

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА С СУБМИКРОННЫМИ ИНКАПСУЛИРОВАННЫМИ ФОРМАМИ НАХОЖДЕНИЯ ИЗ УПОРНОЙ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДЕЛЬКЕН

А. В. Лаврик<sup>1</sup>, Т. Г. Конарева<sup>1</sup>, А. В. Рассказова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск, Россия

**Аннотация:** Представлены результаты исследований по извлечению золота из упорной золотосодержащей руды месторождения Делькен. Особенность данной руды в том, что в ней содержатся крупные сростки золота с кварцем, большое количество тонкого золота в тесном сростании с кварцем, а также золото обнаруживается в виде субмикронных включений во всех рудообразующих минералах. Большое разнообразие форм проявления ценного компонента требует подбора способа переработки с учетом различных технологических типов сырья для его максимального извлечения. По результатам химического анализа содержание золота в исследуемой руде составило 31,24 г/т. Дана характеристика частиц ценного компонента размером менее 1 мкм, присутствующих в различных минералах. Были проведены исследования по извлечению золота методом горячего цианирования при измельчении материала до 40 мкм. Результаты извлечения Au – 97,7%. Учитывая высокое содержание благородного металла в руде и ее упорность для стандартного цианидного выщелачивания, можно сделать выводы, что тонкое измельчение материала в сочетании с горячим цианированием будут эффективными для применения в промышленном масштабе. При переработке такого типа руды целесообразно будет использовать предварительное гравитационное обогащение и автоклавное выщелачивание.

**Ключевые слова:** золото, инкапсулированное субмикронное золото, выщелачивание цианидными растворами, горячее цианирование.

**Для цитирования:** Лаврик А. В., Конарева Т. Г., Рассказова А. В. Результаты извлечения золота с субмикронными инкапсулированными формами нахождения из упорной руды месторождения Делькен // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 12-1. – С. 121–128. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_121\_0\_121.

### Recovery of submicron encapsulated gold from rebellious ore of Delken deposit

A. V. Lavrik<sup>1</sup>, T. G. Konareva<sup>1</sup>, A. V. Rasskazova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mining Institute of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

**Abstract:** The study focuses on gold recovery from rebellious ore of Delken deposit. The feature of this ore is the high content of large gold and quartz aggregates, fine gold and quartz accretions and submicron gold shots in all ore-forming minerals. Such diversity of gold occurrence in

ore requires a processing technology regarding various process types of gold to maximize its recovery. According to the chemical analysis, the gold content of the test ore is 31.24 g/t. Gold particles less than 1 µm in size, present in various ore-forming minerals, are characterized.

The studies into gold recovery were implemented in the hot cyanide concentration test of ore samples ground down to the size of 40 µm. Au recovery made 97.7 %. Considering high gold content and resistance of the test ore to the standard cyanide leach concentration, we can draw a conclusion that fine grinding of this ore in combination with hot cyanidation can be effectively used on a commercial scale. Furthermore, it is advisable to subject such ore to preliminary gravity concentration and autoclave leaching.

**Key words:** gold, encapsulated gold, submicron gold, cyanide leaching, hot leaching.

**For citation:** Lavrik A. V., Konareva T. G., Rasskazova A. V. Recovery of submicron encapsulated gold from rebellious ore of Delken deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(12-1):121–128. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_121\_0\_121.

## Введение

Известно, что в золоторудных месторождениях различных формаций помимо видимых частиц ценного компонента часто содержится значительное количество субмикронных форм благородных металлов. Современное аналитическое оборудование позволяет выявить присутствие очень тонких частиц минералов, что требует подбора соответствующих технологий разработки месторождений [1–3]. Большой спрос на благородные металлы ввиду высоких темпов развития промышленности и одновременно истощения собственной сырьевой базы драгоценных металлов ведет к вовлечению в переработку бедных, забалансовых, техногенных видов сырья с упорными рудами, содержащими сложноизвлекаемые формы ценного компонента. В связи с этим актуальной является проблема создания и применения технологий, позволяющих максимально извлекать запасы недр Земли при разработке новых месторождений.

