

УДК [553.98.041:550.834.52.05]:(571.7)

DOI: 10.24930/1681-9004-2026-26-2-449-468

Особенности химического и Си-изотопного состава самородного золота из карбонатитов и четвертичных отложений Гулинского массива (Маймеча-Котуйская провинция, Россия)

К. Н. Малич¹, Г. В. Липенков², А. А. Войтин¹, В. В. Мурзин¹, И. Ю. Баданина¹,
Д. А. Озорнин¹, Н. Г. Солошенко¹

¹Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург,
ул. Академика Вонсовского, 15, e-mail: dunite@yandex.ru

²Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, 199106, г. Санкт-Петербург,
Средний пр-т, 74, e-mail: Gleb_Lipenkov@karpinskyinstitute.ru

Поступила в редакцию 25.11.2025 г., принята к печати 04.12.2025 г.

Объект исследования. Минеральные ассоциации самородного золота из карбонатитов и четвертичных отложений Гулинского массива (Маймеча-Котуйская провинция, Россия), с которым ассоциируют комплексные золото-пиритово-осмиевые россыпные месторождения. **Цель.** Изучение минеральных ассоциаций и вариаций химического и Си-изотопного состава самородного золота из кальцит-доломитовых карбонатитов Южного карбонатитового штока и четвертичных отложений р. Гулэ, дренирующей карбонатиты Гулинского массива. **Методы.** Химический состав самородного золота изучен с помощью рентгеноспектрального микроанализатора CAMECA SX 100. Аналитическая методика определения $\delta^{65}\text{Cu}$ включала в себя растворение образцов в смеси кислот HCl и HNO₃, селективное хроматографическое выделение Си из раствора с последующим определением изотопного отношения $^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu}$ на масс-спектрометре Neptune Plus. **Результаты.** Проанализированные образцы представлены монофазными и полифазными минеральными ассоциациями самородного золота в составе гомогенных и гетерогенных зерен, которые состоят из высокопробного золота, электрума, минеральных фаз системы Au–Ag–Cu, тетраурикуприда и аурикуприда. Первые Си-изотопные данные для минералов золота из кальцит-доломитовых карбонатитов Гулинского массива и четвертичных отложений р. Гулэ выявили идентичные в пределах погрешности средние значения $\delta^{65}\text{Cu}$ ($-0.49 \pm 0.08\text{‰}$ (n = 3) и $-0.30 \pm 0.30\text{‰}$ (n = 8) соответственно). **Выводы.** Выявленные особенности минеральных ассоциаций и химического состава самородного золота из кальцит-доломитовых карбонатитов свидетельствуют об их сходстве с таковыми из россыпных отложений р. Гулэ, расположенных в непосредственной близости от Южного карбонатитового штока. Данные по изотопному составу меди для коренного и россыпного золота неотличимы в пределах погрешности друг от друга, свидетельствуя в пользу ювенильного источника рудного вещества. Главными коренными источниками золота являлись породы маймеча-котуйского ийолит-карбонатитового комплекса.

Ключевые слова: минералы золота, изотопный состав меди, карбонатиты, четвертичные отложения, р. Гулэ, Гулинский массив, Полярная Сибирь

Источник финансирования

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-00116, <https://rscf.ru/project/25-17-00116/>

Chemical and Cu-isotopic characteristics of native gold from carbonatites and Quaternary deposits of the Guli massif (Maimecha–Kotui province, Russia)

Kreshimir N. Malitch¹, Gleb V. Lipenkov², Artem A. Voitin¹, Valery V. Murzin¹, Inna Yu. Badanina¹,
Danil A. Ozornin¹, Nataliya G. Soloshenko¹

Для цитирования: Малич К.Н., Липенков Г.В., Войтин А.А., Мурзин В.В., Баданина И.Ю., Озорнин Д.А., Солошенко Н.Г. (2026) Особенности химического и Си-изотопного состава самородного золота из карбонатитов и четвертичных отложений Гулинского массива (Маймеча-Котуйская провинция, Россия). *Литосфера*, 26(2), 449–468. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-2-449-468>. EDN: ZMNMNY

For citation: Malitch K.N., Lipenkov G.V., Voitin A.A., Murzin V.V., Badanina I.Yu., Ozornin D.A., Soloshenko N.G. (2026) Chemical and Cu-isotopic characteristics of native gold from carbonatites and Quaternary deposits of the Guli massif (Maimecha–Kotui province, Russia). *Lithosphere (Russia)*, 26(2), 449–468. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-2-449-468>. EDN: ZMNMNY

© К.Н. Малич, Г.В. Липенков, А.А. Войтин, В.В. Мурзин, И.Ю. Баданина, Д.А. Озорнин, Н.Г. Солошенко, 2026

¹A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st., Ekaterinburg 620110, Russia, e-mail: dunite@yandex.ru

²A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, 74 Sredny av., St. Petersburg 199106, Russia, e-mail: Gleb_Lipenkov@karpinskyinstitute.ru

Received 25.11.2025, accepted 04.12.2025

Research subject. Mineral assemblages of native gold from carbonatites and Quaternary deposits of the Guli massif (Maimecha–Kotui province, Russia), which are associated with complex gold–iridium–osmium placer deposits. **Aim.** To identify mineral assemblages and variations in the chemical and Cu-isotopic composition of native gold from calcite–dolomite carbonatite of the Southern carbonatite stock and Quaternary deposits of the Gule River, draining carbonatites of the Guli massif. **Methods.** The chemical composition of native gold was studied using a CAMECA SX 100 electron microprobe analyzer. The analytical technique for determining $\delta^{65}\text{Cu}$ included dissolving gold samples in a mixture of HCl and HNO_3 , selective chromatographic separation of Cu from solution, followed by determination of the $^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu}$ value using a ThermoFisher Neptune Plus MC-ICP mass spectrometer. **Results.** The analyzed samples are represented by single-phase and polyphase mineral assemblages of native gold within homogeneous and heterogeneous grains, which consist of high-fineness gold, electrum, natural Au–Ag–Cu alloys, tetra-auricupride, and auricupride. The first Cu-isotope data for gold minerals from calcite–dolomite carbonatite of the Guli massif and Quaternary deposits of the Gule River revealed identical, within analytical uncertainty, average $\delta^{65}\text{Cu}$ values ($-0.49 \pm 0.08\%$ ($n = 3$) and $-0.30 \pm 0.30\%$ ($n = 8$), respectively). **Conclusions.** The observed features of the mineral assemblages and the chemical composition of native gold from calcite–dolomite carbonatites show a close similarity to those of placer deposits of the Gule River, located near the Southern Carbonatite Stock. Copper isotopic data for both primary and placer gold are consistent within analytical uncertainty, suggesting a common juvenile source. It is proposed that the principal bedrock sources of gold were rocks of the Maimecha–Kotui ijolite–carbonatite complex.

Keywords: gold minerals, copper isotopic composition, carbonatite, Quaternary sediments, Gule River, Guli Massif, Polar Siberia

Funding information

This study was supported by grant No. 25-17-00116 from the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/25-17-00116/>

Acknowledgements

The authors express their gratitude to V.A. Bulatov, T.G. Okuneva, A.D. Rybakova, and N.S. Chebykin for their assistance in conducting mineralogical and isotope analytical work, as well as to M.M. Goncharov and G.G. Lopatin for long-term collaboration in studying noble metal mineralization of the Maimecha–Kotuy province. The authors are grateful to the anonymous reviewers for their constructive comments and editorial revisions, which contributed to the improvement of the manuscript.

