

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Геология и полезные ископаемые

УДК 549.283+550.812.1+553.411 (571.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-511-526>

Оригинальная статья

Самородное золото россыпей Эвотинского района (Алдано-Становой щит): минералого-геохимические особенности и потенциальные коренные источники

А. И. Журавлев^{✉,1}, А. В. Округин¹, Б. Б. Герасимов¹, Е. Е. Лоскутов¹,
А. И. Иванов¹, М. С. Иванов¹, А. А. Кравченко¹, А. М. Исмагулов²

¹Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

²Курчатовский институт, г. Москва, Российская Федерация

✉Ai.zhuravlevgeo@gmail.com

Аннотация

Эвотинский рудно-россыпной район (ЭРР) расположен в центральной части Алдано-Станового щита. В пределах площади известно большое количество золотоносных россыпей, многие из которых на данный момент отработаны. Несмотря на то что район находится в сфере геологического изучения с 30-х годов прошлого столетия, коренные источники для большинства россыпей не установлены. С использованием традиционных минералого-геохимических методов и LA-ICP-MS-анализа проведено исследование россыпного золота ЭРР. Установлено, что самородное золото представлено частицами размером от 0,1 до 1,2 мм преимущественно цементационных, трещинных и интерстициальных форм. Степень окатанности зерен различна. Структурное травление позволило выявить разнофазное, зернистое, концентрически и неяснозональное внутреннее строение золотинок. Кроме этого, отмечаются структуры гранулирования и двойникования. LA-ICP-MS-анализ показал присутствие в частицах золота широкого спектра элементов микропримесей. Предполагается, что основными коренными источниками россыпного золота служили рудные проявления, аналогичные месторождению им. П. Пинигина, а также сульфидные и эпиптермальные, связанные со щелочным мезозойским магматизмом, которые широко распространены в Центрально-Алданском рудном районе. Не исключается возможность поступления золота из минерализаций, связанных с порфировыми системами и железорудными месторождениями. Присутствие в россыпях частиц рудного облика свидетельствует о близости коренных источников и повышает потенциал территории на обнаружение не выявленных до настоящего времени рудных проявлений.

Ключевые слова: самородное золото, россыпь, минералогия, типоморфизм, LA-ICP-MS, Эвотинский рудно-россыпной район, Алдано-Становой щит

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания НИР ИГАБМ СО РАН 2024 (проект № FUG-2024-0006).

Для цитирования: Журавлев А.И., Округин А.В., Герасимов Б.Б., Лоскутов Е.Е., Иванов А.И., Иванов М.С., Кравченко А.А., Исмагулов А.М. Самородное золото россыпей Эвотинского района (Алдано-Становой щит): минералого-геохимические особенности и потенциальные коренные источники. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(4):511–526. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-511-526>

Native gold from placers of the Evotinskii region (Aldano-Stanovoy Shield): mineralogical and geochemical features, and possible primary sources

Anatolii I. Zhuravlev^{✉,1}, Alexander V. Okrugin¹, Boris B. Gerasimov¹,
Evgeniy E. Loskutov¹, Alexey I. Ivanov¹, Michil S. Ivanov¹,
Alexander A. Kravchenko¹, Artem M. Ismagulov²

¹Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation

²Kurchatov Institute, Moscow, Russian Federation

✉Ai.zhuravlevgeo@gmail.com

Abstract

The Evotinskii Ore and Placer Region (EOR) is located in the central part of the Aldano-Stanovoy Shield and is characterized by a significant presence of gold-bearing placers, many of which have undergone extensive mining activities. Despite geological investigations that have been conducted since the 1930s, the main sources of numerous placers remain largely unidentified. This study employed traditional mineralogical and geochemical methods, along with LA-ICP-MS analysis, to investigate placer gold within the Evotinskii Ore and Placer Region. The findings indicate that native gold within the placers of the EOR is predominantly represented by particles measuring between 0.1 and 1.2 mm, which primarily exhibit forms of cementation, fracture, and interstitial characteristics. The degree of roundness varies, and high-fineness shells and intergranular high-fineness veins are not uncommon. Structural etching revealed a multi-phase, granular, concentric, and vaguely zonal internal structure of the native gold. Furthermore, granulation and twinning structures were also identified. The LA-ICP-MS analysis of the native gold from the placers indicated a diverse array of trace element impurities within the particles. These extensive investigations suggest that the primary sources of placer gold are likely to be ore occurrences similar to the P. Pinigin deposit, as well as sulfide and epithermal occurrences associated with alkaline Mesozoic magmatism, which are prevalent in the Central-Aldan ore region. The possibility of a certain amount of gold originating from mineralizations associated with porphyry systems and iron ore deposits cannot be excluded. The discovery of ore-like particles may signify the proximity of bedrock sources and enhances the potential of the region for the discovery of previously unidentified ore occurrences.

Keywords: native gold, placer, mineralogy, typomorphism, laser ablation, Evotinskii ore and placer region, Aldano-Stanovoy shield

Funding. This study was conducted within the framework of the state research assignment for the Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS (project no. FUG-2024-0006).

For citation: Zhuravlev A.I., Okrugin A.V., Gerasimov B.B., Loskutov E.E., Ivanov A.I., Ivanov M.S., Kravchenko A.A., Ismagulov A.M. Native gold from placers of the Evotinskii region (Aldano-Stanovoy Shield): mineralogical and geochemical features, and possible primary sources. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(4):511–526. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-511-526>

Введение

Крупнейшим и наиболее хорошо изученным золоторудным районом Алданского щита является Центрально-Алданский рудный район (ЦАРР). В районе известны многочисленные россыпные и коренные месторождения золота, геологическому строению которых посвящен ряд работ [1–3]. Южнее ЦАРР расположен Эвотинский рудно-россыпной район (ЭРР) с большим количеством золотоносных россыпей. Геологическая разведка месторождений на территории района проводилась многократно и преимущественно была направлена на поиски месторождений железа, графита, флогопита, апатита, урана и др. Поиски

ски золоторудных объектов привели к открытию лишь золоторудного месторождения им. П. Пинигина, локализованного в докембрийских metabазитах [4, 5]. Таким образом, несмотря на длительную историю промышленной отработки и геологического изучения района, сведения о типоморфизме самородного золота весьма скудны, а коренные источники для большинства россыпей не установлены.

Изучение типоморфизма россыпного золота широко применяется для локализации коренных источников и выявления их рудно-формационных типов [6–12] и др. Проведенные в последние годы исследования частиц самородного золота при

помощи ICP-MS-анализа показали различие в содержаниях элементов микропримесей в золоте разных рудно-формационных типов руд [13–15]. Схожие результаты получены в работах [16–18] при использовании LA-ICP-MS-анализа, основным преимуществом которого, в сравнении с ранее упомянутым, является локальный пробоотбор, исключающий полную деструкцию образца. Также метод был использован при поиске возможных коренных источников россыпного золота в других регионах [19–21].

В публикации приводятся результаты исследования минералого-геохимических особенностей россыпного золота Эвотинского рудно-россыпного района, в том числе LA-ICP-MS-анализа, выполненного с целью определения рудно-формационных типов возможных коренных источников и оценки перспектив территории на обнаружение рудной минерализации.

Материалы и методы

Изучено самородное золото из аллювиальных отложений ЭРР. Промывка осуществлялась ручным методом на бутаре с доводкой на промывочном лотке, объем пробы 0,5 м³. Отбор проб производился из аллювиальных отложений на косах, отмелях, перекатах, глубина отбора составляла до 1,5 м. Гранулометрическое изучение проводилось при помощи набора минералогических сит, размер ячеек которых соответствует классам гранулометрической шкалы и составляет: +2 мм, 1–2 мм, 0,5–1 мм, 0,25–0,5 мм и –0,25 мм. Мономинеральная фракция самородного золота выделялась вручную с использованием бинокулярного микроскопа. Изучение морфологических особенностей частиц самородного золота проводилось под бинокулярным микроскопом, затем зерна были сфотографированы на электронном микроскопе JEOL JSM-6840LV (Токио, Япония). На следующем этапе из частиц золота были изготовлены препараты (эпоксидные шашки) и отполированы методом безрельефного полирования. Далее выполнено изучение минералов микровключений в золоте на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6840LV с энергодисперсионным спектрометром Energy 350 Oxford Instruments (Abington, UK). Количественный анализ и обработка результатов выполнены с использованием метода ХРР для коррекции матричных эффектов при проведении количественного микроанализа на программном обеспече-

нии Software INCA Energy. Параметры съемки: ускоряющее напряжение $U = 20$ кВ, сила тока $I = 1,07$ нА, время установления спектра при количественной оптимизации на кобальте и образцах 7 с. Предел обнаружения основных элементов – 0,2–0,8 % и 1 % для более «тяжелых» элементов. Пробность определена на микрозондовом волновом анализаторе Camebax Micro фирмы Cameca с параметрами: ускоряющее напряжение $U = 20$ кВ, сила тока $I = 10$ нА, диаметр пучка $d = 0,5$ мкм. Измерения проводились в центральной и краевой частях для выявления высокопробных облочков. Анализы периферийных частей золотин не использовались в вычислениях. Аналитические работы проведены в отделе физико-химических методов анализа Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН (аналитик Н.В. Христофорова).

