

УДК (470+571)+(571.52)+(517)+(5-015)+553.3.072+551.7+550.3+552.3+551.2+551.3+553.2+550.4 DOI: 10.24930/1681-9004-2022-22-5-644-666

Au-Pd минерализация и рудообразующие флюиды месторождения Блейда Фар Вест (Анти-Атлас, Марокко)

Ю. А. Калинин¹, А. А. Боровиков¹, Л. Maacha², М. Zuhair², Г. А. Пальянова¹, Л. М. Житова¹

¹Институт геологии и минералогии СО РАН, 630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Комтюга, 3

²Managem Group, Twin Center, Tour A, Angle Boulevards Zerkouni and Al Massira Al Khadra BP 5199, Casablanca, Morocco

Поступила в редакцию 14.03.2022 г., принятая к печати 02.06.2022 г.

Светлой памяти Владимира Ильича Лебедева,
выдающегося геолога и исследователя,
посвятившего многие годы изучению рудных
месторождений Марокко

Объект исследований. Убогосульфидное Au-Pd оруденение месторождения Блейда Фар Вест, представленное необычной ассоциацией палладистого золота и минералов системы Pd-Bi-Se, а также серебристого золота и минералов системы Pd-Bi-Te. Месторождение локализовано в неопротерозойских вулканических породах центрального Анти-Атласа (Марокко). **Методы.** Химический анализ минералов проводился в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск, Россия) методом электронно-зондового микронализма (ЕРМА). Флюидные включения изучены с помощью методов криометрии и гомогенизации с использованием микротермокамеры THMSG-600. Состав газовой фазы и определение твердых фаз включений проводилось методом КР-спектроскопии. Качественный химический состав солей флюидных включений определялся методом ЕРМА. **Основные результаты и выводы.** В ассоциации с палладистым золотом обнаружены минералы системы Pd-Bi-Se, ранее не известные в рудах Блейды: остербошиит $(\text{Pd}, \text{Cu})_7\text{Se}_5$, палладсейт $(\text{Pd}_{17}\text{Se}_{15})$, падмайт PdBiSe , $(\text{Au}, \text{Ag})\text{Se}$, самородный селен, а также ряд неидентифицированных фаз – Pd_2BiSe , Pd_3BiSe , Pd_4BiSe и Pd_5BiSe . Согласно данным исследования флюидных включений в кварце и кальците, Au-Pd минерализация образовалась при температуре от 384 до 75°C при участии гомогенных или гетерофазных $\text{CaCl}_2\text{-NaCl}$ высокосоленных гидротермальных растворов на глубине 2.8–2.7 км. Высказывается предположение, что палладистое золото и минералы системы Pd-Bi-Se были образованы в условиях, близких к условиям образования Au-Pd месторождений Бразилии, а серебристое золото и минералы системы Pd-Bi-Te могли образоваться в условиях подобных, но не тождественных, условиям образования Au-Pd низкотемпературной минерализации на порфировых месторождениях с примесями Pd и без Pd.

Ключевые слова: Au-Pd месторождения, самородное золото (с примесями Pd и без Pd), минералы платиновых металлов (МПМ), флюидные включения

Источник финансирования

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН, а также при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-05-00393)

Au-Pd mineralization and ore-forming fluids of the Bleïda Far West deposit (Anti-Atlas, Morocco)

Yuri A. Kalinin¹, Andrey A. Borovikov¹, L. Maacha², M. Zuhair², Galina A. Palyanova¹,
Lyudmila M. Zhitova¹

¹V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3 Acad. Koptyug Av., Novosibirsk 630090, Russia

²Managem Group, Twin Center, Tour A, Angle Boulevards Zerkouni and Al Massira Al Khadra BP 5199, Casablanca, Morocco

Received 14.03.2022, accepted 02.06.2022

Для цитирования: Калинин Ю.А., Боровиков А.А., Maacha L., Zuhair M., Пальянова Г.А., Житова Л.М. (2022) Au-Pd минерализация и рудообразующие флюиды месторождения Блейда Фар Вест (Анти-Атлас, Марокко). *Литосфера*, 22(5), 644–666. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-5-644-666>

For citation: Kalinin Yu.A., Borovikov A.A., Maacha L., Zuhair M., Palyanova G.A., Zhitova L.M. (2022) Au-Pd mineralization and ore-forming fluids of the Bleïda Far West deposit (Anti-Atlas, Morocco). *Lithosphere (Russia)*, 22(5), 644–666. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-5-644-666>

© Ю.А. Калинин, А.А. Боровиков, L. Maacha, M. Zuhair, Г.А. Пальянова, Л.М. Житова, 2022

Research subject. Au-Pd mineralization of the Bleïda Far West deposit, represented by an unusual association of palladium gold, minerals of the Pd-Bi-Se system, as well as silvery gold and minerals of the Pd-Bi-Te system. The deposit is localized in the Neoproterozoic volcanic rocks of the central Anti-Atlas (Morocco). **Methods.** A chemical analysis of minerals was carried out at the Center for Collective Use of Multielement and Isotopic Studies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia) using the electron probe microanalysis (EPMA) method. Fluid inclusions were studied using cryometry and homogenization using a THMSG-600 microthermochamber. The composition of the gas phase and the determination of the solid phases of the inclusions were carried out by Raman spectroscopy. The qualitative chemical composition of fluid inclusion salts was determined by the EPMA method. **Results and conclusions.** It is suggested that palladium gold and minerals of the Pd-Bi-Se system were formed under the conditions close to those during the formation of Au-Pd infiltration deposits in Brazil, while silvery gold and minerals of the Pd-Bi-Te system could be formed under the conditions similar, but not identical, to the formation conditions of Au-Pd low-temperature mineralization in porphyry deposits. According to the study of fluid inclusions in quartz and calcite, Au-Pd mineralization was formed at temperatures from 384 to 75°C with the participation of homogeneous or heterophasic $\text{CaCl}_2\text{-NaCl}$ highly saline hydrothermal solutions at a depth of 2.8–2.7 km. Minerals of the Pd-Bi-Se system, previously unknown in Bleïda Far West ores, were found in association with native gold: osterboshite ($\text{Pd}, \text{Cu}, \text{Se}_5$), paladsite ($\text{Pd}_{17}\text{Se}_{15}$), (Au, Ag)Se, padmaite PdBiSe , native Se, as well as a number of unidentified phases – Pd_2BiSe , Pd_3BiSe , Pd_4BiSe and Pd_5BiSe .

Keywords: *Au-Pd deposits, native gold (with and without Pd), PGM minerals, fluid inclusions*

Funding information

Work is done on state assignment of IGM SB RAS, and with the support of the Russian Foundation for Basic Research (project No. 20-05-00393)

Acknowledgements

The authors sincerely express their gratitude to the esteemed V.I. Titov and S.N. Zverev, whose help in carrying out research work at the Blade Far West field was invaluable.

ВВЕДЕНИЕ

Месторождения, в рудах которых присутствует парагенетическая ассоциация золота с элементами платиновой группы (ЭПГ) мире немногочисленны, но они вызывают неутихающий интерес исследователей, особенно в аспекте их генезиса. Одним из таких объектов является месторождение Блейда Фар Вест (Марокко), характеризующееся убого-сульфидным оруднением со специфической ассоциацией палладистого золота, селенистых минералов платиновых металлов (МПМ), а также серебристого золота и теллуристых МПМ. Подобного состава рудные парагенезисы характерны для Au-Pd месторождений Бразилии, связанных с несогласием (Olivo et al., 1995; Cabral et al., 2002, 2011). В России известно золоторудное месторождение Чудное, расположенное в Малдинской рудной зоне на Приполярном Урале, в малосульфидных рудах которого Au-Pd и Au-Ag сплавы ассоциируют с Bi-Te и As-Sb МПМ, а также с минералами редких земель (Онищенко, Кузнецов, 2019; Пальянова, 2020; Palyanova et al., 2021). Проявления Au-Pd минерализации встречаются и на порфировых месторождениях различных рудных районов мира. Образование этой минерализации связывается с поздними низкотемпературными стадиями рудообразующего процесса и обычно не влияет на экономическую значимость порфировых место-

рождений, представляя лишь минералогический интерес (Plotinskaya et al., 2018; McFall et al., 2018; González-Jiménez et al., 2021). Следует упомянуть о ЭПГ-Cu-Ni сульфидных и малосульфидных Pt-Pd магматических месторождениях, на постмагматических гидротермальных стадиях которых может происходить образование Au-Cu и Au-Ag минералов, обогащенных Pd и Pt, в ассоциации с МПМ (Sluzhenikin, Mokhov, 2015; Nielsen et al., 2015).

Ранее месторождение Блейда Фар Вест изучалось разными международными группами исследователей, в результате чего сформировалась основная точка зрения на его происхождение – эптермальное. Сторонники эптермальной гипотезы (Barakat et al., 2002) считают, что перенос Au и ЭПГ проходил в виде хлоридных комплексов, а осаждение осуществлялось в низкотемпературном диапазоне (<300 °C) при повышенной фугитивности кислорода и/или при низком рН. Данные изотопного состава углерода и кислорода карбонатов указывают на происхождение карбонатов и кварца рудных жил из метаморфических или магматических гидротермальных флюидов (El Ghorfi et al., 2006). Серебристое золото и обогащенные Te МПМ в рудах также свидетельствуют в пользу участия в рудообразовании эндогенных флюидов.

Au-Pd руды были зафиксированы в инфильтрационных урановых месторождениях типа “несогласия” (Jabiluka, Coronation Hill, Gold Ridge) в се-

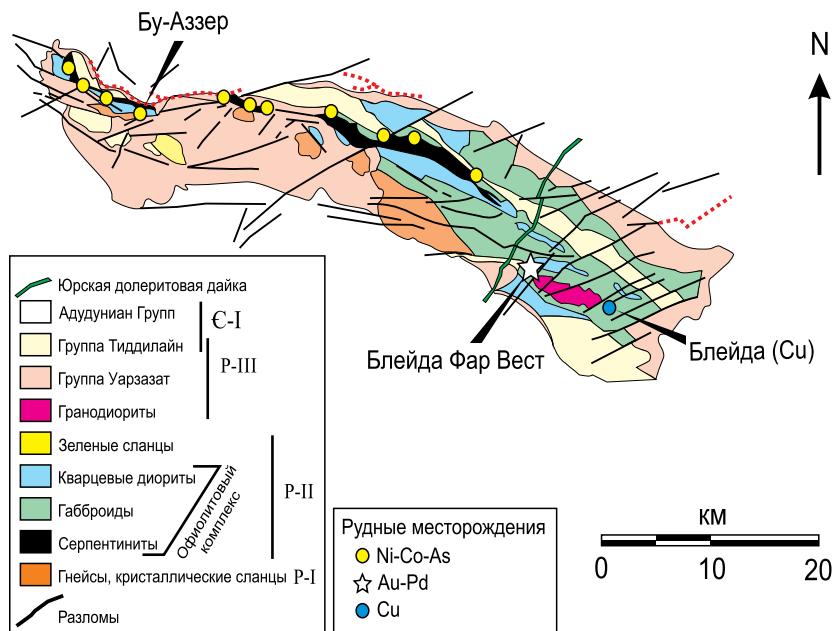


Рис. 1. Геологическая карта выступа Бу-Аззер – Эль-Граара, модифицированная по (Leblanc, 1981; El Ghorfi et al., 2006; Лебедев, Калинин, 2020).

В легенде показаны традиционные подразделения протерозоя на выступе Бу-Аззер – Эль-Граара: P-I – палеопротерозой, P-II – нижний и средний неопротерозой, P-III – верхний протерозой.

Fig. 1. Geological map of the Bu Azzer – El Graar salient, modified after Leblanc, 1981; El Ghorfi et al., 2006; Lebedev, Kalinin, 2020.

The legend shows the traditional divisions of the Proterozoic on the Bu-Azzer-El Graara ledge: P-I – Paleoproterozoic, PII – Lower and Middle Neoproterozoic, PIII – Upper Proterozoic.

верных территориях Австралии (Wilde et al., 1989; Carville et al., 1990; Şener et al., 2002) и в Южном Девоне Великобритании (Hope's Nose и др.) (Clark, Criddle, 1982, Shepherd et al., 2005). Во всех случаях для руд характерно полное отсутствие сульфидов, наличие селенидов, иногда теллуридов и арсенидов, обогащение палладием. Au-Pd минерализация локализуется в кварцевых или карбонатных жилах с гематитом и образуется при низких температурах ($86 \pm 13^{\circ}\text{C}$) из окисленных, слабокислых хлоридных или содовых рассолов.

Авторы настоящей статьи ставят своей **целью** – на основании изучения собственных, пусть и немногочисленных, минералогических и термобарогеохимических материалов найти новые факты в подтверждение той или иной точки зрения на происхождение столь необычной Au-Pd минерализации марокканского месторождения Блейда Фар Вест.

КРАТКИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Месторождение Блейда Фар Вест располагается в 6 км к северо-западу от одноименного медного рудника Блейда, в 42 км к юго-восто-

ку от Со-рудника Бу-Аззер. GPS: N $30^{\circ}23'23.31''$, W $6^{\circ}30'58.73''$; альт. 1340 м. Месторождение Блейда заключает 2.5 млн т руды при содержании Au 2 г/т (Barakat et al., 2002; Belkabir et al., 2008; El Ghorfi et al., 2006). Месторождение локализовано в неопротерозойских вулканических породах докембрийского выступа Бу-Аззер – Эль-Граара в Центральном Анти-Атласе (рис. 1). Докембрийский выступ Бу-Аззер – Эль-Граара представляет собой сегмент сложного панафриканского орогенного пояса (2.1–2.0 млрд лет), вытянутого вдоль основной оси Анти-Атласа (Gasquet et al., 2005; Thomas et al., 2004; Leblanc, 1981; El Ghorfi et al., 2006; Лебедев, Maacha, 2018). Район характеризуется мощной, тесно переслаивающейся последовательностью осадочных и вулканических пород (Leblanc, 1981). Выступ окружен несогласно перекрывающими его поздними эдиакарскими (635–541 млн лет) и палеозойскими породами. Гранодиоритовый интрузив Блейда, прорывающий эти породы, датируется 579.4 ± 1.2 млн лет. В пределах региона произошли два панафриканских тектонических события. Первое крупное событие 685 ± 15 млн лет (B1) связано с региональным метаморфизмом от зеленосланцевой до амфиболитовой фации и появлением слан-

цеватости (S1) от N90° до N120°E (Clauer, 1976; El Ghorfi et al., 2006). Второе тектоническое событие 623 ± 18 млн лет (B2) фиксируется вертикальными складками восточно-западного направления, сланцеватостью (S2) от N45° до 60° и разломами северо-восточного и юго-западного направлений.

Золотая минерализация Блейда связана с гидротермально измененными амфиболитами и хлоритовыми сланцами и развивается на площади 5×3 км. Ранний гидротермальный этап представлен безрудными кварцевыми жилами, которые контролируются тектоническими структурами события B1 (N – 90°–120°) (Belkabir et al., 2008). Второй этап представлен зонами интенсивной силификации, многочисленными маломощными кварцевыми жилами с карбонатом, гематитом, самородным золотом, а также зонами брекчий (El Ghorfi et al., 2006, 2011; Wafik et al., 2018; Leblanc, Billaud, 1978; Barakat et al., 2002). Зоны гидротермального изменения, зоны брекчий, кварцевые жилы второго этапа, контролируются структурами события B2 и параллельны сланцеватости и разломам S2 второго этапа. На месторождении выявлены три основные рудные зоны, простирающиеся до глубины не менее 100 м: зона брекчий (ZB), зона центральная (ZC) и промежуточная зона (ZI). Самородное золото ассоциирует с пластинчатыми кристаллами гематита и МПМ. Золото-пальладиевая минерализация практически не содержит сульфидов (El Ghorfi et al., 2006).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследованы образцы, отобранные авторами на месторождении в 2015 г. с поверхности Центральной (ZC) и Промежуточной (ZI) рудных зон. Образец ZC № 12 – метасланец с самородным золотом в плоскостях сколов по тонким кварц-гематит-хлорит-кальцитовым прожилкам, сечущим сланцеватость. Образец ZC 13 – кварцевая жила с гематитом. Образец ZC 15 – брекчия кварцевой жилы, с гематитом, малахитом, бурым хлоритом, халцедоном и магнитом. Образец ZI 16 – хлоритизированный и гематизированный метадиорит с полосчатой сланцеватой структурой. Видимое самородное золото присутствует в тонких (0.5–0.1 мм) кварц-гематит-хлорит-кальцитовых прожилках. Метадиорит содержит редкую тонкую вкрапленность халькопирита, борнита, пирита. Все образцы были продублированы на месте искусственными “шлаковыми” концентратами, полученными в результате дробления и промывки представительных по объему проб (3–5 кг).

