Оригинальная статья / Original article
УДК 550.4:550.8
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-160-176

Минералого-петрографическая характеристика месторождения Угахан

© А.В. Блинов[a], Ю.И. Тарасова[b]
[a,b]Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия
[b]Иркутский научный центр СО РАН, г. Иркутск, Россия

Резюме: В статье рассмотрены минералого-петрографические и геохимические характеристики золоторудного месторождения Угахан с целью создания схемы формирования минералогических ассоциаций, вписанной в общую геодинамическую эволюцию Бодайбинского региона. Исследования проведены на основе авторского материала, полученного на месторождении Угахан во время полевых работ. Непосредственно минералого-петрографические и аналитические работы выполнены в Центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН. По минералого-петрографическим исследованиям установлены три генерации карбонатных минералов, образованные в разное время и связанные с различными этапами формирования месторождения. В пределах месторождения повсеместно отмечается развитие агрегатов регенерационного кварца. Особенно масштабно данное явление наблюдается в верхних пачках бужуихтинской свиты, сложенных кварцевыми песчаниками. Развитие минеральных ассоциаций на месторождении происходило в следующем порядке: на ранней низкотемпературной стадии формировался фрамбоидальный и мелкий идиоморфный пирит (I и II), позже развивалась ассоциация высокотемпературных минералов, включающая арсенопирит, пирротин, пирит-III, самородное золото, галенит, сфалерит, блеклые руды, на пострудной стадии происходила кристаллизация пирита-IV в кварц-карбонатной оторочке. Аналогичная последовательность образования минеральных ассоциаций наблюдается на месторождениях Красный и Сухой Лог, что позволяет предполагать формирование рудной минерализации месторождений сухоложского типа в результате сходных рудообразующих процессов. Приуроченность месторождения Угахан к бужуихтинской свите позволяет считать данное стратиграфическое подразделение перспективным для дальнейших поисков в нем месторождений золота. Содержание мышьяка в отложениях бужуихтинской свиты как основного сопутствующего золоту элемента в пределах Бодайбинского региона на порядок ниже, что предполагает его исключение из поисковых характеристик в границах данного стратоуровня.

Ключевые слова: золото, Бодайбинский регион, месторождение Угахан, минералогия, петрография, геохимия

Благодарности: Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по Проекту IX.130.3.1 (№ 0350-2019-0010). Работа осуществлена с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск).

Информация о статье: Дата поступления 27 апреля 2020 г.; дата принятия к печати 29 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

Для цитирования: Блинов А.В., Тарасова Ю.И. Минералого-петрографическая характеристика месторождения Угахан. *Науки о Земле и недропользование.* 2020. Т. 43. № 2. С. 160–176. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-160-176

Mineralogical and petrographic characteristics of the Ugahan deposit

© Anton V. Blinov[a], Julia I. Tarasova[b]
[a,b]Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS, Irkutsk, Russia
[b]Irkutsk Scientific Center, SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: The article considers the mineralogical-petrographic and geochemical characteristics of the Ugahan gold ore deposit with the aim of creating a scheme of the mineralogical associations' formation that is inscribed in the general geodynamic evolution of the Bodaibo region. The study has been carried out on the copyright material obtained in the research area during the fieldwork. The mineralogical-petrographic and analytical work has been

carried out at the Research Sharing Center “Isotope-geochemical studies” of Vinogradov Institute of Geochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. The mineralogical and petrographic research has identified three generations of carbonate minerals, formed at different times and associated with different stages of the field formation. Within the deposit, the development of the regenerative quartz aggregates is widely observed. The phenomenon is especially widespread in the upper members of the Buzhuikhta formation that are composed of quartz sandstones. The development of the mineral associations in the deposit took place in the following order. At the early low-temperature stage, the framboid and small idiomorphic pyrite were formed (I and II). Later, the high-temperature minerals association developed, that included arsenopyrite, pyrrhotite, pyrite-III, native gold, galena, sphalerite, and gray copper ores. At the post-ore stage, the pyrite-IV crystallization in a quartz-carbonate rim occurred. A similar sequence of mineral association formation is observed at the Krasny and Sukhoy Log deposits, which suggests that the formation of ore mineralization of the Sukhoy Log type deposits is a result of similar ore-forming processes. The confinement of the Ugahan deposit to the Buzhuikhta formation allows us to consider this stratigraphic unit as promising in terms of further exploration for gold deposits. The content of arsenic (as the main gold-accompanying element in the Bodaibo region) in the deposits of the Buzhuikhta formation is an order of magnitude lower, which suggests that it should be excluded from the search characteristics within the boundaries of this stratigraphic level.

Keywords: gold, Bodaibo region, Ugahan deposit, mineralogy, petrography, geochemistry

Acknowledgements: The study is part of the State assignment, Project IX.130.3.1 (№ 0350-2019-0010). The work has been carried out using the scientific equipment of the Research Sharing Center "Isotopic Geochemical Research", Institute of Geochemistry, SB RAS, Irkutsk.

Information about the article: Received April 27, 2020; accepted for publication May 29, 2020; available online June 30, 2020.

For citation: Blinov AV, Tarasova JI. Mineralogical and petrographic characteristics of the Ugahan deposit. *Earth sciences and subsoil use.* 2020;43(2):160–176. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-160-176

Введение

Проблема генезиса месторождений золота Бодайбинского региона, в том числе и таких месторождений-гигантов, как Сухой Лог и Вернинское, остается очень актуальной, несмотря на значительные сдвиги в областях аналитической и изотопной геохимии, а также в расшифровке геодинамических событий в эволюции региона.

В настоящее время большая часть геологов разделяет мнение о едином процессе формирования рудной минерализации для всех месторождений Бодайбинского региона, имеющих экономическую рентабельность для извлечения золота [1–8]. Тем не менее практически все месторождения имеют свои отличительные признаки, которые базируются на принадлежности к той или иной свите, локализации в различных областях метаморфической зональности, различном сочетании литологических подразделений (песчаник, алевролит, карбонат, филлитовидный сланец), насыщении органическим веществом и т. д. Среди работ последних двух десятилетий можно выделить в качестве наиболее значимых минералогические исследования R.R. Large с соавторами [9] и Ю.И. Тарасовой с соавторами [8]. В них были продемонстрированы наиболее типичные характеристики месторождений Сухой Лог (хомолхинская свита) и Красный (аунакитская свита). В своей статье Ю.И. Тарасова, базируясь на представлениях предшественников [5, 6, 9–11], представила принципиальную схему формирования месторождений сухоложского типа. В числе принципиальных этапов становления месторождений авторы выделяют: конседиментационный (610–590 млн лет), катагенный (550 млн лет) и два метаморфогенных этапа, первый из которых (450 млн лет) являлся собственно рудным, а второй (320–290 млн лет) – наложенным метаморфическим событием, в значительной степени затушевавшим первые три этапа. Впервые для региона авторы показали схему формирования минералогических ассоциаций, вписав ее в геодинамическую эволюцию региона. Относительно этой схемы будет построено данное исследование по изучению вещественного состава месторождения Угахан.

Объект и методы исследования

Уникальность месторождения Угахан заключается в том, что оно является единственным описанным золоторудным объектом Бодайбинского региона, локализованным в пределах бужуихтинской свиты. Данный факт делает изучение этого месторождения максимально перспективным с точки зрения как генетического понимания его происхождения, так и оценки перспективности бужуихтинской свиты для поиска в ней новых золоторудных объектов в целом.

В структурном плане месторождение Угахан расположено в северной части Бодайбинского синклинория в Хомолхинской подзоне. В геологическом строении территории принимают участие отложения палеопротерозойской эры эдиакарского периода [12–15] дальнетайгинской серии (бужуихтинская, угаханская, хомолхинская и имняхская свиты), прорванные магматическими породами конкудеро-мамаканского комплекса.

Оруденение приурочено непосредственно к висячему крылу Верхне-Угаханской антиклинальной структуры, которая сложена отложениями бужуихтинской свиты, разделенной на пять подсвит [16]. Непосредственно рудные тела приурочены к контакту филитовидных углеродистых сланцев средней части с кварцевыми песчаниками верхней части разреза свиты. Мощность свиты не превышает 700–750 м. Детальная изотопно-геохимическая информация по отложениям бужуихтинской свиты приведена в ряде статей [17–19].

Минералого-петрографические исследования. Вмещающие породы месторождения Угахан представлены переслаиванием углеродсодержащих метапесчаников и алевролитов. В составе обломочного материала присутствуют зерна кварца и полевых шпатов, обломки зерен карбоната, а также более поздние, чем основная ткань, железомагнезиальные карбонаты.

Методом рентгеноструктурного анализа подтверждены карбонатные минералы трех разновидностей:

1. В основной ткани вмещающих пород в виде мелких обломков установлены кальцит и доломит (рис. 1, *a*).

2. По периферии сульфидных агрегатов развиваются тонкие чешуйки сидерита, являющегося синрудным (рис. 1, *c*).