Исследование содержания элементов микропримесей в самородном золоте при помощи LA-ICP-MS-анализа выполнено на квадрупольном масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Elan DRC-e (Perkin Elmer, США), оснащенный системой лазерной абляции New wave research NWR-213 (ESI, США). С целью исключения возможности попадания в зону пробоотбора минеральных микровключений анализируемая область выбиралась заранее во время изучения полированных срезов частиц на сканирующем электронном микроскопе. Измерения проводились с параметрами: длина волны 213 нм, мощность лазерного луча – 5 Дж/см². Скорость потока газа носителя (He) составляла 0,5 дм³/мин. Диаметр пятна лазерного луча – 80 мкм. Параметры масс-спектрометра: мощность частотного генератора – 1250 Вт, расход плазмообразующего газа (Ar) составлял 18 дм³/мин. Градуировку проводили по твердым стандартным образцам NIST SRM 610, ГСО 10588-2015 Зл4а-4. Исследование состава проведено в НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, (аналитик А.М. Исмагулов). Анализ выполнен на 60 элементов. Содержание элементов рассчитаны с нормированием на 100 %. Установлено, что в самородном золоте диагностируется широкий спектр элементов микропримесей, в том числе Si, Al, Ca, Fe, REE и др. Если примеси Fe и REE в золоте известны, то обнаружение Si, Al и Ca предположительно обусловлено присутствием в зоне анализа весьма малых, оптически не диагностируемых петрогенных минеральных включений. Изучение рас-

пределения элементов микропримесей показало, что наиболее информативными для разделения популяций изучаемых частиц золота являются (предел обнаружения в ppm) – Cu (2), Bi (0,05), Sb (0,1), Sn (0,5), Pd (0,2), Pt (0,1). При статистической обработке данные, не превышающие предел обнаружения в два раза, считались равными пределу обнаружения. Внутренние структуры изучены методом многократного структурного травления раствором на основе царской водки. Морфология золотин дается по известной систематике [6], где Н.В. Петровской в рудах кроме правильных (идiomорфных) и неправильных форм предложено выделить и смешанные (или гемиидиоморфные) формы частиц. Пробность частиц самородного золота указана согласно классификации Л.А. Николаевой [10]: 999–951 ‰ – весьма высокопробное, 950–900 – высокопробное, 899–800 – средней пробности, 799–700 – относительно низкопробное, 699–400 – низкопробное или высокосеребристое (электрум), 399–100 – кюстелит, < 100 ‰ – самородное серебро.

Геология района

Эвотинский рудно-россыпной район расположен в пределах Алдано-Станового щита – крупнейшего выступа фундамента Сибирского кратона. По составу и геологической эволюции в строении щита выделяются пять террейнов [22]: Западно-Алданский гранитно-зеленокаменный террейн, Центральнo-Алданский и Восточно-Алданский супертеррейны, разделенные тектоническими меланжами. В южной части щита расположены Тындинский тоналит-трондьемитовый и Чогарский гранулит-ортогнейсовый составные террейны. В ходе мезозойской тектономагматической активизации Алдано-Становой щит интродировался широким спектром магматических пород – от ультраосновных до кислых и от субщелочных до щелочных. Магматические события этого этапа связаны с процессами орогенеза в прилегающей Монголо-Охотской складчатой области на активной южной окраине мезозойского палеоконтинента [23].

В пределах ЭРР обнажаются ультраметаморфические породы докембрийского фундамента, представленные биотит-пироксен-амфиболитовыми и силлиманит-гранат-кордиеритовыми гнейсами и сланцами с кварцитами, мраморами, кальцифированными горизонтами, прослоями и линзами (рис. 1). Докембрийские образования в разной степени гранитизированы и вмещают ин-

трузии позднеархейских – раннепротерозойских гранитов и метабазитов. Породы интенсивно дислоцированы, образуют сложную систему складок и разломов, вмещающих многочисленные и обширные дайки позднепротерозойских долеритов [5].

Геологическая история осадочного чехла на территории приведена по данным работ [22, 24, 25]. С этого периода до конца кембрия территория существовала в режиме стабильной платформы. По сохранившимся нижнекембрийским отложениям можно сделать вывод, что в этот период территория была перекрыта карбонатными осадками, мощность которых достигала 500–1000 м. С конца кембрия и до начала мезозойского времени площадь являлась частью Восточно-Сибирского континента, а именно поднятой его частью. В этот период происходили процессы длительной денудации с формированием поверхности выравнивания на карбонатных отложениях и развитием площадных, а также линейных кор выветривания. В юрский период интенсивность тектонической активности увеличилась, происходило опускание территории и в образовавшихся впадинах аккумуляровался обломочный материал, выносимый из области Станового хребта. К концу юрского периода вся площадь была перекрыта плащом терригенных отложений мощностью более километра. В это же время в северной части бассейна с формированием поднятия внедрились магматические образования монзонит-сиенитовой формации. На раннемеловом этапе завершилась эволюция магматических очагов, а продолжающиеся восходящие движения сформировали Эвотинский горст. В позднемеловое время происходило очередное денудационное выравнивание рельефа в условиях слабого воздымания территории. Предположительно до палеогена на большей части площади еще сохранялся чехол венд-кембрийских и юрских терригенно-карбонатных отложений общей мощностью в несколько сотен метров. В кайнозое на территории, вероятно, формировались обширные площадные коры выветривания, что прослеживается наличием сохранившихся кор этого времени в восточной части территории. Тектонические движения в конце кайнозоя привели к денудации перекрывающих кембрийских и юрских отложений, сохранившихся в настоящее время только на юге в Чульманской впадине, а также в виде останцов вокруг мезозойских массивов.

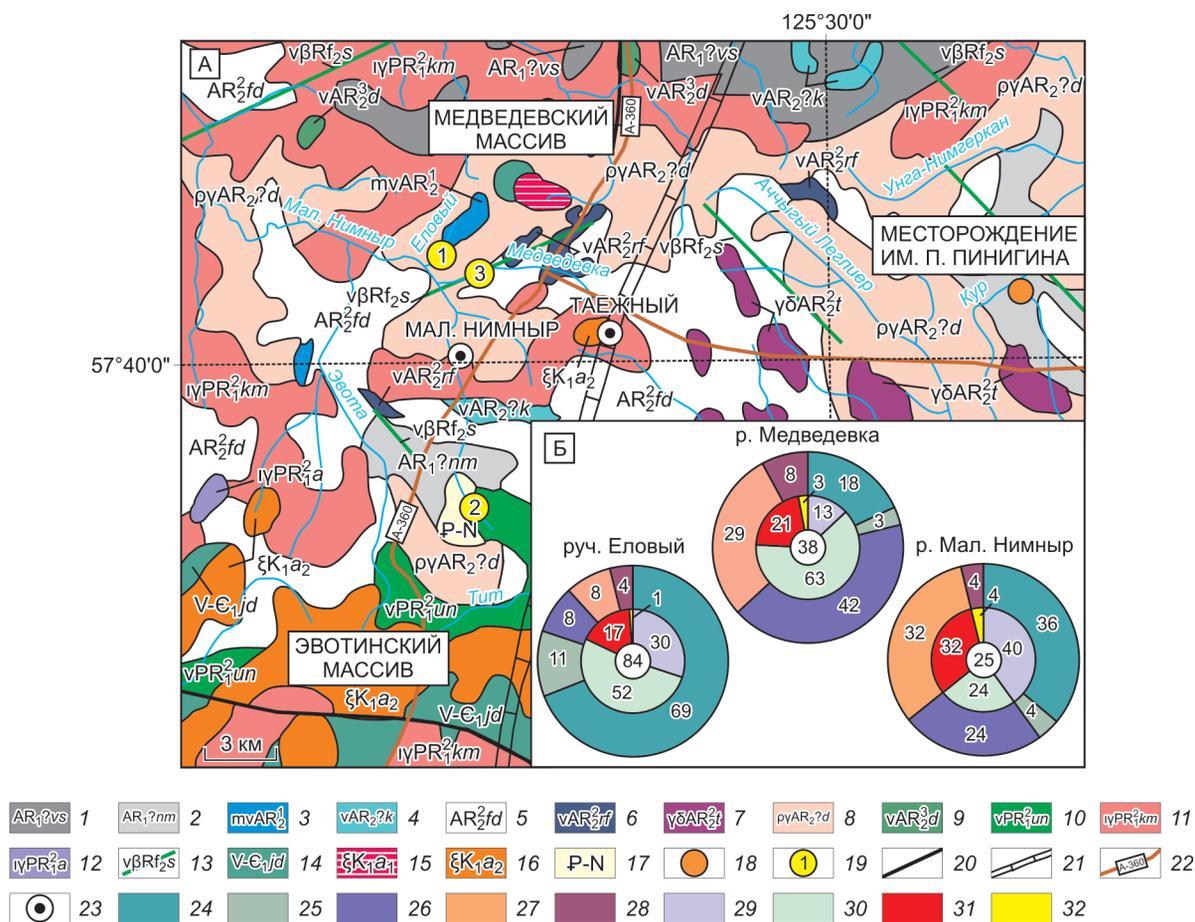


Рис. 1. Геологическая карта-схема северной части Эвотинского рудно-россыпного района (А) по [24] с дополнениями авторов, морфологические и гранулометрические особенности россыпного золота (Б). 1–13 – архейские и протерозойские комплексы кристаллического фундамента, 14 – венд-кембрийские карбонатные отложения, 15 – Медведевский массив, 16 – мезозойские сиениты, 17 – палеоген-неогеновые отложения, 18 – месторождение им. П. Пинигина, 19 – места отбора шлиховых проб (1 – руч. Еловый, 2 – верхнее течение р. Мал. Нимныр, 3 – р. Медведевка), 20 – разломы, 21 – железная дорога, 22 – федеральная трасса А-360 «Лена», 23 – населенные пункты, 24–28 – морфология частиц золота: цементационное (24), дендриты и дендритоиды (25), трещинное (26), интерстициальное (27), гемидиоморфное (28); 29–32 – гранулометрический состав, фракции, мм: <math><0,25\text{ мм}</math> (29), $0,25-0,5\text{ мм}$ (30), $1-0,5\text{ мм}$ (31), >1 мм (32)

