

МОРФОЛОГИЯ И СОСТАВ САМОРОДНОГО ЗОЛОТА ИЗ РОССЫПИ РЕКИ ДУНИТОВОЙ (МАЙМЕЧА-КОТУЙСКАЯ ПРОВИНЦИЯ, ПОЛЯРНАЯ СИБИРЬ)

© 2024 г. Д. чл. К. Н. Малич, А. А. Войтин

*Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН,
ул. Академика Вонсовского, 15, Екатеринбург, 620110, Россия
e-mail: dunite@yandex.ru*

Поступила в редакцию 05.08.2024

После доработки 01.10.2024

Принята к публикации 09.10.2024

С Гулинским массивом ультраосновных и щелочных пород с карбонатитами в пределах Маймеча-Котуйской провинции на севере Сибирской платформы ассоциируют комплексные золото-иридиево-осмиевые россыпные месторождения. В отличие от минералов осмия и иридия, которые генетически связаны с ультраосновными породами, вопрос о коренном источнике золота является предметом дискуссии. Нами впервые охарактеризованы морфологические и вещественные особенности минералов золота из четвертичных отложений реки Дунитовой в южной части Гулинского массива. По морфологии зерна самородного золота подразделены на каплевидно-округлые, комковатые, уплощенно-комковатые и пластинчатые разновидности; определены их основные морфометрические параметры, пробность самородного золота и среднестатистические характеристики химического состава. По внутреннему строению изученные зерна самородного золота подразделяются на гомогенные, состоящие преимущественно из однородного по составу электрума, и гетерогенные, содержащие (1) несколько минералов (например, электрум, тетрааурикуприд, аурикуприд) или (2) образованные электрумом с сильно варьирующим составом (от Au-содержащего серебра до Ag-содержащего золота). Первые данные по изотопному составу меди для самородного золота из различных морфологических типов р. Дунитовой характеризуются близкими значениями $\delta^{65}\text{Cu}$ в диапазоне от -0.59 до 0.11‰ ($\delta^{65}\text{Cu}$ среднее = $-0.30 \pm 0.23\text{‰}$, $n = 5$), что свидетельствует в пользу примитивного источника рудного вещества. С учетом геологической обстановки расположения русловых и террасовых отложений р. Дунитовой, незначительного характера переноса россыпного золота (4–6 км) и сходства минералов золота р. Дунитовой с минералами золота из кальцитовых карбонатитов, главными источниками изученных морфологических разновидностей золота являлись породы Маймеча-Котуйского ийолит-карбонатитового комплекса.

Ключевые слова: морфология, морфометрические параметры, самородное золото, изотопный состав меди, россыпь реки Дунитовой, коренные источники, Гулинский массив, Маймеча-Котуйская провинция, Полярная Сибирь

DOI: 10.31857/S0869605524060017, **EDN:** NWQZKC

ВВЕДЕНИЕ

С уникальным Гулинским массивом ультраосновных и щелочных пород с карбонатитами в пределах Маймеча-Котуйской провинции на севере Сибирской

платформы связаны крупные россыпные месторождения осмия и иридия с мелкими россыпями золота (Малич, Лопатин, 19976, Малич, 1999; Лопатин, 2001; Сазонов и др., 2001). Подавляющее большинство минералов платиновой группы (МПГ) из россыпей представлены идиоморфными кристаллами и агрегатами зерен, образованными Os-Ir твердыми растворами или минералами осмия, которые преобладают над Ru-Os сульфидами, Pt-Fe минералами и другими МПГ. Минералы самородного золота состоят из индивидов и агрегатов зерен различной степени окатанности, среди которых доминирует (80%) электрум (Au,Ag) с содержанием серебра 20–60 мас. %. Электрум входит в состав монофазных и полифазных зерен, сложенных также самородным золотом (Au), тетрааурикупридом (AuCu) и аурикупридом (Cu₃Au).

Значительные прогнозные ресурсы благородных металлов (более 20 тонн) в комплексных золото-платиноидных россыпях Гулинского массива позволили расширить металлогенический потенциал Маймеч-Котуйской провинции (Малич и др., 1996; 1998; Malitch et al., 2002), традиционно перспективной на апатит-магнетитовые, флогопитовые руды, нефелиновое сырье и редкие металлы, ассоциирующие с ийолит-карбонатитовыми массивами данной провинции (Егоров, 1991). Ранее было показано (Балмасова и др., 1992; Малич, Рудашевский, 1992; Малич, 2021), что платиноидная минерализация генетически связана с дунитами и хромититами Гулинского массива. Вопрос о коренном источнике золота остается дискуссионным (Сазонов и др., 2001; Баданина и др., 2010; Когарко, Сенин, 2011; Малич и др., 2013; Рябчиков и др., 2016; Сорохтина и др., 2019; Sazonov et al., 2021).

Неотъемлемой частью исследований при выявлении условий образования благороднометалльной минерализации является установление статистических и индивидуальных особенностей морфологии, химического и изотопного состава, внутреннего строения МПГ и минералов золота, включая наличие и состав микровключений. С целью выявления коренного источника золотой минерализации нами впервые приводятся результаты изучения морфологии, химического и изотопного состава минералов золота из аллювиальных отложений р. Дунитовой, расположенной в юго-западной части массива. Исследование является частью более масштабной задачи, направленной на выявление коренных источников и уточнения условий образования золотой и платиноидной минерализации Гулинского массива.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСПОЛОЖЕНИЕ ИЗУЧЕННЫХ ОБРАЗЦОВ

В пределах Маймеч-Котуйской провинции, расположенной на севере Сибирской платформы, известно более 20 массивов, состоящих из различных ультраосновных, щелочно-ультраосновных, щелочных пород и карбонатитов (Егоров, 1991; Kogarko et al., 1995; Малич, 1999). При этом, ультрамафиты (дуниты, хромититы, метадуниты, оливиниты, верлиты и клинопироксениты) резко преобладают над другими породами лишь в Гулинском и Бор-Уряхском массивах. В других массивах ультрамафиты образованы преимущественно оливинитами (метадунитами), которые играют значительную (массивы Кугда и Одихинча) или резко подчиненную (массивы Маган, Немакит и др.) роль, встречаясь в виде «ксенолитов», представляющих собой дезинтегрированные и преобразованные метасоматическими процессами блоки более ранних ультраосновных тел.

Гулинский массив ультраосновных, щелочно-ультраосновных пород и карбонатитов обнаружен Ю.М. Шейнманном и П.С. Фоминым в 1943 году. Он контролируется Таймыро-Байкальской и Енисей-Котуйской палеорифтогенными структурами. По геолого-геофизическим данным, площадь Гулинского массива вместе с погребенной частью составляет около 2000 км². Форма ультрамафитового тела, по данным математического

моделирования материалов гравirazведки и данным бурения, пластинообразная (Малич, Лопатин, 1997а; 1997б) с погружением на северо-запад, в плане близкая эллипсу, длинная ось которого вытянута в северо-восточном направлении.

В строении Гулинского массива выделяется несколько фаз внедрения (Егоров, 1991; Kogarko et al., 1995; Малич, 1999): 1) дуниты и клинопироксениты Гулинского клинопироксенит-дунитового комплекса, 2) мелилитовые породы, 3) якупирангиты-мельтейгиты и близкие к ним щелочные мафиты, 4) ийолиты и ийолит-пегматиты, 5) нефелиновые и щелочные эгириновые сиениты, 6) породы фоскоритовой серии и 7) карбонатиты, входящие в состав Маймечя-Котуйского ийолит-карбонатитового комплекса. В обнаженной части массив сложен, главным образом, дунитами, хромититами, верлитами и клинопироксенитами в составе Гулинского клинопироксенит-дунитового комплекса (рис. 1). Преобладающие дуниты образуют в плане серповидное тело протяженностью около 30 км и шириной 10–15 км, занимая площадь около 450 кв. км. В юго-западной части они перекрыты толщей меймечитов – ультраосновных вулканитов маймечинской свиты, а в центральной – прорваны штокообразными телами Маймечя-Котуйского ийолит-карбонатитового комплекса площадью около 30 км² (рис. 1).

Основными россыпеобразующими структурами в Гулинском рудном районе являются долины рек и ручьев, дренирующих породы массива. Комплекс современных и верхнечетвертичных аллювиальных отложений рек Ингарингда, Сабыда, Гулэ, Селинга и их притоков осмиеносны и золотоносны на всем их протяжении (Малич и др., 1998; Лопатин, 2001; Сазонов и др., 2001). Продуктивны русловые и террасовые пласты. Наибольшее значение по количеству полезных компонентов имеют пласты террасового комплекса, в котором платиноидная и золотая минерализации сосредоточены в песчано-галечниковом глинистом с валунами слое, особенно в его нижней части, достигая наибольших концентраций на границе рыхлых отложений и плотика.

Представительная выборка минералов золота была взята для исследования при квартовании золотого концентрата, полученного в ходе поисково-оценочных работ Полярной поисковой партии Норильской комплексной геологоразведочной экспедиции (НКГРЭ) и характеризующего продуктивный пласт четвертичных отложений реки Дунитовой (поисковая траншея 8), левого притока р. Гулэ (рис. 1, 2). Отметим, что продуктивный пласт россыпей рек Гулэ и Дунитовой приурочен как к современному галечному аллювию и аллювию каргинского возраста, так и к подрусловому элювию, иногда – к коллювиальному шлейфу. В тяжелой фракции аллювия рек Гулэ и Дунитовой преобладает магнетит (82%), хромшпинелид (7%), ильменит (5%), оливин (3.8%); в небольших количествах присутствуют (<1%): пироксен, апатит, циркон и пироклор, в знаковых: титанит, платиноиды, самородное золото, перовскит, гранат, пирит и рутил (Малич, 1999). При сравнении с составом тяжелой фракции остальных рек района наблюдается повышенное содержание магнетита и ильменита, при пониженном содержании хромшпинелида. Всего было изучено 58 зерен самородного золота.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Морфологические особенности минералов золота были изучены с помощью стереомикроскопа Leica M205C с цифровой камерой Leica DFC450 C и сканирующего электронного микроскопа Tescan Mira LMS с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 (ЦКП ИГГ УрО РАН «Геоаналитик», Екатеринбург, аналитик Н.С. Чебыкин), используя комбинацию изображений во вторичных и обратно-рассеянных электронах. Размер зерен был измерен в трех направлениях. По самой

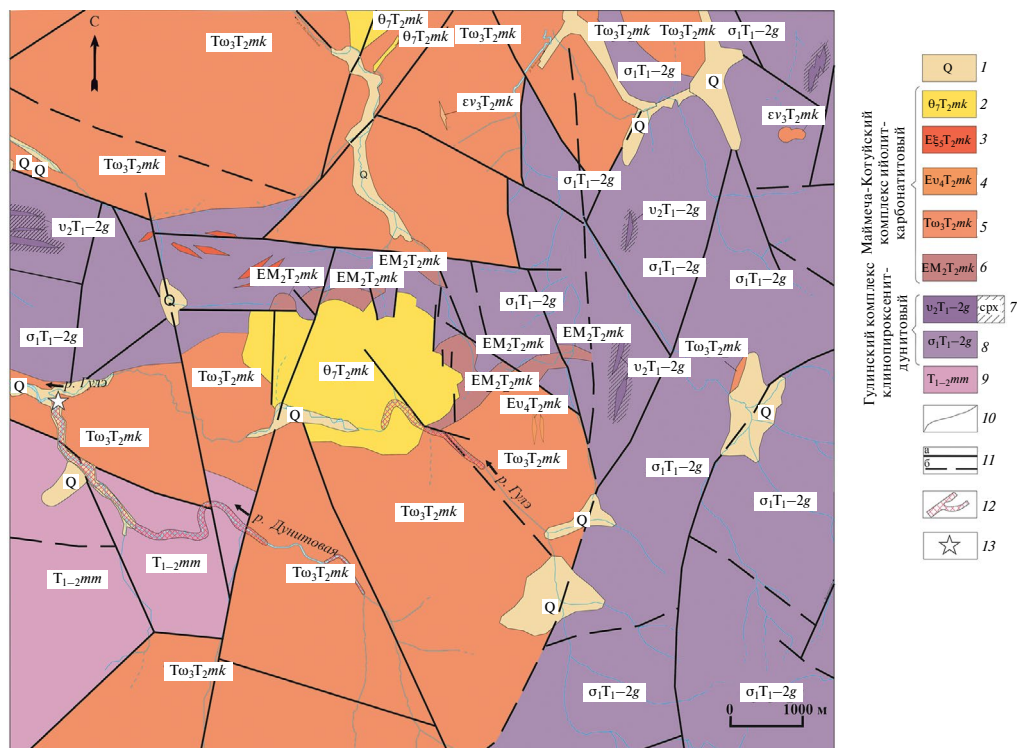


Рис. 1. Схема геологического строения южной части Гулинского массива ультраосновных и щелочных пород с карбонатитами (составлена геологами Полярной партии Норильской КГРЭ).