3. Имеет место широкое развитие более поздних пойкилобластов анкерита и сидерита, образующихся позже основной ткани (рис. 1, *d*). Такие пойкилобласты развиваются в основном по цементу и включают мелкие зернышки кварца, полевого шпата, чешуйки серицита и частицы углеродистого вещества, но иногда и обломки более крупных зерен кварца.

В основной ткани преобладают обломки зерен кварца удлиненной линзовидной формы, по длинной оси расположенные по сланцеватости. Зерна кварца подвержены регенерации, что заметно по частицам углеродистого вещества, оставшимся от цемента в разросшихся зернах кварца. Наиболее широко этот процесс проявляется в верхних пачках кварцевых песчаников бужуихтинской свиты, перекрывающих месторождение (рис. 1, *b*). В разных количествах встречаются более мелкие зерна плагиоклаза и калиевого полевого шпата таблитчатой формы с обильными включениями частиц углеродистого вещества. По полевым шпатам начинают развиваться чешуйки серицита и карбонат.

В пределах бужуихтинской свиты повсеместно отмечаются мелкие – 0,05 мм – реликты микрофитолитов, сложенные кальцитом и доломитом, насыщенным частицами углеродистого вещества (рис. 2). Сами по себе находки микрофитолитов в хорошей сохранности являются признаком относительно низкого метаморфизма в пределах месторождения.

Несмотря на повсеместную сульфидизацию отложений бужуихтинской свиты, максимальное развитие сульфидной минерализации приурочено к контакту пелитовой и песчаной разностей. На месторождении установлены четыре морфологические разновидности пирита (рис. 3).

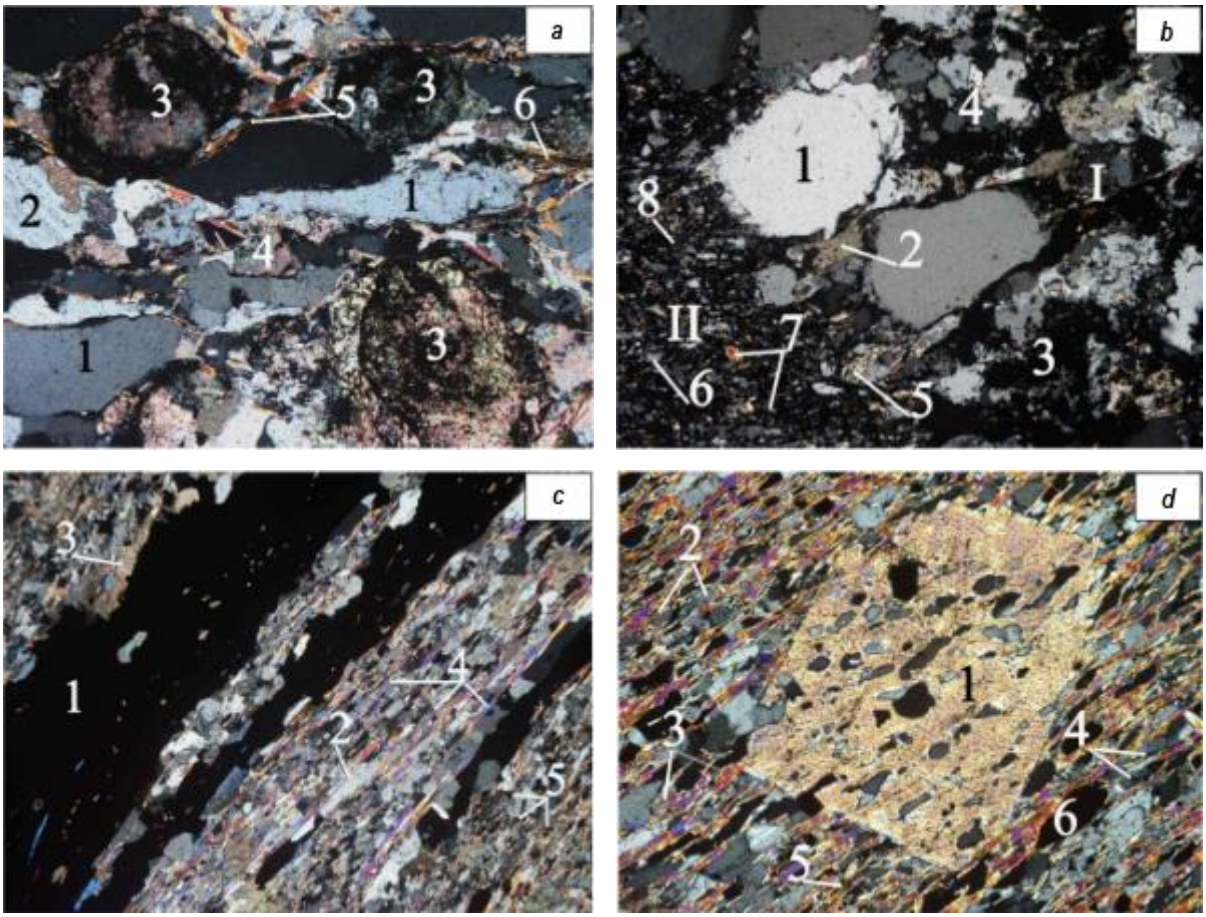

Рис. 1. Шлифы, содержащие карбонатные минералы трех разновидностей:
а – рассланцованный крупно-среднезернистый углеродсодержащий кварцевый известковистый метапесчаник с микрофитолитами и большим содержанием карбоната:
1 – обломки зерен кварца, 2 – обломки зерен плагиоклаза, по которым развивается карбонат, 3 – микрофитолиты, сложенные карбонатом и углеродистым веществом, 4 – зернышки карбоната, предположительно кальцита, в цементе, 5 – чешуйки серицита, 6 – углеродистое вещество
Поле зрения по горизонтали – 1,4 мм. Николи +
b – углеродсодержащий метапесчаник (I), углеродистый филлитовидный сланец (II):
I: 1 – обломки зерен кварца подвергаются регенерации, 2 – обломки карбоната, 3 – скопления углеродистого вещества в реликтах микрофитолитов, 4 – обломок кварцита (кремня) с примесью углеродистого вещества, 5 – серицит и углеродистое вещество в цементе;
II: 6 – зернышки кварца, 7 – чешуйки серицита, 8 – частицы углеродистого вещества
Поле зрения по горизонтали – 1,4 мм. Николи +
с – линзовидные вкрапления сульфидных сростков в алевросланце, расположенные согласно сланцеватости и сопровождаемые кварцем и карбонатом в более крупных зернах, чем в породе:
1 – сростки зерен пирротина, 2 – кварц, 3 – сидерит, 4 – чешуйки серицита-мусковита, 5 – частицы углеродистого вещества
Поле зрения по горизонтали – 3,5 мм. Николи +
d – рассланцованный углеродсодержащий метаалевропесчаник с прослоями углеродистого карбонатизированного алевросланца слюдисто-кварцевого состава:
1 – пойкилобласт анкерита ромбовидной формы, 2 – удлиненные зерна кварца, 3 – чешуйки сидерита в участках с сульфидной вкрапленностью, 4 – углеродистое вещество, 5 – акцессорный турмалин, 6 – вкрапленность сульфидных минералов
Поле зрения по горизонтали – 0,8 мм. Николи +

Fig. 1. Sections containing carbonate minerals of three varieties
a – interstratified coarse-grain carbon-containing quartz calcareous metasandstone with microphytolites and high carbonate content:
1 – fragments of quartz grains, 2 – fragments of plagioclase grains along which the carbonate develops, 3 – microphytoliths composed of carbonate and carbonaceous substance, 4 – grains of carbonate, presumably calcite, in cement, 5 – sericite flakes, 6 – carbonaceous substance
Horizontal field of view is 1.4 mm. Nicoli +

b – Carbon-containing metasandstone (I), carbonaceous phyllite schist (II):
I: 1 – fragments of quartz grains undergoing regeneration, 2 – fragments of carbonate,
3 – accumulations of carbonaceous matter in microphytolith relics, 4 – fragment of quartzite (flint)
with an admixture of carbonaceous substance, 5 – cement and carbonaceous substance in cement;
II: 6 – grains of quartz, 7 – flakes of sericite, 8 – particles of carbonaceous substance
Horizontal field of view is 1.4 mm. Nicoli +
c – lenticular inclusions of sulfide aggregates in the silt shale, arranged according
by schistosity and accompanied with quartz and carbonate in larger grains than in the rock:
1 – intergrowths of pyrrhotite grains, 2 – quartz, 3 – siderite, 4 – flakes of sericite-muscovite,
5 – carbon substance particles
Horizontal field of view is 3.5 mm. Nicoli +
d – interstratified carbon-containing metaaleuro-sandstone with interbeds
of carbonaceous carbonated siltstone of micaceous-quartz composition:
1 – poikiloblast of diamond-shaped ankerite, 2 – elongated quartz grains, 3 – siderite flakes
in sulfide impregnation areas, 4 – carbonaceous substance,
5 – accessory tourmaline, 6 – impregnation of sulfide minerals
Horizontal field of view is 0.8 mm. Nicoli +