Минералогические исследования проводились на оптическом микроскопе Olympus BX51 (Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Но-

восибирск, Россия). Химические анализы минералов проводились методом электронно-зондового микронализма (EPMA) на растровом электронном микроскопе MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding, Брно, Чехия), оборудованном рентгеновским дисперсионным спектрометром (EDS) AZtec Energy XMax-50 (Oxford Instruments Nanoanalysis, Оксфорд, Великобритания) (аналитики Н.С. Карманов, М.В. Хлестов). EPMA параметры: ускоряющее напряжение – 20 кВ, время получения спектра – 60 с (общая площадь спектров ≈ 100 отсчетов), серия K для Fe, Cu, As и серия L для Pd, Ag, Sb, Au, Hg. Чистые металлы (Fe, Cu, Pd, Ag, Au) и сплавы InAs для As и HgTe для Hg использованы в качестве стандартов. Пределы обнаружения (мас. %) составили: 0.1 – Fe; 0.15 – Cu; 0.25 – Pd, Ag, Sb; 0.3 – As; 0.6 – Au и 0.8 – Hg. Погрешность определения основных компонентов с содержанием более 10 мас. % не превышала 1 отн. %, при содержании компонентов 2–10 мас. % погрешность не превышала 6–8 отн. %. Близко к пределу обнаружения ошибка составляла 15–20 отн. %. Пробность самородного золота (N_{Au}) рассчитывали по уравнению: $Au \times 1000/(Au + Ag + Cu + Pd) \%$ (Николаева и др., 2013).

Методы исследования флюидных включений. Для определения температур фазовых переходов во флюидных включениях применялись методы крио- и термометрии (микротермокамера THMSG-600 фирмы Linkam с диапазоном измерений от –196 до +600°C). Изучение состава газовой фазы и определение твердых фаз включений проводились методом КР-спектроскопии (спектрометр Ramanor U-1000 фирмы JobinYvon, лазер MilleniaProS2 (532 нм), детектор HORIBA JOBIN YVON, г. Новосибирск). Общая концентрация солей в растворах флюидных включений и принадлежность их к той или иной водно-солевой системе определялись по данным криометрии (Bakker, 2018; Борисенко, 1982; Bodnar, Vityk, 1994). При оценке давления и определении других параметров среди минералообразования по микротермометрическим данным изучения флюидных включений использовались программные пакеты AqSo_NaCl (Bakker, 2018), Vx-Tern.exe (Painsi et al., 2008; Akinfiev, Diamond, 2010), ISOHOR (Bakker, 2001), FLINCOR (Brown, 1989), H_2O-CO_2-NaCl phase calculations (Dubacq et al., 2013). Для определения химического состава солей флюидных включений проведена термическая декрепитация (400–450°C). Растворы из вскрытых включений изливались на поверхность шлифа, высыхали и образовывали солевые агрегаты. Качественный химический состав этих солей определялся методом EPMA (Haynes, Kesler, 1987; Haynes et al., 1988; Борисенко и др., 1994; Kontak, 1995, 2004). Аналитические работы выполнены в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

ПАРАГЕНЕЗИС САМОРОДНОГО ЗОЛОТА И ПЛАТИНОИДОВ

В образцах (CZ и IZ) видимое самородное золото локализуется в зальбандах тонких кварцевых прожилков S2 в метасланце либо в тонких кварц-гематит-хлоритовых прожилках S2 в метадиорите (рис. 2а, б). Самородное золото образует срастания с МПМ, гематитом, а также с халькозином, ани-

литом, магнетитом, гетитом, микроклином, биотитом и диабантитом. Гематит всегда идиоморфен по отношению к самородному золоту (рис. 2в, г). По EPMA данным, состав самородного золота в изученных образцах характеризуется средним отношением Au/Ag = 14.6 и отвечает усредненной кристаллохимической формуле $\text{Au}_{0.86}\text{Ag}_{0.12}\text{Pd}_{0.01}\text{Cu}_{0.01}$ (табл. 1, рис. 3–5). Не выявлено закономерности в распределении Pd и Cu в зернах золота. Отсутствует

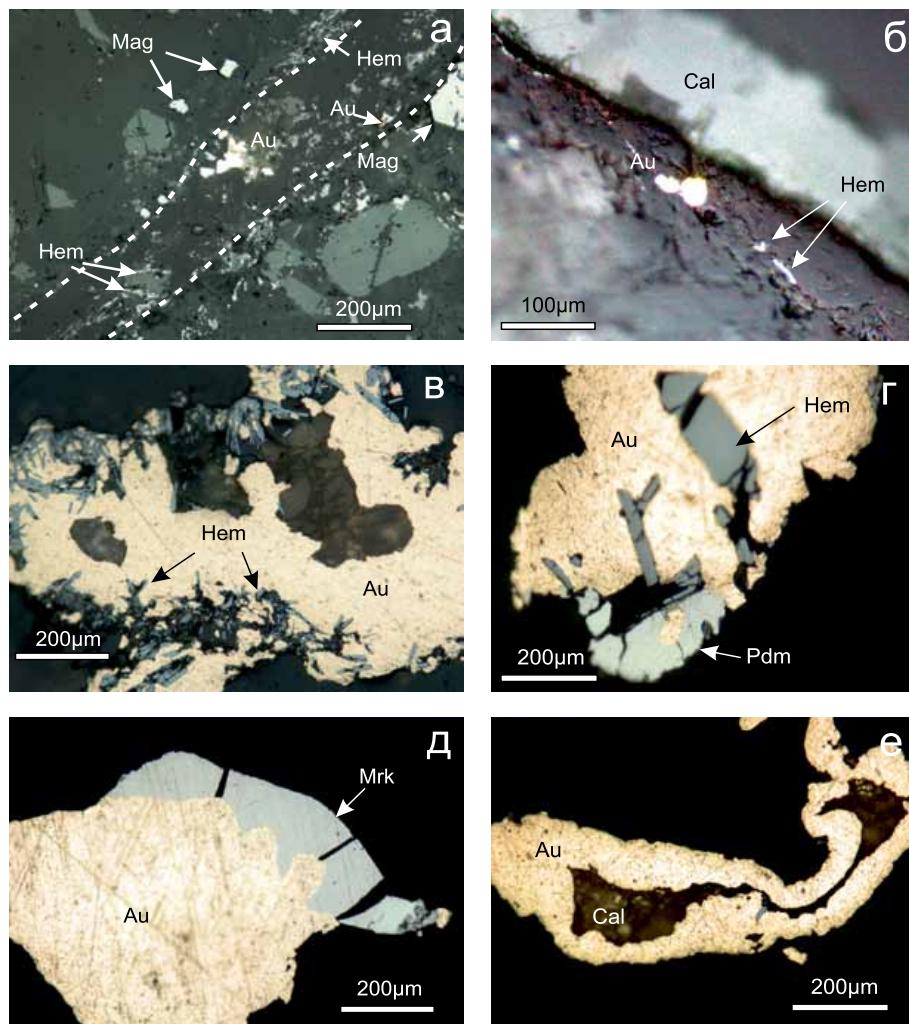


Рис. 2. Самородное золото месторождения Блейда Фар Вест (отраженный свет).

а – обр. 12, самородное золото в тонком кварц-хлорит-гематитовом прожилке (S2) в метасланце, штриховой линией показан зальбанд; б – образец 16, самородное золото в хлорит-гематитовом зальбанде тонкого кальцитового прожилка; в – срастание кристаллов гематита; г – падмаита (PdBiSe) и самородного золота; д – срастание меренскиита (PdTc_2) с самородным золотом; е – самородное золото с хлоритом. Сокращения названий минералов здесь и далее указаны по IMA–CNMNC (Warr, 2021): меренскийт – Mrk, падмайт – Pdm, гематит – Hem, кальцит – Cal, самородное золото – Au, магнетит – Mag.

Fig. 2. Native gold of Bleïda Far West deposit (reflected light).

а – sample 12, native gold in thin quartz-chlorite-hematite veinlet (S2) in metaschist, selvage is shown by dashed line; б – sample 16, native gold in a chlorite-hematite selvage of a thin calcite veinlet; в – the intergrowth of crystals of hematite and native gold; г – padmaite (PdBiSe) and native gold; д – the intergrowth of merenskyite (PdTc_2) with native gold; е – native gold and calcite. The abbreviations of mineral names, hereinafter, are given according to IMA–CNMNC (Warr, 2021): merenskyite – Mrk, padmait – Pdm, hematite – Hem, calcite – Cal, native gold – Au, magnetite – Mag.

Таблица 1. Состав самородного золота месторождения Блейда Фар Вест, в мас. %**Table 1.** Composition of native gold from the Bleïda Far West deposit, wt %

№ ан.*	Фото**	T.a.***	Au	Ag	Pd	Cu	Сумма	N _{Au} %
1	а	6	90.57	7.22	0.72	0.29	98.81	917
2	а	7	91.78	6.53	0	0	98.31	934
3	а	8	90.6	7.67	0.73	0.3	99.3	912
4	б	5	90.42	7.14	0.74	0.32	98.61	917
5	б	6	90.71	7.1	0.54	0.32	98.67	919
6	в	1	91.3	5.79	0.64	0.79	98.51	927
7	в	2	91.93	6.06	0.86	0.77	99.63	923
8	в	4	88.64	6.8	0.73	0.31	96.47	919
9	в	5	92.97	6.27	0.68	0.7	100.62	924
10	г	3	89.75	7.04	0.74	0.39	97.93	917
11	г	4	92.3	6.96	0.73	0.61	100.6	917
12	г	5	91.96	6.74	0.52	0.6	99.82	921
13	д	1	92.18	6.52	0	0.61	99.31	928
15	д	6	92.71	7.24	0	0.33	100.28	925
16	д	8	91.3	6.75	0	0.41	98.46	927
17	е	6	91.48	7.12	0.69	0.51	99.79	917
18	е	7	91.77	7.01	0.49	0.35	99.61	921
19	е	8	92.02	7	0	0	99.02	929
20	е	9	90.54	6.66	0	0.31	97.51	929
21	ж	1	87.08	6.61	0.5	0.28	99.75	922
22	ж	2	92.03	7.31	0.58	0	99.92	921
23	ж	3	92.31	6.06	0	0.62	99	933
24	з	5	93.21	8.34	0	0	101.55	918
25	з	6	91.29	6.81	0.65	0	98.75	924
26	з	7	90.8	7.4	0.7	0	98.9	918
27	з	8	91.37	7.57	0	0.45	99.4	919
28	з	9	90.36	7.14	0	0	97.5	927
29	и	1	93.92	6.47	0	0.58	100.98	930
30	и	2	90.87	6.88	0	0	97.75	930
31	и	3	93.32	7.27	0	0.33	100.9	925
32	а	2	91.75	6.16	0.56	0.53	99.01	927
33	а	3	93.1	6.35	0.49	0.53	100.46	927
34	б	1	89.67	7.26	0.65	0.4	97.98	915
35	б	4	92.59	7.85	0.72	0.34	101.5	912
36	б	5	91.19	6.84	0	0	98.03	930
37	в	2	92.2	7.08	0.56	0	99.84	923
38	в	3	91.45	7.39	0.74	0	99.58	918
39	г	1	88.53	7.49	0.54	0.56	97.12	912
40	д	4	89.89	7.25	0	0.45	97.58	921
41	е	4	90.9	6.84	0.97	0.48	99.18	916
42	ж	4	89.9	7.2	0	0	97.1	926
43	з	8	89.97	6.07	0.56	0.54	97.13	926
44	и	1	91.75	6.55	0	0.55	98.85	928
45	и	2	93.69	6.83	0	0.33	100.86	929
46	и	3	92.33	6.72	0	0.28	99.33	930
47	и	4	93.43	6.83	0	0	101.23	932
48	б	2	90.38	6.62	0	0.29	97.29	929
49	в	2	91.53	7.28	0	0.3	99.11	924
50	д	4	91.42	5.56	0	0.54	97.53	937
51	е	1	89.9	7.64	0	0	97.55	922
52	ж	2	91.49	6.26	0	0.68	98.44	929
53	з	1	91.06	6.62	0.53	0.3	98.51	924
54	з	2	91.2	7.31	0.75	0	99.27	919
55	з	3	88.92	7.19	0.72	0.42	97.25	914
56	и	2	92	7.08	0.6	0.42	100.1	919
57	и	3	93.15	6.22	0.83	0.48	100.68	925

Примечание. *Номера анализов № 1–31 указаны на рис. 3, № 32–47 – на рис. 4, № 48–57 – на рис. 5. **Обозначение фотографий на рис. 3, 4, 5. ***Цифры соответствуют номерам точек анализа на фотографиях.

Note. *Points of analyzes No. 1–31 are indicated in fig. 3, no. 32–47 – in fig. 4, no. 48–57 – in fig. 5. **Designation of photographs is in fig. 3, 4, 5. ***Numbers correspond to the numbers of analysis points is in the photographs.

корреляция между Pd, Cu, Au и Ag в самородном золоте. Не обнаружено зависимости величины примеси Pd и Cu в самородном золоте от состава ассоциирующих с ним МПМ. Пробность самородного золота варьирует в изученных образцах от 939 до 911%.

Ранее Эль Горфи и его соавторы (2006) идентифицировали ряд МПМ в рудах месторождения Блейда Фар Вест, а именно: мертиит-I Pd₅(Sb,As)₂, мертиит-изомерит Pd₁₁Sb₂As₂, кейконнит Pd_{3-x}Te и обогащенный биконнит ≈ Pd₂₀(Te, Bi)₇, палладсейт Pd₁₇Se₁₅, меренскиит PdTe₂, меренскиит-мончейт (Pd,Pt)(Te,Bi)₂, котульскит PdTe и сперрилит PtAs₂. Нами в рудах обнаружены ранее не установленные на месторождении минералы: мертиит-II Pd₈Sb_{2.5}As_{0.5}, остербошиит (Pd,Cu)₇Se₅, падмайт PdBiSe, фишессерит Ag₃AuSe₂, фаза (Au,Ag)Se (Tolstykh et al., 2018), самородный селен, фаза Pd₃BiSe (Cabral et al., 2002; Smith, Nickel, 2007), а также ряд неидентифицированных фаз: PdSe, Pd₂BiSe, Pd₄BiSe и Pd₅BiSe (см. рис. 3–5, см. табл. 2–4). В рудах присутствуют также гематит, борнит, халькопирит и пирит (Ghorfi et al., 2006; Bourque et al., 2015). Из других минералов, встреченных в тесном срастании с самородным золотом, необходимо отметить хальказин и джарлеит (Cu₃₁S₁₆) (см. рис. 5в, и; табл. 4).

ФЛЮИДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

Флюидные включения изучены в кварце из прожилков S2 в метасланце (кварц 1), в кварце кварц-гематитовых жил (кварц 2), брекчированном кварце с медной минерализацией (кварц 2) и кальците прожилков S2, секущих сланцеватость метадиорита.