ВВЕДЕНИЕ

С Гулинским массивом ультраосновных и щелочных пород с карбонатитами в пределах Маймечы-Котуйской провинции на севере Сибирской платформы ассоциируют комплексные золото-иридиево-осмиевые россыпные месторождения (Малич и др., 1998; Малич, 1999; Лопатин, 2001; Сазонов и др., 2001). В отличие от платиноидной минерализации, генетически связанной с ультраосновными породами (Балмасова и др., 1992; Малич, Рудашевский, 1992; Малич, 2022), 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).

Первая находка самородного золота (размером около 20 мкм в поперечнике) из дунитов Гулинского массива охарактеризована в работе (Когарко, Сенин, 2011). По данным исследования (Рябчиков и др., 2016), формирование самородного золо-

та могло происходить как в высокомагнезиальных породах, так и в породах щелочных и карбонатитовых серий. Первые данные о минералах золота из кальцит-доломитовых карбонатитов Южного карбонатитового штока подтвердили это предположение (Малич и др., 2024). Зерна самородного золота размером от 200 до 1300 мкм в поперечнике представлены природными фазами Au–Ag твердых растворов 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 минеральными фазами системы Au–Cu–Ag, представленными природными сплавами $\text{Au}_{0.74}\text{Cu}_{0.14}\text{Ag}_{0.12}$ и $\text{Ag}_{0.51}\text{Au}_{0.47}\text{Cu}_{0.02}$, тетраурикупридом (AuCu) и аурикупридом (Cu_3Au). Для самородного золота характерна ранняя пентландит-троилит-халькопиритовая ассоциация, установленная в составе идиоморфных полифазных включений; более поздний галенит (PbS) в составе субидиоморфных монофазных включений замещается гипергенным церусситом (PbCO_3) (Малич и др., 2024). Выявленное сходство минералов золота из кальцит-

доломитовых карбонатитов с таковыми из россыпей Гулинского массива (Сазонов и др., 2001; Малич, 2022) позволило предположить, что в золотом рудообразовании значительная роль принадлежит производным поздних фаз ийолит-карбонатитового магматизма.

Появление новых методов исследований, прежде всего изотопно-геохимических, предопределяет необходимость постоянного совершенствования существующих моделей образования и критериев прогнозирования благороднометалльных месторождений. Изотопная геохимия находит широкое применение в изучении месторождений полезных ископаемых, например, для датирования сульфидов, определения источников рудообразующих компонентов и понимания процессов рудообразования. Хотя изотопный анализ серы и свинца для рудных минералов долгое время был стандартным инструментом, в последние десятилетия наблюдается рост применения нетрадиционных изотопных систем и изотопной системы меди, в частности (Mathur, Zhao, 2023; см. также ссылки в данной работе). Являясь переходным металлом, медь умеренно сидерофильна и сильно халькофильна; присутствует в земной среде в трех степенях окисления: самородная Cu^0 , Cu^+ и Cu^{2+} . Медь имеет два стабильных изотопа – ^{63}Cu и ^{65}Cu , которые встречаются в природе в пропорции 69.17 к 30.83% (Shields et al., 1965). Так как медь чувствительна к окислительно-восстановительному воздействию, изотопные вариации Cu полезны для получения генетической информации об источниках вещества и процессах образования рудных месторождений.

Цель настоящей работы – охарактеризовать вариации изотопного состава меди самородного золота из кальцит-доломитовых карбонатитов Южного карбонатитового штока и четвертичных отложений р. Гулэ, расположенных в непосредственной близости с карбонатитами Гулинского массива. Мы полагаем, что характер вариаций изотопного состава меди, наряду с химическим составом Cu-содержащего самородного золота, может быть использован в качестве дополнительного параметра при выявлении условий формирования благороднометалльного оруденения.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ ОБРАЗЦОВ

В строении Гулинского массива выделяется несколько фаз внедрения в составе двух комплексов (Егоров, 1991; Малич, Лопатин, 1997а, б; Малич, 1999; Липенков и др., 2018): дуниты и клинопироксениты гулинского клинопироксенит-дунитового комплекса, а также мелилитовые породы, якупирангиты-мельтейгиты и близкие к ним щелочные

мафиты, ийолиты и ийолит-пегматиты, нефелиновые и щелочные эгириновые сиениты, породы фоскоритовой серии и карбонатиты, входящие в состав маймеча-котуйского ийолит-карбонатитового комплекса. В обнаженной части массив сложен главным образом дунитами и клинопироксенитами в составе гулинского клинопироксенит-дунитового комплекса (рис. 1). Отметим, что оливиниты, выделяемые в составе первой фазы внедрения маймеча-котуйского ийолит-карбонатитового комплекса (Егоров, 1991), в Гулинском массиве отсутствуют. В юго-западной части породы массива перекрыты толщей меймечитов – ультраосновных вулканитов маймечинской свиты, а в центральной – прорваны штокообразными телами Северного и Южного карбонатитовых штоков, входящих в состав маймеча-котуйского ийолит-карбонатитового комплекса (см. рис. 1).

Основными россыпеобразующими структурами в Гулинском рудном районе являются долины рек и ручьев, дренирующих породы массива. Комплексы современных и верхнечетвертичных аллювиальных отложений рек Ингарингда, Сабыда, Гулэ, Селингда и их притоков осмиеносны и золотосны на всем их протяжении (Малич и др., 1998; Малич, 1999; 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.

Данное исследование базируется на минералах золота, выделенных из двух крупнообъемных проб кальцит-доломитовых карбонатитов Южного карбонатитового штока, коренные выходы которого обнажаются в правом борту р. Гулэ (см. рис. 1). Информация о морфологии, размерах, минеральных ассоциациях и химическом составе для всех зерен самородного золота приведена в работе (Малич и др., 2024). Для сравнения с коренным золотом нами изучена выборка из 58 зерен самородного золота, характеризующего продуктивный пласт четвертичных отложений р. Гулэ (поисковая линия 350; см. рис. 1, 2). Отметим, что продуктивный пласт россыпи р. Гулэ приурочен как к современному галечному аллювию и аллювию каргинского возраста, так и к подрусловому элювию, иногда – к коллювиальному шлейфу. При сравнении с составом тяжелой фракции остальных рек района наблюдается повышенное содержание железотитановых оксидов (87 мас. %) при пониженном содержании хромшпинелида (7 мас. %).

Детальная информация о зернах самородного золота из кальцит-доломитовых карбонатитов (обр. 147-2, 149-2 и 149-4) и четвертичных