В настоящее время мало изучена проблема нахождения субмикронных инкапсулированных форм минералов в составе геологических объектов. К микро- и наноминералогии природных объектов проявляется всё больший интерес. Многочисленными исследо-

ваниями выявлено, что традиционные схемы обогащения «упорных» руд не дают удовлетворительных результатов по извлечению благородных металлов, распределенных в виде мельчайших частиц. А. М. Сазонов вместе с коллективом авторов в своей работе по исследованию микро- и наноразмерных форм благородных металлов отмечают, что невидимые формы золота концентрируются в арсенопирите, пирите, пирротине, оксидах металлов (кварц, хромит, магнетит), в меньшей степени — в силикатах, карбонатах и органическом веществе. Предполагается изоморфное вхождение золота в сульфиды, наличие твердых растворов гипотетических сульфидов золота в пирите, существование нескольких форм нахождения золота в одном минерале. Предполагается изоморфное замещение золотом железа в решетке пирита, что приводит к уменьшению параметра элементарной ячейки [4].

На Дальнем Востоке таким примером золоторудного месторождения, содержащего сложноизвлекаемые формы благородных металлов, является месторождение Делькен (Хабаровский край). Золотосодержащая руда месторождения Делькен характеризуется присутствием крупных сростков золота с кварцем, большим

количеством тонкого золота в тесном сростании с кварцем и субмикронных включений в различных минералах. Большое разнообразие форм ценного компонента в исследуемой руде требует подбора способа переработки, обеспечивающего их эффективное извлечение из различных технологических типов сырья [5–6].

В предыдущих исследованиях было установлено, что исследуемая руда проявляет различные факторы упорности [7]. Упорными считаются золотосодержащие руды, в которых не достигается высокое извлечение золота в традиционных циклах цианирования-выщелачивания даже при предварительном тонком измельчении [8]. Наличие тонковкрапленного золота в закрытых сростках в минеральном сырье является одной из основных причин технологической упорности сырья. В предыдущих исследованиях было установлено, что вкрапленность золота в кварце является осложняющим фактором при гидрометаллургической переработке руды [9]. При наличии плотной структуры минерального сырья и дисперсного золота, заключенного в нем, проявляется упорность золотых руд в процессе выщелачивания. Сочетание данных факторов присуще сульфидам и отчасти кварцу [10].

### **Фактический материал**

В ранее проведенных исследованиях установлено, что изучаемая проба месторождения Делькен представлена кварц-полевошпатовыми метасоматитами по диоритам. В пробе присутствует крупное золото (до 1,5 мм) и тонкодисперсное (менее 40 мкм). Почти треть ценного компонента в исследуемой руде (26%) представляет собой мелкое и тонкодисперсное золото (класс меньше 0,071 мм). Все золото с примесью серебра (до 10% по массе),

чистое золото не встречается. Большая часть также с примесью свинца (до 15% по массе). Содержание серебра и свинца вариативно, но в пределах 2–3%. Встречается золото сложного состава — с примесью серебра, алюминия, кадмия (до 5%) и включениями аргентита. Содержание благородного металла варьирует от 19 до 43 г/т [1].

В результате ранее проведенных исследований по гравитационному и флотационному обогащению, предшествующих гидрометаллургической переработке, сделаны выводы, что флотация в качестве предварительной операции для данной руды неэффективна, а гравитация должна проводиться при тонком измельчении материала [3]. Результаты извлечения золота методом прямого цианирования оказались не высокими (от 85,65% до 89,82% с использованием различных схем), что характеризует данную руду как относительно упорную.

### **Методы исследований**

В работе было использовано современное аналитическое, лабораторное оборудование ведущих зарубежных и отечественных фирм. Пробоподготовка осуществлялась с использованием современного оборудования Fritsch. Детальное изучение выделенных субмикронных включений золота проводилось на сканирующем электронном микроскопе «JEOL 6000 Plus» (Япония). Для количественной оценки содержания золота в исходных материалах применялся атомно-абсорбционный спектрофотометр ААС-7000 [9].

Эксперимент по выщелачиванию методом горячего цианирования проводился на материале крупностью –0,04 мм.