Типы флюидных включений. Флюидные включения в кварце могут быть разделены на типы по фазовому составу при комнатной температуре (Реддер, 1984):

1) LV – двухфазные включения с газовым пузырем и жидкостью, наполнение от 90 до 80 об. % (рис. 6а);

2) V – однофазные газовые включения. Газовые включения трассируют контакты отдельных зерен кварца либо образуют обособленные скопления (рис. 6б);

3) CO₂VL – включения обогащенные жидккой и газообразной CO₂, содержат жидкость, занимающую от 5 до 15 об. % (рис. 6в, г);

4) LSV – трехфазные включения с кубиком галита, жидкостью и газовым пузырем (рис. 6д, е)

5) жидкие однофазные включения (тип L), присутствуют в кальците;

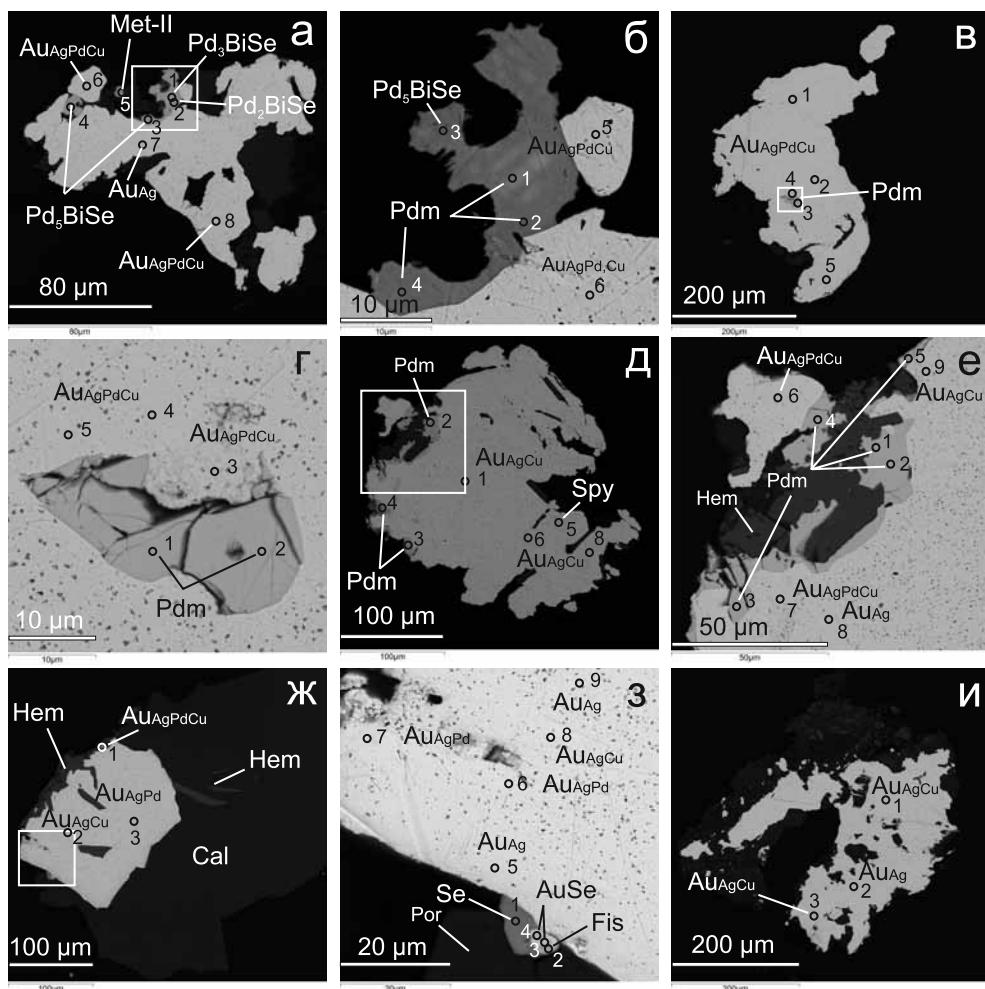


Рис. 3. Изображения в обратно рассеянных электронов (BSE): микропарагенезы самородного золота и Pd минералов.

б – выделенный фрагмент на фотографии “а”; е – выделенный фрагмент фотографии “д”; з – выделенный фрагмент на фотографии “ж”. Указаны точки анализа. Сокращения названий минералов: мертвит-II – Met-II, падмайт – Pdm, фишессерит – Fis, гематит – Hem, кальцит – Cal, самородное золото – Au; примеси Ag, Cu, Pd указаны меньшим шрифтом.

Fig. 3. Backscattered Electron (BSE) images: microparageneses of native gold and Pd-minerals.

б – selected fragment of the photograph “а”; е – selected fragment of the photograph “д”; з – selected fragment of the photo “ж”. Points of analysis are indicated. Abbreviations of the names of minerals: mertiite-II – Met-II, padmait – Pdm, Fischesserite – Fis, hematite – Hem, calcite – Cal, native gold – Au; impurities Ag, Cu, Pd are indicated in smaller font.

6) многофазные флюидные включения, содержащие 1–2 ксеногенные фазы – гематит и кальцит, в различных объемных соотношениях с жидкостью и газом (рис. би, а–г).

Микротермометрия флюидных включений.
Образец 12. Двухфазные LV включения в кварце прожилков S2 в метасланце гомогенизируются в интервале температуры от 317 до 190°C (табл. 5). В замороженных включениях признаки первого плавления твердых фаз наблюдаются при температуре от –55 до –52°C, что близко к температуре эвтектики систем, содержащих CaCl₂ (Борисен-

ко, 1982). Лед в замороженных включениях плавится в интервале температуры от –19 до –2.2 °C. Плавление CO₂-клатрата происходит в интервале температуры от –1 до +1°C. Соленость растворов включений варьирует от 21.7 до 3.3 мас. % экв. NaCl (Painsi et al., 2008). Большинство газовых включений (тип V) в кварце из метасланцев (обр. 12) являются низкоплотными и содержат газовую fazу, которая не сжижается при охлаждении до –197°C. В некоторых относительно крупных газовых включениях при охлаждении появляются небольшие кристаллы твердой CO₂, ко-

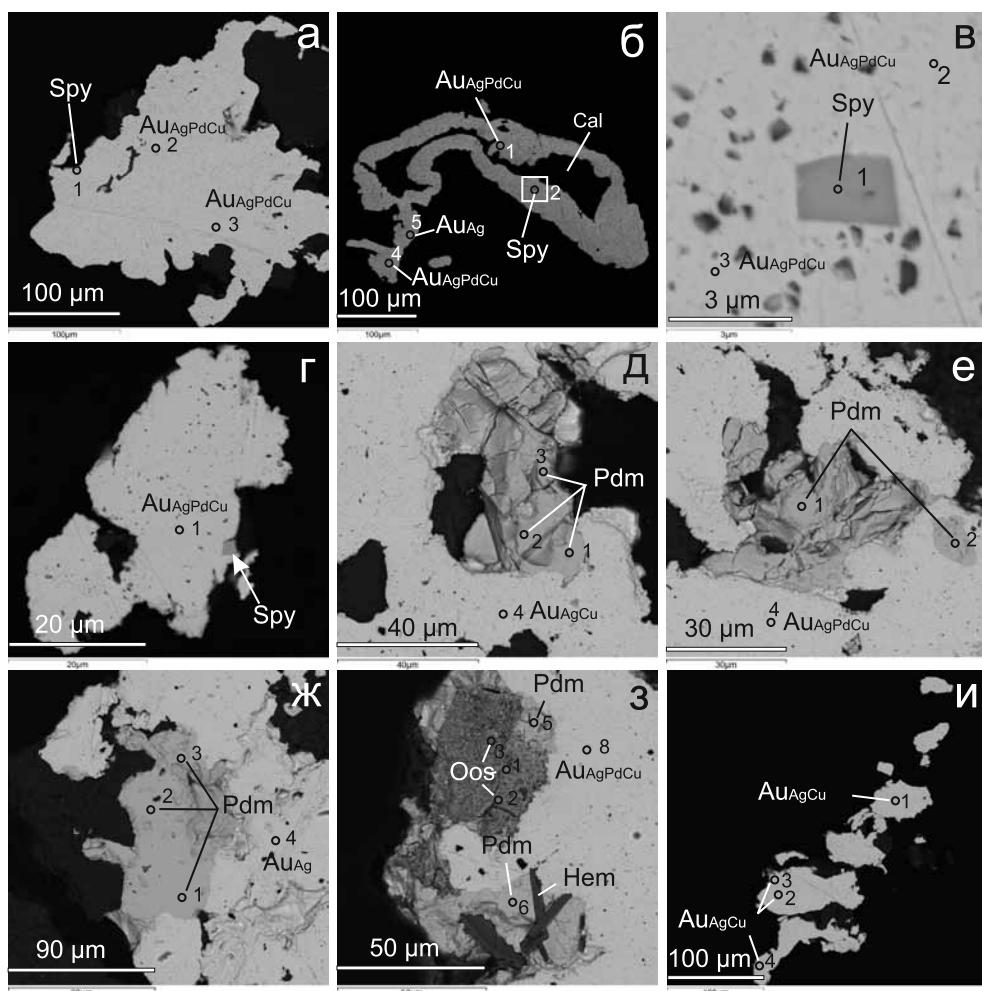


Рис. 4. Изображения в обратно рассеянных электронах (BSE) микропарагенезов самородного золота и минералов палладия.

в – фрагмент фотографии “б”. Указаны точки анализа. Сокращения названий минералов: падмайт – *Pdm*, остербосхит – *Oos*, сперрилит – *Spy*, кальцит – *Cal*, самородное золото – *Au*; примеси Ag, Cu, Pd указаны меньшим шрифтом.

Fig. 4. Backscattered electron (BSE) images: microparageneses of native gold and palladium minerals.

в – fragment of photograph “б”. Points of analysis are indicated. Mineral abbreviations: padmaite – *Pdm*, osterboschite – *Oos*, sperrylite – *Spy*, calcite – *Cal*, native gold – *Au*; impurities Ag, Cu, Pd are indicated in smaller font.

торые плавятся и сразу гомогенизируются в газовую фазу при температуре -60°C . По данным КР-спектроскопического исследования газовые включения содержат смесь CO_2 и N_2 (соответственно 70.8–67.9 и 32.1–22.0 мол. %), либо практически чистый N_2 .

Образец 13. Двухфазные LV включения в кварце жил с гематитом и малахитом гомогенизируются в интервале температур от 280 до 210°C (см. табл. 5). В замороженных LV включениях первое плавление происходит в интервале температуры, близкой к температуре плавления эвтектик водно-солевых систем $\text{CaCl}_2 + \text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$, $\text{CaCl}_2 + \text{MgCl}_2 +$

$+ \text{H}_2\text{O}$ и $\text{CaCl}_2 + \text{KCl} + \text{H}_2\text{O}$ от -55 до -49°C . Плавление гидрата CO_2 происходит в интервале температуры от -4.6 до $+1^{\circ}\text{C}$. Соленость растворов включений варьирует от 18.8 до 14.4 мас. % экв. NaCl .

В кварце кварцевых жил (обр. 13 и 15) газовые и обогащенные CO_2 включения содержат CO_2 , которая плавится в интервале температур от -59.9 до -56.6°C и гомогенизируется в жидкость (иногда с критическими явлениями) в интервале температур от $+31$ до $+24^{\circ}\text{C}$ (табл. 6). Плотность CO_2 варьирует от 0.73 до 0.51 г/см³. По данным КР-спектроскопии, обогащенные CO_2 включения содержат CO_2 со следами азота до 0.5 мол. %.

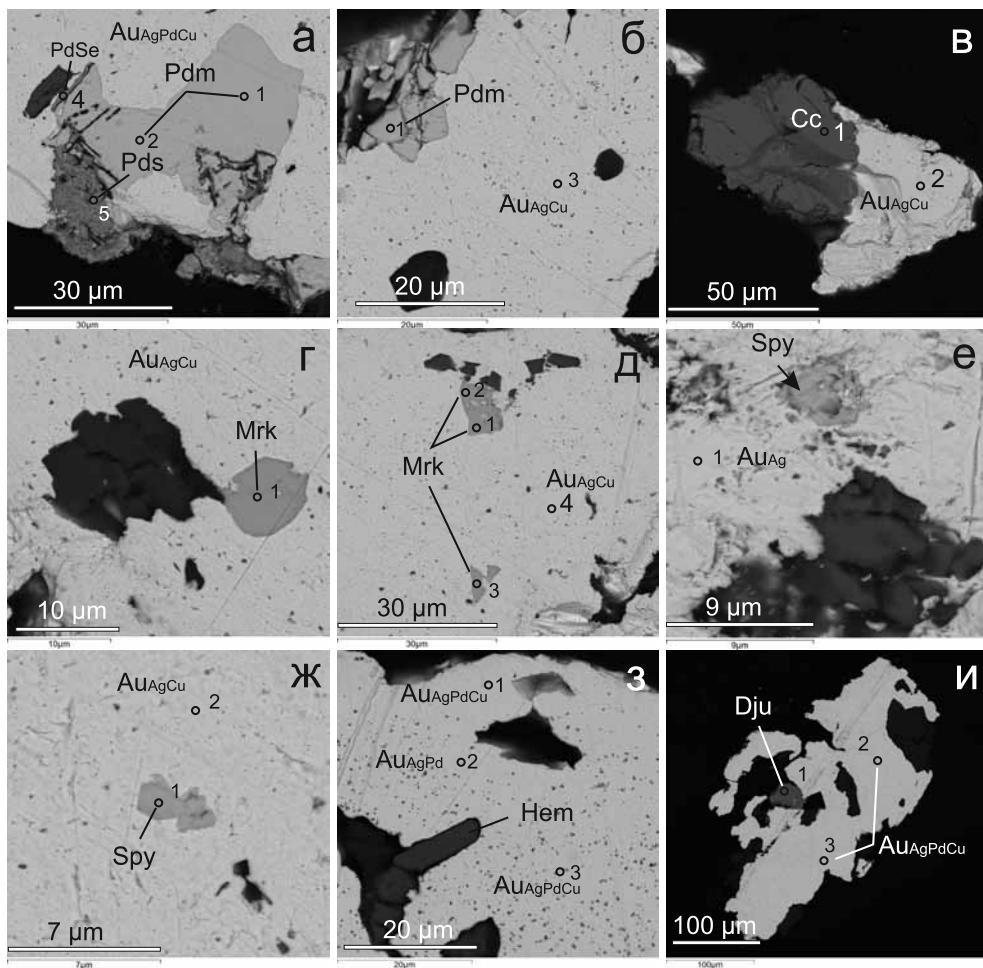


Рис. 5. Изображения в обратно рассеянных электронах (BSE) микропарагенезисов самородного золота и минералов палладия.

Указаны точки анализа. Сокращения названий минералов: падмайт – *Pdm*, палладсейте – *Pds*, меренскит – *Mrk*, гематит – *Hem*, сперрилит – *Spy*, джарлеит – *Dju*, халькоzin – *Cc*, самородное золото – *Au*; примеси Ag, Cu, Pd указаны меньшим шрифтом.

Fig. 5. Backscattered electron (BSE) images: microparageneses of native gold and palladium minerals. Points of analysis are indicated.

Mineral abbreviations: padmaite – *Pdm*, palladseite – *Pds*, merenskyite – *Mrk*, hematite – *Hem*, sperrylite – *Spy*, jarleite – *Dju*, chalcosine – *Cs*, native gold – *Au*; impurities Ag, Cu, Pd are indicated in smaller font.