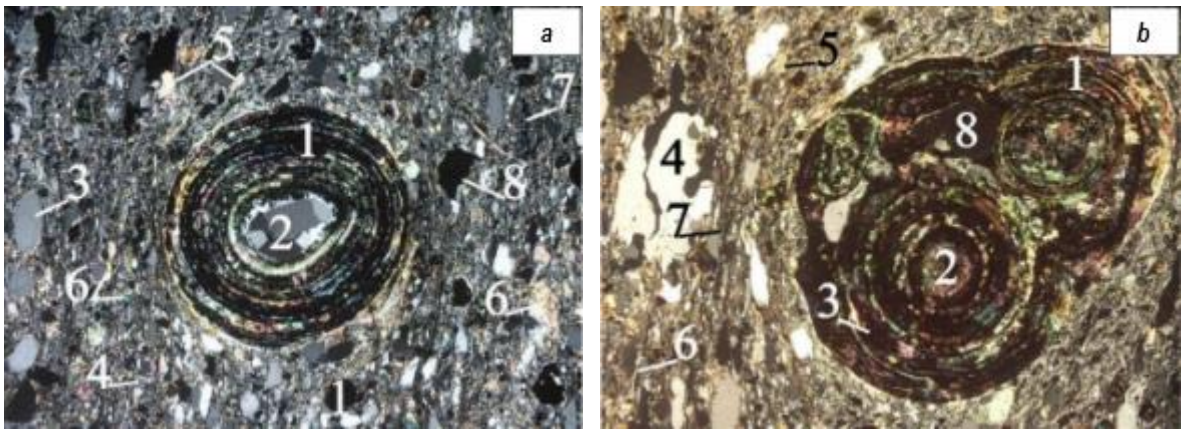

Рис. 2. Рассланцованный углеродсодержащий известковистый метапесчаник с хорошо сохранившимися микрофитолитами, мелкими линзовидными вкраплениями пирротина и вкрапленностью пирита:
a – рассланцованный углеродсодержащий известковистый метапесчаник с микрофитолитом:
1 – микрофитолиты, сложенные карбонатом – чередуются светлые и темные слои,
обогащенные углеродистым веществом, 2 – в центре микрофитолита карбонат замещен кварцем,
3 – обломки зерен кварца, 4 – зерна плагиоклаза, 5 – обломки карбоната, 6 – серицит в цементе,
7 – углеродистое вещество, 8 – вкрапленность пирротина;
b – рассланцованный углеродсодержащий известковистый метапесчаник
с микрофитолитом сложного строения:
1 – микрофитолит сложного строения, 2 – карбонат в микрофитолите, 3 – углеродистое вещество
в микрофитолите, 4 – обломки зерен кварца, 5 – мелкие обломки карбоната, 6 – серицит в цементе,
7 – углеродистое вещество, 8 – более поздняя вкрапленность пирротина
Поле зрения по горизонтали – 4 мм. Николи +

Fig. 2. Interstratified carbon-bearing calcareous metasandstone with well-preserved microphytoliths, small lenticular inclusions of pyrrhotite, and disseminated pyrite
a – Interstratified carbon-bearing calcareous metasandstone with microphytoliths:
1 – carbonate microphytoliths – light and dark layers enriched in carbonaceous substance,
2 – carbonate replaced by quartz in the center of the microphytolite,
3 – fragments of quartz grains, 4 – plagioclase grains, 5 – carbonate fragments, 6 – sericite cement,
7 – carbonaceous substance, 8 – impregnation of pyrrhotite;
b – Interstratified carbon-bearing calcareous metasandstone with microphytolith of complex structure:
1 – microphytolith of complex structure, 2 – carbonate in microphytolite, 3 – carbonaceous matter
in microphytolith, 4 – fragments of quartz grains, 5 – small fragments of carbonate, 6 – sericite in cement,
7 – carbonaceous substance, 8 – later dissemination of pyrrhotite
Horizontal field of view is 4 mm. Nicoli +

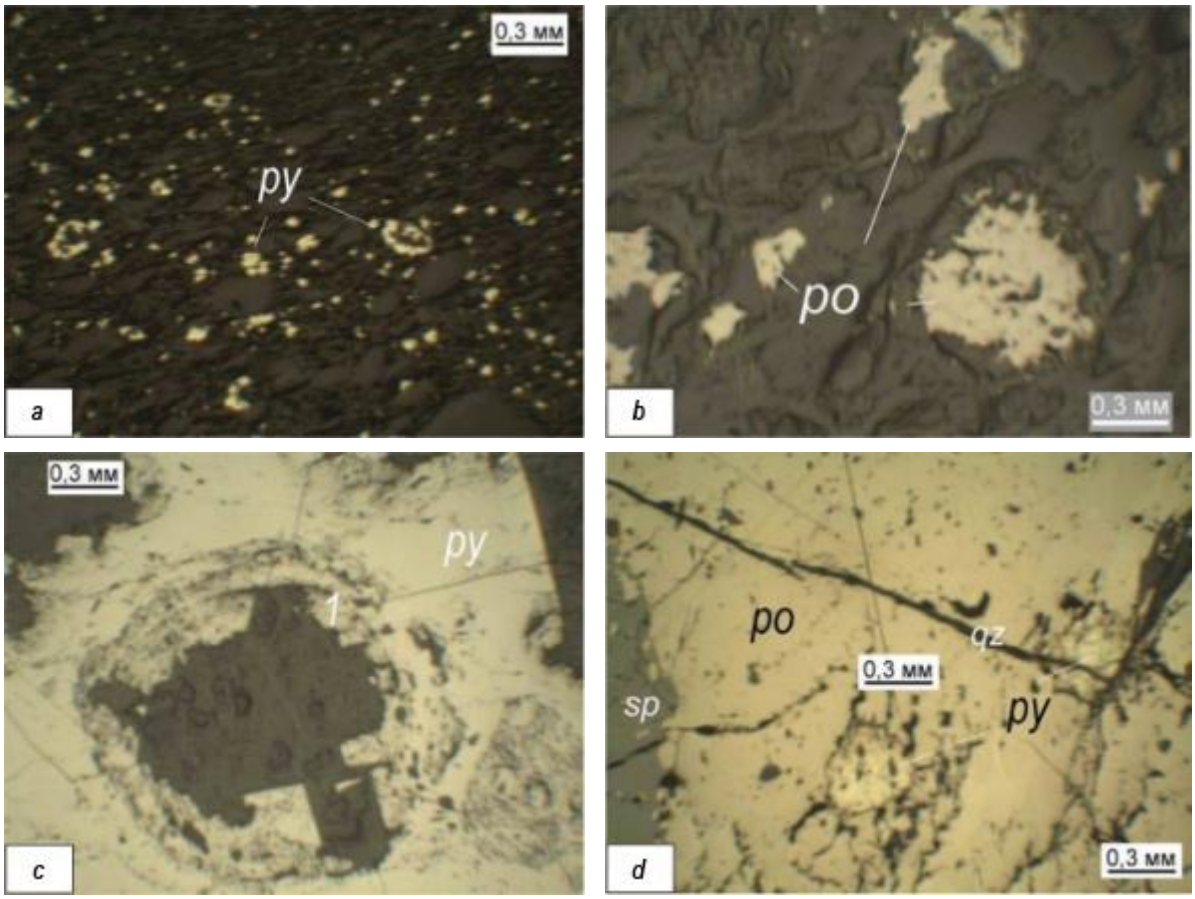

Рис. 3. Морфологические разновидности пирита и пирротина:
a – рассеянная порфирометазернитая вкрапленность мелко- и тонкозернистого (глобулярного) пирита (py) в полосах сульфидизации в окварцованном песчанике;
b – тонковкрапленный пирротин (po) – псевдоморфозы пирита-I;
c – агрегат пирита-III; видны реликты пирита-I и пирита-II;
d – агрегаты метазернистого пирита (py) и выделение сфалерита (sp) в пирротине (po); у пирита отмечена тонкопластинчатая отдельность; границы пирита с пирротином неровные; тонкие прожилки кварца (qz) секут пирит и пирротин
Микроскоп. Николи II

Fig. 3. Morphological varieties of pyrite and pyrrhotite:
a – dispersed granular impregnation of fine and fine-grain (globular) pyrite (py) in sulfidization zones of silicified sandstone;
b – finely disseminated pyrrhotite (po) – pseudomorphs of pyrite-I;
c – pyrite-III aggregate; visible relicts of pyrite-I and pyrite-II;
d – aggregates of metagrain-rich pyrite (py) and sphalerite (sp) precipitation in pyrrhotite (po); pyrrhotite (po) veinlets in pyrite; uneven boundaries between pyrite with pyrrhotite; thin veins of quartz (qz) cutting pyrite and pyrrhotite
Microscope. Nicoli II

Пирит-I представляет собой наиболее раннюю морфологическую разновидность пирита в виде мелких глобулей размером до 200 мкм (см. рис. 3, *a*). Первичный пирит-I частично или полностью замещается пирротином-I, образуя при изоморфном замещении округлые выделения во вмещающих породах (см. рис. 3, *b*). Реликты пирита-I видны в более поздних разновидностях пирита (см. рис. 3, *c*) и в агрегатах пирротина-II (рис. 3, *d*).