### **Результаты исследований**

В результате детальных минералогических исследований различных

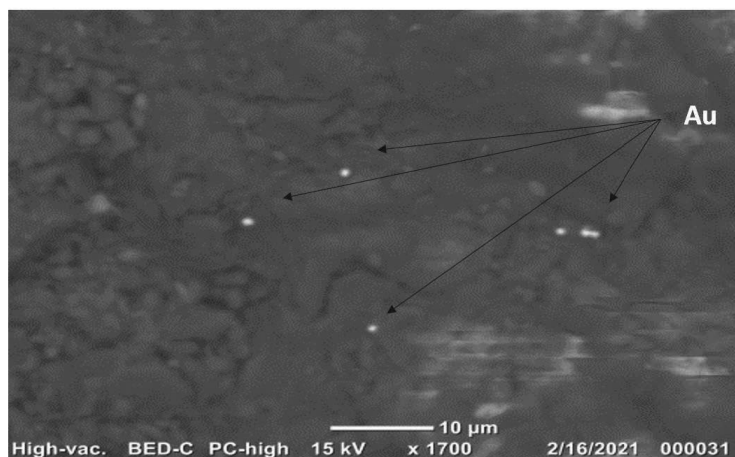
минералов руды месторождения Делькен были обнаружены частицы золота порядка менее 1 мкм во всех породообразующих и рудных минералах. На рис. 1 показана микрофотография с электронного сканирующего микроскопа зерна пирита, содержащего рассеянную вкрапленность золота.

По результатам исследований различных минералов, содержащих субмикронные формы ценного компонента, обнаружено, что рассеянные частицы золота имеют размеры от 100 нм до 1 мкм. Характеристика минера-

лов и обнаруженных частиц представлена в табл. 1.

В предыдущих исследованиях сокращенным минералогическим анализом было установлено, что все золото связано с кварцем. В результате детальных минералогических исследований с помощью электронного сканирующего микроскопа были обнаружены субмикронные инкапсулированные формы золота во всех породообразующих и рудных минералах.

Субмикронные формы благородного металла имеют отличный



Содержание, %

Массовое:

C - 8,38

O - 13,2

S - 6,58

Fe - 9,2

Ag - 18,52

Au - 44,11

Атомное:

C - 30,48

O - 36,06

S - 8,97

Fe - 7,2

Ag - 7,5

Au - 9,79

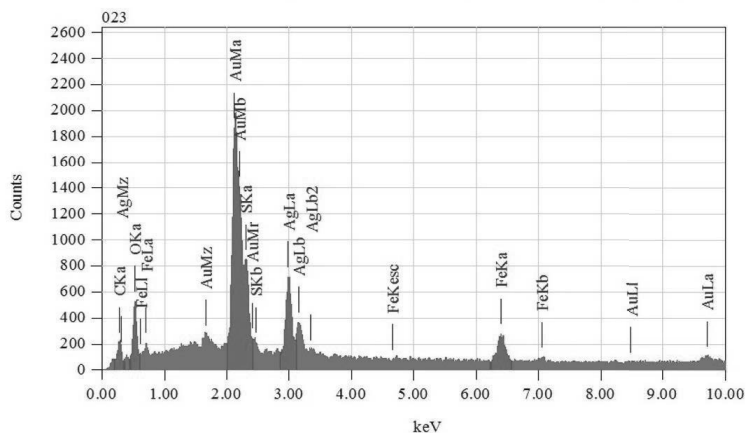


Рис. 1. Микрофотография зерна пирита, содержащего рассеянную вкрапленность золота (сделана с использованием электронного сканирующего микроскопа «JEOL 6000 Plus»)

Fig. 1. Micrograph with scanning electron microscope of a pyrite grain containing scattered gold phenocrysts. (made using an electron scanning microscope «JEOL 6000 Plus»)

Таблица 1

**Характеристика зерен с включениями субмикронного золота в различных минералах пробы кварц-полевошпатовых метасоматитов по диоритам месторождения Делькен**  
**Characteristics of grains with submicron gold inclusions in various minerals of quartz-feldspar metasomatite assay from diorites of the Delken deposit.**

№	Минерал	Включения	Золото
1	Серицит, Полевые шпаты	Арсенопирит, Торнебомит (Ce,La,...) $3(\text{SiO}_4)[\text{OH}]$ ; пирит; самородная медь	Au присутствует в виде включений менее 0,8 мкм
2	Гематит	Пирит, арсенопирит	Au с примесью Ag и As присутствует в виде включений размером менее 1 мкм
3	Пирит	Лимонит, полевые шпаты, арсенопирит, монацит, интерметаллид (Sn5,Cu1,6,Ni5) галенит	Au с примесью Ag присутствует в виде включений размером менее 1 мкм
4	Кварц	Вольфрамит, включения самородной меди, монацит,	Au встречается менее 0,5 мкм. Чистое Au и с примесью Ag
5	Ярозит	Углеродистые образования (C-82%), монацит, пирит	Размеры менее 0,5 мкм Au