Образец 15. Трехфазные LSV включения в кварце с гематитом при охлаждении и нагревании могут находиться в метастабильном состоянии, которое характерно для включений с повышенной соленостью. При нагревании до температуры полной гомогенизации и последующем охлаждении в большинстве исходно трехфазных LSV включений фаза галита не появляется в течение долгого времени. Это затрудняет идентификацию флюидных включений по фазовому составу при комнатной температуре. Трехфазные включения LSV в кварце с гематитом гомогенизируются в интервале температуры от 220 до 209°C, га-

зовая фаза исчезает раньше растворения галита в интервале температуры от 198 до 145°C. Соленость растворов трехфазных включений 33.0–32.2 мас. % экв. NaCl. Жидкость LSV включений не кристаллизуется в течение многих циклов охлаждение/нагревание (от –190 до +100°C) и остается в аморфном состоянии. Такое поведение при низкой температуре характерно для растворов, содержащих CaCl₂ либо FeCl₂ и FeCl₃ (Davis et al., 1990; Samson, Walker 2000; Боровиков и др., 2002). Температуры плавления эвтектики, льда и кристаллогидрата были установлены только в LSV включениях с соленостью менее 32 мас.%. Первое плавление в замо-

Таблица 2. Состав минералов в ассоциации с самородным золотом на месторождении Блейда Фар Вест
 Table 2. Composition of minerals in association with native gold from the Bleida Far West deposit

№	Фото*	T.a.**	Fe	Ni	Au	Ag	Pt	Pd	Cd	Bi	Sb	Te	As	Se	Сумма	Минерал***	Формула
1	a	1	0	0	0	0	0	51.56	0	32.64	0	0	0	12.92	0	97.12	Pd ₃ BiSe
2	a	2	0	0	0	0	0	45.6	0	38.63	0	0	0	14.85	0	99.08	Pd ₂ BiSe
3	a	3	0	0	1.8	0	0	63.16	0	24.81	0	0	0	9.1	0	98.88	Pd ₅ BiSe
4	a	4	0	0	1.85	1.34	0	62.67	0	24.73	0	0	0	9.18	0	99.76	Pd ₅ BiSe
5	a	5	0	0	0	0	0	71.32	0	25.96	0	3.94	0	0	0	101.22	Мертиит-II
6	б	1	0	0	0	0	0	32.24	0	46.42	0	0	0	17.76	0	96.43	Падмант
7	б	2	0	0	1.35	0	0	65.65	0	25.71	0	0	0	9.08	0	101.8	Pd ₅ BiSe
8	б	3	0	0	1.28	0	0	60.17	0.79	28.25	0	0	0	10.06	0	100.54	Pd ₄ BiSe
9	б	4	0	0	2.09	1.53	1.15	56.38	0.53	30.88	0	0	0	10.83	0	103.38	Pd ₃ BiSe
10	в	3	0	0	1.84	0	0	28.35	0	50.1	0	0	0	19.68	0	99.96	Падмант
11	г	1	0	0	1.62	0	0	28.26	0	50.82	0	0	0	19.24	0	99.94	"
12	г	2	0	0	2.22	0	0	28.39	0	48.98	0	0	0	19.57	0	99.15	"
13	д	2	0	0	0	0	0	26.96	0	51.12	0	0	0	18.74	0	96.83	"
14	д	3	0	0	2.86	0	0	28.99	0	48.99	0	0	0	20.1	0	100.94	"
15	д	4	0	0	3.69	0	0	29.24	0	47.69	0	0	0	20.35	0	100.97	Сперрилит
16	д	5	0.31	0	9	0.63	49.22	0	0	0	0.48	35.91	3.68	1.25	100.49	Падмант	
17	е	1	0.88	0	0	0	0	27.05	0	49.43	0	0	0	18.89	0	96.25	"
18	е	2	0.23	0	0	0	0	27.16	0	50.47	0	0	0	18.76	0	96.62	"
19	е	3	0	0	3.23	0	0	28.25	0	48.19	0	0	0	19.04	0	98.71	(Pd _{1.04} Fe _{0.02}) _{1.06} Bi _{0.95} Se _{0.97}
20	е	4	1.09	0	0	0	0	26.45	0	50.29	0	0	0	17.71	0	95.53	(Pd _{1.02} Fe _{0.08}) _{1.10} Bi _{0.98} Se _{0.92}
21	е	5	0	0.24	1.89	0	0	26.45	0	48.13	0	0	0	18.1	0	94.81	(Pd _{1.03} Au _{0.04} Ni _{0.02}) _{1.09} Bi _{0.96} Se _{0.95}
22	з	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	107.5	0	107.47	Селен
23	з	2	0.45	0	29.49	48.52	0	0	0	0	0	0	0	25.73	0	104.19	Фишессерит
24	з	3	0	0	64.52	1.76	0	0	0	0	0	0	0	31.53	0	97.81	(Au,Ag)Se
25	з	4	0	0	70.14	1.11	0	0	0	0	0	0	0	33.93	0	105.19	(Au,Ag)Se

Примечание. *Обозначение фото – см. рис. 3. **Цифры соответствуют номерам точек анализа на фотографиях. ***Здесь и далее идеальные формулы указаны для неидентифицированных минеральных фаз.
 Note. *Designation of photographs – see Fig. 3. **The numbers correspond to the numbers of analysis points in the photographs. ***Here and below, ideal formulas for unidentified mineral phases are given.

Таблица 3. Состав МПМ в ассоциации с самородным золотом на месторождении Блейда Фар Вест
Table 3. Composition of MPM in association with native gold from the Bleida Far West deposit

№	Фото*	T.a.**	Cu	Au	Ag	Pt	Pd	Hg	Bi	As	Se	S	Сумма	Минерал	Формула
1	а	1	0	4.47	0	51.46	0	0	36.37	5.14	0	97.43	Сперрилит	(Pt _{0.95} Au _{0.08}) _{0.03} (As _{1.74} Se _{0.23}) _{1.97}	
2	б	2	0	17.05	1.19	43.82	0	0	34.57	3.41	0	100.03	"	(Pt _{0.81} Au _{0.31} Ag _{0.04}) _{1.16} (As _{1.67} Se _{0.16}) _{1.83}	
3	в	1	0	4.68	0	51.65	0	0	38.25	3.56	0.97	99.1	"	(Pt _{0.91} Au _{0.08}) _{0.99} (As _{1.75} Se _{0.15} S _{0.10}) _{2.00}	
5	д	1	0	0	0.9	0	28.41	0	50.84	0	20.00	0	100.16	Падмант	(Pd _{1.04} Ag _{0.03}) _{1.07} Bi _{0.95} Se _{0.98}
6	д	2	0	0	0.66	0	28.23	0	51.08	0	19.89	0	99.86	"	(Pd _{1.04} Ag _{0.02}) _{1.06} Bi _{0.96} Se _{0.98}
7	д	3	0	0	0.64	0	28.25	0	49.94	0	19.66	0	98.49	"	(Pd _{1.06} Ag _{0.02}) _{1.08} Bi _{0.94} Se _{0.98}
8	е	1	0	0	0	0	28.65	0	52.51	0	19.56	0	100.72	"	Pd _{1.05} Bi _{0.98} Se _{0.97}
9	е	2	0	4.04	0.59	0	28.68	0	48.3	0	19.32	0	100.94	"	(Pd _{1.05} Au _{0.08} Ag _{0.02}) _{1.15} Bi _{0.90} Se _{0.95}
10	ж	1	0	0	0	0	27.9	0	52.28	0	19.46	0	99.64	"	Pd _{1.04} Bi _{0.99} Se _{0.97}
11	ж	2	0	0	0	0	27.27	0	51.72	0	19	0	97.99	"	Pd _{1.03} Bi _{1.00} Se _{0.97}
12	ж	3	0	0	0	0	27.65	0	51.96	0	19.23	0	98.84	"	Pd _{1.04} Bi _{0.99} Se _{0.97}
13	з	1	1.29	0	4.32	0	51.77	0.74	0	0	33.75	0.71	92.58	Остербушит***	—
14	з	2	1.51	0.99	4.36	0	47.35	0.67	0	0	28.72	0.5	84.1	"	—
15	з	3	1.14	0	3.52	0	45.02	1.01	14.89	0	30.29	0.34	96.21	"	(Pd _{3.38} Ag _{0.41} Cu _{0.23} Hg _{0.06} B _{10.91}) _{6.99} (Se _{4.88} S _{0.13}) _{5.01}
16	з	5	0	0	0	0	29.69	0	51.24	0	22.03	0	102.96	Падмант	Pd _{1.04} Bi _{0.92} Se _{1.04}
17	з	6	0	0	0	0	28.36	0	51.37	0	20.38	0	100.11	"	Pd _{1.04} Bi _{0.96} Se _{1.01}

Примечание. *Обозначение фотог – см. рис. 4. **Цифры соответствуют номерам точек анализа на фото рис. 4. ***Анализ остербушита характеризуется низкой суммой из-за тесного срастания минерала с неустановленной фазой либо из-за его губчатой структуры. На рис. 4₃ видна неоднородность строения агрегата остербушита.

Note. *Designation of photographs see in Fig. 4. **Numbers correspond to the numbers of analysis points in the photographs of Fig. 4. ***Analysis of osterboshite is characterized by a low sum due to the close intergrowth of the mineral with an unidentified phase, or due to the spongy structure, the heterogeneity of the structure of the osterboshite aggregate is visible in the Fig. 4₃.

Таблица 4. Состав минералов в ассоциации с самородным золотом на месторождении Блейда Фар Вест
Table 4. Electron microprobe (EPMA) data for minerals in association with native gold from the Bleïda Far West deposit

№	Фото*	T.a**	Fe	Ni	Cu	Au	Ag	Pt	Pd	Bi	Te	As	Se	Сумма	Минерал	Формула	
1	а	1	0	0	0	0	0.59	0	27.89	53.52	0	0	18.82	0	100.82	Падмайт	(Pd _{1.03} Ag _{0.02}) _{0.05} Bi _{1.01} Se _{0.94}
2	а	2	0	0	0	0	0.5	0	27.83	51.58	0	0	18.45	0	98.36	"-	(Pd _{1.05} Ag _{0.02}) _{0.07} Bi _{1.00} Se _{0.99}
3	а	4	4.61	0	0	2.94	3.75	0	50.2	3.15	0	0	36.9	0	101.55	PdSe	(Pd _{0.87} Ag _{0.06} Ag _{0.03} Fe _{0.03} Bi _{0.03}) _{1.14} Se _{0.86}
4	а	5	0	0	0	1.35	1.05	0	58.61	0	0	0	37.71	0	98.72	Палладиент	(Pd _{1.63} Ag _{0.21} Ag _{0.30}) _{0.73} Se _{1.62}
5	б	1	0	0	0	0	0	0	29.76	50.7	0	0	20.97	0	101.44	Падмайт	Pd _{1.07} Bi _{0.92} Se _{1.01}
6	в	1	0	0	76.85	0	0	0	0	0	0	0	0	21.13	97.98	Халькозин	Cu _{1.94} S _{1.06}
7	г	1	0	1.78	0	3.87	0	0	25.93	0	70.52	0	0	0	102.1	Меренскит	(Pd _{0.86} Ni _{0.11} Ag _{0.07}) _{0.04} Te _{1.96}
8	д	1	0	1.93	0	5.77	0.39	0	25.38	0	69.5	0	0	0	102.98	"-	(Pd _{0.84} Ni _{0.12} Ag _{0.01}) _{0.07} Te _{1.92}
9	д	2	0	2.07	0	3.43	0	0	25.38	0	69.87	0	0	0	100.75	"-	(Pd _{0.85} Ni _{0.13} Ag _{0.06}) _{0.04} Te _{1.96}
10	д	3	0	1.61	0	4.52	0.44	0	24.49	0	67.44	0	0	0	98.51	"-	(Pd _{0.85} Ni _{0.10} Ag _{0.08} Ag _{0.01}) _{0.04} Te _{1.95}
11	ж	1	0	0	0	5.59	0	51.02	0	0	35.53	4.18	1.19	97.51	Сперрилит	(Pt _{0.92} Ag _{0.10}) _{0.02} (As _{1.67} Se _{0.19} S _{0.13}) _{0.99}	
12	и	1	0	0	78.66	0	0	0	0	0	0	0	0	20.56	99.22	Джарпент	Cu ₃₁ S ₁₆

Примечание. *Обозначение фото – рис. 5. **Цифры соответствуют номерам точек анализа на фото рис. 5.
Note. *Designation of photographs – see Fig. 5. **The numbers correspond to the numbers of the analysis points in the photographs of Fig. 5.

роженных LSV включениях происходит в интервале температур от -68 до -62°C . Лед плавится при температуре $-26\dots -24^{\circ}\text{C}$. Гидрогалит в таких включениях полностью замещал галит при отрицательной температуре. Концентрация основных солевых компонентов раствора включений была оценена: $\text{NaCl} \approx 20$ мас. % и $\text{CaCl}_2 \approx 13$ мас. %.

Образец 16. В кальците тонких прожилков S2 с самородным золотом LV включения гомогенизируются в интервале температуры от 132 до 80°C (см. табл. 5). В замороженных LV включениях первое плавление происходит при температуре -55°C , что соответствует эвтектике системы $\text{CaCl}_2\text{--NaCl--H}_2\text{O}$. Лед плавится в интервале температуры от -41.6 до -40°C , гидрогалит – при температуре от -23 до -20°C . В L включениях лед плавится в интервале температуры от -17 до -15°C . Концентрация основных солевых компонентов растворов включений (тип LV и L) $\text{NaCl} – 3.5$ мас. % и $\text{CaCl}_2 – 26$ мас. %.

Попытка оценить давление минералообразующих флюидов основана на данных изучения $\text{CO}_2\text{--VL}$ и LSV включений, для которых можно предположить синхронный захват (обр. 15 и 13). Используя модель $\text{H}_2\text{O--CO}_2\text{--NaCl}$ системы, было рассчитано давление для равновесных фаз, которые по плотности CO_2 и концентрации NaCl близки соответственно к плотности CO_2 в CO_2 , VL включениях и солености LSV включений (Dubacq et al., 2013). Давление образования кварц–гематитовых жил при температуре гомогенизации газовой фазы LSV включений варьирует от 76 до 31 МПа, давление образования кварцевых жил с Си-минерализацией – от 63 до 51 МПа.

Изученные образцы руд Блейда Фар Вест относятся к одному гипсометрическому уровню. Если принять максимальное значение расчетного давления (76 МПа) за литостатическое, глубина образования месторождения может быть оценена в 2.8 км. Минимальные значения расчетного давления (31 МПа) могут отвечать гидростатическому давлению в период раскрытия зияющих трещин. Расчет глубины по гидростатическому давлению с учетом плотности высококонцентрированных хлоридных растворов (1.15 г/см 3) дает величину 2.7 км, которая соотносится с оценкой глубины по литостатическому давлению.

Для коррекции температуры захвата включений по давлению были рассчитаны изохоры для растворов NaCl (программа AqSo) с концентрацией, соответствующей солености изученных флюидных включений (Bakker, 2018). Температура кристаллизации кварца в кварцевых прожилках S2 варьирует от 384 до 290°C при среднем значении расчетного давления 60 МПа. Температура образования кварца в кварц–гематитовых жилах изменяется от 280 до 145°C . Температура кристаллизации кальцитовых прожилков с самородным

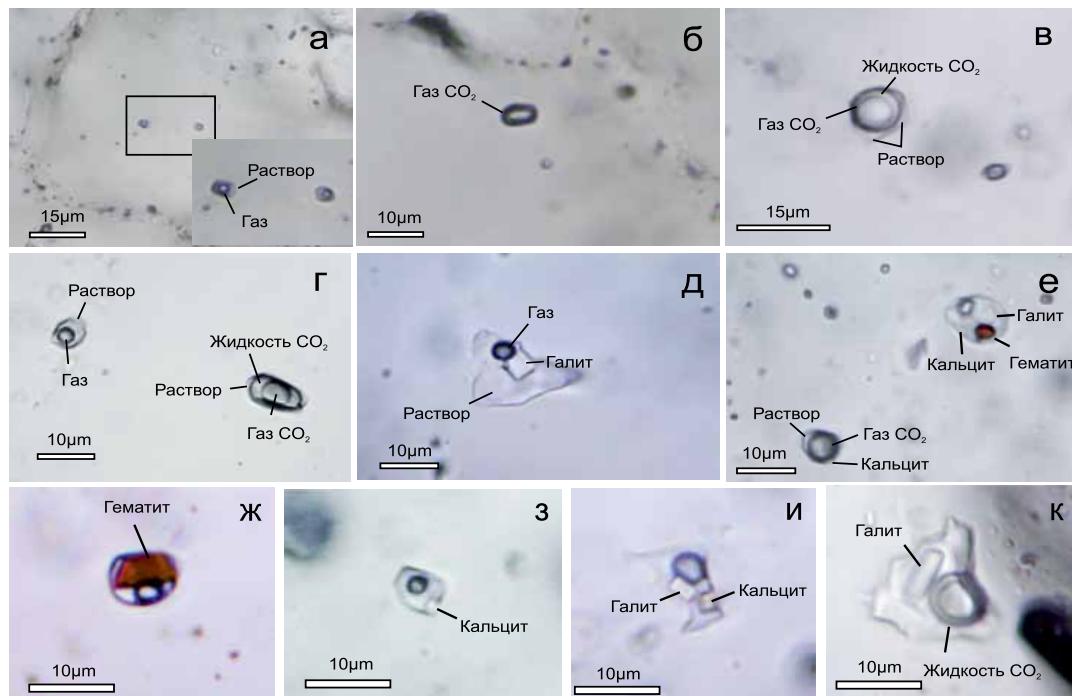


Рис. 6. Флюидные включения в кварце месторождения Блейда Фар Вест.