Пирит-II представляет собой мелкие идиоморфные кристаллы, редко встречающиеся во вмещающих породах, а также наблюдается в виде реликтов в пирите-III (см. рис. 3). Размер кристаллов пирита-II составляет около 100 мкм. Кристаллы пирита-II встречаются на месторождении Угахан крайне редко – значительно реже, чем на других золоторудных месторождениях Бодайбинского района.

Пирит-III представляет собой аллотриоморфные, изометричные метаагрегаты размером до 2–3 см. Пирит-III является рудоносным пиритом, золото находится по трещинам. В пирите-III отмечаются включения более ранних минералов – пирита-I, пирита-II (см. рис. 3, *c*), халькопирита и пирротина-I. Наложенная полиметаллическая ассоциация развивается по агрегатам пирита-III и по трещинам в нем. По периферии в виде каймы и по трещинам пирита-III установлены участки более тонкозернистого пирита (порфирометазернистая структура) – кристаллического пирита-IV. В пирите-III установлены захваченные агрегаты пирротина-I.

Пирит-IV наблюдается в виде единичных крупных идиоморфных кристаллов кубического облика (преимущественно таблитчато-призматический в разрезе). Размер агрегата пирита-IV – около 4–5×7–8 мм. Крупные метаагрегаты включают в себя реликты более ранних мелких разновидностей пирита – глобулярного пирита-I, мелких идиоморфных кристаллов пирита-II – и обрастают метаагрегатами пирита-III. Пирит-IV захватывает тонкие включения нерудных минералов – кварца, слюды, ксенолитов вмещающих пород, рутила. Особо следует отметить развитие пирита-IV по агрегату пирротина-II, где видна реликтовая структура агрегата пирротина и частички незамещенного пирротина. Трещины и иногда периферия пирротина-II обрастают тонкими зернами пирита-IV (рис. 4, *a*).

Установлены две морфологические разновидности пирротина. Пирротин-I представляет собой результат частичного или полного псевдоморфного замещения глобулярного пирита-I и встречается в виде округлых выделений во вмещающих породах (рис. 4, *b*). Размеры вкрапленных выделений пирротина-I в основном менее 0,1–0,3 мм. Выделения пирротина ксеноморфные, изометричные, с изрезанными краями, отмечается кайма рутила. Часто пирротин-I отмечается в виде включений в агрегатах пирита-III, -IV (см. рис. 3).

Пирротин-II представлен крупными (до нескольких сантиметров) линзовидными или прожилковидными массивными агрегатами (см. рис. 4). Структуры пирротиновых агрегатов аллотриоморфно-, гипидиоморфнозернистые. Линзы пирротина-II ориентированы субсогласно вмещающим породам. Агрегаты пирротина-II рассланцованы по простиранию. В пирротине отмечены тонкие включения карбоната, рутила, встречаются мелкие концентрически-зональные реликты пирита-I (см. рис. 4, *b*).

Полиметаллическая ассоциация в пределах месторождения Угахан представлена галенитом, халькопиритом, сфалеритом, арсенопиритом и носит наложенный характер относительно пирита-III и пирротина-II.

Галенит наблюдается в виде выделений ксеноморфных агрегатов, прожилков, по тонким трещинам, интерстициям в пирите-III или в агрегатах пирита-III и пирротина-II. Размеры выделений изменяются от микронов до 0,2 мм. В ассоциации с галенитом повсеместно встречаются халькопирит и сфалерит. Выделения самородного золота наиболее часто установлены в совместных выделениях с галенитом.

Результаты минераграфических исследований показывают, что на месторождении Угахан установлены две разновидности халькопирита. Халькопирит-I установлен в ассоциации с пирротином-I в виде мелких включений в пирите-III. Выделения пирротина-I и халькопирита-I имеют чаще округлую вытянутую форму. Халькопирит-II ассоциирует с пирротином-II. Преобладающей формой выделения халькопирита-II является обрастание агрегатов пирротина-II. Форма агрегатов пирротина-II и халькопирита-II чаще всего неправильная, угловатая. Размер кайм халькопирита-II достигает первых миллиметров, мощность – первые десятые доли миллиметров.

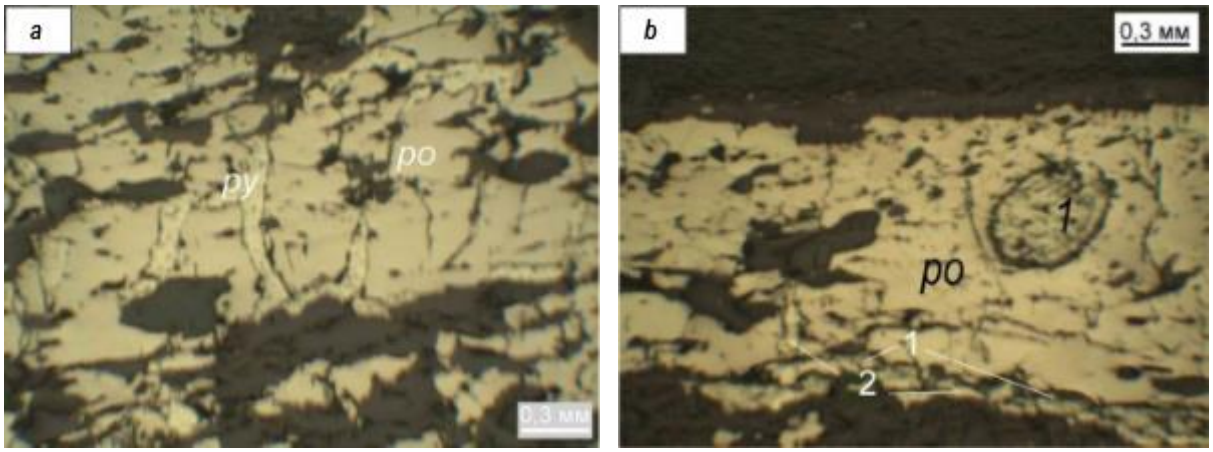

Рис. 4. Контакты метакристаллического пирита с пирротином:
a – сульфидная пятнисто-вкрапленная, почти массивная минерализация пирротина (po)
в виде линзовидных, полосчатых агрегатов;
в пирротине пирит (py) наблюдается в виде мелких зернистых агрегатов,
секущих мелких метапрожилков и каемок;
b – в полосчатых агрегатах пирротина (po) структуры ситовидные, гранобластовые;
в пирротине наблюдаются концентрически-зональные агрегаты пирита (1);
тонкозернистые корочки пирита по пирротину (2) и зональному пириту (1)
Микроскоп. Николи II
Fig. 4. Contacts of metacrystalline pyrite with pyrrhotite:
a – sulfide spotted-disseminated, massive mineralization of pyrrhotite (po)
in the form of lenticular, streaked aggregates;
presence of pyrite (py) in pyrrhotite in the form of small granular aggregates,
small cutting meta-veins and rims;
b – streaked aggregates of pyrrhotite (po), the structures are sieve, granoblast;
concentric-zonal aggregates of pyrite observed in pyrrhotite (1);
fine-grain pyrite rims (2) along pyrrhotite and zonal pyrite (1)
Microscope. Nicoli II

Сфалерит представляет собой идиоморфные, гипидиоморфные мелко-, тонкозернистые агрегаты. Чаще всего сфалерит наблюдаются по трещинам и периферии пирротина-II и пирита-III. Сфалерит замещает пирротин, развивается по нему. В сфалерите отмечены ксенолиты пирротина-I. Размер зернистых агрегатов сфалерита – до 0,6×1,5 мм. В ассоциации с пирротином одновременно со сфалеритом отмечены мелкие зернистые выделения халькопирита и галенита, развивающихся по пирротину-II.

Арсенопирит встречается крайне редко в виде мелких единичных игольчатых кристаллов во вмещающих породах или захвачен агрегатами пирита-III и пирротина-II.

Золото развивается в основном по трещинам и пустотам в пирите-III, реже – в виде интерстициальных выделений в совместных агрегатах пирита-III и пирротина-II. Наиболее часто золото заполняет трещины в пирите (рис. 5). Частицы самородного золота характеризуются высокой отражательной способностью. Цвет их – светло-желтый, наиболее часто встречаются размеры золотин 5×5 и 5×10 мкм, в единичных случаях они достигают размера 90×210 мкм. Золото тонкодисперсное. Форма зерен золота соответствует форме трещин и пустот, в которых оно развивается.

Минералого-петрографические исследования проводились в Центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН методами рентгеноструктурного анализа, рентгеноспектрального микроанализа, также на цифровых поляризационных микроскопах Altami Polar 312 и Micromed Polar 3 с цифровыми фотокамерами Toupcam для получения фотоснимков и их анализа.

