–0,13	+0,14	+18,88	–9,09	+9,79
Al	35,0	40,9	38,5	+5,9	–2,4	+3,5	+16,86	–6,86	+10,00
Fe^{2+}	18,5	15,5	12,9	–3,0	–2,6	–5,6	–16,22	–14,05	–30,27
Mn	0,33	0,31	0,27	–0,02	–0,04	–0,06	–6,06	–12,12	–18,18
Mg	52,7	44,0	49,1	–8,7	+5,1	–3,6	–16,51	+9,68	–6,83
Ca	32,8	31,9	30,9	–0,9	–1,0	–1,9	–2,74	–3,05	–5,79
Na	15,2	23,8	28,3	+8,6	+4,5	+13,1	+56,58	+29,61	+86,18
K	1,47	2,84	0,77	+1,37	–2,07	–0,70	+93,20	–140,82	–47,62
P	0,69	0,75	0,68	+0,06	–0,07	–0,01	+8,70	–10,14	–1,45
S	1,47	9,37	17,72	+7,90	+8,35	+16,25	+537,41	+568,03	+1105,44
CO_2	56,7	64,3	48,2	+7,6	–16,1	–8,5	+13,40	–28,40	–14,99
OH	12,4	–	–	–12,4	–	–12,4	–100,00	–	–100,00
O	526	502	481	–24	–21	–45	–4,56	–3,99	–8,56
Сумма +	–	–	–	+31,7	+26,95	+34,99	+3,67	+3,12	+4,05
Сумма –	–	–	–	–56,02	–45,41	–77,77	–6,48	–5,25	–8,99
Сумма	864,69	840,37	821,91	–24,32	–18,46	–42,78	–2,81	–2,13	–4,94

Примечание. Расчет произведен по атомно-объемной системе пересчета Ю.В.Казицына и В.А.Рудника [38].

Проанализировав баланс вещества, можно выделить четыре группы элементов. Первая группа представлена S и Na, которые привносятся в породы переходной и внутренней метасоматических зон. Вторая группа состоит из относительно инертных элементов на данной стадии метасоматоза: Al, Ti, Si, P, Ca, Mg. Элементы третьей группы выносятся из пород. К ним принадлежат Mn, Fe и OH. Четвертая группа элементов представлена K и CO_2. Количества этих компонентов возрастают в переходной зоне и значительно уменьшаются во внутренней. Нами сделан вывод, что это является результатом перераспределения K и CO_2 из внутренней метасоматической зоны в породы переходной зоны, а не выноса их метасоматизирующими растворами. Отрицательные значения результирующих относительных изменений в содержаниях K и CO_2 могут быть обусловлены тем, что мощность переходной метасоматической зоны в два раза превышает мощность внутренней.

Привнос-вынос редких элементов на щелочной стадии метасоматоза иллюстрируется рис.5, *б*. Породы внутренней метасоматической зоны имеют более высокие содержания Au, As, Sb и W относительно спессартитов во внешней зоне, что свидетельствует о привносе этих элементов в результате метасоматоза, а Li при этом выносится из пород. Спессартиты с умеренной и сильной степенью метасоматических преобразований демонстрируют незначительное обеднение РЗЭ относительно менее измененных пород с сохранением формы спектров РЗЭ (см. рис.5). Дайка спессартитов, по которой были проведены исследования, находится вне рудной зоны (см. рис.2, *б*). Однако наблюдаемое в ней распределение элементов может отражать общие закономерности. Породы в лежачем боку дайки имеют более высокие содержания Au, Sb, Zn, Pb, Ba, Mo, Th и U по сравнению с породами висячего бока. Это согласуется с положением рудных зон в лежачем боку рудоконтролирующих тектонических нарушений и отсутствием оруденения в метасоматически измененных породах висячего бока.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