Fig. 1. Geological map-scheme of the northern part of the Egotinskii ore and placer region (A) according to [24] with the authors' additions, as well as morphological and granulometric features of placer gold (B). 1–13 – Archean and Proterozoic complexes of the crystalline basement, 14 – Vendian-Cambrian carbonate sediments, 15 – Medvedev massif, 16 – Mesozoic syenites, 17 – Paleogene-Neogene sediments, 18 – P. Pinigin deposit, 19 – locations of sampling (1 – Elovoyi creek, 2 – upper course of the Mal. Nimnyr River, 3 – Medvedevka River), 20 – faults, 21 – railroad, 22 – Federal highway A-360 “Lena”, 23 – settlement, 24–28 – morphology of gold particles: cementation (24), dendrites and dendritoids (25), fractured (26), interstitial (27), hemidiomorphic (28); 29–32 – granulometric composition, fractions: <math><0,25\text{ мм}</math> (29), $0,25-0,5\text{ мм}$ (30), $1-0,5\text{ мм}$ (31), >1 мм (32)

Результаты

Самородное золото месторождения им. П. Пинигина. Самородное золото месторождения им. П. Пинигина изучено из пробы, отобранной из элювиальных развалов. Оно представлено частицами рудного облика размерами от 0,1 до 0,55 мм. Преобладают интерстициальные и цементационные формы, в подчиненном количестве отмечаются трещинные и гемидиоморфные (см. таблицу).

Пробность золота изменяется в диапазоне 908–1000 ‰ (см. ниже рис. 6), со значительным преобладанием частиц с пробностью более 980 ‰ (> 75 ‰), что в целом согласуется с ранее опубликованными данными [4]. В частицах наблюдается высокое содержание Cu, Bi, в единичных малое Sn, Pd (рис. 2). Содержания в золоте Sb, Pt не превышают предел обнаружения. Содержание Cu высокое, однако по максимальным значениям оно значительно ниже, чем для Рябинового месторождения.

Типоморфные особенности самородного золота северной части Эвотинского рудно-россыпного района

Typomorphic features of native gold of northern part of Evotinskii ore and placer region

Объект	Морфология, %	Размер, мм	Окатанность	Пробность, ‰	Микропримесь (LA-ICP-MS, среднее), г/г	Внутреннее строение	Минералы включения
Ручей Еловый высоко- и весьма высокопробное	Ц (85), Т (4), И (9), Г (2)	0,13–0,58	Хорошая, средняя, слабая	903–1000	Cu (710,68), Bi (12,55), Sb (0,18), Pd (40,76)	ЗР, ДВ, МЗ	Кварц, галенит, пироксен, оксиды Bi, мальдонит, пильзенит, теллурувисмутит
Ручей Еловый (низко-среднепробное)	Ц (51), Т (14), И (8), Г (5), Д (22)	0,1–1,03	Хорошая, средняя, слабая	619–888	Cu (294,89), Bi (0,18), Sb (115,73), Sn (4,46), Pd (6,2), Pt (0,11)	ЗР, РФ, НЗ, КЗ, ДВ, ГР, МЗ	Кварц, пирит, гессит (?)
Река Мал. Нимныр	Ц (36), Т (24), И (32), Г (4), Д (4)	0,12–1	Хорошая, средняя, слабая	846–1000	Cu (1016,47), Bi (0,18), Pd (0,25), Pt (0,12)	ЗР, ДВ, МЗ	Кварц, галенит, пирит
Река Медведевка (высоко- и весьма высокопробное)	Ц (23), Т (44), И (30), Г (3)	0,2–1,2	Хорошая, средняя, слабая	904–1000	Cu (798,15), Bi (0,19), Sb (0,51), Pd (2,46), Pt (0,15)	ЗР, МЗ	Кварц, оксиды Bi, галенит, пирит
Река Медведевка (низко-среднепробное)	Т (38), И (25), Г (25), Д (12)	0,24–0,72	Хорошая, средняя	744–876	Cu (131,9), Sb (380,4), Sn (39,2)	ЗР, НЗ, МЗ	Кварц, браннерит(?)
Месторождение им. П. Пинигина	Ц (36), И (43), Т (16), Г (5)	0,1–0,55	Слабая	908–1000	Cu (1027,33), Bi (146,28), Sn (0,58), Pd (0,24)	МЗ	Кварц, пироксен, леллингит, мальдонит, оксиды Bi, оксиды Fe

Примечание. Морфология: Ц – цементационное, И – интерстициальное, Т – трещинное, Г – гемиидоморфное, Д – дендриты и дендритоиды. Внутреннее строение: ЗР – зернистое, ДВ – структуры двойникования (в том числе полисинтетические), РФ – разнотазовое, НЗ – неяснозональное, КЗ – концентрически-зональное, ГР – структуры грануляции, МЗ – монозернистое.

Note. Morphology: Ц – cementation, И – interstitial, Т – fracture, Г – hemiidiomorphic, Д – dendrites and dendritoids. Inner structure: ЗР – grained, ДВ – twinned (symplectite included), РФ – intergrowth of different phases, НЗ – unclear zoned, КЗ – concentrically zonal, ГР – structures of granulation, МЗ – mono grain.

На диаграмме трехэлементного состава (рис. 3) самородное золото месторождения им. П. Пинигина формирует поле, вытянутое вдоль ребра Au-Cu*100, что обусловлено незначительной вариацией содержания серебра. Изученные нами золотины из Рябинового месторождения из-за узкого диапазона пробности (850–900 ‰) и благодаря повышенному содержанию меди (до 5 000 г/т и более) располагаются в виде тренда, параллельно грани Au-Cu*100 (см. рис. 3), который указывает на практически не меняющееся содержание примеси серебра.

Золото характеризуется монозернистым внутренним строением. Минеральные включения представлены кварцем, пироксеном, леллингитом (FeAs₂), мальдонитом (Au₂Bi), оксидами железа и висмута. Отмечаются оксиды с содержа-

нием Bi около 85 и 93 мас.%, они отнесены нами к бисмиту и сферобисмиту соответственно. Некоторые выделения, возможно, являются висмутитом. В единичных случаях фиксируются оксиды с Bi около 73 %, As – 14–15 %, которые близки по составу ателеститу (Bi₂O(AsO₄)(OH)). Единичное выделение оксида, состоящее из Bi – 66,10 %, Te – 18,43 %, отнесено нами предположительно к пинггиту (Bi₆Te₂O₁₃). Некоторые оксидные включения имеют неоднородное строение, возможно, представлены тончайшим сростанием, и результаты их анализов не позволяют достоверно диагностировать минерал. В единичных случаях обнаруживаются частицы золота с оболочкой мальдонита (рис. 4, а).

Важно отметить, что на данном месторождении наряду с массивным самородным золотом

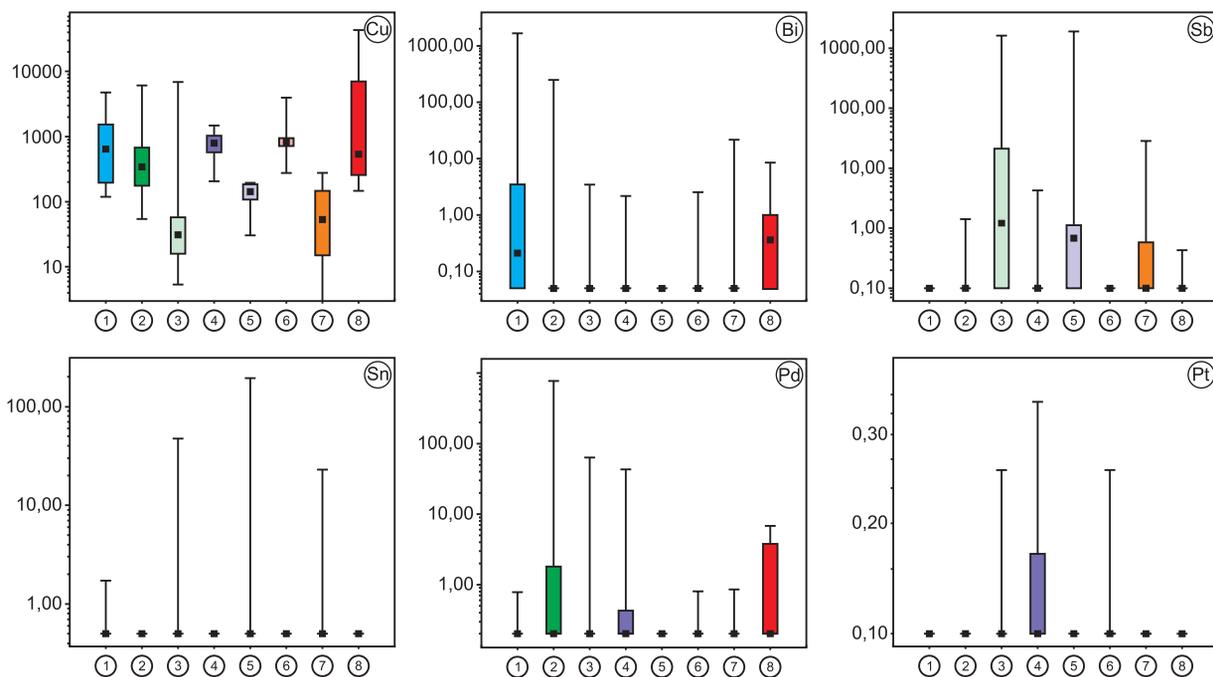


Рис. 2. Содержание элементов микропримесей (в г/т) в самородном золоте из рудных и россыпных объектов ЦАРР и ЭРР по данным LA-ICP-MS. Верхняя и нижняя границы закрашенных блоков соответствуют 75 и 25 перцентилю содержания, ответвления соответствуют максимальному и минимальному содержаниям, черный квадрат – медианное значение содержания. 1 – месторождение им. П. Пинигина, 2 – высоко- и весьма высокопробное золото руч. Еловый, 3 – низко- и среднепробное золото руч. Еловый, 4 – высоко- и весьма высокопробное золото р. Медведевка, 5 – низко- и среднепробное золото р. Медведевка, 6 – верхнее течение р. Мал. Нимныр, 7 – россыпи ЦАРР (р. Бол. Куранах, р. Селигдар, р. Юхточка), 8 – месторождение Рябиновое (ЦАРР)