1 – аллювиальные (русла, поймы и террасы), озерные и водно-ледниковые отложения; 2–5 – Маймеча-Котуйский ийолит-карбонатитовый комплекс: 2 – карбонатиты седьмой фазы комплекса; 3 – нефелиновые и щелочные сиениты пятой фазы комплекса; 4 – биотит-пироксеновые ультрамафиты, малиниты и шонкиниты третьей фазы комплекса; 5 – меллитовые породы второй фазы комплекса; 6, 7 – Гулинский клинопироксенит-дунитовый комплекс: 6 – дуниты (первая фаза), 7 – клинопироксениты (вторая фаза); cpx – метасоматические ореолы оливин-клинопироксенового состава (оливиновые клинопироксениты, верлиты, клинопироксеновые дуниты); 8 – меймечиты, лавобрекчии и туфы меймечитов, 9 – геологические границы; 10 – разломы (а – достоверные, б – предполагаемые); 11 – промышленные россыпи золота; 12 – место отбора образцов россыпного золота.

Fig. 1. Schematic geological map of the southern part of the Guli massif of ultramafic, alkaline rocks and carbonatites (compiled by geologists of the Polar Party of the Norilsk Integrated Geological Exploration Expedition).

1 – alluvial (channels, floodplains and terraces), lacustrine and fluvio-glacial deposits; 2–5 – Maimecha-Kotui ijolite-carbonatite complex: 2 – carbonatites of the seventh phase of the complex; 3 – nepheline and alkaline syenite of the fifth phase of the complex; 4 – biotite-pyroxene ultramafic rocks, malignite and shonkinite of the third phase of the complex; 5 – melilitite rock of the second phase of the complex; 6, 7 – Guli clinopyroxenite-dunitite complex: 6 – dunite (first phase), 7 – clinopyroxenite (second phase); cpx – metasomatic halos composed of olivine-bearing clinopyroxenite, wehrlite, and clinopyroxene-bearing dunite; 8 – meimechite, lava breccias and meimechite tuffs, 9 – geological boundaries; 10 – faults (a – reliable, b – assumed); 11 – economic gold placers; 12 – sampling site for alluvial gold.

длинной оси зерна измеряли «длину» (Д), средняя по размеру ось, перпендикулярная «длине», соответствовала «ширине» (Ш), а короткая ось, перпендикулярная двум предыдущим, измеряли как «толщину» (Т). Эти размеры, выраженные как отношения ширины к длине и толщины к ширине, использовались с целью определения расстояния от коренного источника по методу, детально охарактеризованному в работах (Cailleux, Tricart, 1959; Hérail et al., 1990). Для определения расстояния от коренного

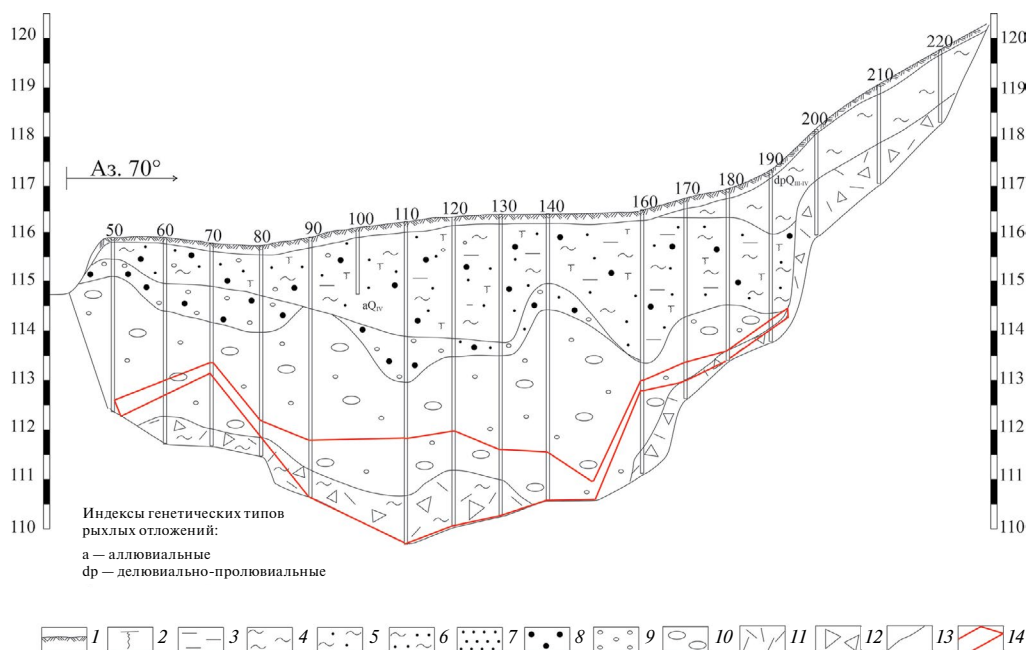


Рис. 2. Поперечный разрез по траншее № 8 через долину р. Дунитовой (составлена геологами Полярной поисковой партии Норильской КГРЭ).

1 — почвенно-растительный слой, 2 — торф, 3 — ил, 4 — глина, 5 — суглинок, 6 — супесь, 7 — песок, 8 — гравий, 9 — галька, 10 — валуны, 11 — дресва, 12 — щебень, 13 — границы генетических типов рыхлых отложений, 14 — продуктивный пласт.

Fig. 2. Cross section along trench # 8 through the Dunitovaya River valley (compiled by geologists of the Polar Party of the Noril'sk Integrated Geological Exploration Expedition).

1 — soil-vegetative layer, 2 — peat, 3 — silt, 4 — clay, 5 — loam, 6 — sandy loam, 7 — sand, 8 — gravel, 9 — pebbles, 10 — boulders, 11 — gruss, 12 — crushed stone, 13 — boundaries of genetic types of loose sediments, 14 — productive layer.

источника использовался коэффициент уплощения ($K_{упл}$) зерен, который определялся по формуле: $K_{упл} = (D + \text{III}) / 2T$ (Loen, 1995). Измерение расстояния (P) от коренного источника (в км) для каждого зерна осуществляли по формуле $P = 1.2833 + (K_{упл} - 0.57662) + (K_{упл}^2 \times 0.31718)$, которая была обоснована в (Cailleux, Tricart, 1959; Héral et al., 1990). Классификация морфологии зерен в координатах сферичность — округлость приведена по схеме, предложенной в работе (Krumbein, Sloss, 1963).

Минералы золота были разделены на шесть фракций крупности (0.125–0.25, 0.25–0.5, 0.5–1.0, 1–2, 2–4 мм, > 4 мм соответственно), после чего зерна каждой фракции смонтированы в эпоксидной смоле и приполированы наполовину. Химический состав минералов золота изучен с использованием рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) при помощи CAMECA SX 100 с пятью волновыми спектрометрами (ЦКП УрО РАН «Геоаналитик», аналитик В.А. Булатов). В качестве стандартных образцов использовались чистые металлы Au, Ag, Pd, Co, Ni, Pb, халькопирит (CuFeS_2) и сплав HgTe . При проведении количественных анализов были использованы следующие рентгеновские спектральные линии: AuMa , AgLa , HgMa , $\text{PdL}\beta$, PbMa , NiKa , FeKa , CuKa , CoKa , SKa . Ускоряющее напряжение составляло 15 кВ, сила тока пучка электронов — 10–40 нА, пространственное разрешение анализа составляло 1–2 мкм. Всего выполнено 498 анализов.

Результаты определения изотопного состава меди для Cu-содержащих минералов золота были получены в ЦКП «Геоаналитик» Института геологии и геохимии УрО РАН. Методика определения изотопного состава меди включала в себя селективное хроматографическое выделение Cu из раствора исследуемого образца самородного золота с последующим определением изотопного отношения $^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu}$ на ThermoFisher Neptune Plus MC ICP-MS. Детальное описание методики представлено в работе (Okuneva et al., 2022). Для хроматографического выделения чистой фракции Cu использовалась ионообменная смола AG MP-1 (Bio-Rad inc., США) (Maréchal, Albarède, 2002); схема выделения аналита описана в (Okuneva et al., 2022). Измерение изотопных отношений $^{65}\text{Cu} / ^{63}\text{Cu}$ в аналитической фракции меди проведено методом окаймляющего стандарта (брекетинга) на масс-спектрометре Neptune Plus, с использованием международного стандарта изотопного состава меди NIST SRM 976 при следующей последовательности операций: холостой опыт (3 %-ный раствор HNO_3) → стандарт NIST SRM 976 → исследуемый образец золота (3 %-ный азотнокислый раствор минерала) → стандарт NIST SRM 976. Каждое единичное измерение изотопного состава Cu состояло из 60 циклов, полученных при восьмисекундной интеграции с измерением базовой линии в течение 30 с. Значение $\delta^{65}\text{Cu}$ вычислялось как $(^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu})_{\text{образец}} / (^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu})_{\text{стандарт}} - 1 \times 1000\text{‰}$; точность определения составляла $\pm 0.14\text{‰}$ (2σ). Для контроля всей аналитической процедуры и оценки правильности определения $\delta^{65}\text{Cu}$ использованы международные стандартные образцы горных пород USGS AGV-2 и BHVO-2; измеренные значения $\delta^{65}\text{Cu}$ составили для них 0.14 ± 0.04 (2SD , $n = 5$) и $0.12 \pm 0.04\text{‰}$ (2SD , $n = 5$) соответственно, что удовлетворительно согласуется с данными, представленными в базе GeoRem. Всего выполнено 5 анализов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Гранулометрический состав россыпного золота р. Дунитовой характеризуется шестью классами крупности (табл. 1). Распространенность фракций крупности в порядке убывания следующая (в мм): от 0.5 до 1.0 (43.1%), от 0.25 до 0.5 (31.1%), от 1 до 2 (15.5%), от 2 до 4 (6.9%), от 0.125 до 0.25 (1.7%) и более 4 (1.7%). Таким образом, преобладают зерна с размером от 0.25 до 1 мм (около 74%).

Цвет россыпного золота варьирует от светло-желтого до темно-желтого, в подчиненном количестве присутствуют зерна, для которых характерен желто-красный оттенок, обусловленный примесью меди в золоте.

Морфологические особенности. Россыпное золото р. Дунитовой характеризуется весьма разнообразной формой. Чаше присутствуют кристалломорфные, шарообразные, изометричные, удлиненные и пластинчатые зерна, а также отдельные зерна брусковидного, губчатого, дендритовидного, дисковидного и более сложного облика. Многие зерна самородного золота, несмотря на их различный облик, имеют реликты

Таблица 1. Гранулометрические данные для зерен самородного золота из россыпи р. Дунитовой
Table 1. Granulometric data for gold grains from placer deposit of the Dunitovaya River

Фракция крупности, мм	От 0.125 до 0.25	От 0.25 до 0.5	От 0.5 до 1.0	От 1 до 2	От 2 до 4	>4	Всего ...
Количество зерен	1	18	25	9	4	1	58
Процентное соотношение, %	1.72	31.03	43.10	15.52	6.90	1.72	100