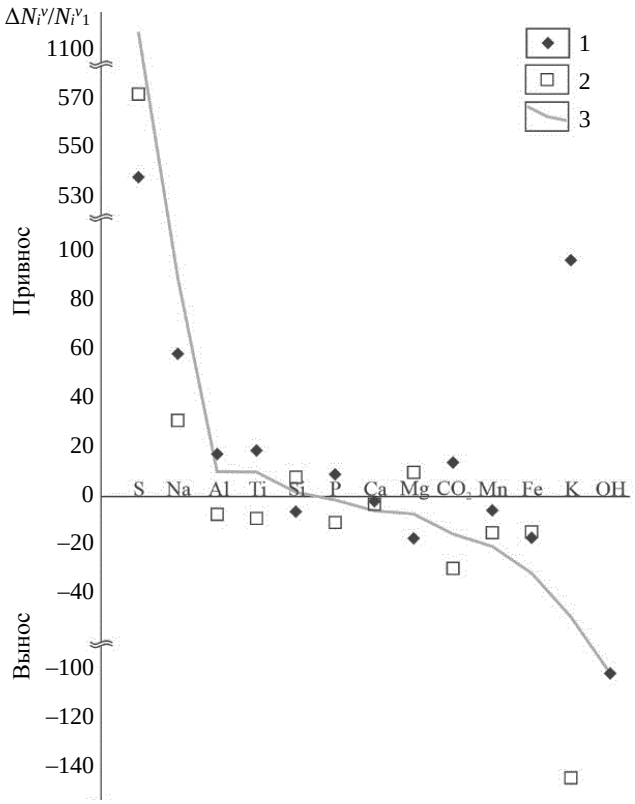


Рис.7. Привнос-вынос элементов во время щелочной стадии метасоматического преобразования спессартитов
ΔN_i^v – разница между количеством атомов элемента в 10000 Å^3 исходной и конечной породы;
$N_i^v{}_1$ – число атомов элемента в 10000 Å^3 метасоматически измененных спессартитов внешней зоны

Изменения при переходе:
1 – от внешней метасоматической зоны к переходной;
2 – от переходной метасоматической зоны к внутренней;
3 – результирующая линия изменений, соответствующая разнице в количествах атомов элементов между внешней и внутренней метасоматическими зонами

В рамках метасоматических преобразований, наблюдаемых в спессартитах месторождения Пещерное, можно выделить две стадии метасоматоза: углекислотную и последующую за ней щелочную. При углекислотном метасоматозе темноцветные минералы замещаются хлоритом, происходит альбитизация и серицитизация плагиоклаза. Под влиянием значительного привноса CO_2 образуется железистый доломит. Формирующийся минеральный парагенезис соответствует внешней метасоматической зоне при лиственитизации габбро [20, 39, 40]. Щелочной (натровый) метасоматоз накладывается на минеральный метасоматический парагенезис первой стадии. Хлорит и реликты магматических темноцветных минералов замещаются магнезитом, привнос Na приводит к появлению новообразованного альбита, а в результате привноса S образуется пирит, в который концентрируется железо из других минералов. В результате процессов щелочной стадии метасоматоза содержание железа в карбонатах уменьшается по направлению от внешней метасоматической зоны к внутренней, тогда как для процессов лиственитизации описана обратная тенденция [40]. По натровой специализации образуемые метасоматиты подобны эйситам, от которых отличаются значительным привносом S и отсутствием гематита [41, 42]. Отсутствие гематитизации и связывание железа в пирит может свидетельствовать в пользу более высокой кислотности метасоматизирующих растворов, чем при образовании классических эйситов [41].

Помимо метасоматических изменений, наблюдаемых в лампрофирах, в периферийных участках месторождения присутствуют пропилитизированные породы. Пропилиты и метасоматические преобразования углекислотной стадии широко распространены в области месторождения Пещерное, а влияние щелочного метасоматоза имеет более локальное распространение вблизи проницаемых разломных зон. Ограничение ореолов эйситизации размерами растворопроводящих каналов может быть объяснено положительным объемным эффектом минеральных преобразований, приводящим к закупорке трещин и пор [41].

Совокупность метасоматических образований месторождения Пещерное в общих чертах соответствует пропилит-березитовой эйситсодержащей гидротермально-метасоматической формации, характерной для тектоногенных гидротермально-метасоматических систем. Согласно модели этой формации, приведенной Е.В.Плющевым с соавторами [43], благодаря высокой летучести углекислоты в верхних уровнях гидротермальной системы может формироваться ареал карбонатизации, что соответствует высоким содержаниям карбонатов в метасоматитах месторождения Пещерное. Сочетание березит-лиственитов и эйситов в связи с оруденением наблюдается на Кочкарском, Чудном, Кумакском и других золоторудных месторождениях [44].