Fig. 2. Content of trace elements (in ppm) in native gold from ore and placer objects of CAOR and EOR according to LA-ICP-MS analysis. Upper and lower boundaries of colored blocks correspond to 75 and 25th percentile, branches correspond to maximum and minimum, black square – median value. 1 – P. Pinigin deposit, 2 – high and very high fineness gold of the Yeloviy Creek, 3 – low and medium fineness gold of the Eloviy Creek, 4 – high and very high fineness gold of the Medvedevka River, 5 – low- and medium-high fineness gold of the Medvedevka River, 6 – upper reaches of the Mal. Nimnyr River, 7 – CAOR placers (r. Bol. Kuranakh, Seligdar and Ukhtochka), 8 – Ryabinovoye deposit (CAOR)

выявлены частицы, состоящие из вторичного золота с субграфическим внутренним строением (губчатое золото). Массивное золото характеризуется пробностью 932–1000 ‰, губчатое – 908–1000 ‰. Губчатые частицы представляют собой либо отпрепарированные каркасно-ячеистые агрегаты с пустотой в интерстициальном пространстве, либо симплектитовые сращения самородного золота и оксидов висмута (рис. 4, б).

Самородное золото массива Медведевский. Медведевский многофазовый мезозойский массив расположен в верховьях ручья Еловый (см. рис. 1) и сложен кварцевыми сиенитами, пироксен-амфиболовыми сиенитами и кварцевыми монцонитами [26]. Ивановым М.С. и Кардашевской В.Н. в измененном пироксен-амфиболовом сиените и метасоматитах впервые выявлены весьма мелкие выделения самородного золота.

Частицы золота имеют размеры от 2 до 30 мкм и изометричные реже удлиненные формы. Пробность золота варьирует в пределах 746–865 ‰ с четким пиком 800–820 ‰ (см. ниже рис. 6, з), что в целом близко пробности золота из россыпей рек Бол. Куранах и Селигдар, которые расположены вблизи месторождений лебединского и куранахского типов [8].

По данным [27], рудоносные метасоматиты Медведевского массива, содержащие сульфидную и золототеллуридную минерализацию, представлены кварц-калишпат-слюдистыми образованиями. Сульфидная минерализация в них представляет из себя вкрапленные и прожилково-вкрапленные минеральные агрегаты с пиритом, халькопиритом, сфалеритом и пирротинном. Железистые минералы окислены и замещаются (вплоть до полного замещения) гидроксидами железа, в кото-

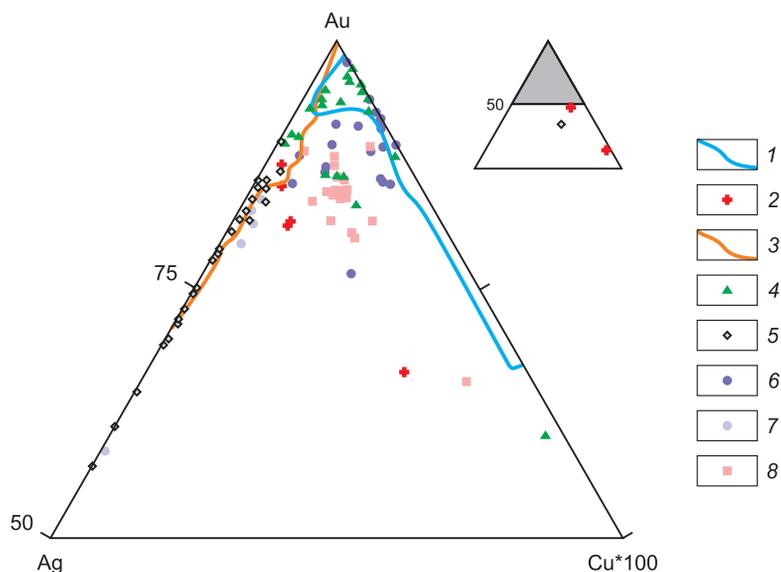


Рис. 3. Диаграмма состава самородного золота Ag-Au-Cu*100 из рудных и россыпных объектов ЦАРР и ЭРР по данным LA-ICP-MS-анализа авторов, содержание в г/т. На врезке две точки, соответствующие золоти́нам месторождения Рябиновое, и одна – руч. Еловый с повышенным содержанием Cu. 1 – месторождение им. П. Пинигина, 2 – месторождение Рябиновое (ЦАРР), 3 – россыпи ЦАРР (р. Бол. Куранах, р. Селигдар, р. Юхточка), 4 – высоко- и весьма высокопробное золото руч. Еловый, 5 – низко- и среднепробное золото руч. Еловый, 6 – высоко- и весьма высокопробное золото р. Медведевка, 7 – низко- и среднепробное золото р. Медведевка, 8 – золото верхнего течения р. Мал. Нимныр

Fig. 3. Diagram of composition of gold Ag-Au-Cu*100 from ore and placer objects of CAOR and EOR according to the authors' LA-ICP-MS analysis, content in ppm. The inset shows two particles of Ryabinovoye deposit with increased Cu content. 1 – P. Pinigin deposit, 2 – Ryabinovoye deposit (CAOR), 3 – CAOR placers (Rivers Bol. Kuranakh, Seligdar and Ukhtochka), 4 – high and very high fineness gold of the Eloviy Creek, 5 – low and medium fineness gold of the Eloviy Creek, 6 – high and very high fineness gold of the Medvedevka River, 7 – high and very high fineness gold of the Medvedevka River, 8 – gold from the upper reaches of the Mal. Nimnyr River

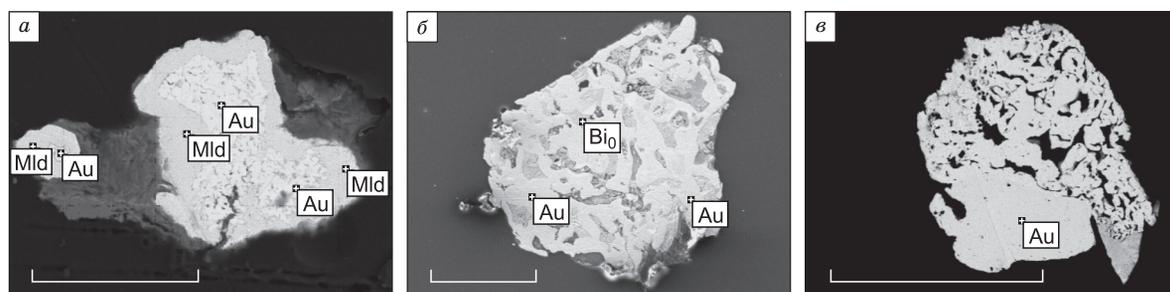


Рис. 4. Микрофотографии частиц весьма высокопробного золота на месторождении им. П. Пинигина. а – самородное золото (Au) с оболочкой мальдонита (Mld); б – симплектиты самородного золота (Au) и оксидов висмута (BiO); в – каркасно-ячеистый агрегат самородного золота (Au) с массивной центральной частью и незаполненным интерстициальным пространством. Изображения в обратно-отраженных электронах. Масштабная полоса 100 мкм

Fig. 4. Microphotographs of particles very high-fineness gold in the P. Pinigin deposit. а – gold (Au) with malдонит (Mld); б – symplectites of gold (Au) and bismuth oxides (BiO); в – framework-cellular aggregate of gold (Au) with massive central part and unfilled interstitial space. BSE images. Scale bar is 100 µm

рых встречаются зерна самородного золота и теллуридов серебра (эмпрессит?) ($AgTe$). Показано [27], что сульфидная минерализация образуется из хлоридных растворов при температурах свыше 360 °С, в то время как поздняя золо-

тотеллуридная минерализация формировалась из разбавленных хлоридных растворов при температурах выше 280 °С.

Самородное золото руч. Еловый. Самородное золото из аллювиальных отложений руч. Еловый

встречается в виде единичных знаков на лоток и характеризуется размером от 0,1 до 1,03 мм. Окатанность зерен различная. Преобладают цементационные, дендритные, интерстициальные и трещинные формы, реже отмечаются гемидиомофные частицы (см. рис. 1, б). Пробность варьирует в весьма широких пределах от 619 до 1000 ‰ (см. рис. 6). Важно отметить, что высоко- и весьма высокопробное золото характеризуется размерами 0,13–0,82 мм, низко-среднепробное 0,1–1,03 мм. Частицы с дендритными формами обнаружены только во второй группе. Степень окатанности зерен в данных группах практически одинаковая.