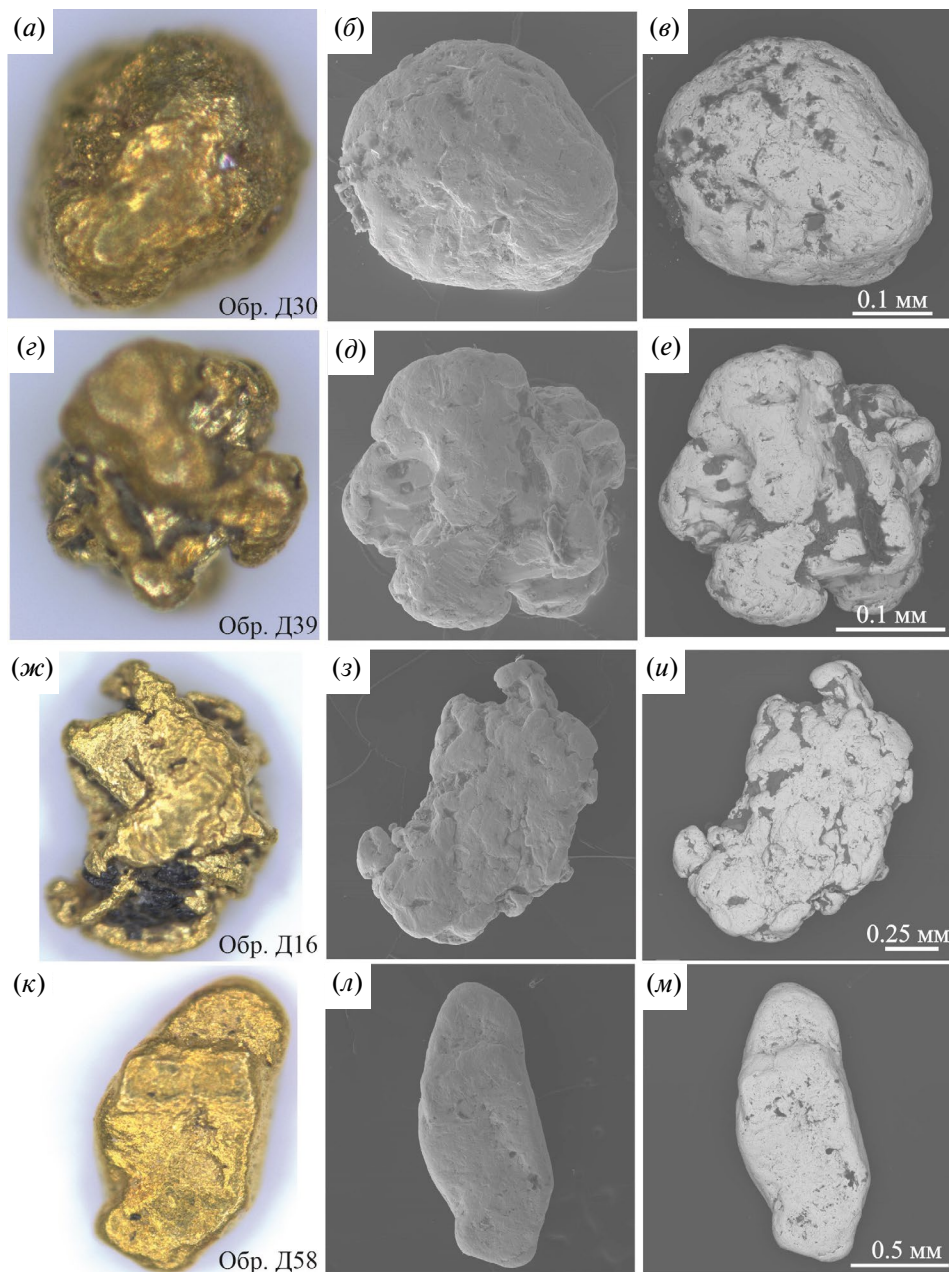


Рис. 3. Характерные особенности морфологических разновидностей зерен россыпного золота реки Дунитовой.

a, б, в – каплевидно-округлые (обр. Д30), *z, д, е* – комковатые (обр. Д39), *ж, з, и* – уплощенно-комковатые (обр. Д16), *к, л, м* – пластинчатые (обр. Д58). Изображения: (*a, z, ж, к*) – под биноклем, (*б, д, з, л*) – во вторичных электронах, (*в, е, и, м*) – в обратно-рассеянных электронах с вещественным контрастом.

Fig. 3. Typical features of alluvial gold grains within morphological varieties from placer deposit of the Dunitovaya River.

a, б, в – drop-shaped-rounded (sample D30), *z, д, е* – lumpy (sample D39), *ж, з, и* – flattened-lumpy (sample D16), *к, л, м* – lamellar (sample D58). Images: (*a, z, ж, к*) under a binocular, (*б, д, з, л*) – in secondary electrons, (*в, е, и, м*) – in back-scattered electrons with compositional contrast.

кристаллических граней. Встречаются «оклепанные» зерна, имеющие лепешковидную форму с загнутыми вверх краями пластинок.

Всё разнообразие встречаемых форм самородного золота было сгруппировано в составе четырех основных морфологических типов (рис. 3): каплевидно-округлого, комковатого, уплощенно-комковатого и пластинчатого. К каплевидно-округлым разновидностям были отнесены наиболее округлые по форме зерна со слабо шагреновым, мелкочаистым рельефом поверхности (рис. 3, *а*, рис. 5, обр. Д15, Д30, Д42). Преобладающими формами зерен среди них являются каплевидные, шарообразные, идиоморфные и некоторые другие, в плане близкие к форме круга. Комковатые зерна внешне похожи на каплевидно-округлые, но обладают более сложными очертаниями (рис. 3, *б*; рис. 5, обр. Д8, Д20, Д41); для них типичен средне-шагреновый рельеф. Уплощенно-комковатые зерна характеризуются овальной формой, часто они заметно вытянуты и приплюснуты. Для них типичен рельеф поверхности от грубо-шагреновой до пупырчатой (рис. 3, *в*; рис. 5, обр. Д38, Д48, Д57). Пластинчатые зерна, как правило, наиболее тонкие. Они обладают пластинчатой, чешуйчатой, дисковидной и некоторыми другими формами, с рельефом поверхности не отличимой от таковой для уплощенно-комковатых зерен (рис. 3, *г*; рис. 5, обр. Д56).

Частота встречаемости зерен золота по вышеназванным морфологическим типам составила (в %) 31.0, 24.2, 22.4 и 22.4 соответственно. Основные морфометрические параметры [длина (D), ширина ($Ш$) и толщина (T), коэффициент уплощенности ($K_{упл}$), коэффициент удлиненности ($K_{удл}$), средний размер (Q), гидравлическая крупность ($ГК$)], P – расстояние до коренного источника и среднестатистические характеристики химического состава для каждого из 58 изученных зерен приведены в табл. 2. Для каплевидно-округлых, комковатых и уплощенно-комковатых разновидностей зерен средние значения коэффициента уплощенности и коэффициента удлиненности изменяются соответственно в пределах от 1.8 до 2.5 и от 2.1 до 3.0, увеличиваясь в зернах золота пластинчатого типа до 3.7 и 4.0 соответственно. Подавляющая часть зерен золота р. Дунитовой имеет средний размер Q [$Q = (D + Ш + T) / 3$] от 0.23 до 0.72 мм. Всего пять зерен золота характеризуются значениями Q в диапазоне от 1.78 до 3.13; для четырех зерен значения Q находятся в пределах 0.12–0.19 (табл. 2). При изучении крупности золотин на основе морфогранулометрических замеров существует возможность обосновать на цифровой основе интегральный показатель, характеризующий миграционную способность частиц – гидравлическую крупность ($ГК$) золотин или скорость свободного падения частиц (см/с) в стоячем столбе воды (Баранников, 2021). Среднее расчетное значение $ГК$ для каплевидно-округлых, комковатых, уплощенно-комковатых и пластинчатых зерен в пределах погрешности совпадает, составляя 26 ± 12 , 31 ± 17 , 19 ± 9 и 19 ± 10 см/с соответственно (табл. 2).

Форму зерен также определяли по ее сферичности (т.е., вытянутости) и округлости (т.е., окатанности). Большинство изученных зерен характеризуются значениями сферичности (C) в интервале 0.3–0.7 ($C = 0.5$, 54%; $C = 0.7$, 22%; $C = 0.3$, 19%); подчиненная выборка зерен обладает значением сферичности 0.9 ($C = 0.9$; 5% (рис. 4, *а*). При этом значения округлости (O) для большинства зерен золота находятся в диапазоне 0.5–0.9 ($O = 0.7$, 40%; $O = 0.5$, 26%; $O = 0.9$, 19%), при подчиненной роли зерен со значениями $C = 0.3$ (12%) и $C = 0.1$ (3%) (рис. 4, *б*).

Представление о морфологическом разнообразии зерен золота в координатах сферичность – округлость дано на рис. 5. Отметим, что наибольшим распространением (30 зерен из 58) обладают средневтянутые зерна (с коэффициентом сферичности 0.5), которые при этом слабо-, средне-, хорошо- или сильноокатаны (коэффициент округлости составляет соответственно 0.3, 0.5, 0.7 и 0.9).

Таблица 2. Морфометрические параметры и средние химические составы (мас. %) зерен золота различных морфологических разновидностей из россыпи р. Дунитовой
Table 2. Morphometric parameters and average chemical compositions (wt %) of gold grains of various morphological varieties from placer deposit of the Dunitovaya River

№ зерна	Размеры, мм			K _{удл}	K _{упл}	Q, мм	ГК, см/с	Р, км	Au	Ag	Cu	Сумма	П	n
	Д	Ш	Т											
Каплевидно-округлые (n = 18)														
Д1	0.17	0.14	0.06	2.83	2.58	0.12	7	5.4	71.62	29.01	<п.о.	100.63	712	10
Д3	0.45	0.30	0.15	3.00	2.50	0.30	16	5.2						
Д5	0.33	0.25	0.14	2.36	2.07	0.24	12	4.1	—	—	—	—	—	—
Д7	0.47	0.38	0.20	2.35	2.13	0.35	24	4.3						
Д13	0.65	0.53	0.40	1.63	1.48	0.53	28	2.9	66.84	32.51	<п.о.	99.35	673	4
Д15	1.00	0.60	0.40	2.50	2.00	0.67	37	4.0	74.71	2.10	23.43	100.24	745	8
Д17	0.60	0.50	0.45	1.33	1.22	0.52	41	2.4	—	—	—	—	—	—
Д19	1.00	0.75	0.54	1.85	1.62	0.76	42	3.2	75.27	25.25	<п.о.	100.52	749	8
Д25	0.30	0.20	0.18	1.67	1.39	0.23	12	2.7	94.15	5.02	<п.о.	99.17	949	2
Д27	0.34	0.20	0.18	1.89	1.50	0.24	12	2.9	76.23	22.94	<п.о.	99.17	769	5
Д30	0.38	0.30	0.29	1.31	1.17	0.32	21	2.3	88.00	12.07	0.02	100.09	879	6
Д32	0.28	0.20	0.20	1.40	1.20	0.23	30	2.4	—	—	—	—	—	—
Д33	0.47	0.40	0.34	1.38	1.28	0.40	25	2.5	72.92	26.73	<п.о.	99.65	731	5
Д34	0.48	0.38	0.23	2.09	1.87	0.36	14.5	3.7	—	—	—	—	—	—
Д42	0.62	0.58	0.32	1.94	1.88	0.51	40	3.7	77.72	22.89	0.01	100.62	773	7
Д43	0.60	0.30	0.30	2.00	1.50	0.40	30	2.9	77.75	0.22	23.09	101.06	769	9
Д49	0.75	0.35	0.25	3.00	2.20	0.45	26	4.4	—	—	—	—	—	—
Д55	1.20	0.82	0.45	2.67	2.24	0.82	45	4.5	85.36	15.24	0.14	100.74	848	4
Среднее	0.56	0.40	0.27	2.07	1.77	0.41	25.7	3.5	78.23	17.63	4.24	100.16	782	
СО	0.28	0.19	0.12	0.57	0.45	0.19	11.9	1.0	7.92	11.35	9.40	0.68	80	
Комковатые (n = 14)														
Д2	0.50	0.37	0.20	2.50	2.18	0.36	21	4.4	94.80	3.76	<п.о.	98.56	962	6
Д8	0.60	0.50	0.34	1.76	1.62	0.48	27	3.2	—	—	—	—	—	—
Д10	0.65	0.40	0.24	2.71	2.19	0.43	22.5	4.4						
Д12	0.90	0.60	0.45	2.00	1.67	0.65	31	3.3	74.92	25.71	0.01	100.64	745	11