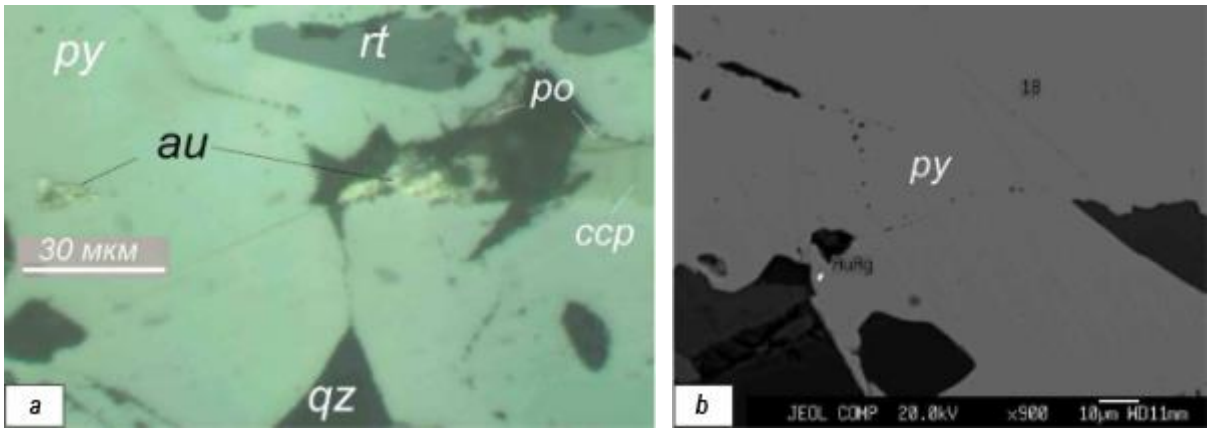

Рис. 5. Золото в пирите:
a – в пирите по интерстициям отмечается золото (au) – изометрично-комковатый агрегат (3–5×13 мкм) и сросток золота (2–5×20 мкм) с пирротином в интерстициях между зернами пирита
Микроскоп. Николи II
b – весьма низкопробное, высокосеребристое золото (AuAg) (~1×2 мкм) в пирите
Изображение получено методом рентгеноспектрального микроанализа
Fig. 5. Gold in pyrite:
a – gold (au) observed in pyrite: isometric lumpy unit (3–5×13 μm) and gold splice (2–5×20 μm) with pyrrhotite in the interstices between the grains of pyrite
Microscope. Nicoli II
b – very low-grade gold with a high content of silver (AuAg) (~1×2 μm), in pyrite
The image obtained by electron-probe microanalysis

Геохимическая характеристика пород и руд. Химический состав месторождения Угахан изучен на основании 56 проб, отобранных из керна скважин в пределах месторождения, и 26 сколковых проб, отобранных на удалении от месторождения. Аналитические исследования проводились в Центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН следующими методами: титриметрический, гравиметрический (НСАМ № 3-Х, НСАМ № 50-Х) методы – на определение общей серы (S_{total}); рентгенофлуоресцентный анализ – на определение петрогенных элементов; сцинтилляционная атомно-эмиссионная спектроскопия с дуговым разрядом – на определение золота и серебра; масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой – на определение редких земель. Полученные данные приведены в табл. 1, 2. Черносланцевые породы, вмещающие рудную минерализацию (пачки bz_2^2 и bz_3^1), схожи по средним содержаниям макрокомпонентов, редких элементов как между собой, так и с вмещающими породами бужуихтинской свиты, отобранными на значительном расстоянии от месторождения.

Таблица 1

Содержание петрогенных компонентов месторождения Угахан, %

Table 1

Content of petrogenic components in the Ugahan deposit, %

Зона	Компонент										
	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	S_{total}	P_2O_5	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	MnO
Рудная зона (25 проб)	57,9	13,99	0,76	8,87	3,42	0,1	3,4	1,15	2,88	1,86	0,04
Зона минерализации (31 проба)	60,8	12,11	0,68	5,47	1,76	0,1	5,3	1,25	2,53	1,83	0,05
Бужуихтинская свита (26 проб)	55,7	13,91	0,56	4,67	1,57	0,08	8,09	1,04	2,72	1,77	0,04

Таблица 2

Содержание редких элементов месторождения Угахан, г/т

Table 2

Content of rare elements in the Ugahan deposit, g/t

Зона	Элемент							
	Au	Ag	Co	Ni	Cu	Pb	Zn	As
Рудная зона (25 проб)	0,998	0,82	25,24	71,14	83,09	19,83	129,21	4,78
Зона минерализации (31 проба)	0,013	0,57	18,12	54,5	53,42	13,43	103,41	4,4
Бужуихтинская свита (26 проб)	0,009	0,1	8,01	38,4	36,57	13,9	74,6	5,2
Зона	Элемент							
	V	Cr	Rb	Sr	Mo	Sn	Ba	U
Рудная зона (25 проб)	140,16	88,51	100,8	504,3	6,88	2,44	1363	4,46
Зона минерализации (31 проба)	112,63	69,84	89,27	604,1	6,24	1,51	1145	4,04
Бужуихтинская свита (26 проб)	165,76	93,44	93,8	840	8,72	2,11	1360	3,61

В пробах с промышленно значимым содержанием золота двукратно возрастают содержания Fe_2O_3, общей серы, в меньшей степени – P_2O_5. Кроме железа и серы в пробах с повышенным содержанием золота увеличено содержание редких элементов сидеро-халькофильной группы (серебро, кобальт, никель, медь, свинец, цинк), что согласуется с увеличением в рудной зоне сульфидной минерализации, представленной пиритом в ассоциации с полиметаллической сульфидной минерализацией (сфалерит, галенит, халькопирит, пентландит).

Прочие элементы либо абсолютно инертны к рудному процессу, либо проявляют тенденцию к уменьшению. Содержания CaO и MgO в отложениях бужуихтинской свиты значительно превышают стандарт для отложений Бодайбинского региона SCHS-1 [20], что согласуется с высоким содержанием карбонатного вещества в породе. В пределах рудной зоны содержание кальция резко снижается с 8 % на удалении до 5 % в околорудной зоне и до 3 % непосредственно в пределах рудных тел месторождения.

Несмотря на появление кварцевых прожилков в пределах рудной зоны и зоны околорудной минерализации, содержание кремнезема остается на стабильном уровне в пределах 59–61 %, что сопоставимо со стандартом SCHS-1. В верхних пачках бужуихтинской свиты, сложенных углеродистыми кварцевыми песчаниками, содержание SiO_2 достигает 80 %.

Вариации содержания щелочных элементов (Na_2O, K_2O, литий, рубидий, цезий) в рудных зонах относительно безрудных отложений как в пределах месторождения, так и на удалении от него крайне малы. Незначительное увеличение содержания калия в пробах с рудным содержанием золота может говорить о локальном перераспределении вещества в пределах рудной зоны месторождения. При этом среднее содержание калия и натрия в целом на месторождении абсолютно сопоставимо с таковым за пределами месторождения, что отвергает идею щелочного метасоматоза за счет внешнего источника.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенных минералого-петрографических исследований пород и руд месторождения Угахан можно сделать следующие выводы:

1. Установлены три генерации карбонатных минералов, образованные в разное время и связанные с различными этапами формирования месторождения:

– кальцит, доломит чаще всего присутствуют в обломочном материале в породе;

– чешуйки синрудного сидерита присутствуют в основной зоне рудообразования в ассоциациях с сульфидными агрегатами (вероятно, формирование такой минерализации связано с восстановлением кислого флюида на сульфидных агрегатах, однако такой парагенезис на месторождении Угахан является исключением, а данный процесс не носит масштабного характера);

– поздние пойкилобласты анкерита и сидерита носят наложенный характер относительно рудного процесса.

2. В пределах месторождения повсеместно отмечается развитие агрегатов регенерационного кварца. Особенно масштабно данное явление наблюдается в верхних пачках бужуихтинской свиты, сложенных кварцевыми песчаниками. Во временном срезе поэтапного развития месторождения процесс регенерации кварца завершился до появления синрудного сидерита, который зачастую корродирует и обрастает кварцевыми зернами. Согласно данным, приведенным в статье О.В. Андреевой [21], верхняя пачка бужуихтинской свиты могла выполнять функцию покрышки на этапе развития катагенных процессов, которые, согласно работе Ю.И. Тарасовой [8], проходили здесь примерно 550 млн лет назад.

3. Развитие минеральных ассоциаций на месторождении происходило в следующем порядке: на ранней низкотемпературной стадии формировался фрамбоидальный и мелкий идиоморфный пирит (I и II), позже развивалась ассоциация высокотемпературных минералов, включающая арсенопирит, пирротин, пирит-III, самородное золото, галенит, сфалерит, блеклые руды, на пострудной стадии происходила кристаллизация пирита-IV в кварц-карбонатной оторочке.

Аналогичная последовательность образования минеральных ассоциаций выявлена на месторождениях Красный [8] и Сухой Лог [9, 11]. Это позволяет предполагать формирование рудной минерализации месторождений сухоложского типа в результате сходных рудообразующих процессов.