В высоко- и весьма высокопробном золоте отмечается повышенное содержание Cu, Bi, Pd, в единичных знаках небольшое содержание Sb (см. рис. 2). Примесь Sn и Pt не обнаружена. Низко- и среднепробное золото отличается более низким медианным содержанием Cu, Bi и повышенным – Sb, Sn. В некоторых частицах фиксируется примесь Pd и Pt. Содержание элементов (Cu, Sb, Sn) в низко- и среднепробном золоте близко к изученным в частицах из россыпей ЦАРР. На диаграмме состава самородного золота (см. рис. 3) высоко- и весьма высокопробные частицы распределены в обширной области, частично попадая в поля золота ЦАРР, месторождения им. П. Пинигина и приближаясь к составу частиц россыпи р. Мал. Нимныр. Фигуративные точки составов частиц низко- и среднепробного золота вытянуты в виде тренда, частично попадая в область составов золота россыпей ЦАРР, однако благодаря более высокому содержанию Ag линия тренда протягивается значительно дальше к вершине Ag диаграммы.

Минеральные включения в золоте представлены кварцем, пиритом, галенитом, пироксеном, оксидами висмута, теллуровисмутитом (Bi_2Te_3), пильзенитом (Bi_4Te_3), мальдонитом. Последние шесть минералов устанавливаются только в частицах с весьма высокой пробностью. В некоторых низкопробных золотилах отмечаются небольшие (максимальный размер 3×10 мкм) удлиненные, реже изометричные микровключения, состоящие из Ag, Te, Au, одна частица из Ag, Te, Au, Fe, S. Обнаружение элементов Au, Fe и S, вероятно, обусловлено тем, что микровключения имеют малые размеры и пучком электронов захватывается соседние минералы. В микровключениях всегда наблюдается преобладание Ag над Te. Наиболее представительный анализ подобно-

го выделения показывает состав (мас. %): Ag – 56,06, Te – 34,69, Au – 10,71, что примерно отвечает по составу минералу гесситу (Ag_2Te). Структурное травление золотин позволило выявить разнофазное, зернистое, концентрически- и неяснозональное внутреннее строение самородного золота. Кроме этого, отмечаются структуры гранулирования и двойникования (в том числе полисинтетическое). Более 80 % низкопробных и среднепробных частиц характеризуется развитием тонких и фрагментарных весьма высокопробных (980–1000 ‰) оболочек. На единичных частицах они полностью покрывают внешнюю поверхность или формируют лагунообразные разрастания, мощностью до 20–25 мкм (рис. 5, в, з). В некоторых золотилах отмечаются весьма высокопробные межзерновые прожилки (см. рис. 5, з).

Важно подчеркнуть, что в россыпи обнаружены золотины с субграфической структурой, аналогичные изученным золотилам месторождения им. П. Пинигина (рис. 5, д). В единичных случаях обнаруживаются массивные частицы с обособлением субграфического типа золота на периферии (рис. 5, е).

В индивидах, характеризующихся разнофазной структурой, выявлены блоки кюстелита и электрума ($\text{Ag} = 359 - 505$ ‰) в матрице с пробностью ($\text{Ag} = 690 - 726$ ‰) с четкими и иногда несколько расплывчатыми границами. В них проявлена грануляция, выражающаяся в формировании межблокового пространства, местами фрагментарно залеченного весьма высокопробным золотом. В целом в россыпи грануляция частиц проявлена по-разному. На некоторых индивидах наблюдаются начальные этапы обособления зерен с образованием небольших пустот в межзерновом пространстве (рис. 5, а), другие представляют собой значительно гранулированные агрегаты (рис. 5, б). У гранул в гранулированных частицах, а также у одиночных золотин нередко обнаруживается концентрически-зональное (см. рис. 5, б), реже многозонное строение. Концентрически-зональная структура обусловлена повышением содержания серебра от центра к краю и совпадает с контурами частиц, зерен.

Самородное золото р. Мал. Нимныр. В верхнем течении р. Малый Нимныр самородное золото изучено из техногенных отвалов. Частицы имеют размеры от 0,12 до 1 мм и по морфологическим характеристикам отличаются от рассмотренных в руч. Еловый меньшим развитием цементационных, дендритных форм, большим распространением интерстициальных и трещин-

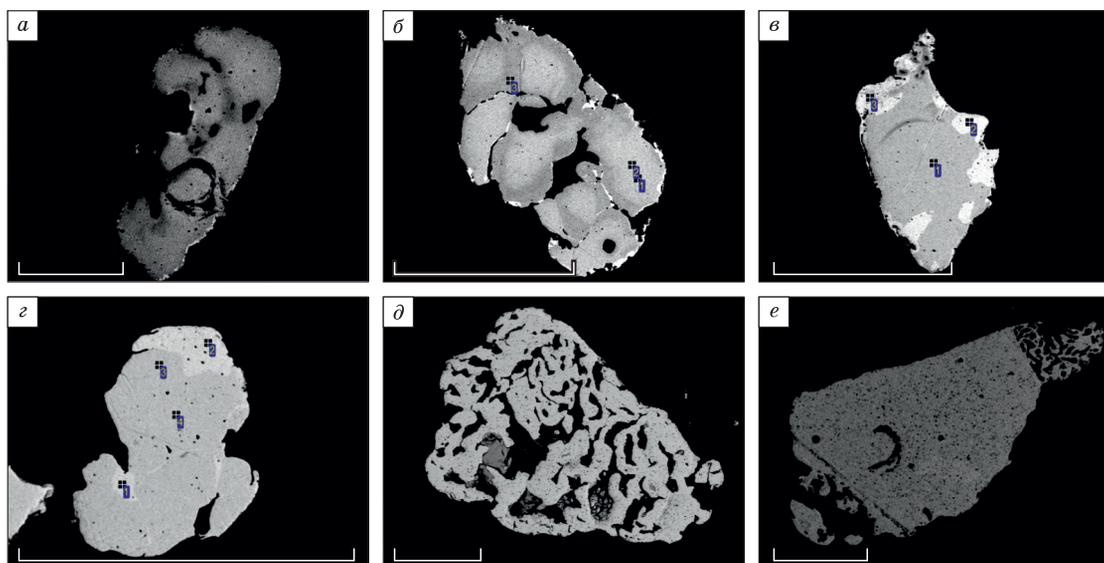


Рис. 5. Микрофотографии частиц самородного золота руч. Еловый. *а* – начальный этап грануляции зерна, *б* – глубоко гранулированная частица, *в* – фрагментарная высокопробная оболочка, *г* – фрагментарная высокопробная оболочка и межзерновые высокопробные прожилки, *д* – частица с субграфической структурой, *е* – массивная частица с субграфическим обособлением в периферийной части. Изображения в обратно-отраженных электронах. Масштабная полоса 100 мкм

Fig. 5. Microphotographs of native gold particles of the Elovyy Creek. *a* – the initial stage of grain granulation, *b* – deep granulated particle, *c* – fragmentary high-finesness shell, *г* – fragmentary very high finesness shell and intergranular veins with very high finesness, *д* – particle with a subgraphic structure, *e* – massive particle with subgraphic gold on periphery. BSE images. Scale bar 100 µm

ных (см. рис. 1, б). Окатанность большей части золота средняя и хорошая, однако во фракции менее 0,3 мм встречаются индивиды рудного облика. Пробность колеблется в относительно узком диапазоне от 846 до 1000 ‰. Все частицы золота, за исключением одной, имеют пробность выше 900 ‰ (см. рис. 6, в). В золоте определено содержание Cu, Pd, Pt, в единичных частицах фиксируется небольшое содержание Bi (см. рис. 2). На диаграмме составов самородного золота фигуративные точки за счет повышенного содержания Cu локализуются в виде самостоятельной области, тяготеющей к центральной части диаграммы (см. рис. 3). Большинство частиц крупнее 0,4 мм имеет высокопробные нередко мощные оболочки. В качестве минералов-включений обнаружены кварц, галенит, пирит. Исследование внутренней структуры показало зернистое, двойниковое строение единичных частиц.

Самородное золото р. Медведевка. Самородное золото р. Медведевка отобрано из техногенных отвалов. Оно представлено знаками с размерами от 0,2 до 1,2 мм. Окатанность большей части золотин хорошая, вместе с тем отмечаются единичные средне- и слабоокатанные

индивиды. Знаки с трещинными уплощенными формами преобладают в россыпи, реже отмечаются интерстициальные и цементационные (рис. 1, б). Дендриты и гемиидиоморфные частицы единичны. Пробность золота изменяется в широком диапазоне от 744 до 1000 ‰, с преобладанием весьма высокопробных частиц (см. рис. 6). Микровключения представлены кварцем, пиритом, галенитом, оксидами висмута. В единичной золотине 875 ‰ пробы были установлены три микровключения, наибольшее из которых имеет удлиненную форму и размеры 2 × 5 мкм. В его составе определены (мас. %): U – 33,27, Au – 24,89, Ti – 17,49, Ag – 1,92, Cd – 0,43, O – 15,17. Примесь Au и Ag, вероятно, обусловлена захватом пучком электронов вмещающей матрицы. Микровключения по составу, предположительно, отвечают браннериту (U,Ca,Ce)(Ti,Fe)₂O₆. На многих частицах вне зависимости от их пробности обнаружены весьма высокопробные оболочки редко мощностью до 50 мкм. В единичных индивидах наблюдается формирование межзерновых высокопробных прожилков. На диаграмме состава золота высоко- и весьма высокопробные частицы распределены в широкой области и частично