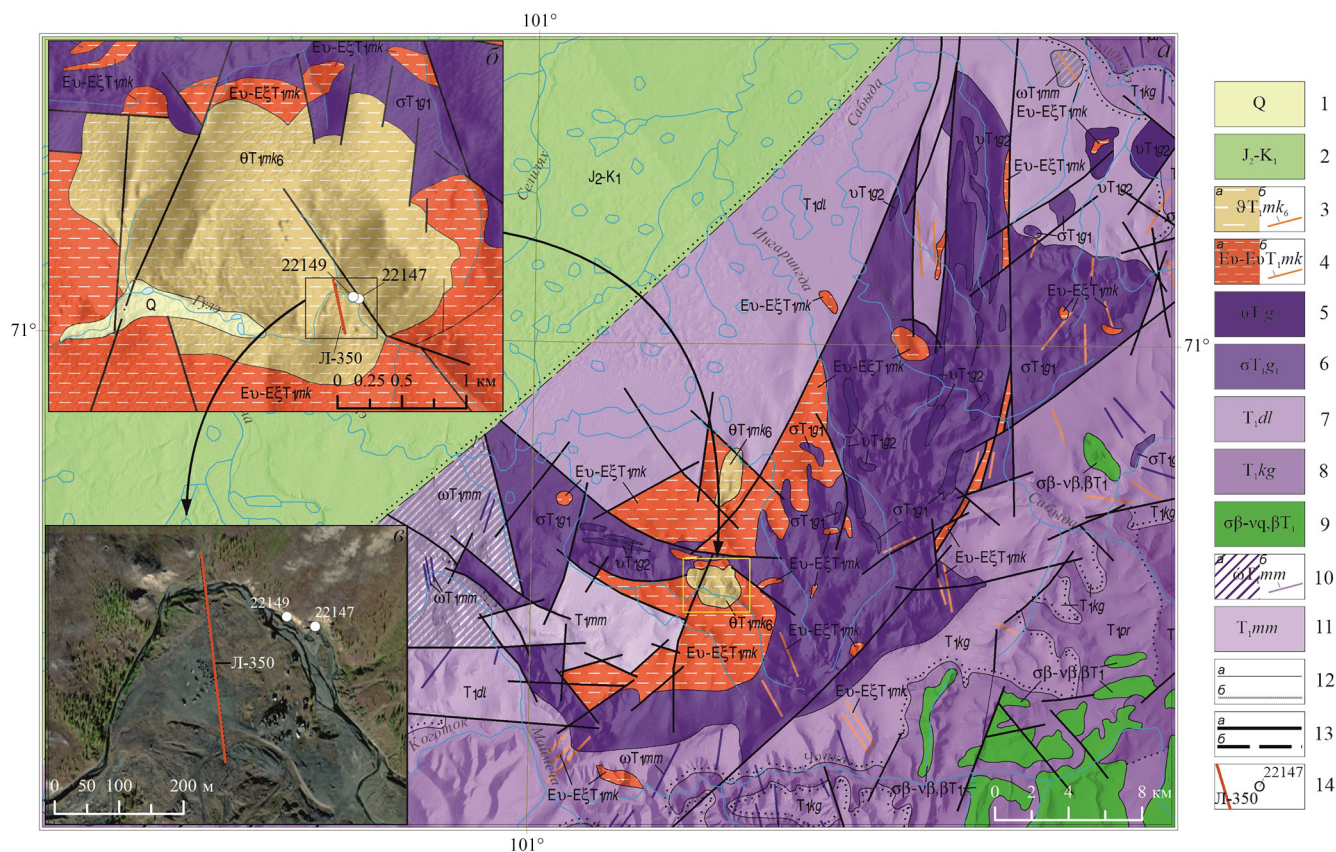


Рис. 1. Обзорная схема района работ.

а – геологическая карта Гулинского массива по материалам ГК1000/3, лист R-47 (Хета) (Липенков и др., 2018), с упрощениями; б – схема геологического строения Южного карбонатитового массива; в – места отбора проанализированных проб в долине р. Гулэ на космическом снимке высокого разрешения ESRI Imagery. На “а” и “б” в качестве подложки использован рельеф ARCTIC DEM. 1 – аллювиальные отложения поймы и первой надпойменной террасы; 2 – undivided Jurassic-Cretaceous terrigenous deposits of the Enisei-Khatanga regional trough; 3, 4 – Maimecha-Kotui ijolite-carbonatite complex: 3 – carbonatite of the sixth phase of the complex (а – штоки, б – дайки, жилы), 4 – undivided formations from the second to fifth phases of the complex (melilite rocks, jakupirangite and melteigite, ijolite, nepheline syenite) (а – штоки, б – дайки, жилы); 5, 6 – Гулинский клинопироксенит-дунитовый комплекс: 5 – клинопироксениты (вторая фаза), 6 – дуниты (первая фаза); 7 – дельканская свита; 8 – коготокская свита; 9 – нерасчлененные образования канганского долеритового и карамского троктодOLERIT-лейкогаббро-дOLERITового комплексов; 10, 11 – маймечинский пикрит-меймечитовый комплекс вулканический: 10 – субвулканические образования (а – штоки, б – дайки); 11 – покровная фация; 12 – геологические границы: а – согласно залегания стратиграфических подразделений и интрузивные контакты, б – несогласного залегания; 13 – разломы (а – достоверные, б – предполагаемые); 14 – места отбора образцов самородного золота из кальцит-ДОЛОМИТОВЫХ карбонатитов (22147) и четвертичных отложений (JL-350).

Fig. 1. Overview scheme of the work area.

а – geological map of the Guli massif based on materials from GK 1000/3, sheet R-47 (Kheta) (Lipenkov et al., 2018), with simplifications; б – geological scheme of the Southern carbonatite massif; в – places of location for the samples studied in the valley of the Gule River in a high-resolution satellite image from ESRI Imagery. In “а” and “б”, ARCTIC DEM relief was used as a substrate. 1 – alluvial deposits of the floodplain and the first terrace above the floodplain; 2 – undivided Jurassic-Cretaceous terrigenous deposits of the Enisei-Khatanga regional trough; 3, 4 – Maimecha-Kotui ijolite-carbonatite complex: 3 – carbonatite of the sixth phase of the complex (а – stocks, б – dikes, veins), 4 – undivided formations from the second to fifth phases of the complex (melilite rocks, jakupirangite and melteigite, ijolite, nepheline syenite) (а – stocks, б – dikes, veins); 5, 6 – Guli clinopyroxenite-dunitite complex: 5 – clinopyroxenite (second phase), 6 – dunitite (first phase); 7 – Del'kan formation; 8 – Kogotok Formation; 9 – undivided formations of the Katanga dolerite and Karama troctolite-dolerite-leucogabbro-dolerite complexes; 10, 11 – Maimecha picrite-meimechite volcanic complex: 10 – subvolcanic formations (а – stocks; б – dikes); 11 – cover facies; 12 – geological boundaries (а – conformable occurrence of stratigraphic units and intrusive contacts, б – unconformable occurrence); 13 – faults (а – reliable; б – assumed); 14 – sampling sites of native gold from calcite-dolomite carbonatites (22147) and Quaternary deposits (JL-350).