Тем не менее месторождение Угахан имеет ряд индивидуальных характеристик, связанных с расположением месторождения и его приуроченностью к бужуихтинской свите. Так, отмечается хорошая сохранность реликтов микрофитолитов относительно вышележащих горизонтов, что указывает на низкую степень метаморфического преобразования обломочных пород. Еще одной особенностью месторождения является слабое развитие арсенопирита, связанное с тем, что содержание мышьяка во вмещающих отложениях бужуихтинской свиты значительно ниже, чем в отложениях хомолхинской и аунакитской свит.

Наиболее значимой геохимической характеристикой месторождения Угахан является резкое увеличение содержания железа и серы в виде сульфидной минерализации (пирит, пирротин, галенит, халькопирит) в рудной зоне (рис. 6) [16]. При этом корреляция обоих элементов с золотом достигает +0,7. Важно отметить, что коррелирует именно закисное железо, характеризующее процесс сульфидизации, в то время как его окисная форма, связанная, по всей видимости, с железо-магнезиальными карбонатами (сидерит, анкерит), корреляции с золотом не имеет (+0,07).

В пределах рудной зоны месторождения Угахан содержания группы щелочных элементов (K_2O и Na_2O), а также редких элементов (рубидий, литий, цезий) (см. рис. 6, *b*), которые традиционно считаются типичными элементами-гранитофилами, не проявляют какой-либо активности. Корреляционная связь данной группы элементов с золотом в рудных телах месторождения резко отрицательная (от -0,03 до -0,37), что аналогично их

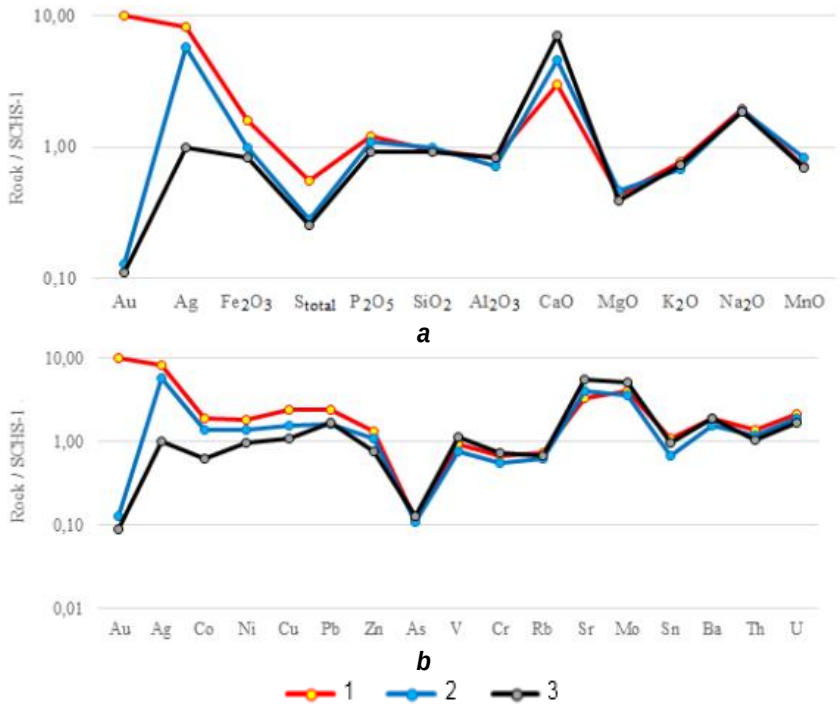

Рис. 6. Распределение петрогенных (a) и редких (b) элементов на месторождении Угахан
(нормировано к SCHS-1 [20]):
1 – рудный материал; 2 – вмещающие породы; 3 – фон
Fig. 6. Distribution of petrogenic (a) and rare (b) elements in the Ugahan deposit
(normalized to SCHS-1 [20]):
1 – ore material; 2 – host rocks; 3 – background

поведению в валовых пробах месторождений Красный и Сухой Лог [5, 8]. Это противоречит гипотезе о синрудном калий-натриевом метасоматозе, являющемся источником рудного вещества [22], и в целом отвергает идею рудоносного флюида, связанного со становлением гранитоидного батолита, предполагаемого по геофизическим данным на глубине [23, 24].

Несмотря на то что кварц является наиболее распространенным жильным минералом рудной зоны месторождения, общее содержание кремнезема в рудных и безрудных интервалах пород близко. Это также говорит об отсутствии привноса SiO_2 в зону рудоотложения из внешних источников. Аналогичные выводы сделаны ранее для месторождений Красный, Сухой Лог, Голец Высочайший, [8, 25].

Учитывая явное обогащение рудной зоны элементами сидеро-халькофильной группы, а также органическим углеродом, которые, согласно представлениям Я.Э. Юдовича и М.П. Кетрис [26], имеют высокую степень связи, можно предположить их совместную миграцию на этапе катагенного перераспределения с концентрированием в антиклинальных структурах. В многочисленных работах [27–32] этот факт подтверждается экспериментальными данными, опубликованными в крайне важном исследовании I. Sugiyama [33], показавшем возможность сорбции благородных металлов флюидом органического происхождения до содержаний, превышающих 1 г/т.

Резкое уменьшение содержаний CaO и CO_2 в интервалах с максимальными содержаниями золота, по всей вероятности, связано с их выносом за пределы месторождения, что предполагает формирование на этапе метаморфизма кислой среды за счет окисления органического вещества. При этом содержание CO_2 в рудной зоне снижается пропорционально снижению CaO, а их корреляция достигает 0,97. Данное предположение нашло подтверждение при изучении месторождения Голец Высочайший,

локализованного в залегающих выше отложениях хомолхинской свиты. В пределах рудной зоны месторождения Голец Высочайший по результатам изотопных исследований Sm-Nd и $\delta^{34}S$, проводившихся авторами данной статьи, установлено присутствие флюида, связанного с бужуихтинской свитой, при более чем трехкратном увеличении содержания CO_2. Таким образом, можно констатировать отсутствие концентрирования золота в рудной зоне месторождения Угахан за счет углекислотного метасоматоза. Соответственно, наложенная карбонатная минерализация не является поисковым критерием для руд данного месторождения.

Такая трактовка событий не противоречит модели формирования месторождений сухоложского типа за счет собственных ресурсов вмещающих отложений на этапе деструкции органического вещества при его взаимодействии с метаморфогенной водой. При этом фиксация золота связана с восстановлением метаморфогенного флюида на восстановительном барьере (формирование пирита-III), о чем свидетельствует развитие наночастиц самородного золота на поверхности пирита [34]. Таким образом, полученные данные предполагают низкую подвижность и ограниченное перераспределение рудных компонентов, включая золото, здесь же без переноса и дорудное концентрирование золота в метаосадках.

В пределах рудной зоны месторождения кроме непосредственно корреляции золота с Fe_2O_3 и общей серы также отмечается корреляционная связь с $Sb^{+0,7}$, $Pb^{+0,56}$, $Cu^{+0,51}$ и $Ag^{+0,32}$. В зоне околорудной минерализации корреляционная группа элементов полностью меняется. Здесь золото положительно коррелирует с $CO_2^{+0.5}$, $MgO^{+0.54}$, $CaO^{+0.39}$, $P2O5^{+0.37}$, $Sr^{+0.6}$. Такая смена ассоциации элементов также подтверждает предположение, что кислый флюид не привносил в рудные тела золото, а, возможно, наоборот, мигрировал из рудной зоны месторождения за его пределы, тем самым обедняя его. Особенностью месторождения являются крайне низкие содержания мышьяка как за пределами месторождения, так и в его рудной зоне, при этом корреляционная связь золота и мышьяка как в рудной зоне, так и за пределами месторождения варьирует от -0,03, до -0,21.

Заключение

В результате проведенных геологических, минералого-петрографических и геохимических исследований можно сделать предварительный вывод относительно генетической принадлежности месторождения Угахан к сухоложскому типу, широко распространенному в пределах Бодайбинского синклинория.

Основание для отнесения месторождения Угахан к сухоложскому типу дают сопоставимость минералогических ассоциаций месторождения Угахан с детально изученными месторождениями Красный и Сухой Лог, а также отсутствие калий-натрового метасоматоза в пределах месторождения.

Приуроченность месторождения Угахан к бужуихтинской свите позволяет считать данное стратиграфическое подразделение перспективным для дальнейших поисков в нем месторождений золота.

Вынос углекислого флюида за пределы рудной зоны ограничивает масштабы концентрирования золота в отложениях бужуихтинской свиты, при этом обогащая вышележащие стратиграфические подразделения.

Содержание мышьяка в отложениях бужуихтинской свиты как основного сопутствующего золоту элемента в пределах Бодайбинского региона на порядок ниже, что предполагает его исключение из поисковых характеристик в рамках данного стратоуровня.

Библиографический список

1. Буряк В.А. Метаморфизм и рудообразование. М.: Недра, 1982. 256 с.