Продолжение табл. 1

№ зерна	Размеры, мм			$K_{удл}$	$K_{пл}$	Q, мм	ГК, см/с	Р, км	Au	Ag	Cu	Сумма	П	n
	Д	Ш	Т											
Д14	0.60	0.54	0.40	1.50	1.43	0.51	26	2.8	74.66	1.25	23.79	99.70	749	13
Д20	2.40	1.67	1.40	1.71	1.45	1.82	82		82.66	14.90	2.46	100.02	826	10
Д22	3.30	1.40	0.65	5.08	3.62	1.78	36		94.06	4.43	0.88	99.37	947	12
Д23	3.90	2.44	0.35	11.14	9.06	2.23	22.5		63.98	36.06	0.38	100.42	637	10
Д24	5.30	2.90	1.20	4.42	3.42	3.13	50		72.54	27.72	<п.о.	100.26	724	13
Д31	0.45	0.39	0.30	1.50	1.40	0.38	20	2.7	87.53	5.71	7.00	100.24	873	11
Д36	0.30	0.25	0.25	1.20	1.10	0.27	14	2.2	89.69	10.36	<п.о.	100.05	896	7
Д39	0.25	0.20	0.10	2.50	2.25	0.18	22.5	4.6	90.16	6.05	3.63	99.84	903	10
Д41	0.54	0.50	0.34	1.59	1.53	0.46	21	3.0	92.54	7.47	<п.о.	100.01	925	6
Д45	0.80	0.60	0.40	2.00	1.75	0.60	32	3.4	66.17	33.52	0.16	99.85	663	6
Среднее	1.46	0.91	0.47	2.97	2.47	0.95	30.5	3.4	81.98	14.75	3.19	99.83	821	
СО	1.60	0.86	0.35	2.60	2.03	0.91	17.2	0.8	11.14	12.51	6.83	0.62	113	—
Уплотненно-комковатые (n = 13)														
Д6	0.50	0.40	0.24	2.08	1.88	0.38	17	3.7	—	—	—	—	—	—
Д11	0.62	0.45	0.30	2.07	1.78	0.46	26	3.5	97.29	2.34	0.49	100.12	972	7
Д16	1.20	0.65	0.40	3.00	2.31	0.75	31	4.7	80.23	20.90	<п.о.	101.13	793	5
Д26	0.25	0.20	0.13	1.92	1.73	0.19	10	3.4	66.45	33.27	<п.о.	99.72	666	7
Д28	0.20	0.15	0.15	1.33	1.17	0.17	7	2.3	97.80	2.65	<п.о.	100.45	974	5
Д29	0.58	0.26	0.24	2.42	1.75	0.36	14	3.4	75.42	24.65	<п.о.	100.07	754	7
Д37	0.40	0.30	0.25	1.60	1.4	0.32	19	2.7	81.35	18.37	<п.о.	99.72	816	8
Д38	0.35	0.20	0.18	1.94	1.53	0.24	23	3.0	87.16	12.06	<п.о.	99.22	878	4
Д44	0.90	0.60	0.20	4.50	3.75	0.57	11	8.9	74.49	26.35	0.08	100.92	738	4
Д48	0.83	0.45	0.19	4.37	3.37	0.49	16	7.7	86.62	13.73	<п.о.	100.35	863	5
Д52	0.85	0.64	0.20	4.25	3.73	0.56	16	8.8	95.90	5.38	<п.о.	101.28	947	5
Д54	1.05	0.58	0.30	3.50	2.72	0.64	25	5.8	95.51	5.52	<п.о.	101.03	945	5
Д57	1.10	0.45	0.42	2.62	1.85	0.66	36	3.6	81.42	19.49	<п.о.	100.91	807	5
Среднее	0.68	0.41	0.23	2.74	2.23	0.45	19.3	4.7	84.97	15.39	0.05	100.41	846	—
СО	0.33	0.18	0.11	1.09	0.88	0.19	8.5	2.3	10.21	10.12	0.14	0.66	101	—

Окончание табл. 1

№ зерна	Размеры, мм			$K_{удл}$	$K_{упл}$	Q, мм	ГК, см/с	Р, км	Au	Ag	Cu	Сумма	П	n	
	Д	Ш	Т												
Пластинчатые ($n = 13$)															
Д4	0.68	0.54	0.1	1.92	6.10	0.44	13	(18.6)	70.60	28.88	0.29	99.77	708	4	
Д9	0.78	0.60	0.17	4.59	4.06	0.52	11.5	10.0	87.96	12.03	0.02	100.01	880	5	
Д18	1.40	0.70	0.40	3.5	2.63	0.83	27	—	73.53	26.77	0.09	100.39	732	5	
Д21	3.00	2.00	0.35	8.57	7.14	1.78	22.5	—	91.15	9.21	<п.о.	100.36	908	16	
Д35	0.42	0.34	0.10	4.20	3.80	0.29	11	9.1	63.34	35.90	<п.о.	99.24	638	6	
Д40	0.56	0.50	0.25	2.24	2.12	0.44	16	4.3	90.43	8.58	<п.о.	99.01	913	6	
Д46	0.90	0.50	0.24	3.75	2.92	0.55	14	6.3	70.19	29.13	0.09	99.41	706	5	
Д47	0.60	0.40	0.20	3.00	2.50	0.40	10	5.2	—	—	—	—	—	—	
Д50	0.72	0.40	0.30	2.40	1.87	0.47	21	3.7	88.02	11.34	<п.о.	99.36	886	6	
Д51	0.61	0.54	0.19	3.21	3.03	0.45	13	6.6	80.95	17.43	1.48	99.86	811	10	
Д53	0.80	0.70	0.10	8.00	7.50	0.53	11	(26.1)	88.00	10.41	1.85	100.26	878	11	
Д56	1.22	0.44	0.35	3.49	2.37	0.67	36	4.9	96.29	4.40	<п.о.	100.69	956	4	
Д58	1.20	0.60	0.35	3.43	2.57	0.72	38	5.4	84.40	16.35	<п.о.	100.75	838	4	
Среднее	0.99	0.64	0.24	4.02	3.74	0.62	18.8	6.2	82.07	17.54	0.32	99.93	821	—	
СО	0.67	0.42	0.10	2.04	1.93	0.38	9.6	2.1	10.28	10.13	0.64	0.58	101	—	

Примечание. D – длинная ось зерна, по которой измеряли «длину», $Ш$ – средняя по размеру ось зерна, перпендикулярная «длине», по которой измеряли «ширину», T – короткая ось, перпендикулярная двум предыдущим, по которой измеряли «толщину». $K_{удл}$ – коэффициент удлинения равен отношению длины к толщине, $K_{упл}$ – коэффициент уплотнения равен $(D + Ш) / (2 \times T)$, Q – средний размер зерна равен $(D + Ш + T) / 3$, $ГК$ – гидравлическая крупность, значение $ГК$ рассчитано по палетке с учетом данных Q и $K_{удл}$ по (Бараников, 2021), n – количество анализов, P – пробыность $(Au_{мас. \%} / (Au + Ag + Cu)_{мас. \%} \times 1000)$, $СО$ – стандартное отклонение, P – расстояние до коренного источника для каждого зерна рассчитано по формуле $P = 1.2833 + (K_{удл} - 0.57662) + (K_{удл} \times K_{упл} \times 0.31718)$ (Cailleux, Tricart, 1959; Négai et al., 1990). <п.о. – ниже предела обнаружения. Для зерен Д3, Д5, Д6, Д7, Д8, Д10, Д17, Д32, Д34, Д47 и Д49 средний химический состав в таблице не приводится так как эти зерна характеризуется неоднородным составом; особенности состава этих зерен приведены в табл. 3, 4 и рис. 7, 8, 10.

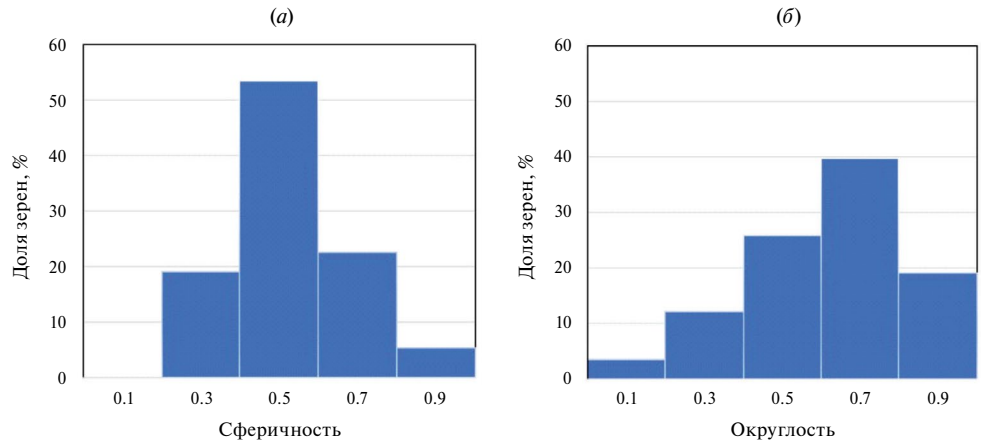


Рис. 4. Частота встречаемости значения сферичности (а) и округлости (б) для зерен россыпного золота р. Дунитовой.

Fig. 4. Histogram of roundness (a) and sphericity (b) values for gold grains from placer deposit of the Dunitovaya River.

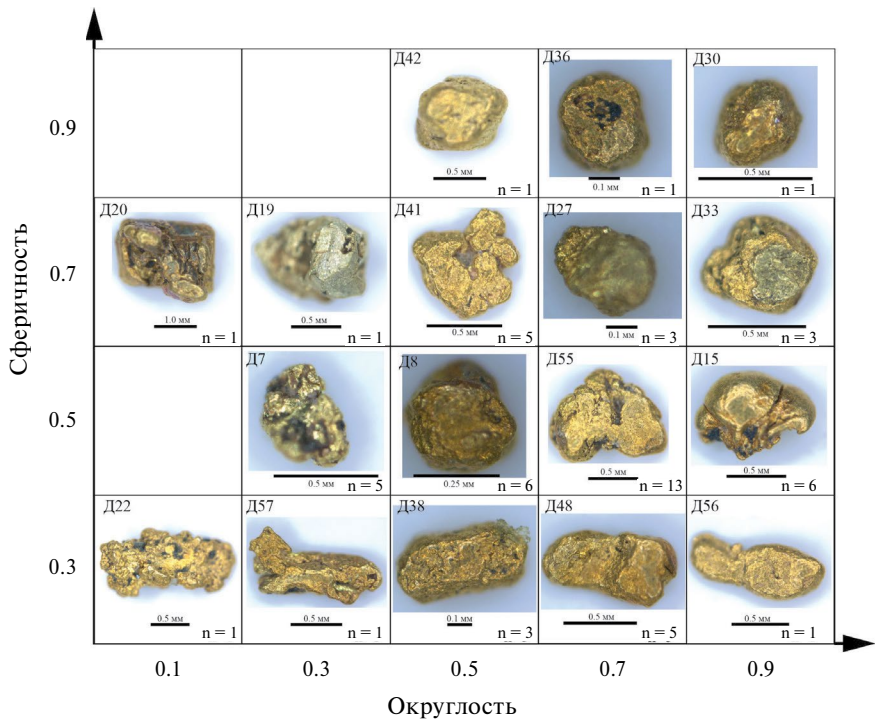


Рис. 5. Диаграмма в координатах сферичность – округлость для 58 зерен россыпного золота р. Дунитовой. Цифры в левом верхнем углу каждого квадрата соответствуют номерам изученных образцов, n – количество зерен.

Fig. 5. Diagram in coordinates sphericity – roundness for 58 gold grains from placer deposit of the Dunitovaya River. Numbers in the upper left corner of each square correspond to numbers of the studied samples, n – quantity of grains.

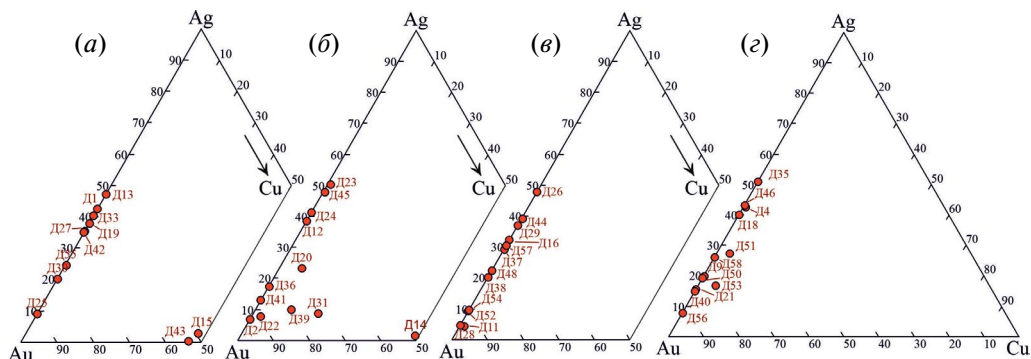


Рис. 6. Средние химические составы однородных зерен золота каплевидно-округлого (а), комковатого (б), уплощенно-комковатого (е) и пластинчатого (з) морфологических типов из россыпи р. Дунитовой в координатах Ag-Au-Cu (ат. %). Номера зерен соответствуют таковым в табл. 2.

Fig. 6. Average chemical compositions of homogeneous gold grains within drop-shaped-rounded (a), lumpy (b), flattened-lumpy (e) and lamellar (z) morphological types from placer deposit of the Dunitovaya River in Ag-Au-Cu coordinates (at. %). Grain numbers correspond to those in Table. 2.