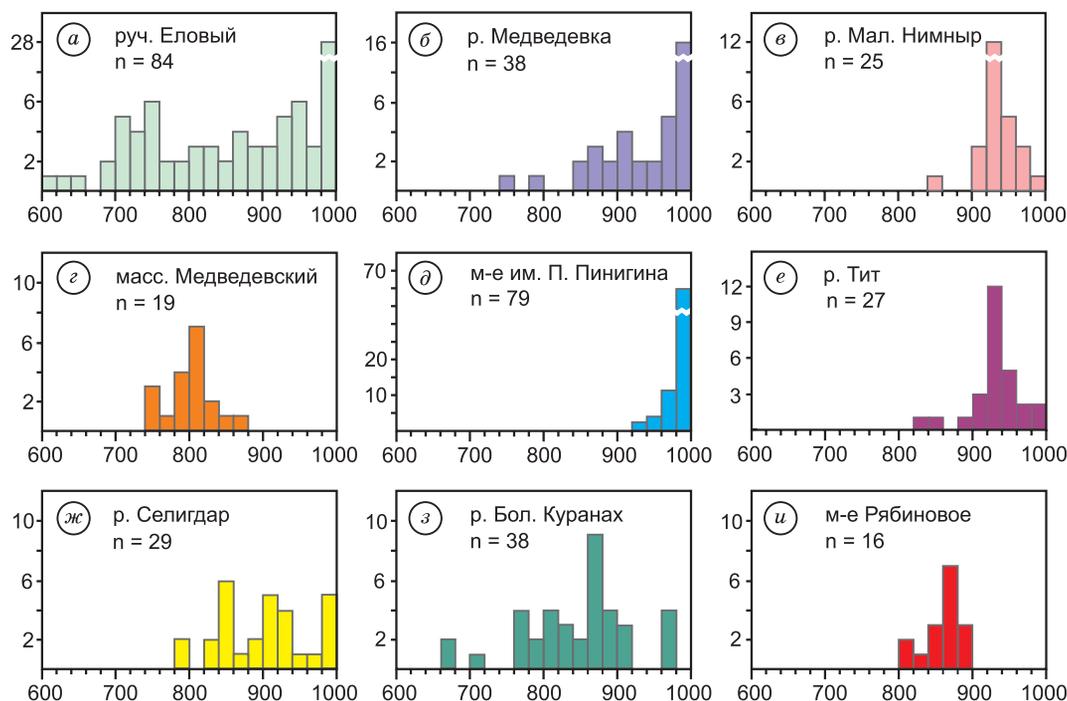


Рис. 6. Гистограммы распределения пробности самородного золота из рудных и россыпных объектов ЦАРР и ЭРР. По абсциссе указана пробность частиц, по ординате – количество знаков, n – общее количество проанализированных зерен золота. Графики е, ж, з по [8]

Fig. 6. Histograms of the distribution of native gold from ore and placer objects of CAOR and EOR. The abscissa indicates the fineness of particles, the ordinate is the number of grains, n is the total number of analyzed gold grains. Graphs e, ж, з according to [8]

входят в поле составов месторождения им. П. Пинигина (см. рис. 3). Часть фигуративных точек составов тяготеет к центральной части диаграммы, приближаясь к знакам россыпи р. Мал. Нимыр. Низкопробные знаки благодаря пониженному содержанию Си приближаются к области составов частиц россыпей ЦАРР, за исключением одной, которая приближается к частицам месторождения Рябиновое. Стоит отметить повышенное содержание Pd в высокопробных золотилах. При исследовании внутренней структуры у редких индивидов обнаруживаются зернистые и неяснозональные структуры (см. таблицу).

Обсуждение

Весьма высокопробное золото, аналогичное по текстурным особенностям золоту месторождения им. П. Пинигина, описано исследователями на золоторедкометалльных месторождениях Северо-Востока России [28, 29] и в Австралии на месторождении Мальдон [30]. Этими авторами предполагается его формирование в результате гипогенного разложения мальдонита, однако также не исключается формирование в результате плавления мальдонита в ассоциации с

минералами Vi или в процессе псевдоморфного замещения мальдонита путем сопряженной реакции растворения-пересадки [30]. Схожее золото в ассоциации с минералами Vi и Te известно в пределах рудных полей Спокойнинского рудного узла Алдано-Станового щита [31]. Не обсуждая вопросы генезиса частиц золота месторождения им. П. Пинигина, необходимо подчеркнуть, что золото характеризуется определенным, уникальным для ЭРР набором минералого-геохимических особенностей, которые, вероятно, можно рассматривать как типоморфные. Стоит отметить, что в работах по минералогии месторождения А.А. Кравченко с соавторами [4] изучено самородное золото в тонком сростании с самородным висмутом, однако оксидов висмута им не описано, очевидно, их формирование происходило в зоне окисления.

Таким образом, высокопробное золото в россыпях ЭРР с субграфическими структурами и массивное с монозернистым строением, характеризующиеся повышенным содержанием элементов микропримесей Си, Vi, ассоциацией с минералами висмута, вероятно, сформированы в коренных источниках, близких по геохимической

специализации рудам месторождения им. П. Пинигина.

Самородное золото низкой и средней пробыности россыпи руч. Еловый нередко имеет дендритные формы и ассоциирует с кюстелитом. По диапазону вариации пробыности, схожим минеральным парагенезисам, а также пространственной близости, вероятно, имеет генетическую связь с сульфидным и золототеллуридным оруденениями, выявленными в пределах Медведевского массива [27]. Также данные частицы по содержанию элементов микропримесей близки золоту, распространенному в пределах россыпных месторождений ЦАРР, что подтверждается положением фигуративных точек на диаграмме составов (см. рис. 3).

Гетерофазная природа низкопробных частиц золота, обнаруженных в руч. Еловый, вероятно, обусловлена колебаниями степени пересыщения растворов при их росте в близповерхностных условиях [32]. Обогащение периферии гранулированных зерен и самостоятельных частиц серебром (концентрическая зональность, подчиненная формам зерен) может быть интерпретировано как признак термального метаморфизма золота [7] и его эндогенных преобразований [6]. Формирование подобного «сложного» в структурном отношении золота, возможно, связано с процессами многоэтапного становления Медведевского мезозойского массива.

Высокопробные частицы россыпи верхнего течения р. Мал. Нимныр имеют специфический комплекс типоморфных признаков, отличный от золота изученных россыпей: химический состав, набор примесных элементов, отсутствие ветвистопетельчатых текстур и ассоциации с минералами висмута. В качестве потенциальных коренных источников для данного золота могут рассматриваться золотоносные породы месторождений и проявлений железа, графита, флогопита и урана рассмотренного района, связанные с рассеянной сульфидной минерализацией в виде пирротина, пирита, халькопирита, галенита [33]. Следует подчеркнуть, что в непосредственной близости расположено крупное железорудное месторождение Таежное.

Минералого-геохимические особенности золота россыпи р. Медведевка указывают на его поступление в россыпь из различных коренных источников. Единичные частицы, ассоциирующие с минералами Bi , вероятно, имеют генетическую связь с рудными проявлениями, ана-

логичными месторождению им. П. Пинигина. Большая часть изученных высоко- и весьма высокопробных зерен по содержанию элементов Cu , Pd и Pt , расположению фигуративных точек на диаграмме составов, схожим внутренним структурам, возможно, имеет рудно-формационный тип источника, аналогичный предполагаемым для россыпи р. Мал. Нимныр. Однако золото данной россыпи, вероятно, имеет более длительную историю нахождения в условиях современного россыпеобразования, что выражается в наличии более мощных коррозионных оболочек, присутствии высокопробных межзерновых прожилков и в среднем лучшей окатанности.

Микровключения, предположительно отвечающие по составу браннериту, возможно, могут указывать на формирование данной частицы в минерализованных зонах, схожих с эльконским типом оруденения. Перспективность района на обнаружения минерализации подобного типа указывалась Молчановым с соавторами [33].

Повышенное содержание Cu и Pd в некоторых частицах руч. Еловый и Медведевка, близкое к изученному на месторождении Рябиновое, возможно, указывает на связь этих индивидов с порфировыми системами.

Обнаруженная на многих золотилах фрагментарная, местами относительно мощная (до 50 мкм) высокопробная оболочка и межзерновые высокопробные прожилки, по всей видимости, отражают этап их пребывания в зоне окисления, предположительно, формировавшейся в кайнозойский период и денудированной к настоящему времени.

Данные, полученные при помощи LA-ICP-MS-анализа, показывают, что самородное золото, сформированное в близповерхностных условиях, характеризуется определенным набором и содержанием элементов микропримесей, однако при сравнительном анализе с частицами, предположительно сформированными в иных коренных источниках, диагностируется наложение концентраций некоторых элементов. Таким образом, использование результатов данного анализа в отрыве от всего комплекса традиционных минералого-геохимических методов исследования самородного золота, вероятно, может привести к ошибочным генетическим построениям.

Заключение

Результаты проведенных комплексных минералого-геохимических исследований самородного

золота ЭРР позволяют предположить, что коренными источниками для рассмотренных россыпных проявлений и месторождений являлись руды различных формационных типов.

Основными источниками, по мнению авторов, служили рудные проявления, аналогичные месторождению им. П. Пинигина, а также сульфидные и эпитермальные, связанные со щелочным мезозойским магматизмом, которые широко распространены в Центрально-Алданском рудном районе. Кроме этого, не исключается вероятность поступления определенного количества металла из точек или зон минерализаций, связанных с порфировыми системами и железорудными месторождениями.

Исследование россыпного самородного золота с использованием LA-ICP-MS-анализа позволило получить дополнительные геохимические данные, способствующие определению возможных коренных источников россыпей. Вместе с тем, во избежание возможных ошибочных генетических построений результаты данного анализа, по нашему мнению, необходимо применять в комплексе с традиционными минералого-геохимическими методами изучения россыпного золота.