По результатам изучения метасоматически измененных спессартитов месторождения Пещерное обнаружено, что Au, As, Sb и W накапливаются в результате метасоматических процессов поздней щелочной стадии. С этой стадией связан существенный привнос серы и формирование сульфидов. Березитизированные породы месторождения Пещерное с наложенной ассоциацией

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

щелочных (натровых) метасоматитов имеют наиболее высокие концентрации золота [45]. Именно щелочно-сульфидные натровые растворы выполнили рудоносную либо рудомобилизующую функцию при образовании золотого оруденения месторождения. А процессами березитизации-лиственитизации была подготовлена благоприятная среда для рудоотложения [40]. Березитизация-лиственитизация, согласно теории метасоматической зональности [46], соответствует «кислотной стадии», а эйситизация может представлять «позднюю щелочную стадию». Растворимость и перенос золота в гидротермальных растворах натриевой специализации рассматривалась различными авторами [47, 48]. Последнее время активно обсуждается возможность извлечения золота из руды с использованием щелочных растворов полисульфида натрия [49, 50]. Процесс рудоотложения золота из щелочных растворов в относительно кислые породы (лиственитты, березиты) и кварцевые жилы подробно рассмотрен в работе В.Н.Сазонова [40]. Полученные данные подтверждают ранее выявленную прямую связь рудной минерализации, относящейся к золото-малосульфидно-кварцевой формации, с элементами Ag, As и Sb в породах центрального сегмента Восточно-Тагильской структурно-формационной зоны, к которой относится область Пещерного месторождения [30].

Пространственная близость с массивом габбро-диорит-гранитового комплекса, связь оруденения с разломными зонами и дайками лампрофиров, высокие содержания CO_2 в метасоматически измененных породах, повышение содержания As, Sb и W в результате рудосопровождающих метасоматических процессов свидетельствуют в пользу того, что месторождение Пещерное может быть отнесено к типу золоторудных объектов, связанных с интрузивными массивами и сформированных в области их гидротермального влияния [12, 51].

Заключение

Лампрофиры на золоторудном месторождении Пещерное представлены спессартитами и керсантитами. Дайки лампрофиров маркируют разломные нарушения, которые в более позднее время стали каналами для гидротермальных флюидов, в том числе и рудоносных. В рамках метасоматических преобразований, наблюдаемых в спессартитах, выделено две стадии метасоматоза: углекислотная и последующая за ней щелочная. Геохимическая специализация натровых метасоматитов по спессартитам свидетельствует о том, что именно щелочная стадия метасоматоза являлась рудосопровождающей. Выявление ореолов натрового метасоматоза в поле широко проявленных метасоматитов пропилит-березитовой формации может быть перспективным для более точной локализации рудных зон.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Dirks P.H.G.M., Sanislav I.V., van Ryt M.R. et al.* Chapter 8: The World-Class Gold Deposits in the Geita Greenstone Belt, Northwestern Tanzania // Geology of the World's Major Gold Deposits and Provinces. Society of Economic Geologists, 2020. Special Publication. № 23. P. 163-183. DOI: 10.5382/SP.23.08

2. *Dubé B., Mercier-Langevin P., Ayer J. et al.* Chapter 3: Gold Deposits of the World-Class Timmins-Porcupine Camp, Abitibi Greenstone Belt, Canada // Geology of the World's Major Gold Deposits and Provinces. Society of Economic Geologists, 2020. Special Publication. № 23. P. 53-80. DOI: 10.5382/SP.23.03

3. *Mueller A.G., Hagemann S.G., McNaughton N.J.* Neoarchean orogenic, magmatic and hydrothermal events in the Kalgoorlie-Kambalda area, Western Australia: constraints on gold mineralization in the Boulder Lefroy-Golden Mile fault system // Mineralium Deposita. 2020. Vol. 55. Iss. 4. P. 633-663. DOI: 10.1007/s00126-016-0665-9