2. Буряк В.А. Источники золота и сопутствующих компонентов золоторудных месторождений в углеродсодержащих толщах // Геология рудных месторождений. 1986. № 6. С. 31–43.

3. Буряк В.А. Генетическая типизация месторождений золота в осадочных и вулканогенно-осадочных толщах // Доклады Академии наук СССР. 1988. Т. 299. № 3. С. 671–678.

4. Чернышев И.В., Чугаев А.В., Сафонов Ю.Г., Сароян М.Р., Юдовская М.А., Еремина А.В. Изотопный состав свинца по данным высокоточного MC-ICP-MS-метода и источники вещества крупномасштабного благороднометального месторождения Сухой Лог (Россия) // Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51. № 6. С. 550–559.

5. Немеров В.К., Спиридонов А.М., Развозжаева Э.А., Матель Н.Л., Будяк А.Е., Станевич А.М. Основные факторы онтогенеза месторождений благородных металлов сухоложского типа // Отечественная геология. 2005. № 3. С. 3.

6. Немеров В.К., Станевич А.М., Развозжаева Э.А., Будяк А.Е., Корнилова Т.А. Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах байкало-патомского региона // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 729–747.

7. Бабяк В.Н., Блинов А.В., Тарасова Ю.И., Будяк А.Е. Новые данные о геолого-структурных особенностях золоторудных месторождений Ожерелье, Ыканское, Угахан и Голец Высочайший // Науки о Земле и недропользование. 2019. Т. 42. № 4. С. 388–412. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-388-412

8. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., et al. Mineralogical and isotope-geochemical (δ13C, δ34S and Pb-Pb) characteristics of the Krasniy gold mine (Baikal-Patom Highlands): constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits // Ore Geology Reviews. 2020. Vol. 119. P. 103365. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365

9. Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., DanyushevskY L.V., Chang Z. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena Goldfield, Russia // Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists. 2007. Vol. 102. No. 7. P. 1233–1267. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.7.1233

10. Буряк В.А., Хмелевская Н.М. Сухой Лог – одно из крупнейших золоторудных месторождений мира (генезис, закономерности размещения оруденения, критерии прогнозирования). Владивосток: Дальнаука, 1997. 156 с.

11. Meffre S., Large R.R., Scott R., Woodhead J., Chang Z., Gilbert S.E., et al. Age and pyrite Pb isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2008. Vol. 72. Iss. 9. P. 2377–2391. https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.03.005

12. Powerman V., Shatsillo A., Chumakov N., Kapitonov I., Hourigan J. Interaction between the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) and the Siberian craton as recorded by detrital zircon suites from Transbaikalia // Precambrian Research. 2015. Vol. 267. P. 39–71. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.05.015

13. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akinfiev N.N. Gold mineralisation and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits // Geoscience Frontiers. 2016. Vol. 7. Iss. 3. P. 453–481. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.010

14. Будяк А.Е., Скузоватов С.Ю., Тарасова Ю.И., Ванг К.-Л., Горячев Н.А. Единая неопротерозойская – раннепалеозойская эволюция рудоносных осадочных комплексов юга Сибирского кратона // Доклады Академии наук. 2019. Т. 484. № 3. С. 335–339. https://doi.org/10.31857/S0869-56524843335-339

15. Palenova E.E., Yudovskaya M.A., Frei D., Rodionov N.V. Detrital zircon U–Pb ages of Paleo- to Neoproterozoic black shales of the Baikal-Patom Highlands in Siberia with implications to timing of metamorphism and gold mineralization // Journal of Asian Earth Sciences. 2019. Vol. 174. P. 37–58. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.10.022

16. Parshin A.V., Budyak A.E., Babyak V.N. Interpretation of integrated aerial geophysical surveys by unmanned aerial vehicles in mining: a case of additional flank exploration // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 459. P. 052079. https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/5/052079

17. Будяк А.Е., Горячев Н.А., Скузоватов С.Ю. Геодинамические предпосылки формирования масштабного оруденения южного обрамления Сибирского кратона в протерозое // Доклады Академии наук. 2016. Т. 470. № 5. С. 562–565. https://doi.org/10.7868/S0869565216290181

18. Чугаев А.В., Будяк А.Е., Чернышев И.В., Шатагин К.Н., Олейникова Т.И., Тарасова Ю.И. [и др.]. Источники обломочного материала неопротерозойских метаосадочных пород Байкало-Патомского пояса (Северное Забайкалье) по Sm-Nd изотопным данным // Геохимия. 2017. № 1. С. 17–25.

19. Чугаев А.В., Будяк А.Е., Чернышев И.В., Дубинина Е.О., Гареев Б.И., Шатагин К.Н. [и др.]. Изотопные (Sm-Nd, Pb-Pb и $\delta^{34}S$) и геохимические характеристики метаосадочных пород Байкало-Патомского пояса (Северное Забайкалье) и эволюция осадочного бассейна в неопротерозойское время // Петрология. 2018. Т. 26. № 3. С. 213–244.

20. Petrov L.L., Kornakov Y.N., Korotaeva I.Ia., Anchutina E.A., Persikova L.A., Susloparova V.E., et al. Multi-element reference samples of black

shale // Geostandards and Geoanalytical Research. 2004. Vol. 28. No. 1. P. 89–102. https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2004.tb01045.x

21. Андреева О.В. Катагенез терригенных пород в осадочных внутрикратонных прогибах позднего протерозоя и его влияние на формирование U-оруденения типа «несогласия» // Геология рудных месторождений. 2012. Т. 54. № 1. С. 49–70.

22. Русинов В.Л., Русинова О.В., Кряжев С.Г., Щегольков Ю.В., Алышева Э.И., Борисовский С.Е. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50. № 1. С. 3–46.

23. Сафонов Ю.Г. Золоторудные и золотосодержащие месторождения мира – генезис и металлогенеческий потенциал // Геология рудных месторождений. 2003. Т. 45. № 4. С. 305–320.

24. Konstantinov M.M., Cherkasov S.V., Dankovtsov R.F., Egorkin A.V. Specific crustal features for large and superlarge endogenic gold deposits (Siberia and Far East regions) // Global Tectonics and Metallogeny. 1999. Vol. 7. No. 2. P. 143–147.

25. Будяк А.Е., Брюханова Н.Н. Селен, висмут и ртуть месторождений золота различных генетических типов в черносланцевых формациях // Геохимия. 2012. № 9. С. 881–888.

26. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимия черных сланцев. Л.: Наука, 1988. 272 с.

27. Buchler J.W. Syntheses and properties of metalloporphyrins // The porphyrins / eds. D. Dolphin. Vol. I. New York: Academic Press, 1978. P. 389–483.

28. Manning D.A.C., Gize A.P. The role of organic matter in ore transport processes // Organic geochemistry: principles a. applications / eds. M.H. Engel, S.A. Macko. New York – London: Plenum press, 1993. P. 547–563.

29. Развозжаева Э.А., Спиридонов А.М., Таусон В.Л., Будяк А.Е. Формы золота в геополимерах углистых сланцев (Патомское нагорье, Восточная Сибирь) // Геохимия. 2011. № 9. С. 998–1004.

30. Калинин Е.П. Геохимическая специфика нефти и ее природа // Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. 2009. № 1 (169). С. 6–12.

31. Fuchs S., Schumann D., Williams-Jones A.E., Vali H. The growth and concentration of uranium and titanium minerals in hydrocarbons of the Carbon Leader Reef, Witwatersrand Supergroup, South Africa // Chemical Geology. 2015. Vol. 393-394. P. 55–66.

32. Будяк А.Е., Горячев Н.А., Развозжаева Э.А., Спиридонов А.М., Соцкая О.Т., Брюханова Н.Н. Геохимия рассеянного органического вещества в золоторудных месторождениях черносланцевых формаций // Доклады Академии наук. 2015. Т. 463. № 6. С. 692–695. https://doi.org/10.7868/S0869565215240160

33. Sugiyama I. Metal transport by oil: application to ore genesis. Montreal: McGill University, 2015.

34. Таусон В.Л., Немеров В.К., Развозжаева Э.А., Спиридонов А.М., Липко С.В., Будяк А.Е. Парагенетические отношения пирита, углерода и золота на месторождении Сухой Лог и типоморфизм поверхности пирита // Доклады Академии наук. 2009. Т. 426. № 4. С. 528–532.

References

1. Buryak VA. *Metamorphism and ore formation*. Moscow: Nedra; 1982. 256 p. (In Russ.)

2. Buryak VA. Sources of gold and associated components of gold deposits in carbonaceous strata. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 1986;6:31–43. (In Russ.)

3. Buryak VA. Genetic typification of gold deposits in sedimentary and volcanic-sedimentary strata. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1988;299(3):671–678. (In Russ.)

4. Chernyshev IV, Chugaev AV, Safonov YG, Saroyan MR, Yudovskaya MA, Eremina AV. Isotopic composition of plumbum by the data of the high-fidelity MC-ICP-MS method, and the substance sources of the large-scale precious metal deposit (Sykhoi Log field, Russia). *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2009;51(6):550–559. (In Russ.)