Некоторая часть изученного золота имеет длительную историю нахождения в экзогенных условиях (палеороссыпи или коры выветривания), что отражено в их внутреннем строении в виде образования мощных высокопробных оболочек и межзерновых весьма высокопробных прожилков. Обнаружение наряду с этим самородного золота рудного облика, вероятно, свидетельствует о близости коренных источников и повышает потенциал территории на обнаружение не выявленных до настоящего времени рудных проявлений.

Список литературы / References

1. Ветлужских В.Г., Казанский В.И., Кочетков А.Я. Золоторудные месторождения Центрального Алдана. *Геология рудных месторождений*. 2002;44(6):467–499. Vetluzhskikh V.G., Kazansky V.I., Kochetkov A.Ya. Gold ore deposits of the Central Aldan. *Geology of Ore Deposits*. 2002;44(6):467–499. (In Russ.)
2. Кочетков А.Я. Мезозойские золотоносные рудно-магматические системы Центрального Алдана. *Геология и геофизика*. 2006;47(7):850–864. Kochetkov A.Ya. Mesozoic ore-bearing ore-magmatic systems of Central Aldan. *Geology and Geophysics*. 2006;47(7):850–864. (In Russ.)
3. Максимов Е.П., Уютов В.М., Никитин В.М. Центрально-Алданская золото-урановорудная магматогенная система (Алдан-Становой щит, Россия). *Тихоокеанская геология*. 2010;29(2):3–26. Maksimov E.P., Uytov V.M., Nikitin V.M. Central-Aldan gold-uranium-ore magmatogenic system (Aldano-

Stanovoy shield, Russia). *Pacific Geology*. 2010;29(2): 3–26. (In Russ.)

4. Кравченко А.А., Смелов А.П., Березкин В.И., Попов Н.В. *Геология и генезис докембрийских золотоносных метабазитов центральной части Алдан-Станового щита (на примере месторождения им. П. Пинигина)*. Якутск: ООО РИЦ «Офсет»; 2010. 148 с.

Kravchenko A.A., Smelov A.P., Berezkin V.I., Popov N.V. *Geology and genesis of Precambrian gold-bearing metabasites of the central part of the Aldan-Stanovoy shield (using the example of the P. Pinigin deposit)*. Yakutsk: Offset; 2010. 148 p. (In Russ.)

5. Кравченко А.А., Округин А.В., Березкин В.И. и др. Геодинамика и рудоносность протерозойских мафитов центральной части Алдан-Станового щита (Юг Северо-Азиатского кратона). *Геодинамика и тектонофизика*. 2024;15(3):1–17. <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-3-0756>

Kravchenko A.A., Okrugin A.V., Beryozkin V.I., et al. Geodynamics and ore-bearing behavior of Proterozoic mafic rocks of the central part of the Aldan-Stanovoy Shield (South of the North-Asian Craton). *Geodynamics and Tectonophysics*. 2024;15(3):1–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-3-0756>

6. Петровская Н.В. *Самородное золото*. М.: Наука; 1973. 348 с.

Petrovskaya N.V. *Native gold*. Moscow: Nauka; 1973. 348 p. (In Russ.)

7. Савва Н.Е., Преис В.К. *Атлас самородного золота Северо-Востока СССР*. М.: Наука; 1990. 292 с.

Savva N.E., Preis V.K. *Atlas of native gold of North-East of USSR*. Moscow: Nauka; 1990. 292 p. (In Russ.)

8. Округин А.В., Журавлев А.И., Мохначевский Г.В. Минералого-геохимические и морфологические особенности россыпного золота юго-восточной части Сибирской платформы. *Отечественная геология*. 2013;(5):19–27.

Okrugin A.V., Zhuravlev A.I., Mokhnachevskii G.V. Mineralogical, geochemical and morphological features of placer gold of South-Eastern part of Siberian platform. *Otechestvennaya geologia [Domestic Geology]*. 2013;(5): 19–27. (In Russ.)

9. Chapman R.J., Mortensen J.K. Characterization of gold mineralization in the Northern Cariboo Gold District, British Columbia, Canada, through integration of compositional studies of lode and detrital gold with historical placer production: a template for evaluation of orogenic gold districts. *Economic Geology*. 2016;111(6): 1321–1345. <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.6.1321>

10. Николаева Л.А., Гаврилов А.М., Некрасова А.Н. и др. *Самородное золото рудных и россыпных месторождений России*. М.: ЦНИГРИ; 2003. 184 с.

Nikolaeva L.A., Gavrilov A.M., Nekrasova A.N., et al. *Native gold of ore and placer deposits of Russia*. Moscow: TSNIGRI; 2003. 184 p. (In Russ.)

11. Gerasimov B.B. The use of typomorphic features of placer gold of the Anabar Region for Determining

- ots sources. *Minerals*. 2023;13(4):1–19. <https://doi.org/10.3390/min13040480>
12. Nikiforova Z.S. Mineralogical method as an effective way to predict gold ore types of deposits in platform areas (East of the Siberian Platform). *Minerals*. 2024;14(6):631. <https://doi.org/10.3390/min14060631>
13. Николаева Л.А., Яблокова С.В. Типоморфные особенности самородного золота и их использование при геологоразведочных работах. *Руды и металлы*. 2007;(6):41–57.
- Nikolaeva L.A., Yablokova S.V. Typomorphic features of native gold and their using in prospecting works. *Ores and Metals*. 2007;(6):41–57. (In Russ.)
14. Яблокова С.В., Миляев С.А., Позднякова Н.Н. Новые данные по типохимизму самородного золота в различных типах месторождений. *Руды и металлы*. 2011;(2):28–31.
- Yablokova S.V., Milyaev S.A., Pozdnyakova N.N. New data on native gold typochemistry in different types of deposits. *Ores and Metals*. 2011;(2):28–31. (In Russ.)
15. Миляев С.А., Самосоров Г.Г., Яблокова С.В. и др. Геохимические особенности самородного золота как прямые признаки рудно-формационной принадлежности проявлений рудного и россыпного золота. *Руды и металлы*. 2020;(3):22–31.
- Milyaev S.A., Samosorov G.G., Yablokova S.V., et al. Geochemical features of native gold as direct signs of ore-formational belonging of ore and placer gold occurrences. *Ores and Metals*. 2020;(3):22–31. (In Russ.). <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2020-10018>
16. Gauert C., Schannor M., Hecht L., et al. A Comparison of in situ analytical methods for trace element measurement in gold samples from various South African gold deposits. *Geostandards and Geoanalytical Research*. 2016;40(2):267–289. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2015.00362.x>
17. Liu H., Beaudoin G. Geochemical signatures in native gold derived from Au-bearing ore deposits. *Ore Geology Reviews*. 2021;132:104066. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104066>
18. Chapman R.J., Banks D.A., Styles M.T., et al. Chemical and physical heterogeneity within native gold: implications for the design of gold particle studies. *Mineralium Deposita*. 2021;56(8):1563–1588. <https://doi.org/10.1016/10.1007/s00126-020-01036-x>
19. Greenough J.D., Tetland M. Trace Element Composition of Placer Gold Across the Okanagan Fault, Kelowna, British Columbia, Canada. *Geoscience Canada*. 2023;50(4):239–315, <https://doi.org/10.12789/geocanj.2023.50.202>
20. Omang B.O., Suh C.E., Lehmann B., Vishiti A., et al. Microchemical signature of alluvial gold from two contrasting terrains in Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*. 2015;112:1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.09.004>
21. Фоминых П.А., Артемьев Д.А., Неволько П.А., Колпаков В.В. ЛА ИСП МС анализ самородного золота аллювиальных россыпей – генетическая интерпретация (Иковское россыпное поле, СЗ Салаирский кряж). *Металлогения древних и современных океанов*. 2020;(1):162–165.
- Fominykh P.A., Artemiev D.A., Nevolko P.A., Kolpakov V.V. LA ICP MS analysis of native gold from alluvial placers – genetic interpretation (Ikovskoye placer field, NW Salair Ridge). *Metallogeny of Ancient and Modern Oceans*. 2020;(1):162–165. (In Russ.)
22. Парфенов Л.М., Кузьмин М.И. *Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия)*. М.: МАИК; 2001. 571 с.
- Parfenov L.M., Kuzmin M.I. *Tectonics, geodynamics, and metallogeny of the territory of the Sakha Republic (Yakutia)*. Moscow: MAIK; 2001. 571 p. (In Russ.)
23. Парфенов Л.М., Попеко Л.И., Томуртоого О. Проблемы тектоники Монголо-Охотского орогенного пояса. *Тихоокеанская геология*. 1999;5:24–43.
- Parfenov L.M., Popoko L.I., Tomurtogoo O. Problems of tectonics Mongolo-Okhotsk orogeny belt. *Pacific Geology*. 1999;5:24–43. (In Russ.)
24. Радьков А.В., Молчанов А.В., Артемьев Д.С. и др. *Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-51-Алдан*. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ; 2015. 365 с.
- Radkov A.V., Molchanov A.V., Artemiev D.S., et al. *State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Aldan-Zabaikalskaya series. Sheet O-51-Aldan*. Saint Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory; 2015. 365 p. (In Russ.)
25. Ворона И.Д., Реутов Л.М. *Объяснительная записка к государственной геологической карте СССР масштаба 1:200000, серия Алданская, лист О-51-XXIV*. М.: ГНТИЛ по геологии и охране недр; 1963. 105 с.
- Vorona I.D., Reutov L.M. *Explanatory note to the state geological map of the USSR at a scale of 1:200000, Aldan series, sheet O-51-XXIV*. Moscow: SSTPL of geology and protection; 1963. 105 p. (In Russ.)
26. Иванов А.И., Лоскутов Е.Е., Иванов М.С., Журавлев А.И. Петрография, геохимические особенности и абсолютное датирование мезозойских интрузивных пород Медвежьих и Таежных массивов (Юго-восток России, Алданский щит). *Minerals*. 2022;12(12):1516. <https://doi.org/10.3390/min12121516>
27. Прокопьев И.Р., Дорошкевич А.Г., Пономарчук А.В. и др. Золоторудная минерализация Джелтулинского, Амгинского и Медвежьего мезозойских щелочных массивов Алданского щита (Якутия): обзор данных по включениям в минералах. В кн.: Кужугет Р.В. (ред.) *Металлогения золота Центрально-Азиатского орогенного пояса и его обрамления: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной Десятилетию науки и технологий в Российской Федерации и 300-летию Российской академии наук, г. Кызыл, 05–08 сентября 2024 г.* Кызыл: ТувИКОПР СО РАН; 2024. С. 71–77.
- Prokopiev I.R., Doroshkevich A.G., Ponomarchuk A.V., et al. Gold ore mineralization of Dzheltulinskii, Amginskii and Medvedev Mesozoic alkaline massifs of Aldan shield (Yakutia): data review on inclusions in minerals.