4. *Seltmann R., Goldfarb R.J., Zu B. et al.* Chapter 24: Muruntau, Uzbekistan: The World's Largest Epigenetic Gold Deposit // Geology of the World's Major Gold Deposits and Provinces. Society of Economic Geologists, 2020. Special Publication. № 23. P. 497-521. DOI: 10.5382/SP.23.24

5. *Goldfarb R.J., Pitcairn I.* Orogenic gold: is a genetic association with magmatism realistic? // Mineralium Deposita. 2023. Vol. 58. Iss. 1. P. 5-35. DOI: 10.1007/s00126-022-01146-8

6. *Rock N.M.S., Finlayson E.J.* Petrological affinities of intrusive rocks associated with the giant mesothermal gold deposit at Porgera, Papua New Guinea // Journal of Southeast Asian Earth Sciences. 1990. Vol. 4. Iss. 3. P. 247-257. DOI: 10.1016/S0743-9547(05)80018-2

7. *Kadel-Harder I.M., Spry P.G., Layton-Matthews D. et al.* Paragenetic relationships between low- and high-grade gold mineralization in the Cripple Creek Au-Te deposit, ColoraDo: Trace element studies of pyrite // Ore Geology Reviews. 2020. Vol. 127. № 103847. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103847

8. *Kelley K.D., Jensen E.P., Rampe J.S., White D.* Chapter 17: Epithermal Gold Deposits Related to Alkaline Igneous Rocks in the Cripple Creek District, Colorado, United States // Geology of the World's Major Gold Deposits and Provinces. Society of Economic Geologists, 2020. Special Publication. № 23. P. 355-373. DOI: 10.5382/SP.23.17

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

9. *Bettles K.* Chapter 13: Exploration and Geology, 1962 to 2002, at the Goldstrike Property, Carlin Trend, Nevada // Integrated Methods for Discovery: Global Exploration in the Twenty-First Century. Society of Economic Geologists, 2002. Special Publication. № 9. P. 275-298. DOI: 10.5382/SP.09.13

10. *Emsbo P., Hofstra A.H., Lauha E.A. et al.* Origin of High-Grade Gold Ore, Source of Ore Fluid Components, and Genesis of the Meikle and Neighboring Carlin-Type Deposits, Northern Carlin Trend, Nevada // Economic Geology. 2003. Vol. 98. № 6. P. 1069-1105. DOI: 10.2113/gsecongeo.98.6.1069

11. *Dobak P.J., Robert F., Barker S.L.L. et al.* Chapter 15: Goldstrike Gold System, North Carlin Trend, Nevada, USA // Geology of the World's Major Gold Deposits and Provinces. Society of Economic Geologists, 2020. Special Publication. № 23. P. 313-334. DOI: 10.5382/SP.23.15

12. *Hart C.* Reduced Intrusion-Related Gold Systems // Mineral Deposits Division. A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces and Exploration Methods. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, 2007. Special Publication. № 5. P. 95-112.

13. *Коробейников А.Ф., Гусев А.И., Красова А.С.* Восстановленные интрузивно-гидротермально-метасоматические золоторудные системы // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 1. С. 16-22.

14. *Шатова Н.В., Молчанов А.В., Терехов А.В. и др.* Рябиновое медно-золото-порфировое месторождение (Южная Якутия): геологическое строение, геохимия изотопов благородных газов и изотопное (U-Pb, Rb-Sr, Re-Os) датирование околорудных метасоматитов и оруденения // Региональная геология и металлогения. 2019. Т. 77. С. 75-97.

15. *Артемьев Д.С., Крымский Р.Ш., Беляцкий Б.В., Ашихмин Д.С.* Возраст оруденения Майского золоторудного месторождения (Центральная Чукотка): результаты Re-Os изотопного датирования // Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 266-278. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.266

16. *Hodgson C.J., Troop D.G.* A new computer-aided methodology for area selection in gold exploration; a case study from the Abitibi greenstone belt // Economic Geology. 1988. Vol. 83. № 5. P. 952-977. DOI: 10.2113/gsecongeo.83.5.952