Кварцевые прослойки метасланца (обр. 12): а – двухфазное водно-солевое включение (тип LV), б – газовое включение (тип V); в – CO₂-обогащенное газовое включение (тип CO₂VL). Катаклизированная кварцевая жила (обр. 13): г – двухфазное водно-солевое включение (тип LV) и CO₂ обогащенное газовое включение (тип CO₂VL); д – трехфазное водно-солевое включение с галитом (тип LSV). Кварц-кварц-гематитовых жил (обр. 15): е – многофазное включение с галитом (тип LSV) и обогащенное CO₂ газовое включение (тип CO₂VL) с ксеногенными фазами гематитом и кальцитом. Включения комбинированного захвата с ксеногенными фазами в кварцевых жилах (обр. 13 и 15): ж – кристалл гематита в двухфазном включении, з и и – кальцит в двухфазном и трехфазном включениях, к – включение с галитом и CO₂.

Fig. 6. Fluid inclusions in quartz from the Bleïda Far West deposit.

Inclusions in metashale quartz layers (sample 12): a – two-phase water-salt inclusion (type LV), б – gas inclusion (type V); в – CO₂-enriched gas inclusion (type CO₂VL). Cataclased quartz vein (sample 13): г – two-phase water-salt inclusion (type LV) and CO₂-enriched gas inclusion (type CO₂VL); д – three-phase water-salt inclusion with halite (type LSV). Inclusions in quartz of quartz-hematite veins (sample 15): е – multiphase inclusion with halite (type LSV) and CO₂ enriched gas inclusion (type CO₂VL) with xenogenic phases hematite and calcite. Inclusions of combined capture with xenogenic phases in quartz veins (samples 13 and 15): ж – hematite crystal in a two-phase inclusion, з and и – calcite in two-phase and three-phase inclusions, к – inclusion with halite and CO₂.

золотом с учетом среднего давления варьирует от 166 до 113°C.

Геотермометрические данные по хлориту ранней (брунсвигит) и хлориту поздней (диабантиит) генераций близки к данным изучения флюидных включений. Согласно геотермометрическим данным, температура кристаллизации кварц-гематитовых жил варьировала от 259 до 231°C, температура кристаллизации Au-Pd минерализации – от 210 до 167°C (Cathelineau, Neiva, 1985; Barakat et al., 2002; Котельников и др., 2012). С учетом ассоциации халькозина, джарлеита и анилита (Cu₇S₄) с самородным золотом температура золоторудного парагенезиса могла снижаться до 75°C и ниже (Potter, 1977; Barton, Skinner, 1979).

ЕРМА-изучение состава солей флюидных включений. Определение химического состава

солей флюидных включений методом ЕРМА проведено в кварце кварц-гематитовых жил (обр. 15 и 13). При термической декрепитации крупные включения поставляли достаточный объем раствора на поверхность пластинки. Содержимое декрепитированных включений на поверхности пластиинки высыпало с образованием характерного агрегата кристаллов солей (рис. 7). В солевых остатках растворов флюидных включений обнаружено присутствие Cl, Na, Ca, K, Mn, Ba, Sr, Fe, Cr и S (табл. 7). Растворы флюидных включений в исследуемых образцах характеризовались пониженной температурой плавления эвтектики, –68...–62 и –55...–49 °C. Причиной пониженной температуры плавления эвтектики растворов включений объясняется присутствием в растворах хлоридов Ca, Fe, Cr и Mn.

Таблица 5. Результаты исследования флюидных включений в кварце рудных жил месторождения Блейда Фар Вест
Table 5. The results of the study of fluid inclusions in the quartz of the ore veins of the Bleïda Far West deposit

Образец	Минерал	Тип (n)	T_m эвтектики, °C	T_m льда, °C	T_m кальтата CO_2 или NaCl гидрата, °C	T_m галита, °C	T_h газа, °C	Соленость, мас.%* NaCl	P, MPa**
12	Q1	LV (1)	-55	-	+0.1	-	317	14.5	-
12	"	LV (5)	-55	-9.5	-	-	190–250	12.8	-
12	"	LV (1)	-55	-0.7	-	-	293	15.5	-
12	"	LV (2)	-55	-19	-	-	312	21.7	-
12	"	LV (4)	-55	-8	-	-	322–321	11.7	-
12	"	LV (1)	-55	-2.5	-	-	332	3.4	-
12	"	LV (2)	-55	-2.2	-	-	325	3.3	-
15	Q2	LHV (1)	-67/-62	-	-	210	168	32.4 (30.4)*	63–37
15	"	LV (1)	-68/-55	-26	+24	209	198	32.2 (31.7)	76–47
15	"	LHV (2)	-68	-	-	220	170	32.9 (30.4)	63–45
15	"	LHV (1)	-68	-	-	215	145	32.8 (29.6)	54–31
15	"	LHV (1)	-68	-	-	219	150	33.0 (29.7)	55–31
13	"	LV (1)	-55	-	-4.6	-	254	19.8	59
13	"	LV (3)	-55...-50	-	-0.5...-0.2	-	270	15.5	63
13	"	LV (4)	-52...-49	-	-1...-0.7	-	280–210	16.5–15.5	51
13	"	LV (1)	-49	-	+1	-	249	14.4	51
16	Cal	LV (1)	-55...-49	-40	-20	-	132	29.3	-
16	"	LV (1)	-55...-49	-41	-23	-	120–100	29.6	-
16	"	L (1)	-55...-49	-17...-15	-	-	80	20.2	-
16	"	L (1)	-55...-49	-16...-15	-	-	90	18.8	-

Примечание. *Расчетная концентрация раствора включения в равновесии с галитом при температуре гомогенизации газа.

**Расчетное давление для двухфазной области системы $\text{NaCl}-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$, фазы которой близки по составу к синхронно захваченным газонасыщенным и водно-солевым флюидным включениям; n – количество изученных включений; Q1 и Q2 – кварц-1 и кварц-2 соответственно, Cal – кальцит. T_m – температура плавления; T_h – температура гомогенизации.

Note. *Calculated concentration of the inclusion solution in equilibrium with halite at the gas homogenization temperature. **Calculated pressure for the two-phase region of the $\text{NaCl}-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ system, the phases of which are close in composition to synchronously trapped gas-saturated and water-salt fluid inclusions; n – the number of studied inclusions; Q1 and Q2 – quartz-1 and quartz-2, respectively, Cal – calcite. T_m – melting temperature; T_h – homogenization temperature.

Таблица 6. Результаты изучения газовых флюидных включений (тип CO_2VL) в кварце кварцевых жил

Table 6. Results of studying gaseous fluid inclusions (type CO_2VL) in quartz of quartz veins

Образец	Тип*	T_m CO_2	T_h CO_2	Плотность CO_2
12	V	-60.5	-60.0 (V)*	0.014
12	V	-60.5	-60.0 (V)	0.014
12	V	-60.5	-60.0 (V)	0.014
12	V	-60.5	-60.0 (V)	0.014
13	V	-56.6	+31.0 (C)	0.55
13	V	-56.6	+31.0 (C)	0.55
13	V	-56.6	+31.0 (C)	0.55
15	CO_2VL	-58.8	+25 (L)	0.71
15	V	-58.8	+24 (L)	0.73
15	V	-59.9	+28 (L)	0.66
15	CO_2VL	-58.7	+24 (L)	0.73
15	CO_2VL	-58.5	+24.5 (L)	0.73
15	CO_2VL	-59.3	+24 (L)	0.73
15	CO_2VL	-59.4	+31.7 (C)	0.51
15	CO_2VL	-59.4	+31.7 (C)	0.51
15	V	-58.0	+30 (L)	0.69
15	V	-57.9	+30 (L)	0.69

Примечание. *Способ гомогенизации CO_2 – в жидкость (L), в газ (V), с критическими явлениями (C). T_m – температура плавления, T_h – температура гомогенизации.

Note. * CO_2 homogenization method – to liquid (L), to gas (V), with critical phenomena (C). T_m – melting temperature, T_h – homogenization temperature.

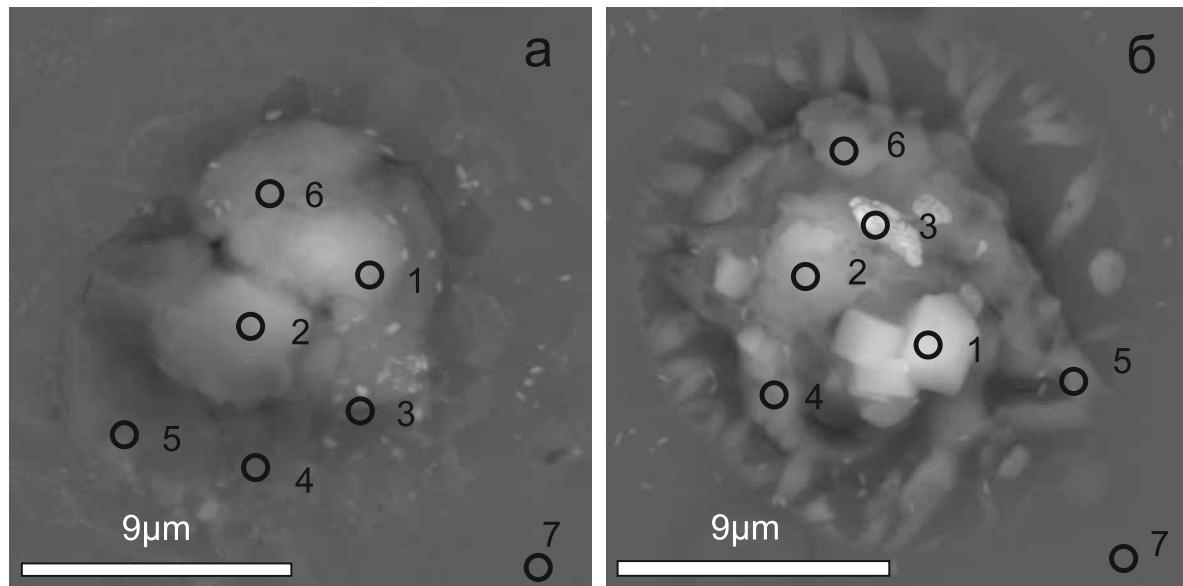


Рис. 7. Изображения в обратно рассеянных электронах (BSE).

Типичные агрегаты кристаллов солей, образовавшиеся на поверхности пластиинки при термической декрепитации флюидных включений: а – обр. 13, б – обр. 15. Указаны номера точек анализа.

Fig. 7. Images in backscattered electrons (BSE).

Typical aggregates of salt crystals formed on the plate surface during thermal decrepitation of fluid inclusions: a – sample 13; b – sample 15. The number of analysis points is indicated.

Таблица 7. Данные электронно-зондового микронализа (EPMA) состава солей флюидных включений

Table 7. Electron probe microanalysis (EPMA) data for fluid inclusion salts

Образец	*№	Si	Al	Cr	Fe	Mn	Ca	Na	K	Ba	S	Cl	O	Сумма**
13	1	3.56	0.21	0	0.94	0.44	4.3	29.73	4.97	0	0	43.31	19.64	107.1
13	2	2.7	0	0	0.49	0	5.08	27.25	0.75	0.28		45.15	17.02	98.71
13	3	20.94	0	2.26	0.23	0.37	4.74	18.15	0.39	4.83	1.43	20.66	45.52	119.5
13	4	38.14	0	1.17	0	0	4.12	0.57	0	0	0.1	2.52	40.59	87.2
13	5	37.16	0	0	0	0	2.47	0.33	0	0	0	2.27	27.42	69.6
13	7	8.64	0	0	0	0.24	2.79	2.69	0.25	0	0	15.57	4.38	34.5
13	6	47.39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.11	55.16	102.6
15	1	6.67	0.38	0	0	0.43	3.67	6.48	26.54	0	0	36.04	43.22	123.4
15	2	2.53	0.2	0	0	0.33	5.32	33.26	0.96	0	0	52.07	22.37	117.0
15	3	3.5	0.2	0	0.17	0.97	4.09	11.51	0.29	9.97	0	35.7	13.82	80.2
15	4	23.54	0	0	0	0.41	15.31	3.9	0.87	0	0.18	10.11	46.92	101.2
15	5	37.45	0	0	0.22	0.49	6.98	0.53	0.09	0	0	2.25	39.71	87.7
15	6	3.53	0	0	0	0.38	7.12	4.18	0.09	0	0	22.67	7.99	45.9
15	7	47.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.12	53.87	101.2

Примечание. *Номер соответствует номеру точки анализа на рис. 7. **Плохие суммы связаны с рельефом поверхности.

Note. *Number corresponds to the number of the analysis point in the Fig. 7. **Bad sums are related to the surface topography.

ОБСУЖДЕНИЕ

Низкотемпературная Au-Pd минерализация золоторудных месторождений Южного и Приполярного Урала (Россия), порфировых месторождений Элацит (Болгария), Скуриес (Греция) и Au-Pd месторождений рудной провинции (Северная Бразилия), связанных с несогласием, отличаются геохимической спецификой. Au-Pd месторождения Бразилии (Córrego Bom Sucesso, Serra Pelada, Cau Iron Mine) характеризуются повышенным содержанием Pd в самородном золоте, а также отсутствием или низким содержанием Ag (Cabral et al., 2002, 2011; Olivo et al., 1995). Зерна МПМ – изомертиит ($Pd_{11}Sb_2As_2$), мертвиит-I, Sb-содержащий мертвиит-II, атенеит, в том числе Se-содержащие МПМ ($Pd-Pt-Se$, $Pd-Se$, $Pd-Hg-Se$ и $Pd-Bi-Se$, судовиковит, палладсейт, падмайт и др.) образуют включения в палладистом золоте или приурочены к его поверхности. Они определяют минеральную ассоциацию As-Sb-Hg-Se, типичную для гидротермальных жильных месторождений, образовавшихся при относительно низких температурах. Самородный палладий, ассоциирующий с гетитом, тесно связан с фазой $Pd-O$.

Самородное золото Au-Pd минерализации месторождений Михеевское (Урал, Россия), а также порфировых месторождений Элацит (Болгария),

Skouries (Греция) характеризуются повышенным содержанием Ag – до 55 мас.%, отсутствием или низким содержанием Pd. Au-Pd минерализация порфировых месторождений включает в себя Тесодержащие МПМ: меренскиит $PdTe_2$, котульскит $Pd(Te,Bi)$ и соболевскит $PdBi$ и др. (Plotinskaya et al., 2018; McFall et al., 2018; Gonzalez-Jiménez et al., 2021; Пальянова и др., 2020).