In: Kuzhuget R.V. (ed.) *The metallogeny of gold in the Central-Asian orogenic belt and its frame: Proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the Decade of Science and Technology in the Russian Federation and the 300th anniversary of the Russian Academy of Science, Kyzyl, September 05–08, 2024*. Kyzyl: TuvIENR SB RAS; 2024, pp. 71–77. (In Russ.)

28. Гамянин Г.Н., Гончаров В.И., Горячев Н.А. Золото-редкометалльные месторождения Северо-Востока России. *Тихоокеанская геология*. 1998;17(3):94–103.

Gamyanin G.N., Goncharov V.I., Goryachev N.A. Gold-Rare metal deposits of North-East of Russia. *Pacific Geology*. 1998;17(3):94–103. (In Russ.)

29. Литвиненко И.С., Шилина Л.А. Мальдонит, ютенобогаардтит и разновидности самородного золота из рудных проявлений Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла (Северо-Восток России). *Записки Российской минералогического общества*. 2020;CXLIX(3):18–37. <https://doi.org/10.31857/S0869605520030041>

Litvinenko I.S., Shilina L.A. Maldonite, juthenboagaardtite and varieties of native gold from ore occurrences of the Nizhne-Myakitsky ore and placer district (North-East Russia). *Notes of Russian mineralogical society*. 2020;CXLIX(3):18–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869605520030041>

30. Birch W.D., Ciobanu C.L. Maldonite from the type locality, Maldon, Victoria, Australia: a new investigation of its occurrence. *Australian Journal of Mineralogy*. 2009;15:25–38.

31. Kondratieva L.A., Anisimova G.S., Kardashevskaya V.N. Ore Mineralogy and typomorphism of native gold of the Spokoininsky cluster of the Aldan-Stanovoy gold province. *Minerals*. 2023;13(4):543, <https://doi.org/10.3390/min13040543>.

32. Самусиков В.П. Закономерности концентрации изоморфно-примесных элементов в минералах при гидротермальном рудообразовании. *Геология и геофизика*. 2010;51(3):338–352.

Samusikov V.P. Concentration patterns of isomorphic impurity elements in minerals during hydrothermal ore formation. *Geology and Geophysics*. 2010;51(3):338–352. (In Russ.)

33. Молчанов А.В., Терехов А.В., Шатов В.В. и др. Золоторудные районы и узлы Алдано-Становой металлогенической провинции. *Региональная геология и металлогения*. 2017;(71):93–111.

Molchanov A.V., Terekhov A.V., Shatov V.V., et al. Gold-bearing ore regions and districts of Aldan-Stanovoy province. *Regional Geology and Metallogeny*. 2017;(71):93–111. (In Russ.)

Об авторах

ЖУРАВЛЕВ Анатолий Иванович, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-0115-5146>, ResearcherID: AAC-6095-2019, Scopus Author ID: 57200217371, SPIN: 1793-5956, e-mail: ai.zhuravlevgeo@gmail.com

ОКРУГИН Александр Витальевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1248-8993>, ResearcherID: V-7207-2018, Scopus Author ID: 6603402108, SPIN: 6412-7556, e-mail: okrugin@diamond.ysn.ru

ГЕРАСИМОВ Борис Борисович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5112-536X>, ResearcherID: L-6369-2018, Scopus Author ID: 14063438000, SPIN: 4136-7018, e-mail: bgerasimov@yandex.ru

ЛОСКУТОВ Евгений Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-7491-1067>, ResearcherID: AAO-4823-2021, Scopus Author ID: 57205150102, SPIN: 3030-3370, e-mail: Loskutov@diamond.ysn.ru

ИВАНОВ Алексей Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5485-3127>, ResearcherID: JBR-7954-2023, Scopus Author ID: 57674640500, SPIN: 7715-0867, e-mail: aiivanov@diamond.ysn.ru

ИВАНОВ Мичил Спартакович, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-0204-1653>, ResearcherID: AAL-7447-2021, Scopus Author ID: 57212410522, SPIN: 6254-7142, e-mail: ivanov.michil@bk.ru

КРАВЧЕНКО Александр Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-9767-6610>, ResearcherID: J-1722-2018, Scopus Author ID: 15750892800, SPIN: 1760-7705, e-mail: freshrock@yandex.ru

ИСМАГУЛОВ Артем Маратович, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0009-0006-7164-9407>, ResearcherID: JMP-3710-2023, Scopus Author ID: 57222555385, SPIN: 1622-9585, e-mail: ismagulov.art@mail.ru

Вклад авторов

Журавлев А.И. – разработка концепции, методология, верификация данных, проведение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи, редактирование рукописи, визуализация, руководство исследованием, администрирование проекта; **Округин А.В.** – разработка концепции, методология, верификация данных, проведение исследования, создание черновика рукописи, редактирование рукописи, визуализация

ция, руководство исследованием; **Герасимов Б.Б.** – методология, верификация данных, проведение исследования, создание черновика рукописи, редактирование рукописи; **Лоскутов Е.Е.** – проведение исследования, создание черновика рукописи, редактирование рукописи; **Иванов А.И.** – разработка концепции, проведение исследования, создание черновика рукописи, редактирование рукописи; **Иванов М.С.** – создание черновика рукописи, редактирование рукописи; **Кравченко А.А.** – разработка концепции, методология, проведение исследования, руководство исследованием; **Исмагулов А.М.** – методология, проведение исследования, редактирование рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

ZHURAVLEV, Anatolii Ivanovich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-0115-5146>, ResearcherID: AAC-6095-2019, Scopus Author ID: 57200217371, SPIN: 1793-5956, e-mail: ai.zhuravlevgeo@gmail.com

OKRUGIN, Alexander Vitalievich, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1248-8993>, ResearcherID: V-7207-2018, Scopus Author ID: 6603402108, SPIN: 6412-7556, e-mail: okrugin@diamond.ysn.ru

GERASIMOV, Boris Borisovich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5112-536X>, ResearcherID: L-6369-2018, Scopus Author ID: 14063438000, SPIN: 4136-7018, e-mail: bgerasimov@yandex.ru

LOSKUTOV, Evgeniy Evgenievich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7491-1067>, ResearcherID: AAO-4823-2021, Scopus Author ID: 57205150102, SPIN: 3030-3370, e-mail: Loskutov@diamond.ysn.ru

IVANOV, Alexey Ivanovich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5485-3127>, Researcher ID: JBR-7954-2023, Scopus Author ID: 57674640500, SPIN: 7715-0867, e-mail: aiivanov@diamond.ysn.ru

IVANOV, Michil Spartakovich, junior researcher, <https://orcid.org/0000-0002-0204-1653>, ResearcherID: AAL-7447-2021, Scopus Author ID: 57212410522, SPIN: 6254-7142, e-mail: ivanov.michil@bk.ru

KRAVCHENKO, Alexander Alexandrovich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-9767-6610>, ResearcherID: J-1722-2018, Scopus Author ID: 15750892800, SPIN: 1760-7705, e-mail: freshrock@yandex.ru

ISMAGULOV, Artem Maratovich, Yuniior Researcher, <https://orcid.org/0009-0006-7164-9407>, ResearcherID: JMP-3710-2023, Scopus Author ID: 57222555385, SPIN: 1622-9585, e-mail: ismagulov.art@mail.ru

Authors' contribution

Zhuralvlev A.I. – conceptualization, methodology, validation, investigation, data curation, writing – original draft, writing – review & editing, visualization, supervision, project administration; **Okrugin A.V.** – conceptualization, methodology, validation, investigation, writing – original draft, writing – review & editing, visualization, supervision; **Gerasimov B.B.** – methodology, validation, investigation, writing – original draft, writing – review & editing; **Loskutov E.E.** – investigation, writing – original draft, writing – review & editing; **Ivanov A.I.** – conceptualization, investigation, writing – original draft, writing – review & editing; **Ivanov M.S.** – writing – original draft, writing – review & editing; **Kravchenko A.A.** – conceptualization, methodology, investigation, supervision; **Ismagulov A.M.** – methodology, investigation, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 10.09.2024

Поступила после рецензирования / Revised 23.10.2024

Принята к публикации / Accepted 12.11.2024