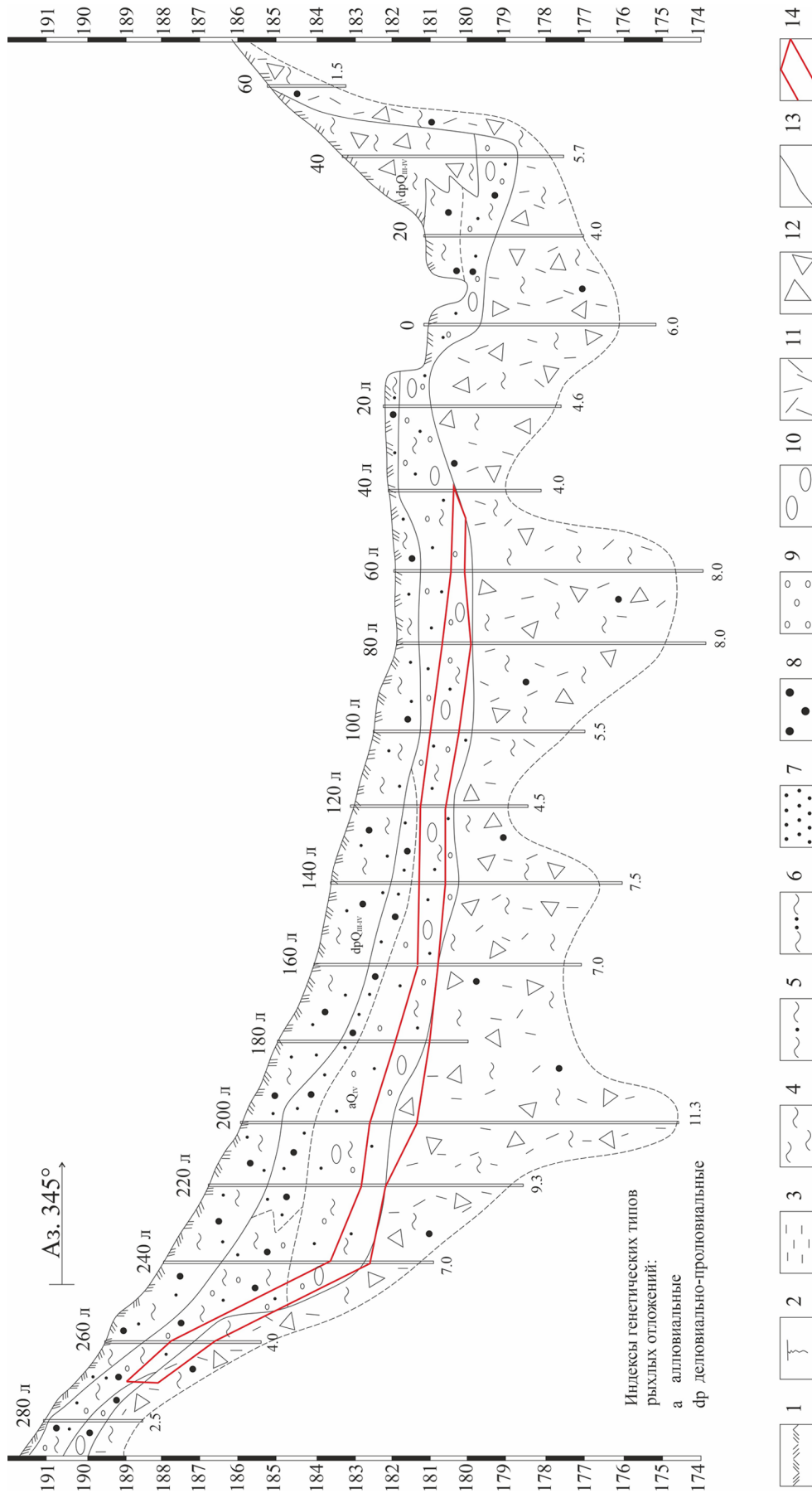


Рис. 2. Поперечный разрез по буровой линии № 350 через долину р. Гулэ (составлена геологами Полярной поисковой партии Норильской КТРЭ).

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 drilling line no 350 through the Guli River valley (compiled by geologists of the Polar Party of the Norilsk Integrated Geological Expedition).

1 – soil and vegetation 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.

отложений р. Гулэ (обр. Г9, Г20, Г25, Г26, Г29, Г30, Г38 и Г42), для которых был проанализирован их Cu-изотопный состав, приводится нами ниже.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Морфологические особенности зерен самородного золота изучены под бинокляром и с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Mira LMS с энергодисперсионной приставкой “INCA Energy” 450-X-Max 80 (ЦКП “Геоаналитик” Института геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург). После этого минералы золота были разделены на фракции крупности, после чего смонтированы в эпоксидной смоле и припорошены наполовину. Химический состав минералов золота изучен с использованием рентгено-спектрального микроанализа (САМЕСА SX 100 с пятью волновыми спектрометрами, ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург). В качестве стандартных образцов использовались чистые металлы Au, Ag, Pd, Co, Ni, Pb, халькопирит (CuFeS₂) и сплав HgTe. При проведении количественных анализов использованы следующие рентгеновские спектральные линии: Au *Ma*, Ag *La*, Hg *Ma*, Pd *Lβ*, Pb *Ma*, Ni *Kα*, Fe *Kα*, Cu *Kα*, Co *Kα*, S *Kα*. Ускоряющее напряжение 15 кВ, сила тока пучка электронов 10–40 нА, пространственное разрешение анализа 1–2 мкм. Всего выполнено 150 анализов.

Далее зерна самородного золота, выбранные для изотопного исследования, были извлечены из эпоксидной смолы. Методика определения изотопного состава меди включала в себя селективное хроматографическое выделение меди из раствора исследуемого образца самородного золота с последующим определением изотопного отношения ⁶⁵Cu/⁶³Cu на ThermoFisher Neptune Plus MC ICP-MS (ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН). Детальное описание методики представлено в работе (Okuneva et al., 2022). Стадия разложения образцов самородного золота (0.00n мг) включала их растворение в смеси кислот в соотношении HCl : HNO₃ = 3 : 1. Для хроматографического выделения чистой фракции Cu использовалась ионообменная смола AG MP-1 (BioRad inc.) (Maréchal, Albarède, 2002), загруженная в полипропиленовые колонки диаметром 0.7 см, высотой 3.5 см и объемом 1.4 см³ (Triskem inc.). Используемая нами оптимизированная схема хроматографического выделения аналитов описана в работе (Okuneva et al., 2022).

Измерение изотопного отношения ⁶⁵Cu/⁶³Cu 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%-й раствор HNO₃) → стандарт NIST SRM 976 → исследуемый обра-

зец золота (3%-й азотнокислый раствор минерала) → стандарт NIST SRM 976. Каждое единичное измерение изотопного состава Cu состояло из 60 циклов, полученных при 8-секундной интеграции с измерением базовой линии в течение 30 с. Значение δ⁶⁵Cu вычислялось как [(⁶⁵Cu/⁶³Cu)_{образец} / (⁶⁵Cu/⁶³Cu)_{стандарт} - 1] × 1000‰; точность определения составляла ±0.14‰ (2σ). Для контроля всей аналитической процедуры и оценки правильности определения δ⁶⁵Cu использованы международные стандартные образцы горных пород USGS AGV-2 и BHVO-2; измеренные значения δ⁶⁵Cu составили для них 0.14 ± 0.04 (2SD, n = 5) и 0.12 ± 0.04‰ (2SD, n = 5) соответственно, что удовлетворительно согласуется с данными, представленными в базе GeoRem. Всего выполнено 11 анализов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Минеральные ассоциации и химический состав самородного золота. По внутреннему строению изученные зерна самородного золота разделены нами на гомогенные и гетерогенные. Первые состоят из одного минерала, который характеризуется однородным химическим составом. Ко вторым отнесены зерна, состоящие из нескольких минеральных разновидностей золота (золота, электрума (Au,Ag), твердых растворов системы Au–Ag–Cu, тетрааурикуприда (AuCu) и аурикуприда (Cu₃Au)). Результаты изучения химического состава минералов золота гомогенных и гетерогенных зерен приведены в табл. 1 и 2 соответственно, а также представлены на рис. 3–5.