Самородное золото Блейда Фар Вест, с учетом данных М. Эль Горфи (2006) и А. Белкабир (2008), представлено палладистым золотом (Pd – до 6.29 мас. %), не содержащим Ag, и серебристым золотом (Ag – до 19.7 мас. %). Состав самородного золота месторождения Блейда Фар Вест имеет сходство с составом самородного золота месторождения Чудное (Приполярный Урал, Россия), руды которого также характеризуются присутствием самородного золота с примесями Pd и Ag (Онищенко, Кузнецов, 2019; Palyanova et al., 2021). Пробность самородного золота Блейда Фар Вест варьирует от 775 до 999‰, среднее – 915‰. На тройной диаграмме Au-Pd-Ag фигуративные точки состава самородного золота располагаются на трендах, характерных как для Au-Pd минерализации на порфировых месторождениях, так и для Au-Pd минерализации месторождений Бразилии, связанных с несогласием (рис. 8). Необходимо заметить, что серебристое золото Блейда Фар Вест (среднее отноше-

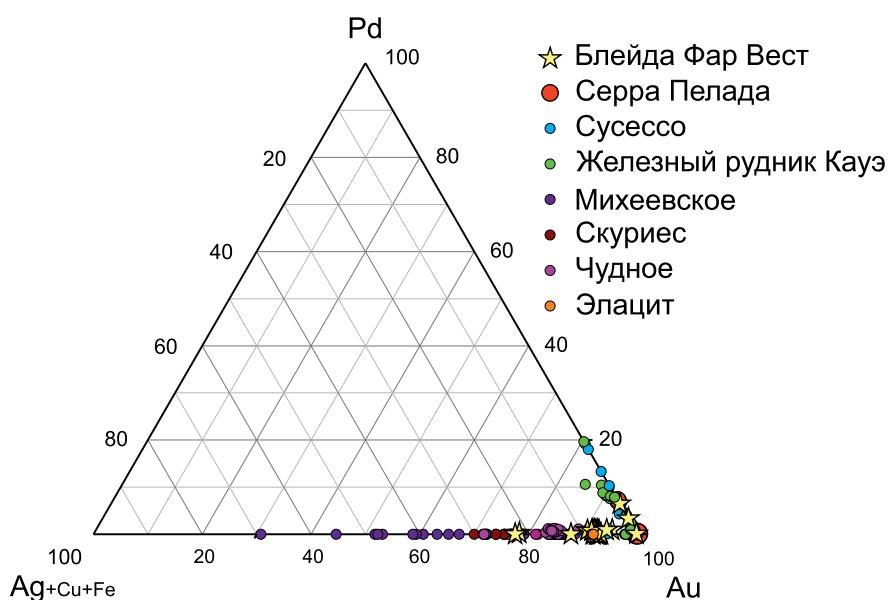


Рис. 8. Состав самородного золота Блейда Фар Вест (авторские данные и (El Ghorfi et al., 2006)), а также эптермальной Au-Pd минерализации на месторождениях Михеевское (Plotinskaya et al., 2018), Чудное (Kuznetsov et al., 2014, 2018; Palyanova et al., 2021), Элацит (Gonzalez-Jimeneza et al., 2021), Скуриес (McFall et al., 2018), Серра Пелада (Cabral et al., 2002), Суcessо (Cabral et al., 2011) и Железный рудник Кауэ (Olivo et al., 1995).

Fig. 8. Composition of native gold from Bleïda Far West (author's data and (Ghorfi et al., 2006)), epithermal Au-Pd mineralization of deposits Mikheevskoe (Plotinskaya et al., 2018), Chudnoe (Kuznetsov et al., 2014, 2018; Palyanova et al., 2021), Elazite (Gonzalez-Jimeneza et al., 2021)), Skouries (McFall et al., 2018), Serra Pelada (Cabral et al., 2002), Sucesso Córrego Bom (Cabral et al., 2011) and Cauê Iron mine (Olivo et al., 1995).

ние Au/Ag = 14.6) близко к Au-Ag-Cu составу самородного золота эндогенных золоторудных месторождений, не содержащих МПМ, таких как орогенные, связанные с интрузиями (Intrusion-related gold deposits) и вулканогенные массивные сульфины (VMS) (Liu, Beaudoin, 2021). Это косвенно указывает на эндогенное происхождение серебристого золота Блейда Фар Вест.

В рудах Блейда Фар Вест присутствуют Pd-Se, Pd-Bi-Se и Pd-Te, Pd-Bi-Te – фазы соответственно характерные для Au-Pd месторождений типа “несогласия” и Au-Pd низкотемпературной минерализации на порфировых месторождениях. На тройной диаграмме фигуративные точки составов Pd-Bi-Se МПМ Блейда Фар Вест и Серра Пелада образуют подобные тренды (рис. 9). Парагенетические отношения между Pd- and Ag- самородным золотом, а также между Pd-Se, Pd-Bi-Se и Pd-Te, Pd-Bi-Te фазами не могут быть точно установлены в рудах месторождения Блейда Фар Вест. Тем не менее можно предположить, что палладистое самородное золото и фазы Pd-Se, Pd-Bi-Se Блейда Фар Вест находятся в одном парагенезисе и были образованы в условиях, близких к условиям образования Au-Pd месторождений Бразилии. По-видимому, серебристое золото и Pd-Te, Pd-Bi-Te фазы также парагенетичны и могли образоваться в условиях, похо-

жих на условия образования низкотемпературной Au-Pd минерализации порфировых месторождений.

Результаты изучения флюидных включений подтверждают гипотезу образования Au-Pd минерализации Блейда Фар Вест в результате процессов подобных, но, по-видимому, не тождественных, процессам рудообразования на Au-Pd месторождениях типа “несогласия”, а также Au-U инфильтрационных и порфировых месторождениях с Au-Pd минерализацией. Рудообразующие флюиды гидротермальных рудных месторождений региона Бу-Азер-Эль-Граара наследуют Na-Сa хлоридный состав глубинных бассейновых рассолов (Essarraj et al., 2005; Maacha et al., 2015). Блейда Фар Вест не является исключением из этого ряда, что указывает на участие в рудообразовании бассейновых Na-Сa хлоридных гипergенных рассолов. Корреляция элементов примесей (Mn, Ba, Sr, Fe, Cr) рудообразующих флюидов с повышенным содержанием этих элементов во вмещающих породах (Belkabir et al., 2008; El Ghorfi et al., 2011) указывает на экстракцию рудных элементов из вмещающих пород и служит дополнительным аргументом в пользу участия в рудообразовании гипергенных рассолов. Низкая температура (до 113 и 75°C) и NaCl-CaCl₂ состав рудообразующих флюидов гематит-хлорит-кальцитовых прожилков с самородным золотом в зальбандах сближает условия образо-

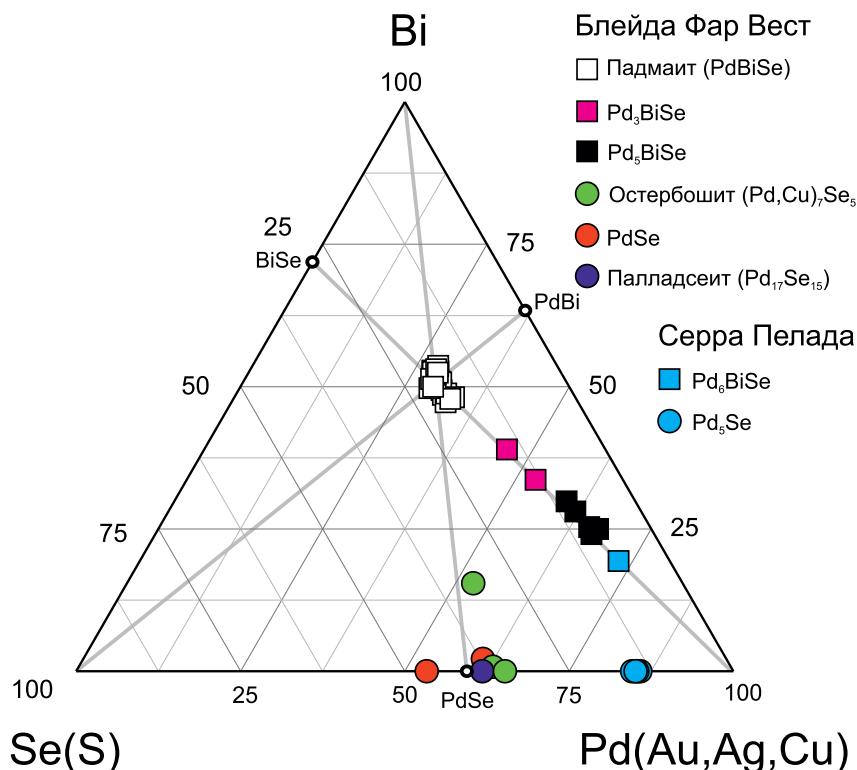


Рис. 9. Состав Pd-Se-Bi фаз месторождений Блейда Фар Вест и Серра Пелада (Cabral et al., 2002), мас. %.

Fig. 9. Composition of Pd-Se-Bi phases of Bleïda Far West and Serra Pelada deposits (Cabral et al., 2002), wt. %

вания Au-Pd минерализация Блейда Фар Вест с условиями образования Au-Pd минерализации Европы, в частности с проявлениями Au-Pd типа “несогласия” внутри и вокруг пермо-триасовых бассейнов на юго-западе Англии (Shepherd et al., 2005). На определенном этапе Au-Pd руды Блейда Фар Вест формировались гетерофазными флюидами, так как часть фигура-тивных точек флюидных включений на диаграмме состояния системы $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ располагаются на кривой равновесия раствор-галит (рис. 10). Гетерогенезация рудообразующего флюида характерна для процесса образования эндогенных месторождений, связанных с процессами магматизма и метаморфизма. Самородное золото могло кристаллизоваться как в среде гомогенного флюида средней солености, так и в среде гетерофазного высококонцентрированного флюида (рис. 10).

ВЫВОДЫ

Модель образования Au-Pd минерализации месторождения Блейда Фар Вест может включать в себя черты месторождений рудообразующих систем типа “несогласия” и порфировой. В пользу этого свидетельствуют:

1) ассоциация рудных минералов, характерных как для Au-Pd месторождений типа “несогласия”, так и для Au-Pd минерализации на порфиро-вых месторождениях;

2) температура отложения руд охватывает диапазон от 384 до 75°C, который соответствует температурам формирования Au-Pd минерализации как на порфиро-вых и Au-Pd месторождениях типа “несогласия”, так и на инфильтрационных Au-U месторождениях;

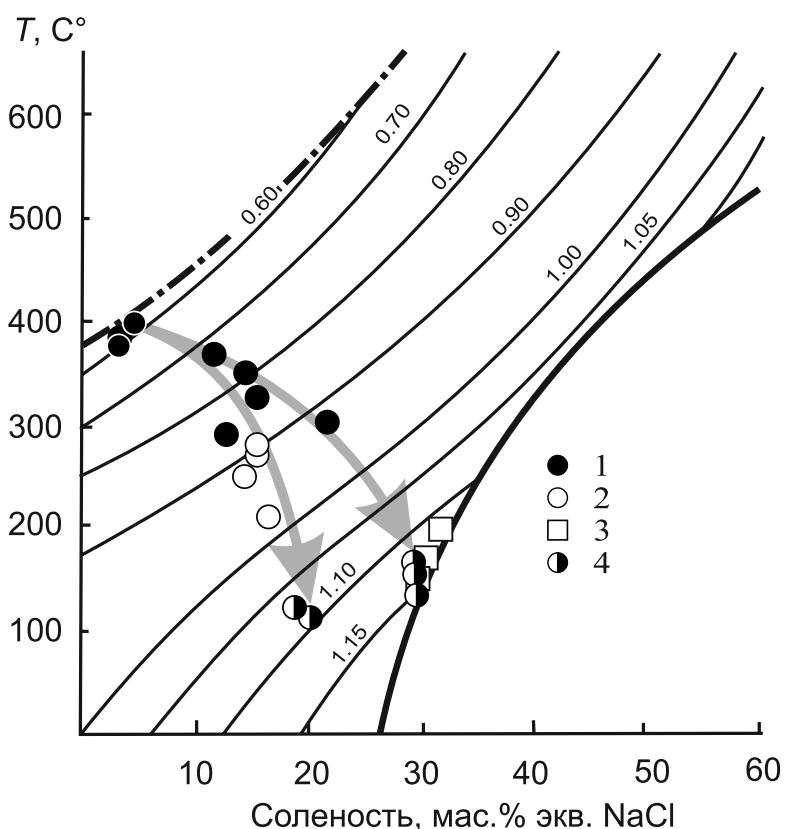


Рис. 10. Диаграмма состояния водно-солевой системы $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$, по (Bodnar, 1988).

Штрих-пунктирная линия – кривая равновесия газ–раствор, тонкие сплошные линии – изохоры, жирная сплошная линия – кривая равновесия галит–раствор. 1 – кварц в прослойках (S2) в метасланцах, 2 – кварц из кварц-гематитовой жилы с Cu-минерализацией, 3 – кварц из кварц-гематитовой жилы, 4 – кальцит из кальцитового прожилка с самородным золотом в гематит-хлоритовом зальбанде. Стрелками показаны вероятные тренды физико-химических параметров.

Fig. 10. Diagram of the state of the water-salt system $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$, according to (Bodnar, 1988).

The dash-dotted line is vapor–liquid equilibrium curve, the thin solid lines are isochores, the thick solid line is halite–liquid equilibrium curve. Symbols: 1 – quartz in interlayers (S2) in metaschists, 2 – quartz from a quartz-hematite vein with Cu-mineralization, 3 – quartz from a quartz-hematite vein, 4 – calcite from a calcite veinlet with native gold in a hematite-chlorite selvedge. Arrows show probable trends in physico-chemical parameters.

3) преобладание NaCl и CaCl_2 в составе высокотемпературных и низкотемпературных флюидов Блейда Фар Вест указывает на возможное участие в рудообразовании бассейновых рассолов;

4) признаки “порфирового” типа оруденения Блейда Фар Вест, по-видимому, связаны с поступлением тепла от удаленного магматического источника, приводящего к нагреванию, гетерогенизации и активной циркуляции бассейновых рассолов в области рудообразования.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность уважаемым В.И. Титову и С.Н. Звереву за неоценимую помощь в проведении исследовательских работ на месторождении Блейда Фар Вест.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисенко А.С., Боровиков А.А., Поспелова Л.Н. (1994) Исследование состава растворов флюидных включений методами криометрии и микрорентгеноспектрального анализа. *Геология и геофизика*, **35**(11), 22-27.
- Борисенко А.С. (1982) Анализ солевого состава растворов газово-жидких включений в минералах методом криометрии. *Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений*. М.: Недра, 37-47.
- Боровиков А.А., Гущина Л.В., Борисенко А.С. (2002) Криометрическое определение растворенного железа (II), железа (III) и цинка в флюидных включениях. *Геохимия*, **40**(1), 63-71.
- Котельников А.Р., Сук Н.И., Котельникова З.А., Щекина Т.И., Калинин Г.М. (2012) Минеральные геотермометры для низкотемпературных парагенезисов. *Вестник ОНЗ РАН*, **4**, NZ9001. doi:10.2205/2012NZ ASEMPG
- Кузнецов С.К., Майорова Т.П., Шайбеков Р.И., Сокерина Н.В., Филиппов В.Н. (2014) Минеральный состав и условия формирования золото-платино-пallадиевых проявлений севера Урала и Пай-Хоя. *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*, **S3-1**, 81-85.
- Кузнецов С.К., Онищенко С.А. (2018) Золотоносность локальных участков метасоматического изменения риолитов месторождения Чудное (Приполярный Урал). *Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН*, **288**(12), 39-45.
- Лебедев В.И., Maacha L. (2018) Кобальтовые арсенидные месторождения рудного пояса Bou Azzer – El Graara (Maroc). (Отв. ред. д.г.-м.н., В.В. Ярмолюк, ИГМ СО РАН), Companie de Tifnout-Tiranimine “ONA” Management group. М.: Де’Либри, 279.
- Лебедев В.И., Калинин Ю.А. (2020) Минералы-индикаторы арсенидного гидротермального процесса формирования кобальтовых месторождений рудного пояса Бу Оффро – Эль Граара в провинции Анти-Атлас (Марокко). *Геология рудн. месторождений*, **62**(6), 1-25.
- Николаева Л.А., Некрасова А.Н., Миляев С.А., Яблокова С.В., Гаврилов А.М. (2013) Геохимические особенности самородного золота месторождений различных рудно-формационных типов. *Геология рудн. месторождений*, **55**(3), 203-213. DOI:10.1134/

S1075701513030045

Онищенко С.А., Кузнецов С.К. (2019) Палладий-золото-сульфидная минерализация в андезитах на месторождении Чудное (Приполярный Урал). *Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН*, **6**(294), 20-27. DOI: 10.19110/2221-1381-2019-6-20-27

Пальянова Г.А. (2020) Минералы золота и серебра в сульфидных рудах. *Геология рудн. месторождений*, **62**(5), 426-449.