Минеральные ассоциации самородного золота и особенности их химического состава. По внутреннему строению изученные зерна золота подразделяются на однородные и гетерогенные. Первые состоят из одного минерала, который характеризуется однородным химическим составом. Ко вторым нами отнесены зерна, состоящие из (1) нескольких минералов [например, электрума (Au, Ag), тетрааурикуприда (AuCu), аурикуприда (Cu₃Au)] или (2) электрума с сильно варьирующим составом (например, от Au-содержащего серебра до Ag-содержащего золота). Среди однородных по составу образцов доминируют природные Ag-Ag сплавы (44 из 47 зерен) над единичными зернами (обр. Д14, Д15, Д43) тетрааурикуприда (табл. 2, рис. 6, а, б). Природные Au-Ag сплавы содержат переменные концентрации золота (39.58–97.80 мас. %) и серебра (2.34–58.83 мас. %); для большинства зерен золота содержание меди не установлено (при пределе обнаружения в 100 ppm) или ее наличие варьирует в интервале от 0.01 до 1.84 мас. % (табл. 2). Данные природные сплавы образуют непрерывный ряд твердых растворов (рис. 6), что характерно для природных соединений в системе Au-Ag (Спиридонов, 2010). В нескольких случаях краевые части образцов, образованные вторичными оторочками шириной 3–10 микрон, состоят из гипергенного самородного золота. Другие образцы представлены природными сплавами системы Au-Ag-Cu, где образцы Д20, Д39 и Д31 (табл. 2, рис. 6, б) характеризуются содержаниями Au (82.66, 90.16 и 87.53 мас. %), Ag (14.90, 6.05 и 5.71 мас. % соответственно) и Cu (2.46, 3.63 и 7.00 мас. % соответственно). Данные природные сплавы в формульном выражении могут быть представлены как Au_{0.70}Ag_{0.23}Cu_{0.07}, Au_{0.80}Cu_{0.10}Ag_{0.10} и Au_{0.73}Cu_{0.18}Ag_{0.09}.

Пробность самородного золота для однородных по составу зерен варьирует в диапазоне от 637 до 974 (табл. 2). Для каплевидно-округлых зерен вариации и среднее значение пробности золота составляют соответственно 673–949 и 782±80, для комковатых – 637–962 и 821±113, для уплощенно-комковатых – 666–972 и 846±101, для пластинчатых – 638–956 и 821±101 (табл. 2). Таким образом, вариации пробности самородного золота для зерен различных морфологических разновидностей близки, с незначительным увеличением среднего значения пробности золота от каплевидно-округлых к уплощенно-комковатым зернам.

Из одиннадцати гетерогенных зерен самородного золота семь представлены каплевидно-округлыми разновидностями, два – комковатыми и по одному

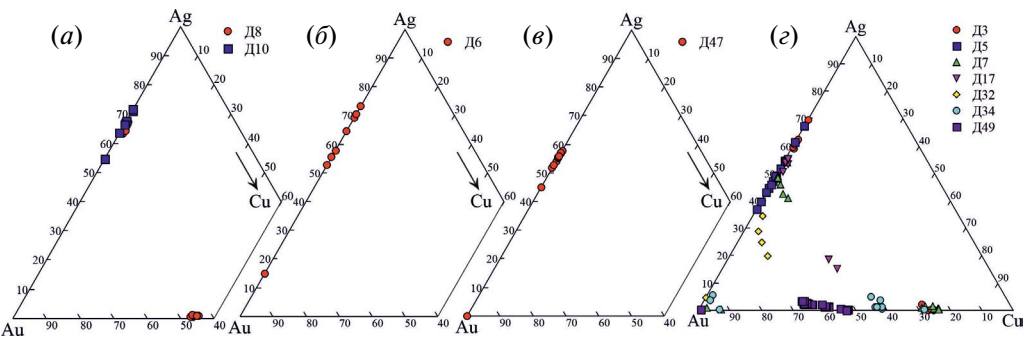


Рис. 7. Химические составы гетерогенных зерен золота комковатого (а), уплощенно-комковатого (б), пластинчатого (в) и каплевидно-округлого (г) морфологических типов из россыпи р. Дунитовой в координатах Ag-Au-Cu (ат. %). Номера зерен соответствуют таковым в табл. 2.

Fig. 7. Chemical compositions of heterogeneous gold grains from lumpy (a), flattened-lumpy (б), lamellar (в) and drop-shaped-rounded (г) morphological types from placer deposit of the Dunitovaya River in Ag-Au-Cu coordinates (at. %). Grain numbers correspond to those in Table. 2.

Таблица 3. Химический (мас. %) и Cu-изотопный ($\delta^{65}\text{Cu}$) состав россыпного золота р. Дунитовой

Table 3. Chemical (wt %) and Cu-isotope ($\delta^{65}\text{Cu}$) data for gold grains from placer deposit of the Dunitovaya River

№ ан.	№ образца, рисунок	Минеральная ассоциация, минерал	Au	Ag	Cu	Сумма	П	n	$\delta^{65}\text{Cu}$
1	Д7, рис. 5, 7, г, 8, а	Электрум	65.43	33.60	1.28	100.31	652	7	-0.25
		Аурикуприд	50.91	0.87	48.32	100.09	509	7	
		Самородное золото	98.33	0.33	1.57	100.23	981	2	
2	Д8, рис. 5, 7, а, 8, б	Электрум	48.47	51.25	0.38	100.10	484	4	0.11
		Тетрааурикуприд	72.14	0.75	27.41	100.30	719	9	
3	Д14, рис. 6, б	Тетрааурикуприд	74.66	1.25	23.79	99.70	749	13	-0.59
4	Д45, рис. 6, б	Электрум	66.17	33.52	0.16	99.85	663	6	0.00
5	Д53, рис. 6, г	Самородное золото	88.00	10.41	1.85	100.26	878	11	-0.45

Примечание. П – пробность; рассчитана по формуле $(\text{Au}_{\text{мас. \%}} / (\text{Au} + \text{Ag} + \text{Cu})_{\text{мас. \%}} \times 1000)$; n – количество анализов.

зерну – уплощенно-комковатыми и пластинчатыми разновидностями. Особенности химического состава гетерогенных зерен золота представлены на рис. 7. Каплевидно-округлые зерна обладают наиболее разнообразным видовым составом минералов золота (например, Au-содержащее серебро (Ag, Au), электрум (Au, Ag), самородное золото Au, неназванный минерал Au_2Cu , тетрааурикуприд AuCu и аурикуприд Cu_3Au) (рис. 7, г). Комковатые зерна образованы Au-содержащим серебром (Ag, Au) и тетрааурикупридом (рис. 7, а), зерна золота уплощенно-комковатого и пластинчатого типа – Au-содержащим серебром, электрумом и самородным золотом (рис. 7, б, 7, в). Особенности их внутреннего строения и химического состава будут рассмотрены нами детально в другой публикации.

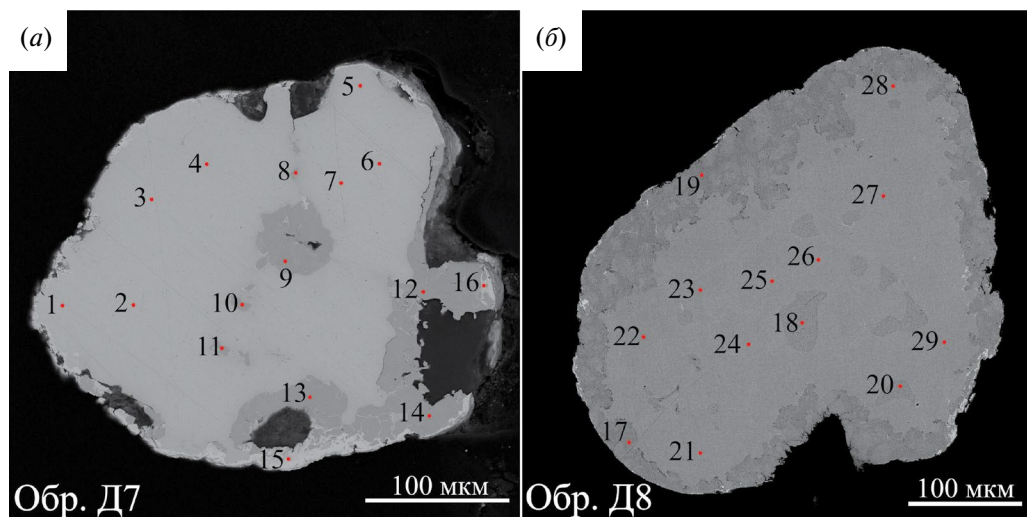


Рис. 8. Внутреннее строение гетерогенных зерен золота из россыпи р. Дунитовой: (а) обр. Д7, (б) обр. Д8. Точки с цифрами 1–29 – места проведения рентгеноспектральных микроанализов, соответствующие таковым номерам в табл. 4. (Au, Ag) – электрум, Au – самородное золото, AuCu – тетрааурикуприд, Cu_3Au – аурикуприд. Изображения в обратно-рассеянных электронах.

Fig. 8. Heterogeneous gold grains from placer deposit of the Dunitovaya River: (a) sample D7, (b) sample D8. Points with numbers 1–29 denote areas of electron microprobe analyses (EMPA) corresponding to the same numbers in Table 4. (Au, Ag) – electrum, Au – native gold, AuCu – tetraauricupride, Cu_3Au – auricupride. BSE images.

Си-изотопные данные. Результаты изучения изотопного состава меди для минералов золота представлены в табл. 3. Гомогенные по составу зерна представлены электрумом (обр. Д45), самородным золотом (обр. Д53) и тетрааурикупридом (обр. Д14). Концентрация меди в электруме и самородном золоте изменяется в пределах 0.16–1.85 мас. % Си; значения $\delta^{65}\text{Si}$ для данных минералов находятся в диапазоне от -0.59 до -0.45‰ (табл. 3), Среднее содержание меди в образце тетрааурикуприда составляет 23.79 ± 2.67 мас. %, значение $\delta^{65}\text{Si} = -0.30 \pm 0.14\text{‰}$ (табл. 3). Гетерогенные зерна (обр. Д7 и Д8) представлены минеральными ассоциациями самородного золота, электрума, тетрааурикуприда и аурикуприда (рис. 8, а, б; табл. 4). В данных минералах содержание меди находится в диапазоне от 0.13–3.43 мас. % в электруме до 43.89–50.90 мас. % в аурикуприде; значения $\delta^{65}\text{Si}$ для гетерогенных зерен золота варьируют от -0.25 до 0.11‰ (табл. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Генетические ограничения на происхождение минералов золота по морфометрическим и минералогическим данным

Форма зерен определяется их видом, сферичностью, степенью окатанности и характерными особенностями поверхности. Морфометрические параметры изученных зерен золота, обобщенные в табл. 2, позволили выявить следующие закономерности. Характер зависимости между крупностью золота и окатанностью характеризуется следующими параметрами: корреляционная зависимость между гидравлической крупностью и фракцией крупности слабая (коэффициент корреляции 0.45), между фракцией крупности и коэффициентом уплощенности – слабая (0.39), между

Таблица 4. Представительные рентгеноспектральные микроанализы минералов золота из гетерогенных зерен Д7 и Д8 р. Дунитовой

Table 4. Representative electron microprobe (WDS) analyses of gold minerals from composite grains D7 and D8 of the Dunitovaya River

№ анализа	Минерал	Au, мас. %	Ag, мас. %	Cu, мас. %	Сумма	Π	Au, ат. %	Ag, ат. %	Cu, ат. %
Зерно Д7 (рис. 5, 7, з, 8, а, 10, а)									
1	Электрум	65.28	34.75	0.38	100.41	650	50.25	48.84	0.91
2		67.48	30.19	2.39	100.06	674	51.90	42.40	5.70
3		66.10	32.75	1.31	100.16	660	50.86	46.02	3.12
4		67.59	29.77	3.43	100.79	671	50.98	41.00	8.02
5		60.07	39.54	0.52	100.13	600	44.87	53.93	1.20
6		65.81	33.90	0.49	100.20	657	50.93	47.90	1.17
7		65.69	34.33	0.41	100.43	654	50.67	48.35	0.98
8	Аурикуприд	53.32	1.43	44.95	99.70	535	27.31	1.34	71.35
9		49.29	0.55	50.78	100.62	490	23.74	0.48	75.78
10		50.64	0.73	48.74	100.11	506	24.94	0.66	74.40
11		55.47	0.82	43.89	100.18	554	28.74	0.78	70.48
12		48.50	0.51	50.90	99.91	485	23.41	0.45	76.14
13		49.01	0.27	50.88	100.16	489	23.65	0.24	76.11
14		50.12	1.77	48.08	99.97	501	24.76	1.60	73.64
15	Самородное золото	98.23	0.13	2.39	100.75	975	92.78	0.22	7.00
16		98.42	0.52	0.74	99.97	987	96.81	0.93	2.26
Зерно Д8 (рис. 5, 7, а, 8, б, 10, б)									
17	Электрум	46.42	53.63	0.28	100.33	463	31.97	67.43	0.60
18		50.58	49.27	0.43	100.28	504	35.65	63.41	0.94
19		47.94	52.22	0.13	100.29	478	33.36	66.36	0.28
20		48.95	49.89	0.66	99.50	492	34.45	64.11	1.44
21	Тетра-аурикуприд	71.91	0.80	27.55	100.26	717	45.29	0.92	53.79
22		71.69	0.81	27.50	100.00	717	45.26	0.93	53.81
23		71.17	0.83	28.41	100.41	709	44.28	0.94	54.78
24		72.43	0.67	27.43	100.53	720	45.65	0.77	53.58
25		72.60	0.46	27.09	100.15	725	46.12	0.53	53.35
26		73.12	0.50	26.48	100.10	730	46.84	0.58	52.58
27		71.98	0.87	27.29	100.14	719	45.51	1.00	53.49
28		72.43	1.09	26.95	100.47	721	45.86	1.26	52.88
29		71.91	0.69	28.02	100.62	715	44.94	0.79	54.27

Примечание. Π – пробность золота.