состав от более крупных форм проявления. Крупное и тонкодисперсное золото содержит не более 10% серебра по массе, а субмикронное до 40% по массе (электрум). Чаще встречается чистое золото, и не было обнаружено примеси свинца. Данные результаты говорят о том, что инкапсулированное субмикронное золото и более крупные его формы имеют разную природу проявления и, как следствие, могут обладать различными физико-химическими характеристиками [10 – 13]. Также можно предположить, что при выщелачивании золота стандартным цианированием не поддаются извлечению его субмикронные инкапсулированные формы (они же и коллоидные). По результатам ранее проведенного эксперимента методом прямого цианирования не извлекаются 10 – 15% ценного компонента, что составляет в среднем 3 г/т с учетом содержания золота 31,24 г/т по данным химического анализа. Далее был проведен сравнительный эксперимент с извлечением золота методом горячего цианирования и уменьшением крупности материала до 40 мкм.

### **Результаты извлечения золота методом горячего цианирования**

В табл. 2 представлены результаты извлечения золота методом горячего цианирования.

Извлечение золота из пробы месторождения Делькен составило более 97%. Высокие показатели извлечения получены в результате уменьшения крупности минеральных частиц при тонком измельчении до 40 мкм и повышения температуры цианидного раствора. За счет этого удается преодолеть их относительную упорность и сравнительно просто обеспечить практически полное извлечение золота. При тонком измельчении появляется дополнительная микротрещиноватость и пористость кристаллических решеток, происходит микроагрегация золота. Рост температуры пульпы повышает не только интенсивность растворения золота и мешающего его извлечению серебра (входящего в состав золотин), но и приводит к образованию полисульфидов, сульфатов и роданидов при взаимодействии соответственно цианида и растворен-

Таблица 2

**Извлечение золота методом горячего цианирования**  
**Recovery of gold by hot cyanidation**

Название пробы	Исходное содержание Au, г/т	Выход в жидкую фазу Au, г/т	ε Au, %
Кварц-полевошпатовые метасоматиты по диоритам (Делькен )	31,24	30,54	97,76

ного кислорода с серой сульфидных минералов. При этом такие соединения серы переходят в жидкую фазу, обеспечивая доступ цианидного комплекса к золоту, причем особо тонкие инкапсулированные в решетку сульфидов и арсенопирита частицы золота могут образовывать с такими соединениями первичные растворимые комплексы.

### Выводы

Руда месторождения Делькен — кварц-полевошпатовые метасоматиты по диоритам, содержит, помимо сростков золота, связанного с кварцем, рассеянную вкрапленность благородного металла с размером частиц в диапазоне от 100 нм до 1 мкм, присутствующую во всех рудообразующих минералах.

Были получены высокие показатели извлечения золота методом горячего цианирования при тонком измельчении до 40 мкм — более 97%.

Учитывая высокое содержание благородного металла в руде и ее упорность для стандартного цианидного выщелачивания, можно сделать выводы, что тонкое измельчение материала и повышение температуры при цианировании с последующей сорбцией будут эффективными для применения в промышленном масштабе. При переработке такого типа руды целесообразно будет использовать предварительное гравитационное обогащение и автоклавное выщелачивание, исключающее внешний выход паров синильной кислоты.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Секисов А. Г., Зыков Н. В., Королев В. С. Дисперсное золото: Геологические и технологические аспекты. — М.: Горная книга, 2012. — 224 с.
2. Шумилова Л. В. Геолого-технологическая классификация золотосодержащих руд с дисперсными формами нахождения металла // Горный информационный аналитический бюллетень. — 2009. — №4. — С.215–219
3. Воробьев А. Е., Верчеба А. А., Требесси с. Основные наноформы золота месторождений и техногенного минерального сырья // Разведка и Охрана недр. —2015. — № 4. — С. 21–25 ISSN: 0034–026X
4. Сазонов А. М., Звягина Е. А., Леонтьев С. И., Вульф М. В., Полева Т. В., Чекушин В. С., Олейникова Н. В. Ассоциации микро- и наноразмерных обособлений благороднометалльного комплекса в рудах // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. — 2008. — №1. — С.17–32
5. Лаврик А. В., Лаврик Н. А., Рассказова А. В., Литвинова Н. М., Конарева Т. Г. Минералого-технологические особенности золота месторождения Делькен (Хабаровский край) // Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения — 2020): материалы Между-