Пальянова Г.А., Мурzin В.В., Беляева Т.В., Кузнецов С.К., Боровиков А.А. (2020) Палладистое золото: химический состав, минеральные ассоциации, типы месторождений. *Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов*. Тез. Докл. XI Междунар. науч.-практ. конф. ФГБУ “ЦНИГРИ”. 183-185.

Реддер Э. (1987) Флюидные включения в минералах. (Ред. Л.С. Бородин). М.: Мир. Т. 1. 558 с.

Akinfiev N.N., Diamond L.W. (2010) Thermodynamic model of aqueous $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}\text{-NaCl}$ solutions from -22 to 100°C and from 0.1 to 100 MPa. *Fluid Phase Equilibria*, **295**, 104-124. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2010.04.007>

Bakker R.J. (2001) Fluids: new software package to handle microthermometric data and to calculate isochors. *Memoir. Geol. Soc.*, **7**, 23-25.

Bakke R.J. (2018) AqSo_NaCl: Computer program to calculate p-T-V-x properties in the $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ fluid system applied to fluid inclusion research and pore fluid calculation. *Comp. Geosci.*, **115**, 122-133. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.03.003>

Barakat A., Marignac C., Boiron M.-C., Bouabdelli M. (2002) Caractérisation des paragenèses et des paléocirculations fluides dans l’indice d’or de Bleïda (Anti-Atlas, Maroc). *C. R. Geosci.*, **334**, 35-41. [https://doi.org/10.1016/S1631-0713\(02\)01709-1](https://doi.org/10.1016/S1631-0713(02)01709-1)

Barton P.B. Jr., Skinner R.J. (1979) Sulphide mineral stabilities. (Ed. H.L.Barnes) *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. Wiley, N.Y., USA. 278-403.

Belkabir A., Jébrak M., Maacha L., Sami M.R.A., Madi A. (2008) Gold mineralization in the Proterozoic Bleida ophiolite, Anti-Atlas, Morocco. *Geol. Soc., Lond., Spec. Publ.*, **297**, 249-264.

Bodnar R.J. (1988) A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubblediameters and P-V-T-X properties of inclusion fluids. *Econ. Geol.*, **78**, 535-542.

Bodnar R.J., Vityk M.O. (1994) Interpretation of microthermometric data for $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ fluid inclusions. (Eds B. De Vivo, M.L. Frezzotti). *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. Virginia Polytechnic Inst State Univ, Blacksburg, VA. 117-131.

Bourque H., Barbanson L., Sizaret S., Branquet Y., Ramboz C., Ennaciri A., El Ghorfi M., Badra L. (2015) A contribution to the synsedimentary versus epigenetic origin of the Cu mineralizations hosted by terminal Neoproterozoic to Cambrian formations of the Bou Azzer–El Graara inlier: New insights from the Jbel Laassel deposit (Anti Atlas, Morocco). *J. Afr. Earth Sci.*, **107**, 108-118. DOI:10.1016/j.jafrearsci.2015.04.005

Brown P.E. (1989) FLINCOR: a microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data. *Amer. Miner.*, **74**(11-12), 1390-1393.

Cabral A.R., Lehmann B., Kwitko-Ribeiro R., Cravo Cos-

- ta C.H. (2002) Palladium and platinum minerals from the Serra Pelada Au-Pd-Pt deposit, Carajás Mineral Province, Northern Brazil. *Can. Mineral.*, **40**(5), 1451-1463. DOI:10.2113/gscanmin.40.5.1451
- Cabral A.R., Lehmann B., Tupinambá M., Wiedenbeck M., Brauns M. (2011) Geology, mineral chemistry and tourmaline B isotopes of the Córrego Bom Sucesso area, southern Serra do Espinhaço, Minas Gerais, Brazil: Implications for Au–Pd–Pt exploration in quartzitic terrain. *J. Geochem. Explor.*, **110**, 260-277. DOI:10.1016/j.gexplo.2011.06.007
- Carville D.P., Leckie J.F., Moorhead C.F., Rayner J.G., Durbin A.A. (1990) Coronation Hill gold-platinum-palladium deposit (Ed. F.E. Hughes) *Geology of the mineral deposits of Australia and Papua New Guinea*. Melbourne Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 759-762.
- Cathelineau M., Neiva D. (1985) A chlorite solid solution geothermometer the Los Asufres (Mexico) geothermal system. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **91**, 235-244.
- Clark A.M., Criddle A.J. (1982) Palladium minerals from Hope's Nose, Torquay, Devon. *Mineralogical Magazine*, **46**, 371-377.
- Clauer N. (1976) Géochimie isotopique du strontium des milieux sédimentaires. Application à la géochronologie de la couverture du craton ouest-africain. Ph.D. Thesis, University of Strasbourg.
- Davis D.W., Lowenstein T.K., Spencer R.J. (1990) Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl–H₂O, NaCl–KCl–H₂O, NaCl–MgCl₂–H₂O, NaCl–CaCl₂–H₂O. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**, 591-601.
- Dubacq B., Bickle M.J., Evans K.A. (2013) An activity model for phase equilibria in the H₂O–CO₂–NaCl system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **110**, 229-252. doi:10.1016/j.gca.2013.02.008
- El Ghorfi M., Oberthür T., Melcher F., Lüders V., Boukhari A., Maacha L., Ziadi R., Baoutoul H. (2006) Gold–palladium mineralization at Bleïda Far West, Bou Azzer–El Graara Inlier, Anti-Atlas, Morocco. *Miner. Depos.*, **41**, 549-564. DOI 10.1007/s00126-006-0077-3
- El Ghorfi M., Maacha L., Ennaciri A., Baoutoul H., Zouhair M., Soulaimani A. (2011) La minéralisation aurifère de “Blenda-Far West” (Boutonnière de Bou Azzer-El Graara, Anti-Atlas central). *Notes et mémoires du service géologique. No. 564. New geological and mining guidebooks of Morocco*. (Eds A. Michard, O. Saddiqi, A. Chalouan, E.C. Rjimati, A. Mouttaqi). V. 9. (Eds A. Mouttaqi, E.C. Rjimati, L. Maacha, A. Michard, A. Soulaimani, H. Ibouh). Main Mines of Morocco. RABAT. Éditions du service géologique du Maroc. 111-116.
- Essarraj S., Boiron M-C., Cathelineau M., Banks D.A., Benharref M. (2005) Penetration of surface-evaporated brines into the Proterozoic basement and deposition of Co and Ag at Bou Azzer (Morocco): Evidence from fluid inclusions. *J. Afr. Earth Sci.*, **41**, 25-39. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.03.001
- Gasquet D., Levresse G., Cheilchez A., Azizi-Samir M.R., Mouttaqi A. (2005) Contribution to a geodynamic reconstruction of the Anti-Atlas (Morocco) during Pan-African times, with the emphasis on inversion tectonics and metallogenetic activity at the Precambrian-Cambrian transition. *Precambr. Res.*, **140**, 157-182 https://doi.org/10.1016/j.precamres.2005.06.009
- Gonzalez-Jimeneza J.M., Pinab R., Kerestedjanc T.N., Gerilla F., Borrajo I., Farre-de Pablof J., Proenzaf J.A., Tornose F., Roquef J., Nietoa F. (2021) Mechanisms for Pd-Au enrichment in porphyry-epithermal ores of the Elatsite deposit, Bulgaria. *J. Geochem. Explor.*, **220**, 106664. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106664
- Haynes F.M., Kesler S.E. (1987) Chemical evolution of brines during mississippi valley-type mineralization; evidence from East Tennessee and Pine Point. *Econ. Geol.*, **82**(1), 53-71.
- Haynes F.M., Sterner S.M., Bodnar R.J. (1988) Synthetic fluid inclusions in natural quartz. IV. Chemical analyses of fluid inclusions by SEM/EDA: Evaluation of method. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **52**, 969-977.
- Kontak D.J. (1995) A study of fluid inclusions in sulfide and nonsulfide mineral phases from a carbonate-hosted Zn-Pb deposit, Gays River, Nova Scotia, Canada. *Econ. Geol.*, **93**(6), 793-817.
- Kontak D.J. (2004) Analysis of evaporate mounds as a complement to fluid-inclusion thermometric data: case studies from granitic environments in Nova Scotia and Peru. *Can. Miner.*, **42**, 1315–1329. DOI: 10.2113/gscanmin.42.5.1315
- Leblanc M., Billaud P. (1978) A Volcano-Sedimenta Cryoper Deposit on a Continental Marginof Upper Proterozoic Age: Bleïda (Anti-Atlas Morocco). *Econ. Geol.*, **73**, 1101-1111.
- Leblanc M. (1981) Ophiolites précambriennes et gîtes arséniques de cobalt (Bou-Azzer, Maroc). *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, **280**.
- Liu H., Beaudoin G. (2021) Geochemical signatures in native gold derived from Au-bearing ore deposits. *Ore Geol. Rev.*, **132**, 104066. DOI:10.1016/j.oregeorev.2021.104066
- Maacha L., Maamar B., Kersit M., Saquaque A., Soulaimani A. (2011) The Bleïda Copper Deposit (Bou Azzer-El Graara inlier). *Notes et mémoires du service géologique*, **564. New geological and mining guidebooks of Morocco. (Eds A. Michard, O. Saddiqi, A. Chalouan, E.C. Rjimati, A. Mouttaqi). 9. Ed, A. Mouttaqi, E.C. Rjimati, L. Maacha, A. Michard, A. Soulaimani, H. Ibouh. *Main Mines of Morocco*. RABAT. Éditions du service géologique du Maroc. 105-109.**
- McFall K.A., Naden J., Stephen R., Baker T., Spratt J., McDonald I. (2018) Platinum-group minerals in the Skouries Cu-Au (Pd, Pt, Te) porphyry Deposit. *Ore Geol. Rev.*, **99**, 344-364. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.06.014
- Nielsen T.F.D., Keiding J.K., Andersen J.C.Ø., Holness M.B., Rudashevsky N.S., Rudashevsky V.N., Salmonsens L.P., Tegner C., Veksler I.V. (2014) The Skaergaard PGE and gold deposit: the result of in situ fractionation, sulphide saturation, and magma chamber-scale precious metal redistribution by immiscible Fe-rich melt. *J. Petrol.*, **56** (8), 1643-1676.
- Olivo G.R., Gauthier M., Bardoux M. (1995) Palladium-Bearing old Deposit Hosted by Proterozoic Lake Superior-Type Iron-Formation at the Cau Iron Mine, Itabira District, Southern São Francisco Craton, Brazil: Geologic and Structural Controls. *Econ. Geol.*, **90**, 118-134.
- Painsi M., Diamond L.W., Akinfiev N.N. (2008) Determination of molar volume and composition of CO₂-H₂O-NaCl fluid inclusions using combined microthermometric and optical measurements. *Proc. XIII International Conference on Thermobarogeochemistry and IV th APIFIS Symposium*, Moscow: IGEM Publ. 1, 43-46. http://www.

- minsoc.ru/2008-1-7-0/
- Palyanova G., Murzin V., Borovikov A., Karmanov N., Kuznetsov S. (2021) Native Gold in the Chudnoe Au-Pd-REE Deposit (Subpolar Urals, Russia): Composition, Minerals in Intergrowth and Genesis. *Minerals*, **11**, 451. <https://doi.org/10.3390/min11050451>
- Plotinskaya O.Y., Azovskova O.B., Abramov S.S., Groznova E.O., Novoselov K.A., Seltmanne R., Spratte J. (2018) Precious metals assemblages at the Mikheevskoe porphyry copper deposit (South Urals, Russia) as proxies of epithermal overprinting. *Ore Geol. Rev.*, **94**, 239–260. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.01.025>
- Potter R.W. (1977) An electrochemical investigation of the system copper-sulfur. Pt II. *Econ. Geol.*, **72**(8), 1524–1542.
- Samson I.M., Walker R.T. (2000) Cryogenic raman spectroscopic studies in the system NaCl–CaCl₂–H₂O and implications for low-temperature phase behavior in aqueous fluid inclusions. *Can. Mineral.*, **38**, 35–43. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.38.1.35>
- Sener A.K., Grainger C.J., Groves D.I. (2002) Epigenetic gold-platinum group element deposits: examples from Brazil and Australia. *Trans. Inst. Mining Metall.*, **111**, B65–B73.
- Shepherd T.J., Bouch J.E., Gunn A.G., McKervey J.A., Jonathan N., Scrivener R.C., Styles M.T., Large D.E. (2005) Permo-Triassic unconformity-related Au-Pd mineralisation, South Devon, UK: new insights and the European perspective. *Mineral. Depos.*, **40**, 24–44. DOI 10.1007/s00126-004-0459-3
- Sluzhenikin S.F., Mokhov A.V. (2015) Gold and silver in PGE–Cu–Ni and PGE ores of the Noril'sk deposits, Russia. *Miner. Depos.*, **50**(4), 465–492.
- Smith D.G.W., Nickel E.H. (2007) A System of Codification for Unnamed Minerals: Report of the SubCommittee for Unnamed Minerals of the IMA Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification. *Can. Mineral.*, **45**, 983–1055.
- Thomas R.J., Fekkak A., Ennih N., Errami E., Loughlin E.S., Gresse P.G., Chevallier L.P., Liégois J.P. (2004) A new lithostratigraphic framework for the Anti-Atlas orogen, Morocco. *J. Afr. Earth. Sci.*, **39**, 217–226.
- Tolstykh N., Vymazalová A., Tuhý M., Shapovalova M. (2018) Conditions of formation of Au-Se-Te mineralization in the Gaching ore occurrence (Maletoyvayam ore field), Kamchatka, Russia. *Mineral. Magazine*, **82**(3), 649–674. DOI:10.1180/mgm.2018.84
- Wafik A., Atif Y., Ait Lahna A., Benhammou A., Admou H., Baoutoul H., Bajdi A., Maacha L., El Ghorfi M. (2018) Geology and typology of the Au-Pd-Pt Mineralization of the north corridor of the Far West Bleïda deposit, Bou Azzer Inlier (Central Anti-Atlas, Morocco). *Int. J. Adv. Res.*, **6**(2), 260–276. <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/6437>
- Warr L.N. (2021) IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Miner. Mag.*, **85**, 291–320. doi:10.1180/mgm.2021.43
- Wilde A.R., Mernagh T.P., Bloom M.S., Hoffmann C.F. (1989) Fluid inclusion evidence on the origin of some Australian unconformity-related uranium deposits. *Econ. Geol.*, **84**(6), 1627–1642.
- 100 °C and from 0.1 to 100 MPa. *Fluid Phase Equilibria*, **295**, 104–124. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2010.04.007>
- Bakker R.J. (2001) Fluids: new software package to handle microthermometric data and to calculate isochors. *Memoir Geol. Soc.*, **7**, 23–25.
- Bakker R.J. (2018) AqSo_NaCl: Computer program to calculate p-T-V-x properties in the H₂O–NaCl fluid system applied to fluid inclusion research and pore fluid calculation. *Comp. Geosci.*, **115**, 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.03.003>
- Barakat A., Marignac C., Boiron M.-C., Bouabdelli M. (2002) Caractérisation des paragenèses et des paléo-circulations fluides dans l'indice d'or de Bleïda (Anti-Atlas, Maroc). *C. R. Geosci.*, **334**, 35–41. [https://doi.org/10.1016/S1631-0713\(02\)01709-1](https://doi.org/10.1016/S1631-0713(02)01709-1)
- Barton P.B. Jr.; Skinner R.J. (1979) Sulphide mineral stabilities. (Ed. H.L. Barnes), *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. Wiley, N.Y., USA. 278–403.
- Belkabir A., Jébrak M., Maacha L., Samir M.R.A., Madi A. (2008) Gold mineralization in the Proterozoic Bleïda ophiolite, Anti-Atlas, Morocco. *Geol. Soc., Lond., Spec. Publ.*, **297**, 249–264.
- Bodnar R.J. (1988) A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubblediameters and P-V-T-X properties of inclusion fluids. *Econ. Geol.*, **78**, 535–542.
- Bodnar R.J., Vityk M.O. (1994) Interpretation of microthermometric data for NaCl–H₂O fluid inclusions. (Eds B. De Vivo, M.L. Frezzotti). *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. Virginia Polytechnic Inst State Univ, Blacksburg, VA. 117–131.
- Borisenco A.S. (1982) Analysis of the Salt Composition of Solutions of Gas-liquid Inclusions in Minerals by Cryometric Method. *Fluid Inclusions Study for the Search and Study of Ore Deposits*. Moscow, Nedra Publ., 37–47. (In Russ.)
- Borisenco A.S., Borovikov A.A., Pospelova L.N. (1994) Study of the composition of fluid inclusions by cryometry and micro X-ray spectral analysis. *Geol. Geofiz.*, **11**, 22–24. (In Russ.)
- Borovikov A.A., Gushchina L.V., Borisenco A.S. (2002) Cryometric determination of dissolved iron. (II), iron (III), and zinc in fluid inclusions. *Geokhimiya*, **40**(1), 63–71. (In Russ.)
- Bourque H., Barbanson L., Sizaret S., Branquet Y., Ramboz C., Ennaciri A., El Ghorfi M., Badra L. (2015) A contribution to the synsedimentary versus epigenetic origin of the Cu mineralizations hosted by terminal Neoproterozoic to Cambrian formations of the Bou Azzer–El Graara inlier: New insights from the Jbel Laassel deposit (Anti Atlas, Morocco). *J. African Earth Sciences*, **107**, 108–118. DOI:10.1016/j.jafrearsci.2015.04.005
- Brown P.E. (1989) FLINCOR: a microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data. *Amer. Miner.*, **74**(11–12), 1390–1393.
- Cabral A.R., Lehmann B., Kwitko-Ribeiro R., Cravo Costa C.H. (2002) Palladium and platinum minerals from the Serra Pelada Au-Pd-Pt deposit, Carajás Mineral Province, Northern Brazil. *Can. Mineral.*, **40**, 5, 1451–1463. DOI:10.2113/gscanmin.40.5.1451
- Cabral A.R., Lehmann B., Tupinambá M., Wiedenbeck M., Brauns M. (2011) Geology, mineral chemistry and tourmaline B isotopes of the Córrego Bom Sucesso area, southern Serra do Espinhaço, Minas Gerais, Brazil: Implications for Au-Pd-Pt exploration in quartzitic terrain.