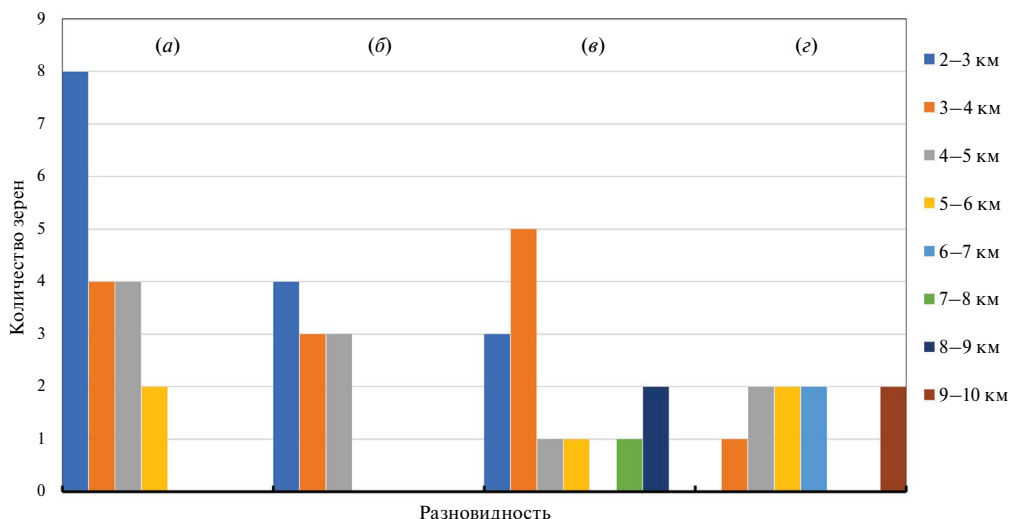


Рис. 9. Частоты значений расстояния (км) от коренного источника для зерен золота каплевидно-округлых (а), комковатых (б), уплощенно-комковатых (в) и пластинчатых (г) разновидностей из россыпи р. Дунитовой

Fig. 9. Histogram of transport distance values (km) from bedrock source for gold grains of drop-shaped-rounded (a), lumpy (б), flattened-lumpy (в) and lamellar (г) varieties from placer deposit of the Dunitovaya River.

фракцией крупности и коэффициентом удлиненности — очень слабая (0.25). Большинство крупных зерен представлено комковатым и уплощенно-комковатым морфологическим типом, средних — всеми морфотипами, мелких — каплевидно-округлым и уплощенно-комковатым морфотипами, при этом в них отсутствуют зерна самородного золота пластинчатой формы. В целом наблюдается слабо выраженная тенденция увеличения степени окатанности с увеличением размера зерен.

В ряде исследований (Youngson, Craw, 1999; Hérail et al., 1990; Loen, 1995; Melchiorre et al., 2023) показано, что морфометрические показатели зерен золота могут быть использованы для определения дальности переноса от коренного источника, из которого они поступали в россыпь. Количественную оценку расстояния (P) от коренного источника (в км) для каждого зерна рассчитывали по формуле $P = 1.2833 + (K_{\text{упл}} - 0.57662) + (K_{\text{упл}}^2 \times 0.31718)$, (Cailleux, Tricart, 1959; Hérail et al., 1990). При этом по рекомендации (Hérail et al., 1990) коэффициент уплощенности для зерен золота, чей размер превышал 1.25 мм, не был использован для определения расстояния от коренного источника; соответственно, эти зерна были исключены из выборки (табл. 2). Характер распределения значений дальности переноса (км) от коренного источника для зерен золота каплевидно-округлых (а), комковатых (б), уплощенно-комковатых (в) и пластинчатых (г) разновидностей показан на рис. 9. Каплевидно-округлые и комковатые зерна золота р. Дунитовой характеризуются идентичными средними значениями P , соответственно 3.5 ± 1.0 ($n = 18$) и 3.4 ± 0.8 ($n = 10$) км. Для уплощенно-комковатых разновидностей зерен золота среднее значение дальности переноса составило 4.7 км при стандартном отклонении 2.3 км ($n = 11$) км. При исключении двух наибольших значений (26.1 и 18.6 км) из выборки зерен пластинчатого морфологического типа среднее значение P оказалось равным 6.2 км со стандартным отклонением 2.1 км ($n = 9$) (табл. 2).

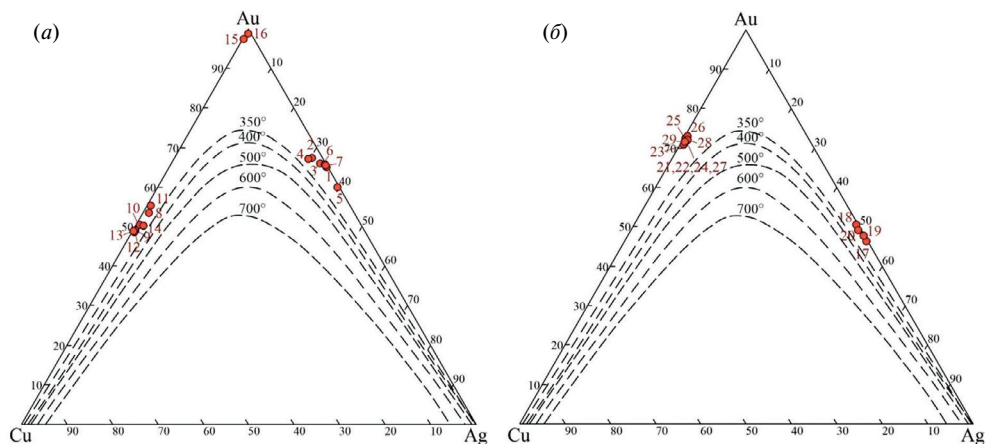


Рис. 10. Состав полиминеральных ассоциаций зерен золота Д7 (а) и Д8 (б) из россыпи р. Дунитовой на диаграмме Au-Cu-Ag. На диаграмму нанесены изотермы тройного твердого раствора по экспериментальным данным (Дриц и др., 1979). Точки с цифрами 1–29 – места проведения рентгеноспектральных микроанализов, соответствующие таковым номерам в табл. 4.

Fig. 10. Au-Cu-Ag composition diagram (wt %) for gold minerals within heterogeneous grains D7 (a) and D8 (b) from placer deposit of the Dunitovaya River. The diagram shows isotherms of a ternary solid solution based on experimental data (Dritz et al., 1979). Points with numbers 1–29 denote areas of EMP analyses corresponding to the same numbers in Table 4.

Полученные результаты демонстрируют тенденцию увеличения расстояния переноса уплощенно-комковатого и пластинчатого самородного золота по сравнению с комковатыми и каплевидно-комковатыми разновидностями. Отметим, что среднее значение пробности самородного золота имеет сходную тенденцию от каплевидно-округлых и комковатых разновидностей (782 и 822 соответственно) к уплощенно-комковатым (846). Кроме того, содержание меди характерно не для всех морфологических разновидностей золота, встречаясь преимущественно в каплевидно-округлых и комковатых зернах (рис. 6, 7). Учитывая незначительный характер переноса минералов россыпного золота (4–6 км) можно предположить, что различная морфология зерен золота отражает не столько характер переноса в водном потоке, сколько обусловлена разными коренными источниками и, возможно, условиями образования минералов золота. Другими словами, выявленные каплевидно-округлые, комковатые, уплощенно-комковатые и пластинчатые разновидности золота могут характеризовать различные этапы золотого минералообразования в породах Гулинского массива. Необходимо отметить, что оценка дальности переноса россыпного золота зависит от многих факторов (от химического состава самородного золота и воды, от временного интервала, в течение которого конкретная частица подвергалась переносу, от климатических условий и т.д.). Однако полученные данные о расстоянии перемещения россыпного золота р. Дунитовой, даже если признать их полуколичественными, весьма информативны для понимания потенциальных источников россыпного золота. С учетом геологической обстановки расположения русловых и террасовых отложений р. Дунитовой, мы полагаем, что главными источниками изученных морфологических разновидностей золота являлись породы Маймеч-Котуйского ийолит-карбонатитового комплекса.

Первая находка самородного золота (размером около 20 микрон в поперечнике) из дунитов Гулинского массива охарактеризована в работе (Когарко, Сенин, 2011). Анализ состава золотой минерализации и минералов-узников в россыпном золоте

Гулинского массива позволил сделать вывод о длительном процессе формирования золотого оруденения массива (Сазонов и др., 2001; Малич и др., 2013; Рябчиков и др., 2016) – от высокотемпературной магматической (перовскит, бадделит и др.) до низкотемпературной гидротермальной стадии (галенит, гематит, хлорит и др.). Верхний температурный предел постмагматического рудообразования определялся формированием тетрааурикуприда (менее 410 °С, Okamoto et al., 1987). Однако для тетрааурикуприда и аурикуприда в составе гетерогенных зерен золота (обр. Д7 и Д8) из россыпи р. Дунитовой (рис. 10) можно предположить еще более низкотемпературные условия образования.

По данным исследования (Рябчиков и др., 2016) формирование зерен золота могло происходить как в высокомагнезиальных породах, так и в породах щелочных и карбонатитовых серий. Первые находки минералов золота из кальцит-доломитовых карбонатитов Южного карбонатитового штока (рис. 1) подтвердили это предположение (Malitch et al., 2024). Минералы золота размером от 200 до 1300 микрон в поперечнике представлены природными Au–Ag сплавами с содержанием золота (69.64–88.57 мас. %) и серебра (11.73–30.83 мас. %) с низкими концентрациями меди (до 0.18 мас. %), которые преобладают над минералами системы Au–Cu–Ag – природными сплавами $Au_{0.74}Cu_{0.14}Ag_{0.12}$ и $Ag_{0.51}Au_{0.47}Cu_{0.02}$, тетрааурикупридом (AuCu) и аурикупридом (Cu_3Au). Для минералов золота характерна ранняя пентландит-троилит-халькопиритовая ассоциация, установленная в составе идиоморфных полифазных включений; более поздний галенит в составе субидиоморфных монофазных включений замещается церусситом (Malitch et al., 2024). Выявленное сходство минералов золота из кальцит-доломитовых карбонатитов с таковыми из россыпей Гулинского массива (Сазонов и др., 1994; 2001; Малич, 2021) свидетельствует о том, что в золотом рудообразовании значительная роль принадлежала производным ийолит-карбонатитового магматизма.

Генетические ограничения на происхождение минералов золота по Си-изотопным данным

С появлением многоколлекторной масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (MC-ICP-MS) (Marechal et al., 1999) стало возможно проводить изучение изотопной геохимии переходных металлов в природных системах. Изотопный состав меди ($\delta^{65}Cu$) для «валовой силикатной Земли» (Bulk Silicate Earth (BSE); т.е., мантии и коры), составляющий $0.06 \pm 0.20\text{‰}$ (Liu et al., 2015), базируется на представительной выборке мантийных перидотитов, коматитов, базальтов срединно-океанических хребтов (MORB), базальтов океанических островов (OIB). Аналогичные или даже более узкие диапазоны значения величины $\delta^{65}Cu$ были зарегистрированы в мантийных перидотитах (от 0.0 до 0.18‰, Ben Othman et al., 2006), базальтах (от –0.10 до –0.03‰, Luck et al., 2003) и гранитах [от –0.46 до 1.51‰, с основным кластером в пределах от –0.14 до $\leq 0.25\text{‰}$ и средним $\delta^{65}Cu$ $0.01 \pm 0.30\text{‰}$ ($n=30$), при исключении двух образцов, выходящих за пределы кластера основных данных (Li et al., 2009)]. В ранее опубликованной работе (Graham et al., 2004) показано, что окислительно-восстановительные реакции играют важную роль при фракционировании изотопов Cu при низких температурах. В общем случае вариации изотопного состава меди в первичных и вторичных Cu-содержащих минералах могут быть обусловлены фракционированием между различными сложными соединениями в растворе (Maréchal, Albarède, 2002) или связаны с влиянием изотопно различных флюидов при гидротермальных процессах (Graham et al., 2004).