Образцы самородного золота из кальцит-доломитовых карбонатитов, для которых проанализирован их Cu-изотопный состав, представлены гомогенными (обр. 147-2 и 149-2) и полифазными (обр. 149-4) разновидностями зерен. Гомогенные зерна сложены (1) электрумом (обр. 147-2, см. рис. 5а), содержащим 81.19 ± 1.18 мас. % Au, 19.09 ± 0.98 мас. % Ag и менее 0.1 мас. % Cu и (2) Au–Ag–Cu фазой (обр. 149-2, см. рис. 5а) с содержаниями Au, Ag и Cu 86.85 ± 0.84, 7.93 ± 0.47, 5.26 ± 0.37 мас. % соответственно, что в формульном выражении соответствует Au_{0.74}Cu_{0.14}Ag_{0.12}. Пробность золота для гомогенных по составу зерен варьируется в диапазоне от 810 ± 10 до 868 ± 3 (см. табл. 1). Полифазная ассоциация зерна 149-4 (см. табл. 2, рис. 3а, 5б) состоит из электрума (Ag_{0.51}Au_{0.47}Cu_{0.02}), тетрааурикуприда (AuCu) и аурикуприда (Cu₃Au). Она сложена продуктами решетчатого распада Au–Ag–Cu твердого раствора, представленного пластинками тетрааурикуприда в электруме. Кроме того, тетрааурикуприд и аурикуприд выявлены в периферической части зерна (см. рис. 3а). Отметим, что различные морфологические разновидности тетрааурикуприда характеризуются сходным химическим составом (см. табл. 2).

Таблица 1. Химические составы минералов золота из монофазных зерен

Table 1. Chemical compositions of gold minerals from single grains

№ ан.	Минерал	Au, мас. %	Ag, мас. %	Cu, мас. %	Сумма	П	Au, ат. %	Ag, ат. %	Cu, ат. %
Самородное золото из кальцит-доломитовых карбонатов									
Зерно 147-2 (рис. 5а)									
1	Электрум	82.83	17.45	Н. п. о.	100.28	826	72.22	27.78	–
2		82.62	17.71	Н. п. о.	100.33	823	71.87	28.13	–
3		82.35	18.25	Н. п. о.	100.60	819	71.19	28.81	–
4		80.20	19.92	Н. п. о.	100.12	801	68.80	31.20	–
5		81.64	18.76	Н. п. о.	100.40	813	70.44	29.56	–
6		81.90	19.02	Н. п. о.	100.92	812	70.22	29.78	–
7		80.82	19.69	Н. п. о.	100.51	804	69.21	30.79	–
8		79.75	19.71	Н. п. о.	99.46	802	68.90	31.10	–
9		79.26	20.65	Н. п. о.	99.91	793	67.76	32.24	–
10		80.93	19.43	Н. п. о.	100.36	806	69.52	30.48	–
11		80.84	19.43	Н. п. о.	100.27	806	69.50	30.50	–
<i>Среднее (n = 11)</i>		<i>81.19</i>	<i>19.09</i>	<i>Н. п. о.</i>	<i>100.29</i>	<i>810</i>	<i>69.97</i>	<i>30.03</i>	<i>–</i>
<i>CO</i>		<i>1.18</i>	<i>0.98</i>	<i>–</i>	<i>0.38</i>	<i>10</i>	<i>1.37</i>	<i>1.37</i>	<i>–</i>
Зерно 149-2 (рис. 5а)									
12	(Au,Cu,Ag)	87.14	8.06	5.45	100.65	866	73.38	12.39	14.22
13		86.30	8.15	5.34	99.79	865	73.30	12.64	14.06
14		86.92	7.97	5.30	100.19	868	73.72	12.34	13.93
15		86.14	8.41	4.75	99.30	867	74.11	13.21	12.67
16		87.66	7.41	5.91	100.98	868	73.35	11.32	15.33
17		87.77	6.82	5.69	100.28	875	74.47	10.57	14.96
18		87.69	8.04	5.26	100.99	868	73.89	12.37	13.74
19		85.84	8.00	4.89	98.73	869	74.25	12.64	13.11
20		85.50	8.26	5.09	98.85	865	73.48	12.96	13.56
21		87.53	8.21	4.91	100.65	870	74.34	12.73	12.92
<i>Среднее (n = 10)</i>		<i>86.85</i>	<i>7.93</i>	<i>5.26</i>	<i>100.04</i>	<i>868</i>	<i>74.83</i>	<i>12.32</i>	<i>13.85</i>
<i>CO</i>		<i>0.84</i>	<i>0.47</i>	<i>0.37</i>	<i>0.84</i>	<i>3</i>	<i>0.44</i>	<i>0.79</i>	<i>0.85</i>
Самородное золото из четвертичных отложений р. Гулз									
Зерно Г9 (рис. 5а)									
22	Высокопробное золото	96.11	2.62	1.12	99.85	963	92.09	4.58	3.33
23		97.09	2.39	1.05	100.53	966	92.72	4.17	3.11
24		97.06	2.45	1.07	100.58	965	92.57	4.27	3.16
25		97.06	2.43	1.03	100.52	966	92.71	4.24	3.05
26		96.66	2.25	1.06	99.97	967	92.89	3.95	3.16
<i>Среднее (n = 5)</i>		<i>96.80</i>	<i>2.43</i>	<i>1.07</i>	<i>100.29</i>	<i>965</i>	<i>92.60</i>	<i>4.24</i>	<i>3.16</i>
<i>CO</i>		<i>0.42</i>	<i>0.13</i>	<i>0.03</i>	<i>0.35</i>	<i>2</i>	<i>0.30</i>	<i>0.23</i>	<i>0.10</i>
Зерно Г20 (рис. 5а)									
27	(Au,Cu,Ag)	89.22	5.58	5.36	100.16	891	76.9	8.78	14.32
28		89.04	5.82	5.14	100.00	890	77.03	9.19	13.78
29		89.19	5.65	5.13	99.97	892	77.28	8.94	13.78
30		89.67	5.67	5.06	100.40	893	77.5	8.95	13.55
31		89.06	5.83	5.34	100.23	889	76.6	9.16	14.24
32		89.30	5.67	5.34	100.31	890	76.85	8.91	14.24
33		90.63	5.11	4.58	100.32	903	79.39	8.17	12.44
34		89.21	5.87	5.23	100.31	889	76.81	9.23	13.96
35		89.60	5.68	5.12	100.4	892	77.35	8.95	13.70
36		89.41	5.59	5.07	100.07	893	77.52	8.85	13.63
37		89.13	6.05	5.21	100.39	888	76.62	9.50	13.88
38		89.82	5.52	5.23	100.57	893	77.36	8.68	13.96
39		89.24	5.80	5.09	100.13	891	77.19	9.16	13.65
40		89.60	5.32	5.24	100.16	895	77.54	8.41	14.05
41		89.62	5.50	5.14	100.26	894	77.53	8.69	13.78
42		89.50	5.67	5.19	100.36	892	77.19	8.93	13.88
43		88.97	5.61	5.35	99.93	890	76.83	8.85	14.32
44		89.63	5.42	5.00	100.05	896	77.92	8.60	13.48
45		89.31	5.83	5.19	100.33	890	76.96	9.18	13.86
<i>Среднее (n = 19)</i>		<i>89.43</i>	<i>5.64</i>	<i>5.16</i>	<i>100.23</i>	<i>892</i>	<i>77.28</i>	<i>8.90</i>	<i>13.82</i>
<i>CO</i>		<i>0.38</i>	<i>0.21</i>	<i>0.17</i>	<i>0.17</i>	<i>3</i>	<i>0.62</i>	<i>0.31</i>	<i>0.42</i>