REFERENCES

Akinfiev N.N., Diamond L.W. (2010) Thermodynamic model of aqueous CO₂–H₂O–NaCl solutions from –22 to

- J. Geochem. Explor.*, **110**, 260-277. DOI10.1016/j.gexplo.2011.06.007
- Carville D.P., Leckie J.F., Moorhead C.F., Rayner J.G., Durbin A.A. (1990) Coronation Hill gold-platinum-palladium deposit (Ed. F.E. Hughes) *Geology of the mineral deposits of Australia and Papua New Guinea*. Melbourne Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 759-762.
- Cathelineau M., Neiva D. (1985) A chlorite solid solution geothermometer the Los Asufres (Mexico) geothermal system. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **91**, 235-244.
- Clark A.M., Criddle A.J. (1982) Palladium minerals from Hope's Nose, Torquay, Devon. *Mineralogical Magazine*, **46**, 371-377.
- Clauer N. (1976) Géochimie isotopique du strontium des milieux sédimentaires. Application à la géochronologie de la couverture du craton ouest-africain. Ph.D. Thesis, University of Strasbourg.
- Davis D.W., Lowenstein T.K., Spencer R.J. (1990) Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl-H₂O, NaCl-KCl-H₂O, NaCl-MgCl₂-H₂O, NaCl-CaCl₂-H₂O. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**, 591-601.
- Dubacq B., Bickle M.J., Evans K.A. (2013) An activity model for phase equilibria in the H₂O-CO₂-NaCl system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **110**, 229-252. doi:10.1016/j.gca.2013.02.008
- El Ghorfi M., Oberthür T., Melcher F., Lüders V., Boukhari A., Maacha L., Ziadi R., Baoutoul H. (2006) Gold-palladium mineralization at Bleïda Far West, Bou Azzer-El Graara Inlier, Anti-Atlas, Morocco. *Miner. Depos.*, **41**, 549-564 DOI 10.1007/s00126-006-0077-3
- El Ghorfi M., Maacha L., Ennaciri A., Baoutoul H., Zouhair M., Soulaimani A. (2011) La minéralisation aurifère de "Bléida-Far West" (Boutonnière de Bou Azzer-El Graara, Anti-Atlas central). *Notes et mémoires du service géologique. No. 564. New geological and mining guidebooks of Morocco*. (Eds A. Michard, O. Saddiqi, A. Chalouan, E.C. Rjimati, A. Mouttaqi). V. **9**. (Eds A. Mouttaqi, E.C. Rjimati, L. Maacha, A. Michard, A. Soulaimani, H. Ibouh). Main Mines of Morocco. RABAT. Éditions du service géologique du Maroc. 111-116.
- Essarraj S., Boiron M-C., Cathelineau M., Banks D.A., Benharref M. (2005) Penetration of surface-evaporated brines into the Proterozoic basement and deposition of Co and Ag at Bou Azzer (Morocco): Evidence from fluid inclusions. *J. Afr. Earth Sci.*, **41**, 25-39. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.03.001
- Gasquet D., Levresse G., Cheilzett A., Azizi-Samir M.R., Mouttaqi A. (2005) Contribution to a geodynamic reconstruction of the Anti-Atlas (Morocco) during Pan-African times, with the emphasis on inversion tectonics and metallogenic activity at the Precambrian – Cambrian transition. *Precambr. Res.*, **140**, 157-182. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2005.06.009
- Gonzalez-Jimeneza J.M., Pinab R., Kerestedjanc T.N., Gervillaa F., Borrajoe I., Farre-de Pablof J., Proenzaf J.A., Tornose F., Roquef J., Nietoa F. (2021) Mechanisms for Pd-Au enrichment in porphyry-epithermal ores of the Elatsite deposit, Bulgaria. *J. Geochem. Explor.*, **220**, 106664. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106664
- Haynes F.M., Kesler S.E. (1987) Chemical evolution of brines during mississippi valley-type mineralization; evidence from East Tennessee and Pine Point. *Econ. Geol.*, **82**(1), 53-71.
- Haynes F.M., Sternier S.M., Bodnar R.J. (1988) Synthetic fluid inclusions in natural quartz. IV. Chemical analyses of fluid inclusions by SEM/EDA: Evaluation of method. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **52**, 969-977.
- Kontak D.J. (1995) A study of fluid inclusions in sulfide and nonsulfide mineral phases from a carbonate-hosted Zn-Pb deposit, Gays River, Nova Scotia, Canada. *Econ. Geol.*, **93**(6), 793-817.
- Kontak D.J. (2004) Analysis of evaporate mounds as a complement to fluid-inclusion thermometric data: case studies from granitic environments in Nova Scotia and Peru. *Can. Miner.*, **42**, 1315-1329. DOI: 10.2113/gscanmin.42.5.1315
- Kotelnikov A.R., Suk N.I., Kotelnikova Z.A., Shchekina T.I., Kalinin G.M. (2012) Mineral geothermometers for low temperature parageneses. *Vestn. Otd. Nauk o Zemle RAN*, **4**, NZ9001. (In Russ.) doi: 10.2205 / 2012NZ ASEMPG
- Kuznetsov S.K., Mayorova T.P., Shaibekov R.I., Sokherina N.V., Filippov V.N. (2014) Mineral composition and conditions for the formation of gold-platinum-palladium occurrences in the north of the Urals and Pai-Khoi. *Geologiya i mineral'nye resursy Sibiri*, **S3-1**, 81-85. (In Russ.)
- Kuznetsov S.K., Onishchenko S.A. (2018) Gold content of local areas of metasomatic alteration of rhyolites of the Chudnoe deposit (Subpolar Urals). *Vestnik IG Komi NTs UrO RAN*, **12**, 39-45. (In Russ.) DOI: 10.19110/2221-1381-2018-12-39-45
- Lebedev V.I., Kalinin Yu.A. (2020) Minerals-indicators of the arsenide hydrothermal process of formation of cobalt deposits of the Bou Offro-El Graara ore belt in the province of Anti-Atlas (Morocco). *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **62**(6), 1-25. (In Russ.)
- Lebedev V.I., Maacha L. (2018) Cobalt arsenide deposits of the Bou Azzer – El Graara (Maroc) ore belt. Rep. (Ed. V.V. Yarmolyuk). IGM SB RAS, Companie de Tifnout-Tiranimine “ONA” Managem group. Moscow, De’Libri Publ., 279. (In Russ.)
- Leblanc M. (1981) Ophiolites précambriennes et gîtes arséniques de cobalt (Bou-Azzer, Maroc). *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 280.
- Leblanc M., Billaud P. (1978) A Volcano-Sedimenta Copper Deposit on a Continental Margin of Upper Proterozoic Age: Bleïda (Anti-Atlas Morocco). *Econ. Geol.*, **73**(6), 1101-1111.
- Liu H., Beaudoin G. (2021) Geochemical signatures in native gold derived from Au-bearing ore deposits. *Ore Geol. Rev.*, **132**, 104066. DOI:10.1016/j.oregeorev.2021.104066
- Maacha L., Maamar B., Kersit M., Saquaque A., Soulaimani A. (2011) The Bleïda Copper Deposit (Bou Azzer-El Graara inlier). *Notes et mémoires du service géologique. No. 564. New geological and mining guidebooks of Morocco*. (Eds A. Michard, O. Saddiqi, A. Chalouan, E.C. Rjimati, A. Mouttaqi). V. **9**. (Eds A. Mouttaqi, E.C. Rjimati, L. Maacha, A. Michard, A. Soulaimani, H. Ibouh). In Main Mines of Morocco. RABAT. Éditions du service géologique du Maroc. 105-109.
- McFall K.A., Naden J., Stephen R., Baker T., Spratt J., McDonald I. (2018) Platinum-group minerals in the Skouries Cu-Au (Pd, Pt, Te) porphyry Deposit. *Ore Geol. Rev.*, **99**, 344-364. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.06.014
- Nielsen T.F.D., Keiding J.K., Andersen J.C.Ø., Holness M.B., Rudashevsky N.S., Rudashevsky V.N., Salmons L.P.,

- Tegner C., Veksler I.V. (2014) The Skaergaard PGE and gold deposit: the result of in situ fractionation, sulphide saturation, and magma chamber-scale precious metal redistribution by immiscible Fe-rich melt. *J. Petrol.*, **56**(8), 1643-1676.
- Nikolaeva L.A., Nekrasova A.N., Milyaev S.A., Yablokova S.V., Gavrilov A.M. (2013) Geochemical features of native gold deposits of various ore-formational types. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **55**(3), 203-213. (In Russ.) DOI:10.1134/S1075701513030045
- Olivo G.R., Gauthier M., Bardoux M. (1995) Palladium-Bearing old Deposit Hosted by Proterozoic Late Superior-Type Iron-Formation at the Cau Iron Mine, Itabira District, Southern São Francisco Craton, Brazil: Geologic and Structural Controls. *Econ. Geol.*, **90**, 118-134.
- Onishchenko S.A., Kuznetsov S.K. (2019) Palladium-gold sulfide mineralization in andesites at the Chudnoye deposit (Subpolar Urals). *Vestnik IG Komi NTs UrO RAS*, **6**, 20-27. (In Russ.) DOI: 10.19110 / 2221-1381-2019-6-20-27
- Painsi M., Diamond L.W., Akinfiev N.N. (2008) Determination of molar volume and composition of $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-Na-Cl}$ fluid inclusions using combined microthermometric and optical measurements. *Proceedings of XIII International Conference on Thermobarogeochemistry and IV th APIFIS Symposium*, Moscow, IGEM Publ., **1**, 43-46. <http://www.minsoc.ru/2008-1-7-0/>
- Pal'yanova G.A. (2020) Gold and silver minerals in sulfide ore. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **62**(5), 383-406. (In Russ.)
- Pal'yanova G.A., Murzin V.V., Belyaeva T.V., Kuznetsov S.K., Borovikov A.A. (2020) Palladium gold: chemical composition, mineral associations, deposit types. *Collection of theses of reports scientific and methodological foundations of forecasting, prospecting, evaluation of deposits of diamonds, precious and non-ferrous metals. XI International Scientific and Practical Conference*. 183-185. (In Russ.)
- Pal'yanova G., Murzin V., Borovikov A., Karmanov N., Kuznetsov S. (2021) Native Gold in the Chudnoe Au-Pd-REE Deposit (Subpolar Urals, Russia): Composition, Minerals in Intergrowth and Genesis. *Minerals*, **11**, 451. <https://doi.org/10.3390/min11050451>
- Plotinskaya O.Y., Azovskova O.B., Abramov S.S., Groznova E.O., Novoselov K.A., Seltmanne R., Spratte J. (2018) Precious metals assemblages at the Mikheevskoe porphyry copper deposit (South Urals, Russia) as proxies of epithermal overprinting. *Ore Geol. Rev.*, **94**, 239-260. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.01.025>
- Potter R.W. (1977) An electrochemical investigation of the system copper-sulfur. Pt II. *Econ. Geol.*, **72**(8), 1524-1542.
- Redder E. Fluid inclusions in minerals. Translation from English D.N. Khitarov (Ed. L.S. Borodin). Moscow, Mir Publ., V. 1, 558 p.
- Samson I.M., Walker R.T. (2000) Cryogenic raman spectroscopic studies in the system $\text{NaCl-CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ and implications for low-temperature phase behavior in aqueous fluid inclusions. *Can. Mineral.*, **38**, 35-43. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.38.1.35>
- Sener A.K., Grainger C.J. & Groves D.I. (2002) Epigenetic gold-platinum-group element deposits: examples from Brazil and Australia. *Trans. Inst. Mining Metall.*, **111**, B65-B73.
- Shepherd T.J., Bouch J.E., Gunn A.G., McKervey J.A., Jonathan N., Scrivener R.C., Styles M.T., Large D.E. (2005) Permo-Triassic unconformity-related Au-Pd mineralisation, South Devon, UK: new insights and the European perspective. *Mineral. Depos.*, **40**, 24-44. DOI 10.1007/s00126-004-0459-3
- Sluzhenikin S.F., Mokhov A.V. (2015) Gold and silver in PGE-Cu-Ni and PGE ores of the Noril'sk deposits, Russia. *Miner. Dep.*, **50**(4), 465-492.
- Smith D.G.W., Nickel E.H. (2007) A System of Codification for Unnamed Minerals: Report of the SubCommittee for Unnamed Minerals of the IMA Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification. *Can. Mineral.*, **45**: 983-1055.
- Thomas R.J., Fekkak A., Ennih N., Errami E., Loughlin E.S., Gresse P.G., Chevallier L.P., Liégois J.P. (2004) A new lithostratigraphic framework for the Anti-Atlas orogen, Morocco. *J. Afr. Earth. Sci.*, **39**, 217-226.
- Tolstykh N., Vymazalová A., Tuhý M., Shapovalova M. (2018) Conditions of formation of Au-Se-Te mineralization in the Gaching ore occurrence (Maletoyvayam ore field), Kamchatka, Russia. *Miner. Mag.*, **82**(3), 649-674. DOI:10.1180/mgm.2018.84
- Wafik A., Atif Y., Ait Lahna A., Benhammou A., Admou H., Baoutoul H., Bajddi A., Maacha L., El Ghorfi M. (2018) Geology and typology of the Au-Pd-Pt mineralization of the north corridor of the Far West Bleïda deposit, Bou Azzer Inlier (Central Anti-Atlas, Morocco). *Int. J. Adv. Res.*, **6**(2), 260-276. <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/6437>
- Warr L.N. (2021) IMA-CNMNC approved mineral symbols. *Miner. Mag.*, **85**, 291-320. doi:10.1180/mgm.2021.43
- Wilde A.R., Mernagh T.P., Bloom M.S., Hoffmann C.F. (1989) Fluid inclusion evidence on the origin of some Australian unconformity-related uranium deposits. *Econ. Geol.*, **84**, 1627-1642.