Возможность использования изотопного состава меди с целью идентификации источника рудного вещества самородного золота была впервые апробирована (Melchiorre et al., 2023) на россыпных месторождениях в районе Ла Чолла (La Cholla)

в штате Аризона (США). В данном исследовании было установлено различие изотопного состава меди для угловато-уплощенных и равномернозернистых разновидностей самородного золота ($\delta^{65}\text{Cu}$ $0.54 \pm 0.22\text{‰}$ и $2.8 \pm 1.0\text{‰}$ соответственно). По мнению Е.Б. Мелчиорри с соавторами (Melchiorre et al., 2023), более низкие значения изотопного состава меди для золота угловато-уплощенной формы отражают их первичную характеристику, тогда как образование золота кристаллического облика обусловлено изотопно-тяжелым составом меди гидротермального флюида, который был унаследован при образовании золота данного типа.

Первые данные по изотопному составу меди для золота из различных морфологических типов р. Дунитовой характеризуются близкими значениями $\delta^{65}\text{Cu}$ в диапазоне от -0.59 до 0.11‰ ($\delta^{65}\text{Cu}$ среднее = $-0.30 \pm 0.23\text{‰}$, $n = 5$), что сходно с таковыми для образцов железистой платины Гулинского и Нижнетагильского массивов [$\delta^{65}\text{Cu}$ среднее = $-0.03 \pm 0.23\text{‰}$ и $-0.26 \pm 0.12\text{‰}$ соответственно (Малич и др., 2024)], а также изоферроплатины Светлоборского массива [$\delta^{65}\text{Cu}$ среднее = $-0.05 \pm 0.20\text{‰}$ (Малич и др., 2024)]. Отметим, что значения $\delta^{65}\text{Cu}$ близкие к 0‰ типичны для высокотемпературных Cu-содержащих минералов (Larson et al., 2003). В данном контексте, значения $\delta^{65}\text{Cu}$ для изученных образцов различных морфологических типов россыпного золота р. Дунитовой свидетельствуют в пользу их происхождения из примитивного источника рудного вещества. Таким образом, характер вариаций изотопного состава меди в минералах золота может быть использован в качестве дополнительного маркера, позволяющего по-новому охарактеризовать условия формирования золотой минерализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере россыпного золота р. Дунитовой в пределах Гулинского массива ультраосновных и щелочных пород с карбонатами Маймеча-Котуйской провинции охарактеризованы морфологические, химические и изотопно-геохимические параметры золотой минерализации. При проведении исследований был использован комплексный подход с привлечением морфометрического анализа, рентгеноспектрального микроанализа и Cu-изотопно-геохимического метода анализа.

По морфологии зерна самородного золота были подразделены на каплевидно-округлые, комковатые, уплощенно-комковатые и пластинчатые разновидности; определены их основные морфометрические параметры (длина, ширина и толщина, коэффициент уплощенности, коэффициент удлиненности, средний размер, гидравлическая крупность), среднестатистические характеристики химического состава. Показано морфологическое разнообразие зерен золота в координатах сферичность – округлость. Наибольшим распространением обладают средневывянутые зерна (с коэффициентом сферичности 0.5), которые при этом слабо-, средне-, хорошо- или сильноокатаны (с коэффициентом округлости соответственно 0.3, 0.5, 0.7 и 0.9).

По внутреннему строению изученные зерна самородного золота подразделяются на гомогенные и гетерогенные. Первые состоят из одного минерала, который характеризуется однородным химическим составом. Ко вторым нами отнесены зерна, (1) содержащие несколько минералов (например, электрум, тетрааурикуприд, аурикуприд) или (2) состоящие из электрума с сильно варьирующим составом (от Au-содержащего серебра до Ag-содержащего золота). Среди гомогенных по составу образцов доминируют природные Ag-Ag сплавы над единичными зернами тетрааурикуприда (AuCu). Гетерогенные зерна представлены минеральными ассоциациями самородного золота, электрума, тетрааурикуприда и аурикуприда. Содержание меди характерно преимущественно для каплевидно-округлых и комковатых зерен золота. Выявлено, что среднее значение пробности и среднее расстояние переноса россыпного золота от

коренного источника увеличивается от каплевидно-округлых и комковатых разновидностей к уплощенно-комковатым и пластинчатым. Первые данные по изотопному составу меди для самородного золота из различных морфологических типов р. Дунитовой характеризуются близкими значениями $\delta^{65}\text{Cu}$ в диапазоне от -0.59 до 0.11‰ ($\delta^{65}\text{Cu}$ среднее $= -0.30 \pm 0.23\text{‰}$, $n = 5$), что свидетельствует об их происхождении из примитивного источника рудного вещества.

Учитывая незначительный характер переноса минералов россыпного золота (4–6 км) мы полагаем, что различная морфология зерен золота отражает не только характер переноса в водном потоке, но также обусловлена разными коренными источниками и, возможно, различными условиями образования минералов золота. С учетом геологической обстановки расположения русловых и террасовых отложений р. Дунитовой и незначительного характера переноса россыпного золота, главными источниками изученных морфологических разновидностей золота являлись породы Маймеча-Котуйского ийолит-карбонатитового комплекса.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН (№ госрегистрации 122022600107-1). Авторы признательны В.А. Булатову, Т.Г. Окуневой, Н.Г. Солошенко и Н.С. Чебыкину за помощь при проведении минералогических и изотопных аналитических работ, а также М.М. Гончарову, Г.Г. Лопатину и Н.Г. Науменко за многолетнее сотрудничество и возможность изучения благороднометальной минерализации Маймеча-Котуйской провинции. Авторы благодарны анонимным рецензентам за конструктивные замечания, которые способствовали улучшению рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Баданина И.Ю., Малич К.Н., Гончаров М.М., Туганова Е.В. Благороднометалльные россыпи Гулинского массива (север Сибирской платформы): новые данные о необычных минеральных ассоциациях золота и платиноидов // Материалы Всероссийской конференции «Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований». Москва: ИГЕМ РАН, **2010**. Т. 1. С. 56–58.

Балмасова Е.А., Смольская Л.С., Лопатина Л.А., Лопатин Г.Г., Лазаренков В.Г., Малич К.Н. Самородный осмий и иридоосмин Гулинского массива // Докл. АН. **1992**. Т. 323. № 4. С. 748–751.

Баранников А.Г. О цифровизации параметров частиц самородного золота при изучении россыпей и шлихо-минералогических исследованиях // Известия УГГУ. **2021**. Вып. 2(62). С. 60–72.

Дриц М.Е, Бочвар Н.Р., Гузей Л.С., Лысова Е.В., Падежнова Е.М., Рохлин Л.Л., Туркина Н.И. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: справочник / отв. ред. Абrikосов Н.Х. Москва: Наука, **1979**. 248 с.

Егоров Л.С. Ийолит-карбонатитовый плутонизм (на примере маймеча-котуйского комплекса Полярной Сибири). Л.: Недра, **1991**. 260 с.

Козарко Л.Н., Сенин В.Г. Первая находка золота в коренных породах Гулинского массива (Полярная Сибирь) // Докл. АН. **2011**. Т. 441. № 1. С. 81–82.

Лопатин Г.Г. К открытию россыпей благородных металлов в Маймеча-Котуйской провинции / Очерки по истории открытий минеральных богатств Таймыра (отв. ред. Самойлов А.Г.). Новосибирск: Издательство Новосибирского университета, филиал «Гео» Издательства СО РАН, **2001**. С. 156–158.

Малич К.Н. Платиноиды клинопироксенит-дунитовых массивов Восточной Сибири (геохимия, минералогия, генезис). Санкт-Петербург: Санкт-Петербургская картографическая фабрика ВСЕГЕИ, **1999**. 296 с.

Малич К.Н. Комплексные платинометалльные месторождения Полярной Сибири (состав, источники вещества и условия образования): дис. ... докт. г.-м. наук, Новосибирск, **2022**. 269 с.

Малич К.Н., Лопатин Г.Г. Геология и формационная принадлежность ультрамафитов Гулинского интрузива / Недра Таймыра. **1997а**. Вып. 2. С. 86–103.

Малич К.Н., Лопатин Г.Г. Новые данные о металлогении уникального Гулинского клинопироксенит-дунитового массива (Северная Сибирь, Россия) // Геол. рудн. месторожд. **1997**. Т. 39. № 3. С. 247–257.

Малич К.Н., Рудашевский Н.С. О коренной минерализации платиноидов хромититов Гулинского массива // Докл. АН. **1992**. Т. 325. № 5. С. 1026–1029.

Малич К.Н., Баданина И.Ю., Гончаров М.М., Лопатин Г.Г., Науменко Н.Г., Туганова Е.В. Маймеч-Котуйский регион – новая платинометальная провинция России // Докл. АН. **1996**. Т. 348. № 2. С. 232–235.

Малич К.Н., Малич Н.С., Симонов О.Н., Лопатин Г.Г., Науменко Н.Г. Иридиево-осмиевые россыпи Маймеч-Котуйской провинции – новый российский источник тугоплавких платиноидов // Отечественная геология. **1998**. № 3. С. 30–35.

Малич К.Н., Сорохтина Н.В., Баданина И.Ю., Кононкова Н.Н. О коренных источниках благороднометаллических россыпей Гулинского массива (Полярная Сибирь): новые минералогические данные // Доклады АН. **2013**. Т. 451. № 1. С. 87–89.

Малич К.Н., Пухтель И.С., Баданина И.Ю., Вотяков С.Л., Солошенко Н.Г., Белоусова Е.А., Велевецкая Т.А., Игнатьев А.В. Источники рудного вещества платинометаллических месторождений Полярной Сибири и Среднего Урала по данным радиогенных (Re-Os, Pt-Os) и стабильных (Cu, S) изотопных систем. Геология и геофизика // **2024**. Т. 65. № 3. С. 401–426.

Рябчиков И.Д., Козарко Л.Н., Сазонов А.М., Кононкова Н.Н. Условия формирования золоторудной минерализации в щелочно-ультраосновных магматических комплексах // Доклады АН. **2016**. Т. 468. № 6. С. 680–683.

Сазонов А.М., Романовский А.Э., Гринев О.М., Лаврентьев Ю.Г., Майорова О.Н., Поспелова Л.Н. Благороднометаллическая минерализация Гулинской интрузии (Сибирская платформа) // Геология и геофизика. **1994**. Т. 35. № 9. С. 51–65.

Сазонов А.М., Звягина Е.А., Леонтьев С.И., Гертнер И.Ф., Краснова Т.С., Колмаков Ю.В., Панина Л.И., Чернышов А.И., Макеев С.М. Платиноносные щелочно-ультраосновные интрузии Полярной Сибири. Томск: изд. ЦНТИ, **2001**. 510 с.

Сорохтина Н.В., Козарко Л.Н., Зайцев В.А., Кононкова Н.Н., Асавин А.М. Сульфидные ассоциации карбонатитов и фоскоритов Гулинского массива (Полярная Сибирь) и их перспективность на благородные металлы // Геохимия. **2019**. Т. 64. № 11. С. 1111–1132.

Спиридонов Э.М. Обзор минералогии золота в ведущих типах Au минерализации / Золото Кольского полуострова и сопредельных регионов (Труды Всероссийской (с международным участием) научной конференции, посвященной 80-летию Кольского НЦ РАН. Апатиты, 26–29 сентября 2010 г.). Апатиты: изд. K&M, **2010**. С. 143–171.