народной конференции, Апатиты, 21–26 сен. 2020 г. — Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2020. — С. 79–81. — ISBN 978–5–91137–430–3

6. Лаврик А. В., Лаврик Н. А., Рассказова А. В., Литвинова Н. М., Конарева Т. Г. Исследование комплексной золотосодержащей руды месторождения Делькен и оценка ее технологических свойств // Проблемы недропользования. 2020. № 2 (25). С. 17–23. — DOI: 10.25635/2313–1586.2020.02.017. — eISSN: 2313–1586

7. Лаврик А. В., Рассказова А. В., Копылова А. Е., Лаврик Н. А., Исследование способов переработки золотосодержащей руды месторождения Делькен // Проблемы недропользования. 2021. № 1 (28). С. 28–34. — DOI: 10.25635/2313–1586.2021.01.028. — eISSN: 2313–1586.

8. Фазлуллин М. И., 2001. Кучное выщелачивание благородных металлов. Москва: Издательство Академии горных наук, 647 с.


9. Шумилова Л. В. Причины технологической упорности золотосодержащих руд с нановключениями металла при цианировании // Горный информационный аналитический бюллетень. — 2009. — № 4. — С. 220–223.

10. Прохоров К. В. Центр коллективного пользования «Центр исследования минерального сырья» / К. В. Прохоров, А. В. Гладырь, М. И. Рассказов // Горная промышленность. — 2020. — № 4. — С. 120–124. — DOI: <http://dx.doi.org/10.30686/1609–9192–2020–4–120–124>. — ISSN: 1609–9192.

11. Pokrovski, *Gleb S.*, Kokh, *Maria A.*, Proux, Olivier, Hazemann, Jean-Louis, Bazarkina, *Elena F.*, Testemale, Denis, Escoda, Celine, Boiron, Marie-Christine, Blanchard, Marc, Aigouy, Thierry, Gouy, Sophie, de Parseval, Philippe, Thibaut, Michel. The nature and partitioning of invisible gold in the pyrite-fluid system // *Ore geology reviews*. — 2019. Vol. 109. — pp. 545–563

12. Taylor, RD, Monecke, T, Reynolds, TJ, Formation mechanisms of quartz veins in orogenic gold deposits: insights from Grass valley, California, USA.// *Life with ore deposits on Earth, proceedings of the 15th SGA biennial meeting*. — 2019. — Vols 1–4 –.2019. — pp. 788–79.

13. Alfonso P., Anticoi H., Yubero T., Bascompta M., Henao, L., Garcia-Valles., M., Palacios S., Yanez J. The Importance of Mineralogical Knowledge in the Sustainability of Artisanal Gold Mining: A Mid-South Peru Case // *MINERALS*. –2019. — Vol. 9 (6). — № 345. DOI: 10.3390/min9060345

14. Feng HX., Shen P., Pan HD., Cao C., Seitmuratova E. Geological characteristics and occurrence of gold in the large Nurkazgan gold-rich porphyry copper deposit, Kazakhstan *Acta petrologica sinica*. — 2018. — Vol. 34 (3). — pp. 763–784. 

## REFERENCES

1. Sekisov A. G., Zykov N. V., Korolev V. S. *Dispersnoe zoloto: Geologicheskie i tekhnologicheskie aspekty* [Dispersed gold: Geological and technological aspects], Moscow, Mining book, 2012, 224 p. [In Russ]

2. Shumilova L. V. Geological and technological classification of gold-bearing ores with dispersed forms of metal. *MIAE. Mining Inf. Anal. Bull.* 2009, no. 4. pp.215–219. [In Russ]

3. Vorobyev A. E., Vercheba A. A., Trebessy s. Main nanofoms of gold deposits and technogenic minerals. *Exploration and Subsoil Protection*. 2015, Vol. 4, pp. 21–25, ISSN: 0034–026X. [In Russ]

4. Sazonov A. M., Zvyagina E. A., Leontiev S. I., Wolf M. V., Poleva T. V., Chekushin V. S., Oleinikova N. V. Associations of micro- and nano-sized segregations of the noble-metal complex in ores. *Journal of the Siberian Federal University. Technique and technology*. 2008, Vol. 1, pp. 17–32. [In Russ]