17. *Rock N.M.S., Groves D.I., Perring C.S., Golding S.D.* Gold, Lamprophyres, and Porphyries: What Does Their Association Mean? // The Geology of Gold Deposits: The Perspective in 1988. The Economic Geology Publishing Company, 1989. Economic Geology Monograph 6. P. 609-625. DOI: 10.5382/Mono.06.47

18. *Rock N.M.S.* Lamprophyres. New York: Springer, 1991. 285 p. DOI: 10.1007/978-1-4757-0929-2

19. *Ферштатер Г.Б., Знаменский С.Е., Бородина Н.С.* Возраст и геохимия Пластовского золотоносного массива // Ежегодник-2008. Труды Института геологии и геохимии УрО РАН. 2009. Вып. 156. С. 276-282.

20. *Бородаевский Н.И., Бородаевская М.Б.* Березовское рудное поле (геологическое строение). М.: Металлургиздат, 1947. 264 с.

21. *Спиридонов Э.М., Бакшеев И.А., Филимонов С.В.* Хромшпинелиды и генезис дозолоторудных спессартитов Березовского рудного поля, Средний Урал // Магматизм, метаморфизм и глубинное строение Урала. Тезисы докладов VI Уральского петрографического совещания. В 2 томах. Т. 2. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 1997. С. 228-229.

22. *Бакшеев И.А., Беляцкий Б.В.* Sm-Nd и Rb-Sr изотопные системы шеелита Березовского золоторудного месторождения (Средний Урал) // Литосфера. 2011. Т. 4. С. 110-118.

23. *Сазонов В.Н., Мурзин В.В., Григорьев Н.А., Гладковский Б.А.* Эндогенное оруденение девонского андезитоидного вулкано-плутонического комплекса (Урал). Свердловск: УрО АН СССР, 1991. 183 с.

24. *Викентьев И.В., Тюкова Е.Э., Мурзин В.В. и др.* Воронцовское золоторудное месторождение. Геология, формы золота, генезис. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2016. 204 с.

25. *Азовскова О.Б., Ровнушкин М.Ю., Сорока Е.И.* Петрохимические особенности дайкового комплекса Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал) // Известия Уральского государственного горного университета. 2019. Вып. 1 (53). С. 18-27 (in English). DOI: 10.21440/2307-2091-2019-1-18-27

26. *Нечкин Г.С., Ровнушкин М.Ю.* Сульфидная околодайковая минерализация на Воронцовском месторождении золота (Ауэрбаховский комплекс, Северный Урал) // Ежегодник-2010. Труды Института геологии и геохимии УрО РАН. 2011. Вып. 158. С. 187-190.

27. *Минина О.В.* Ауэрбаховская комплексная рудно-магматическая система на Среднем Урале // Отечественная геология. 1994. № 7. С. 17-23.

28. *Ожерельева А.В., Арифулов Ч.Х., Арсентьева И.В.* Золотоносность Ауэрбаховского вулканоплутонического пояса (Северный, Приполярный, Полярный Урал) // Отечественная геология. 2014. № 2. С. 4-19.

29. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000 (второе поколение). Серия Средне-Уральская. Лист O-41-I (Серов). Объяснительная записка. СПб: ВСЕГЕИ, 2017. 260 с.

30. *Несис В.Н., Мотов А.П., Бутняков А.В.* Геохимические признаки и границы золоторудных полей района месторождений Горнячка и Пещерное, Северный Урал // Руды и металлы. 2020. № 1. С. 32-38. DOI: 10.24411/0869-5997-2020-10003

31. *Пучков В.Н.* Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.

32. *Hawthorne F.C., Oberti R., Harlow G.E. et al.* Nomenclature of the amphibole supergroup // American Mineralogist. 2012. Vol. 97. № 11-12. P. 2031-2048. DOI: 10.2138/am.2012.4276

33. *Bosi F., Biagioni C., Pasero M.* Nomenclature and classification of the spinel supergroup // European Journal of Mineralogy. 2019. Vol. 31. № 1. P. 183-192. DOI: 10.1127/ejm/2019/0031-2788

34. *Pasero M., Kampf A.R., Ferraris C. et al.* Nomenclature of the apatite supergroup minerals // European Journal of Mineralogy. 2010. Vol. 22. № 2. P. 163-179. DOI: 10.1127/0935-1221/2010/0022-2022