5. Nemerov VK, Spiridonov AM, Razvozzhayeva EA, Matel NL, Budyak AE, Stanevich AM. Major factors of ontogenesis of Sukhoi Log-type precious metals deposits. *Otechestvennaya geologiya*. 2005;3:3. (In Russ.)

6. Nemerov VK, Stanevich AM, Razvozzhaeva EA, Budyak AE, Kornilova TA. Biogenic sedimentation factors of ore formation in the Neoproterozoic strata of the Baikal-Patom region. *Geologiya i geofizika*. 2010;51(5):729–747. (In Russ.)

7. Babyak VN, Blinov AV, Tarasova JI, Budyak AE. New data on the geological and structural features of the Ozhereliye, Ykanskoye, Ugahan and Golets Vysochaishy gold fields. *Earth sciences and subsoil use.* 2019;42(4):388–412. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-388-412

8. Tarasova YuI, Budyak AE, Chugaev AV, Goryachev NA, Tauson VL, Skuzovatov SYu, et al. Mineralogical and isotope-geochemical (δ13C, δ34S and Pb-Pb) characteristics of the Krasniy gold mine (Baikal-Patom Highlands): constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits. *Ore Geology Reviews*. 2020;119:103365. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365

9. Large RR, Maslennikov VV, Robert F, DanyushevskY LV, Chang Z. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena Goldfield, Russia. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*. 2007;102(7):1233–1267. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.7.1233

10. Buryak VA, Khmelevskaya NM. *Suknoy Log, one of the greatest gold ore deposits in the world (genesis, distribution patterns, prospecting criteria)*. Vladivostok: Dal'nauka; 1997. 156 p. (In Russ.)

11. Meffre S, Large RR, Scott R, Woodhead J, Chang Z, Gilbert SE, et al. Age and pyrite Pb isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2008;72(9):2377–2391. https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.03.005

12. Powerman V, Shatsillo A, Chumakov N, Kapitonov I, Hourigan J. Interaction between the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) and the Siberian craton as recorded by detrital zircon suites from Transbaikalia. *Precambrian Research*. 2015;267:39–71. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.05.015

13. Yudovskaya MA, Distler VV, Prokofiev VYu, Akinfiev NN. Gold mineralisation and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits. *Geoscience Frontiers*. 2016;7(3):453–481. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.010

14. Budyak AE, Skuzovatov SY, Tarasova YI, Wang KL, Goryachev NA. Common Neoproterozoic – early paleozoic evolution of ore-bearing sedimentary complexes in the southern Siberian craton. *Doklady Akademii nauk*. 2019;484(3):335–339. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/S0869-56524843335-339

15. Palenova EE, Yudovskaya MA, Frei D, Rodionov NV. Detrital zircon U–Pb ages of Paleo- to Neoproterozoic black shales of the Baikal-Patom Highlands in Siberia with implications to timing of metamorphism and gold mineralization. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2019;174:37–58. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.10.022

16. Parshin AV, Budyak AE, Babyak VN. Interpretation of integrated aerial geophysical surveys by unmanned aerial vehicles in mining: a case of additional flank exploration. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2020;459:052079. https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/5/052079

17. Budyak AE, Goryachev NA, Skuzovatov SY. Geological background to the formation of the large-scale mineralization of the southern margin of the Siberian craton in the Proterozoic period. *Doklady Akademii nauk*. 2016;470(5):562–565. (In Russ.) https://doi.org/10.7868/S0869565216290181

18. Chugaev AV, Budyak AE, Chernyshev IV, Shatagin KN, Oleinikova TI, Tarasova YI, et al. The sources of the detritus of the Neoproterozoic metasedimentary rocks in the Baikal-Patom belt (Northern Transbaikalia) by Sm-Nd isotope data. *Geokhimiya*. 2017;1:17–25. (In Russ.)

19. Chugaev AV, Budyak AE, Chernyshev IV, Dubinina EO, Gareev BI, Shatagin KN, et al. Isotope (Sm-Nd, Pb-Pb, and $\delta^{34}S$) and geochemical characteristics of the meta-sedimentary rocks in the Baikal-Patom belt (Northern Transbaikalia) and Neoproterozoic evolution of the sedimentary basin. *Petrologiya*. 2018;26(3):213–244. (In Russ.)

20. Petrov LL, Kornakov YN, Korotaeva IIa, Anchutina EA, Persikova LA, Susloparova VE, et al. Multi-element reference samples of black shale. *Geostandards and Geoanalytical Research*. 2004;28(1):89–102. https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2004.tb01045.x

21. Andreeva OV. Catagenesis of terrigenous rocks in sedimentary intracratonic troughs of the Late Proterozoic and its influence on the formation of U-mineralization of the “disagreement” type. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2012;54(1):49–70. (In Russ.)

22. Rusinov VL, Rusinova OV, Kryazhev SG, Shchegol'kov YuV, Alysheva EI, Borisovsky SE. Near-ore metasomatism of terrigenous carbonaceous rocks in the Lena gold ore district. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2008;50(1):3–46. (In Russ.)

23. Safonov YuG. World’s gold-ore and gold-bearing deposits: genesis and metallogenic potential. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2003;45(4):305–320. (In Russ.)

24. Konstantinov MM, Cherkasov SV, Dankovtsov RF, Egorkin, AV. Specific crustal features for large and superlarge endogenic gold deposits (Siberia and Far East regions). *Global Tectonics and Metallogeny*. 1999;7(2):143–147.

25. Budyak AE, Bryukhanova NN. Selenium, bismuth and mercury of gold fields of different genetic types in black-slate formations. *Geokhimiya*. 2012;9:881–888. (In Russ.)

26. Yudovich YaE, Ketris MP. *Geochemistry of black shale*. Leningrad: Nauka; 1988. 272 p. (In Russ.)

27. Buchler JW. Syntheses and properties of metalloporphyrins. In: Dolphin D (eds.). *The porphyrins*. Vol. I. New York: Academic Press; 1978. p.389–483.

28. Manning DAC, Gize AP. The role of organic matter in ore transport processes. In: Engel MH, Macko SA (eds.). *Organic geochemistry: principles a. applications*. New York – London: Plenum press; 1993. p.547–563.

29. Razvozzhaeva EA, Spiridonov AM, Tauson VL, Budyak AE. Forms of gold in the carbonaceous shale geopolymers: Patom upland, Eastern Siberia. *Geokhimiya*. 2011;9:998–1004. (In Russ.)

30. Kalinin EP. Geochemical specificity of oil and its nature. *Vestnik Instituta geologii Komi nauchnogo tsentra Ural'skogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk* = Vestnik of the Institute of Geology of the Komi Science Centre UB RAS. 2009;1:6–12. (In Russ.)

31. Fuchs S, Schumann D, Williams-Jones AE, Vali H. The growth and concentration of uranium and titanium minerals in hydrocarbons of the Carbon Leader Reef, Witwatersrand Supergroup, South Africa. *Chemical Geology*. 2015;393-394:55–66.

32. Budyak AE, Goryachev NA, Razvozzhaeva EA, Spiridonov AM, Sotskaya OT, Bryukhanova NN. Geochemistry of the scattered organic substance in gold fields of black-slate formations. *Doklady*

Akademii nauk. 2015;463(6):692–695. (In Russ.) https://doi.org/10.7868/S0869565215240160

33. Sugiyama I. *Metal transport by oil: application to ore genesis*. Montreal: McGill University; 2015.

34. Tauson VL, Nemerov VK, Razvozzhaeva EA, Spiridonov AM, Lipko SV, Budyak AE. Paragenetic relations of pyrite, carbon and gold at the Sukhoi Log deposit and typomorphism of the pyrite surface. *Doklady Akademii nauk*. 2009;426(4):528–532. (In Russ.)

Критерии авторства / Authorship criteria

Блинов А.В., Тарасова Ю.И. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Anton V. Blinov, Julia I. Tarasova are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All authors have read and approved the final version of this manuscript.

Сведения об авторах / Information about the authors

Блинов Антон Валерьевич,
младший научный сотрудник лаборатории геохимии рудообразования и геохимических методов поисков,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия,
✉ e-mail: belor_cool@mail.ru
Anton V. Blinov,
Junior Researcher, Laboratory of Ore Formation Geochemistry and Geochemical Prospecting Methods,
Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS,
1a Favorsky St., Irkutsk 664033, Russia,
✉ e-mail: belor_cool@mail.ru

Тарасова Юлия Игоревна,
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник лаборатории геохимии рудообразования и геохимических методов поисков,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия,
научный сотрудник,
Иркутский научный центр СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия,
e-mail: j.tarasova84@yandex.ru
Julia I. Tarasova,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher, Laboratory of Ore Formation Geochemistry and Geochemical Prospecting Methods,
Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS,
1a Favorsky St., Irkutsk 664033, Russia,
Researcher,
Irkutsk Scientific Center, SB RAS,
134 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
e-mail: j.tarasova84@yandex.ru