5. Lavrik A. V., Lavrik N. A., Rasskazova A. V., Litvinova N. M., Konareva T. G. *Mineralogo-tekhnologicheskie osobennosti zolota mestorozhdeniya Del'ken (Habarovskij kraj)* [Mineralogical and technological features of gold deposits Delken (Khabarovsk

region)]. Innovacionnyye processy kompleksnoj pererabotki prirodnogo i tekhnogennogo mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2020): materialy Mezhdunarodnoj konferencii, Apatity, 21–26 sen. 2020. pp. 79–81. ISBN 978–5–91137–430–3. [In Russ]

6. Lavrik A. V., Lavrik N. A., Rasskazova A. V., Litvinova N. M., Konareva T. G. Study of complex gold-bearing ore of Delken deposit and evaluation of its technological properties. *Problems of Subsoil Use*. 2020, Vol. 2 (25), pp. 17–23, DOI: 10.25635/2313–1586.2020.02.017. eISSN: 2313–1586. [In Russ]

7. Lavrik A. V., Rasskazova A. V., Kopylova A. E., Lavrik N. A., Study of methods of processing gold-bearing ore of Delken deposit. *Problems of Subsoil Use*. 2021, Vol. 1 (28), pp. 28–34. DOI: 10.25635/2313–1586.2021.01.028. [In Russ]

8. Fazlullin M. I. *Kuchnoe vyshchelachivanie blagorodnyh metallov* [Heap leaching of noble metals]. Moscow, Academy of Mining Sciences, 2011, 647 p. [In Russ]

9. Shumilova L. V. Reasons of technological tenacity of gold-bearing ores with metal nano inclusion in cyanidation. Moscow, *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2009, Vol. 4, pp. 220–223. [In Russ]

10. Prokhorov K. V., Gladyr A. V., Rasskazov A. V. Center of collective use “Center of Mineral Resources Research Center. *Gornaya Promyshlennost'*. 2020, Vol. 4, pp. 120–124. DOI: <http://dx.doi.org/10.30686/1609–9192–2020–4–120–124>. ISSN: 1609–9192. [In Russ]

11. Pokrovski Gleb S., Kokh Maria A., Proux Olivier, Hazemann Jean-Louis, Bazarkina Elena F., Testemale Denis, Escoda Celine, Boiron Marie-Christine, Blanchard Marc, Aigouy Thierry, Gouy Sophie, de Parseval Philippe, Thibaut Michel. The nature and partitioning of invisible gold in the pyrite-fluid system. *Ore geology reviews*. 2019, Vol. 109, pp. 545–563

12. Taylor R. D., Monecke T., Reynolds T. J., Formation mechanisms of quartz veins in orogenic gold deposits: insights from Grass valley. *Life with ore deposits on Earth, proceedings of the 15th SGA biennial meeting, California, USA*. 2019, Vols 1–4, pp. 788–79.

13. Alfonso P., Anticoi H., Yubero T., Bascompta M., Henao L., Garcia-Valles. M., Palacios S., Yanez J. The Importance of Mineralogical Knowledge in the Sustainability of Artisanal Gold Mining: A Mid-South Peru Case. *MINERALS*. 2019, Vol. 9 (6). no. 345. DOI: 10.3390/min9060345

14. Feng HX., Shen P., Pan HD., Cao C., Seitmuratova E. Geological characteristics and occurrence of gold in the large Nurkazgan gold-rich porphyry copper deposit. *Kazakhstan Acta petrologica sinica*. 2018, Vol. 34 (3), pp. 763–784.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лаврик Александра Викторовна<sup>1</sup> – мл. науч. сотр., аспирант, alexalavrikxx@gmail.com;  
Конарева Татьяна Геннадьевна<sup>1</sup> – науч. сотр., alexalavrikxx@gmail.com, konar\_tat@mail.ru;

Рассказова Анна Вадимовна<sup>1</sup> – канд. техн. наук, вед. науч. сотр., annbot87@mail.ru;  
<sup>1</sup> Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51, Россия.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lavrik A. V.<sup>1</sup>, Junior Researcher, post-graduate student, alexalavrikxx@gmail.com;

Konareva T. G.<sup>1</sup>, Researcher, konar\_tat@mail.ru;

Rasskazova A. V.<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, annbot87@mail.ru;

<sup>1</sup> Mining Institute of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, 51, Turgeneva St., Khabarovsk, Russia.

Получена редакцией 18.07.2021; получена после рецензии 25.10.2021; принята к печати 10.11.2021.

Received by the editors 18.07.2021; received after the review 25.10.2021; accepted for printing 10.11.2021.