35. *Droop G.T.R.* A general equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria // Mineralogical Magazine. 1987. Vol. 51. Iss. 361. P. 431-435. DOI: 10.1180/minmag.1987.051.361.10

36. *Азовскова О.Б., Сорока Е.И., Ровнушкин М.Ю., Солошенко Н.Г.* Sm-Nd-изотопия даек Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал) // Вестник геонаук. 2020. № 9 (309). С. 3-6 (in English). DOI: 10.19110/geov.2020.9.1

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

37. *Sun S.-S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Magmatism in the Ocean Basins. London: Geological Society, 1989. Special Publication. № 42. P. 313-345. DOI: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19

38. *Казицын Ю.В., Рудник В.А.* Руководство к расчету баланса вещества и внутренней энергии при формировании метасоматических пород. М.: Недра, 1968. 364 с.

39. *Заварицкий А.Н.* Избранные труды. В 4 томах. Т. 4. М.: Академия наук СССР, 1963. 727 с.

40. *Сазонов В.Н.* Лиственитизация и оруденение. М.: Наука, 1975. 172 с.

41. *Омельяненко Б.И.* Околорудные гидротермальные изменения пород. М.: Недра, 1978. 215 с.

42. *Сазонов В.Н.* Золотопродуктивные метасоматические формации подвижных поясов (геодинамические обстановки и РТХ-параметры формирования, прогностическое значение). Екатеринбург: Уральская государственная горно-геологическая академия, 1998. 181 с.

43. *Плющев Е.В., Шатов В.В., Кашин С.В.* Металлогения гидротермально-метасоматических образований. СПб: ВСЕГЕИ, 2012. Т. 354. 560 с.

44. *Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Коротеев В.А., Поленов Ю.А.* Месторождения золота Урала. Екатеринбург: Уральская государственная горно-геологическая академия, 2001. 622 с.

45. *Толочко С.А., Десюк М.А.* Геологические особенности золоторудного месторождения «Пещерное» (Свердловская область) // Практика геологов на производстве: Сборник трудов VII Всероссийской студенческой научно-практической конференции, 3 декабря 2022, Россия. Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2022. С. 46-48.

46. *Коржинский Д.С.* Теория метасоматической зональности. М.: Наука, 1982. 104 с.

47. *Звягинцев О.Е., Паульсен И.А.* О растворимости золота в гидросульфидах щелочей // Известия сектора по изучению платины. 1940. Вып. 17. С. 101-110.

48. *Летников Ф.А., Вилор Н.В.* Золото в гидротермальном процессе. М.: Недра, 1981. 224 с.

49. *Qingjuan Wen, Yufeng Wu, Xiu Wang et al.* Researches on preparation and properties of sodium polysulphide as gold leaching agent // Hydrometallurgy. 2017. Vol. 171. P. 77-85. DOI: 10.1016/j.hydromet.2017.04.008

50. *Sudova M., Kanuchova M., Sisol M. et al.* Possibilities for the Environmental Processing of Gold-Bearing Ores // Separations. 2023. Vol. 10. Iss. 7. № 384. DOI: 10.3390/separations10070384

51. *Baker T., Lang J.R.* Fluid inclusion characteristics of intrusion-related gold mineralization, Tombstone–Tungsten magmatic belt, Yukon Territory, Canada // Mineralium Deposita. 2001. Vol. 36. Iss. 6. P. 563-582. DOI: 10.1007/s001260100189

***Авторы*: Д.В.Кузнецов,** *ведущий инженер, kuznetsov@igg.uran.ru, https://orcid.org/0009-0003-3261-7742* (*Институт геологии и геохимии им. академика А.Н.Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия*), **С.Ю.Степанов,** *канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник* (*Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Ильменский государственный заповедник, Миасс, Россия*), **А.В.Бутняков,** *заместитель директора* (*Уральский филиал «Полиметалл УК», Екатеринбург, Россия*), **В.С.Игошева,** *инженер-исследователь, https://orcid.org/0000-0002-9158-4958* (*Институт геологии и геохимии им. академика А.Н.Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0