Таблица 1. Окончание

Table 1. Ending

№ ан.	Минерал	Au, мас. %	Ag, мас. %	Cu, мас. %	Сумма	П	Au, ат. %	Ag, ат. %	Cu, ат. %
Зерно Г26 (рис. 5а)									
46	Электрум	74.60	25.25	0.36	100.21	744	61.24	37.85	0.91
47		73.96	25.88	0.40	100.24	738	60.40	38.59	1.01
48		73.68	26.13	0.14	99.95	737	60.48	39.16	0.36
49		73.99	26.19	0.09	100.27	738	60.60	39.17	0.23
50		73.52	26.26	0.09	99.87	736	60.39	39.38	0.23
51		73.68	26.34	0.06	100.08	736	60.41	39.44	0.15
52		73.99	25.99	0.09	100.07	739	60.78	38.99	0.23
53		73.51	26.22	0.17	99.90	736	60.30	39.27	0.43
54		73.67	26.12	0.21	100.00	737	60.38	39.09	0.53
55		73.66	26.26	0.20	100.12	736	60.26	39.23	0.51
56		73.78	26.22	0.08	100.08	737	60.52	39.28	0.20
57		74.68	25.09	0.22	99.99	747	61.63	37.81	0.56
58		73.55	26.32	0.31	100.18	734	60.01	39.21	0.78
59		74.41	25.87	0.06	100.34	742	61.08	38.77	0.15
60		73.85	26.02	0.17	100.04	738	60.59	38.98	0.43
<i>Среднее (n = 15)</i>		<i>73.90</i>	<i>26.01</i>	<i>0.18</i>	<i>100.09</i>	<i>738</i>	<i>60.60</i>	<i>38.95</i>	<i>0.45</i>
<i>CO</i>		<i>0.38</i>	<i>0.37</i>	<i>0.11</i>	<i>0.14</i>	<i>3</i>	<i>0.42</i>	<i>0.50</i>	<i>0.27</i>
Зерно Г38 (рис. 5а)									
61	Высокопробное золото	94.13	4.59	1.49	100.21	939	87.87	7.82	4.31
62		94.37	4.49	1.45	100.31	941	88.14	7.66	4.20
63		94.16	4.71	1.48	100.35	938	87.72	8.01	4.27
64		94.20	4.62	1.40	100.22	940	88.06	7.89	4.05
65		93.84	4.87	1.49	100.20	937	87.41	8.29	4.30
66		94.23	4.50	1.49	100.22	940	88.01	7.68	4.31
67		94.65	4.28	1.41	100.34	943	88.59	7.32	4.09
68		94.23	4.60	1.48	100.31	939	87.89	7.83	4.28
69		94.40	4.56	1.42	100.38	940	88.12	7.77	4.11
70		94.24	4.69	1.42	100.35	939	87.90	7.99	4.11
71		94.19	4.72	1.42	100.33	939	87.86	8.04	4.10
72		94.38	4.46	1.46	100.30	941	88.16	7.61	4.23
<i>Среднее (n = 12)</i>		<i>94.25</i>	<i>4.59</i>	<i>1.45</i>	<i>100.29</i>	<i>940</i>	<i>87.98</i>	<i>7.82</i>	<i>4.20</i>
<i>CO</i>		<i>0.19</i>	<i>0.06</i>	<i>0.04</i>	<i>0.07</i>	<i>2</i>	<i>0.28</i>	<i>0.25</i>	<i>0.10</i>

Примечание. П – пробность, здесь и в табл. 2, 3 рассчитана по формуле $(Au_{\text{мас. \%}} / (Au + Ag + Cu)_{\text{мас. \%}} \cdot 1000)$. Н. п. о. – ниже предела обнаружения. CO – стандартное отклонение

Note. П – fineness, here and in Tables 2 and 3 it equals to $(Au_{\text{wt \%}} / (Au + Ag + Cu)_{\text{wt \%}} \cdot 1000)$. Н. п. о. – below the detection limit. CO – standard deviation.

Образцы самородного золота из четвертичных отложений р. Гулэ тоже представлены как гомогенными (обр. Г9, Г20, Г26 и Г38), так и полифазными (обр. Г25, Г29, Г30 и Г42) разновидностями. Среди гомогенных зерен выявлены электрум (обр. Г26) и высокопробное золото (обр. Г9 и Г38) с содержаниями меди от 0.18 до 1.45 мас. %. Данные минералы образуют непрерывный ряд твердых растворов (см. табл. 1, рис. 5а), что характерно для природных соединений в системе Au–Ag (Пальянова, 2020). Отметим, что Au–Cu–Ag фаза (обр. Г20, табл. 1, рис. 5а) с содержаниями Au, Ag и Cu 89.43 ± 0.38 , 5.64 ± 0.21 , 5.16 ± 0.17 мас. % соответственно при расчете на одну формульную единицу отвечает составу $Au_{0.77}Cu_{0.14}Ag_{0.09}$, который оказался близким

таковому для обр. 149-2 из кальцит-доломитовых карбонатитов. Пробность золота гомогенных зерен варьируется в пределах от 738 ± 3 до 965 ± 2 (см. табл. 1).

Полифазные зерна представлены разными минеральными ассоциациями, которые обладают рядом отличительных особенностей. Для зерна Г25 характерна “решетчатая” структура распада твердого раствора с различными по размерам зонами, состоящими из тетраурикуприда ($AuCu$) и минеральной фазы, близкой к Au_3Cu (см. рис. 3б–г), в высокомедистом электруме $Au_{0.72}Ag_{0.15}Cu_{0.13}$. Значительную часть зерна составляют относительно крупные ламели тетраурикуприда ($Au_{1.09}Cu_{0.90}Ag_{0.01}$, $n = 7$; см. табл. 1), между которыми выявлены значительно