Morphology and Composition of Gold Minerals from the Placer Deposit of Dunitovaya River (Maimecha-Kotui Province, Polar Siberia)

K. N. Malitch, A. A. Voitin

Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch RAS,
Ekaterinburg, Russia
e-mail: dunito@yandex.ru

Complex gold-iridium-osmium placer deposits are associated with the Guli massif of ultramafic, alkaline rocks and carbonatites within the Maimecha-Kotui province in the northern part of the Siberian Platform. Unlike natural Os-Ir alloys, which are genetically related to ultramafic rocks, the bedrock source of gold remains controversial. We report, for the first time, morphological and compositional features of gold mineralization from the Quaternary deposits of the Dunitovaya River in the southern part of the Guli massif. According to the morphology, gold grains are subdivided into drop-shaped-rounded, lumpy, flattened-lumpy and lamellar varieties; their main morphometric parameters, gold fineness and average statistical characteristics of the chemical composition are presented. Based on their internal structure, the studied gold grains are subdivided into homogeneous, consisting predominantly of electrum of homogeneous composition,

and heterogeneous, containing (1) several minerals (e.g., electrum, tetra-aurocupride, aurocupride) or (2) formed by electrum with a highly variable composition (i.e., from Au-bearing silver to Ag-bearing gold). The first copper isotopic data for gold grains from various morphological types of the Dunitovaya River are characterized by similar $\delta^{65}\text{Cu}$ values in the range from -0.59 to 0.11‰ ($\delta^{65}\text{Cu}$ average = $-0.30 \pm 0.23\text{‰}$, $n = 5$), which is in favor of a primitive source of ore matter. Taking into account the geological background of the location of channel and terrace deposits of the Dunitovaya River, the insignificant character of the transfer for placer gold (4–6 km), and the similarity of gold minerals from the Dunitovaya River with gold minerals from calcite carbonatite, we propose that the main bedrock sources of the studied morphological varieties of gold were the rocks of the Maimecha-Kotui ijolite-carbonatite complex.

Keywords: morphology, morphometric parameters, native gold, Cu-isotopic composition, carbonatite, placer deposit of the Dunitovaya River, bedrock sources, Guli massif, Maimecha-Kotui Province, Polar Siberia

REFERENCES

- Badanina I.Yu., Malitch K.N., Goncharov M.M., Tuganova E.V. Precious metal placers of the Gulinsky massif (north of the Siberian platform): new data on unusual mineral associations of gold and platinum group metals. In: *Mat. All-Rus. conf. "Native gold: typomorphism of mineral associations, conditions for the formation of deposits, problems of applied research"* Moscow: IGEM RAS, **2010**. Vol. 1. P. 56–58.
- Balmasova Y.A., Smol'skaya L.S., Lopatina L.A., Lopatin G.G., Lazarenkov V.G., Malitch K.N. Native osmium and iridosmine from the Guli massif. *Doklady Earth Sci.* **1992**. Vol. 325. N 5. P. 154–157 (in Russian).
- Barannikov A.G. About the digitalization of the parameters of native gold particles in the study of placers and schlich-mineralogical studies. *Proc. Ural State Mining Univ.* **2021**. N 2(62). P. 60–72. (in Russian). DOI: 10.21440/2307-2091-2021-2-60-72
- Ben Othman D., Luck J.M., Bodinier J.L., Arndt N.T., Albarede F. Cu-Zn isotopic variations in the Earth's mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **2006**. Vol. 70 (18 suppl. 1). P. A46.
- Cailleux A., Tricart J. Introduction to the study of sand and pebbles. Paris: Cent. Doc. Univ., **1959**. Vol. 3. 364 p.
- Drits M.E., Bochvar N.R., Guzei L.S., Lysova E.V., Padezhnova E.M., Rokhlin L.L., Turkina N.I. Binary and multicomponent copper-based systems: Handbook (Abrikosov N.Kh., ed.). Moscow: Nauka, **1979**. 248 p. (in Russian).
- Graham S., Pearson N., Jackson S., Griffin W., O'Reilly S.Y. Tracing Cu and Fe from source to porphyry: in situ determination of Cu and Fe isotope ratios in sulfides from the Grasberg Cu-Au deposit. *Chem. Geol.* **2004**. Vol. 207. P. 147–169.
- Hérail G., Fornari M., Viscarra G., Miranda V. Morphological and chemical evolution of gold grains during the formation of a polygenic fluvial placer: the Mio-Pleistocene Tipuani placer example (Andes, Bolivia). *Chronicle of Mining Res.* **1990**. Vol. 500. P. 41–49.
- Egorov L.S. Ijolite-carbonatite plutonism (the Maimecha-Kotui Complex of Polar Siberia as an example). Leningrad: Nedra, **1991**. 260 p. (in Russian).
- Kogarko L.N., Senin V.G. The first find of native gold in parent rocks of the Gulinskii Massif (Polar Siberia). *Dokl. Earth Sci.* **2011**. Vol. 441. N 1. P. 1512–1513.
- Kogarko L.N., Kononova V.A., Orlova M.P., Wooley A.R. Alkaline rocks and carbonatites of the world. Part 2: Former USSR. London, UK: Chapman and Hall, **1995**. 226 p.
- Krumbein W., Sloss L. Stratigraphy and Sedimentation. 2nd Edition. San Francisco: W.H. Freeman and Co., **1963**. 660 p.
- Larson P.B., Maher K., Ramos F.C., Chang Z.S., Gaspar M., Meinert L.D. Copper-isotope ratios in magmatic and hydrothermal ore-forming environments. *Chem. Geol.* **2003**. Vol. 201. N 3–4. P. 337–350.
- Li W.-Q., Jackson S.E., Pearson N.J., Alard O., Chappell B.W. The Cu isotopic signature of granites from the Lachlan Fold Belt, SE Australia. *Chem. Geol.* **2009**. Vol. 258. P. 38–49.

Liu S.-A., Huang J., Liu J., Wörner G., Yang W., Tang Y.-J., Chen Y., Tang L., Zheng J., Li S. Copper isotopic composition of the silicate Earth. *Earth Planet. Sci. Lett.* **2015**. Vol. 427. P. 95–103.

Luck J.-M., Ben Othman D., Albarede F. Zn and Cu isotopic variations in chondrites and iron meteorites: early solar nebula reservoirs and parent-body processes. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **2005**. Vol. 69. P. 5351–5363.

Loen J.S. Use of placer gold characteristics to locate bedrock gold mineralization. *Expl. Mining Geol.* **1995**. Vol. 4. P. 335–339.

Lopatin G.G. About the discovery of noble-metal placers in the Maimecha-Kotui province. In: *Feature articles about the history of discoveries of mineral wealth of Taimyr* (Samoilov A.G. ed.). Novosibirsk: Novosibirsk University, **2001**. P. 156–158 (in Russian).

Malitch K.N. Platinum-group elements in clinopyroxenite-dunite massifs of the Eastern Siberia (geochemistry, mineralogy, genesis). Saint Petersburg: Saint Petersburg Cartographic Factory VSEGEI, **1999**. 296 p. (in Russian).

Malitch K.N. Complex PGE deposits of the Polar Siberia (composition, sources and conditions of formation). Habil. Dr. thesis. Ekaterinburg: IGG UB RAS, **2022**. 269 p. (in Russian).

Malitch K.N., Lopatin G.G. Geology and petrographic association of ultramafites of the Guli intrusion. In: Resources of Taimyr (Simonov O.N., Malitch N.S., eds.). Norilsk: VSEGEI Press, **1997a**. N 2. P. 86–103 (in Russian).

Malitch K.N., Lopatin G.G. New data on the metallogeny of the unique Guli clinopyroxenite-dunite Massif, Northern Siberia, Russia. *Geol. Ore Deposites.* **1997b**. Vol. 39. N 3. P. 209–218.

Malitch K.N., Rudashevskiy N.S. Bedrock platinum-metal mineralization in chromitite of the Guli Massif. *Doklady Earth Sci.* **1992**. Vol. 327. N 8. P. 165–169.

Malitch K.N., Badanina I.Yu., Goncharov M.M., Lopatin G.G., Naumenko N.G., Tuganova E.V. The Maimecha-Kotui Region: a new platinum province in Russia. *Doklady Earth Sci.* **1996**. Vol. 348. N 4. P. 574–577.

Malitch K.N., Malitch N.S., Simonov O.N., Lopatin G.G., Naumenko N.G. Iridium-osmium placers of the Maimecha-Kotuy province – the new Russian source for refractory platinum-group elements. *Native Geol.* **1998**. N 3. P. 30–34 (in Russian).

Malitch K.N., Auge T., Badanina I.Yu., Goncharov M.M., Junk S.A., Pernicka E. Os-rich nuggets from Au-PGE placers of the Maimecha-Kotui Province, Russia: a multidisciplinary study. *Miner. Petrol.* **2002**. Vol. 76. P. 121–148.

Malitch K.N., Sorokhtina N.V., Badanina I.Yu., Kononkova N.N. Parent sources of noble-metal placers of the Guli massif (Polar Siberia): new mineralogical data. *Dokl. Earth Sci.* **2013**. Vol. 451. N 1. P. 743–745.

Malitch K.N., Lipenkov G.V., Ozornin D.A., Naumov M.V., Badanina I.Yu., Bulatov V.A., Voitina A.A. Gold mineralization from calcite-dolomite carbonatite of the Guli massif (Maimecha-Kotui province, Polar Siberia): first results. *Dokl. Earth Sci.* **2024a**. Vol. 519. N 1. P. 1899–1905.

Malitch K.N., Puchtel I.S., Badanina I.Yu., Votyakov S.L., Soloshenko N.G., Belousova E.A., Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V. Sources of ore material in the platinum-group element deposits of Polar Siberia and the Middle Urals based on the data from radiogenic (Re-Os, Pt-Os) and stable (Cu, S) isotopes. *Russian Geol. Geophys.* **2024b**. Vol. 65. N 3. P. 366–387.

Maréchal C., Albarede F. Ion-exchange fractionation of copper and zinc isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **2002**. V. 66. P. 1499–1509.

Maréchal C., Telouk P., Albarede F. Precise analysis of copper and zinc isotopic compositions by plasma-source mass spectrometry. *Chem. Geol.* **1999**. Vol. 156. P. 251–273.

Melchiorre E.B., Mathur R., Kamenov G., Paredes J. Geochemical overprinting and secondary placer crystal formation in the La Cholla District, Quartzsite, Arizona, USA: evidence from copper isotopes, morphology, and trace elements. *Minerals.* **2023**. Vol. 13. Paper 1444.

Okamoto H., Chakrabarti D.J., Laughlin D.E., Massalski T.B. The Au-Cu (Gold-Copper) system. *J. Phase Equilibria.* **1987**. Vol. 8. N 5. P. 454–474.

Okuneva T.G., Karpova S.V., Streletskaya M.V., Soloshenko N.G., Kiseleva D.V. The method for Cu and Zn isotope ratio determination by MC ICP-MS using the AG MP-1 resin. *Geodynamics & Tectonophysics.* **2022**. Vol. 13(2s). 0615.

Ryabchikov I.D., Kogarko L.N., Sazonov A.M., Kononkova N.N. Formation of gold mineralization in ultramafic alkalic magmatic complexes. *Dokl. Earth Sci.* **2016**. Vol. 468. N 2. P. 623–625.

Sazonov A.M., Romanovsky A.E., Grinev O.M., Mayorova O.N., Pospelova L.N. Precious-metal mineralization of the Guli intrusion. *Russian. Geol. Geophys.* **1994**, Vol. 35. N 9. P. 51–65 (in Russian).

Sazonov A.M., Zvyagina E.A., Leontyev S.I., Gertner I.F., Krasnova T.S., Kolmakov Yu.V., Panina L.I., Chernyshov A.I., Makeev S.M. Platinum-bearing alkaline-ultrabasic intrusions of Polar Siberia. Tomsk: CNTI Press, **2001**. 510 p. (in Russian).

Sazonov A.M., Romanovsky A.E., Gertner I.F., Zvyagina E.A., Krasnova T.S., Grinev O.M., Silyanov S.A., Kolmakov Yu.V. Genesis of precious metal mineralization in intrusions of ultramafic, alkaline rocks and carbonatites in the north of the Siberian Platform. *Minerals*. **2021**. Vol. 11. Paper 354.

Sorokhtina N.V., Kogarko L.N., Zaitsev V.A., Kononkova N.N., Asavin A.M. Sulfide mineralization in the carbonatites and phoscorites of the Guli Massif (Polar Siberia), and their noble-metal potential. *Geochem. Int.* **2019**. Vol. 64. N 11. P. 1125–1146.

Spiridonov E.M. Review of gold mineralogy in the leading types of Au mineralization. In: *Gold of the Kola Peninsula and adjacent regions (Proc. All-Russ. sci. conf. dedicated to the 80th anniv. of the Kola Scientific Centre of the RAS. Apatity, September 26–29, 2010)* (ed. Yu.L. Voitekhovsky). Apatity: K&M Press, **2010**. P. 143–171 (in Russian).

Youngson J.H., Craw D. Variation in placer style, gold morphology, and gold particle behavior down gravel bed-load rivers: an example from the Shotover/Arrow-Kawarau-Clutha River System, Otago, New Zealand. *Econ. Geol.* **1999**. Vol. 94. P. 615–634.