Таблица 2. Химический состав минералов золота из полифазных зерен

Table 2. Chemical composition of gold minerals from composite grains

№ ан.	Минерал	Au, мас. %	Ag, мас. %	Cu, мас. %	Сумма	П	Au, ат. %	Ag, ат. %	Cu, ат. %
Самородное золото из кальцит-доломитовых карбонатитов									
Обр. 149-4 (рис. 3а, 5б)									
1	Электрум	56.38	42.24	1.17	99.79	565	41.11	56.24	2.65
2		57.27	42.18	0.44	99.89	573	42.22	56.78	1.00
3		59.13	40.26	0.98	100.37	589	43.58	54.18	2.24
4		61.36	38.67	0.29	100.32	612	46.18	53.14	0.68
5		66.33	32.75	0.66	99.74	665	51.75	46.65	1.60
6		66.96	32.69	0.61	100.26	668	52.09	46.44	1.47
7		65.44	33.62	1.06	100.12	654	50.29	47.18	2.53
8		64.79	33.83	0.54	99.16	653	50.52	48.17	1.31
9		61.46	37.77	0.58	99.81	616	46.48	52.16	1.36
10		59.56	39.95	0.54	100.05	595	44.39	54.36	1.25
11		64.23	34.67	1.45	100.35	640	48.65	47.95	3.40
12		58.30	41.58	0.35	100.23	582	43.09	56.11	0.80
13		65.27	34.43	0.58	100.28	651	50.23	48.39	1.38
<i>Среднее (n = 13)</i>		<i>62.04</i>	<i>37.28</i>	<i>0.71</i>	<i>100.03</i>	<i>620</i>	<i>46.97</i>	<i>51.37</i>	<i>1.67</i>
<i>СО</i>		<i>3.66</i>	<i>3.73</i>	<i>0.35</i>	<i>0.35</i>	<i>37</i>	<i>3.84</i>	<i>3.99</i>	<i>0.80</i>
14	Тетрааурикуприд	74.81	0.28	25.01	100.10	747	48.95	0.33	50.72
15		74.53	0.58	25.23	100.34	743	48.46	0.69	50.85
16		74.85	0.41	25.25	100.51	745	48.64	0.49	50.87
17		74.11	0.73	25.42	100.26	739	48.05	0.86	51.09
18		73.65	0.73	25.91	100.29	734	47.43	0.86	51.71
<i>Среднее (n = 5)</i>		<i>74.39</i>	<i>0.55</i>	<i>25.36</i>	<i>100.30</i>	<i>742</i>	<i>48.31</i>	<i>0.65</i>	<i>51.05</i>
<i>СО</i>		<i>0.51</i>	<i>0.34</i>	<i>0.34</i>	<i>0.15</i>	<i>5</i>	<i>0.59</i>	<i>0.23</i>	<i>0.39</i>
19	Аурикуприд	51.16	Н. п. о.	49.03	100.19	511	25.19	–	74.81
20		50.42	Н. п. о.	49.72	100.14	503	24.65	–	75.35
21		49.09	Н. п. о.	51.01	100.10	490	23.69	–	76.31
22		49.06	Н. п. о.	50.93	99.99	491	23.71	–	76.29
<i>Среднее (n = 4)</i>		<i>49.93</i>	–	<i>50.17</i>	<i>100.10</i>	<i>499</i>	<i>24.31</i>	–	<i>75.69</i>
<i>СО</i>		<i>1.04</i>	–	<i>0.96</i>	<i>0.09</i>	<i>10</i>	<i>0.74</i>	–	<i>0.74</i>
Самородное золото из четвертичных отложений р. Гулэ									
Обр. Г25 (рис. 3б–е, 5в)									
23	(Au,Ag,Cu)	85.23	10.60	4.44	100.27	850	72.02	16.35	11.63
24		85.60	9.61	5.43	100.64	851	71.35	14.62	14.03
25		86.16	9.92	4.47	100.55	857	72.94	15.33	11.73
26		86.45	9.03	4.83	100.31	862	73.32	13.98	12.70
27		85.34	9.52	5.10	99.96	854	72.00	14.66	13.34
28		85.89	9.50	4.50	99.89	860	73.30	14.80	11.90
29		85.43	9.73	4.88	100.04	854	72.20	15.01	12.78
<i>Среднее (n = 7)</i>		<i>85.73</i>	<i>9.70</i>	<i>4.81</i>	<i>100.24</i>	<i>855</i>	<i>72.44</i>	<i>14.97</i>	<i>12.59</i>
<i>СО</i>		<i>0.45</i>	<i>0.48</i>	<i>0.37</i>	<i>0.29</i>	<i>4</i>	<i>0.75</i>	<i>0.74</i>	<i>0.90</i>
30	(Au,Cu,Ag)	84.60	3.13	12.03	99.76	848	66.30	4.48	29.22
31		84.51	7.85	8.02	100.38	842	68.32	11.59	20.09
32		84.11	5.77	9.99	99.87	842	66.96	8.39	24.65
33		84.73	6.48	8.90	100.11	846	68.25	9.53	22.22
<i>Среднее (n = 4)</i>		<i>84.49</i>	<i>5.81</i>	<i>9.74</i>	<i>100.03</i>	<i>845</i>	<i>67.46</i>	<i>8.50</i>	<i>24.05</i>
<i>СО</i>		<i>0.27</i>	<i>1.98</i>	<i>1.73</i>	<i>0.28</i>	<i>3</i>	<i>0.99</i>	<i>2.99</i>	<i>3.92</i>
34	Тетрааурикуприд	79.29	0.50	20.40	100.37	790	55.07	0.63	44.30
35		78.82	0.60	20.40	99.82	790	55.06	0.77	44.17
36		78.65	0.41	20.40	100.00	787	54.50	0.52	44.98
37		78.99	0.41	20.40	100.26	788	54.70	0.52	44.78
38		78.92	0.34	20.40	100.38	786	54.43	0.43	45.14
39		78.34	0.26	20.40	99.69	786	54.33	0.33	45.34
40		78.67	0.35	20.40	100.29	784	54.17	0.44	45.39
<i>Среднее (n = 7)</i>		<i>78.81</i>	<i>0.41</i>	<i>20.89</i>	<i>100.11</i>	<i>787</i>	<i>54.61</i>	<i>0.52</i>	<i>44.87</i>
<i>СО</i>		<i>0.30</i>	<i>0.11</i>	<i>0.31</i>	<i>0.28</i>	<i>2</i>	<i>0.35</i>	<i>0.14</i>	<i>0.48</i>

Таблица 2. Окончание

Table 2. Ending

№ ан.	Минерал	Au, мас. %	Ag, мас. %	Cu, мас. %	Сумма	П	Au, ат. %	Ag, ат. %	Cu, ат. %
Обр. Г29 (рис. 4а, 5г)									
41	Электрум	71.80	27.60	0.88	100.28	716	57.48	40.34	2.18
42		73.68	25.53	1.07	100.28	735	59.61	37.71	2.68
43		70.96	28.27	0.87	100.10	709	56.64	41.21	2.15
44		72.06	26.95	1.25	100.26	719	57.58	39.32	3.10
45		69.12	29.72	1.13	99.97	691	54.47	42.77	2.76
46		61.39	38.11	0.61	100.11	613	46.20	52.38	1.42
47		61.30	37.71	0.96	99.97	613	46.04	51.72	2.24
48		64.65	35.13	0.14	99.92	647	50.03	49.64	0.33
49		60.44	38.62	0.62	99.68	606	45.48	53.07	1.45
<i>Среднее (n = 9)</i>		<i>67.27</i>	<i>31.96</i>	<i>0.84</i>	<i>100.06</i>	<i>672</i>	<i>52.61</i>	<i>45.35</i>	<i>2.04</i>
<i>СО</i>		<i>5.31</i>	<i>5.35</i>	<i>0.34</i>	<i>0.20</i>	<i>52</i>	<i>5.69</i>	<i>6.24</i>	<i>0.85</i>
50	Высокопробное золото	99.99	0.13	0.00	100.12	999	99.76	0.24	0.00
51		98.98	1.02	0.11	100.11	989	97.82	1.84	0.34
<i>Среднее (n = 2)</i>		<i>99.49</i>	<i>0.58</i>	<i>0.06</i>	<i>100.12</i>	<i>994</i>	<i>98.79</i>	<i>1.04</i>	<i>0.17</i>
<i>СО</i>		<i>0.71</i>	<i>0.63</i>	<i>0.08</i>	<i>0.01</i>	<i>7</i>	<i>1.37</i>	<i>1.13</i>	<i>0.24</i>
Обр. Г30 (рис. 4в, г, 5д)									
52	Электрум	50.91	6.31	0.08	99.84	505	35.78	64.04	0.18
53		50.38	49.38	0.49	100.22	655	50.70	48.12	1.17
54		65.62	34.11	1.20	100.32	611	45.73	51.49	2.77
55		61.31	37.81	1.86	100.00	506	35.37	60.60	4.03
56		50.63	47.51	0.05	99.93	461	31.87	68.02	0.11
57		46.05	53.83	0.21	100.00	569	41.85	57.67	0.48
58		56.87	42.92	0.04	100.33	387	25.65	74.26	0.08
59		38.79	61.50	0.37	100.23	601	45.06	54.08	0.86
60		60.26	39.60	Н. п. о.	100.64	836	73.63	26.37	–
61		84.14	16.50	0.50	100.40	631	48.10	50.72	1.18
62		63.33	36.57	0.12	99.96	368	24.19	75.57	0.24
63		36.83	63.01	0.12	100.02	474	33.01	66.73	0.26
64		47.41	52.49	0.32	100.21	597	44.67	54.59	0.74
<i>Среднее (n = 13)</i>		<i>55.50</i>	<i>44.25</i>	<i>0.41</i>	<i>100.16</i>	<i>554</i>	<i>41.20</i>	<i>57.87</i>	<i>0.93</i>
<i>СО</i>		<i>12.56</i>	<i>12.45</i>	<i>0.54</i>	<i>0.23</i>	<i>124</i>	<i>12.86</i>	<i>12.95</i>	<i>1.19</i>
65	Тетрааурикуприд	73.58	0.57	25.69	99.84	737	47.70	0.68	51.62
66		73.82	0.38	26.39	100.59	734	47.23	0.44	52.33
<i>Среднее (n = 13)</i>		<i>73.70</i>	<i>0.48</i>	<i>26.04</i>	<i>100.22</i>	<i>735</i>	<i>47.46</i>	<i>0.56</i>	<i>51.98</i>
<i>СО</i>		<i>0.17</i>	<i>0.13</i>	<i>0.49</i>	<i>0.53</i>	<i>2</i>	<i>0.33</i>	<i>0.17</i>	<i>0.50</i>
67	(Cu,Au,Ag)	50.91	6.31	42.79	100.01	509	26.10	5.91	67.99
68	(Au,Cu,Ag)	61.86	23.96	14.50	100.32	617	41.09	29.06	29.85
Обр. Г42 (рис. 4б, 5е)									
68	Тетрааурикуприд	74.17	0.43	25.14	99.74	744	48.52	0.51	50.97
69		74.79	0.50	24.89	100.18	747	48.93	0.60	50.47
70		74.59	0.20	25.58	100.37	743	48.36	0.24	51.40
71		74.17	0.72	24.84	99.73	744	48.64	0.86	50.50
72		75.42	0.57	24.26	100.25	752	49.73	0.69	49.58
<i>Среднее (n = 5)</i>		<i>74.63</i>	<i>0.49</i>	<i>24.94</i>	<i>100.05</i>	<i>746</i>	<i>48.84</i>	<i>0.58</i>	<i>50.58</i>
<i>СО</i>		<i>0.52</i>	<i>0.19</i>	<i>0.48</i>	<i>0.30</i>	<i>4</i>	<i>0.54</i>	<i>0.23</i>	<i>0.68</i>
73	Высокопробное золото	99.29	0.17	0.21	99.67	996	99.04	0.31	0.65
74		99.45	Н. п. о.	0.70	100.15	993	97.87	0.00	2.13
75		99.56	0.33	0.34	100.23	993	98.36	0.60	1.04
<i>Среднее (n = 3)</i>		<i>99.43</i>	<i>0.17</i>	<i>0.42</i>	<i>100.02</i>	<i>994</i>	<i>98.42</i>	<i>0.30</i>	<i>1.28</i>
<i>СО</i>		<i>0.14</i>	<i>0.17</i>	<i>0.25</i>	<i>0.30</i>	<i>2</i>	<i>0.59</i>	<i>0.30</i>	<i>0.78</i>

Примечание. П – пробность золота. Н. п. о. – ниже предела обнаружения.

Note. П – fineness. Н. п. о. – below the detection limit.

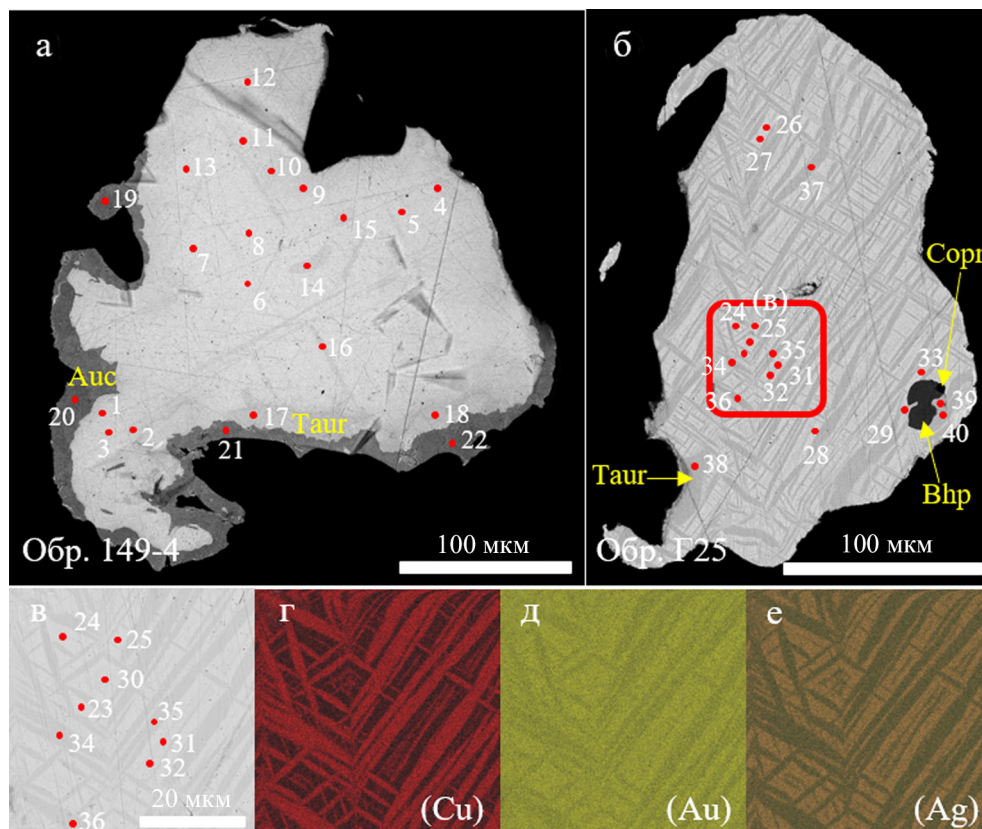


Рис. 3. Особенности внутреннего строения полифазных зерен самородного золота из доломит-кальцитовых карбонатитов Гулинского массива (а; обр. 149-4) и четвертичных отложений р. Гулэ (б–е; обр. Г25).

Изображения в обратно рассеянных электронах с вещественным контрастом (а–в) и рентгеновских лучах $CuK\alpha$ (г), $AuMa$ (д) и $AgK\alpha$ (е). Точки с цифрами 1–40 на “а–в” – участки проведения рентгеноспектральных микроанализов, соответствующие таковым в табл. 2. Аббревиатура минералов здесь и далее дана в соответствии с рекомендациями в (Warr, 2021): *Taur* – тетра-аурикуприд, *Aur* – аурикуприд, *Bhp* – брейтгауптит, *Copn* – кобальтпентландит.

Fig. 3. Particularities of internal structure in polyphase grains of native gold from (a; sample 149-4) dolomite-calcite carbonatite of the Guli massif and Quaternary sediments of the Gule River (б–е; sample G25).

Images in back-scattered electrons with compositional contrast (a–b) and X-ray maps of $CuK\alpha$ (г), $AuMa$ (д) and $AgK\alpha$ (е). Points with numbers 1–40 in “a–b” denote areas of electron microprobe analysis corresponding to the same numbers in Table 2. The abbreviations of minerals here and below are given in accordance with the recommendations in (Warr, 2021): *Taur* – tetraauricupride, *Aur* – auricupride, *Bhp* – breithauptite, *Copn* – cobaltpentlandite.

более тонкие ламели или зоны микронного размера, по составу близкие к Au_3Cu ($Au_{2.70}Ag_{0.34}Cu_{0.96}$, $n = 4$; см. табл. 1). Отметим, что характер распада трехкомпонентного $Au-Cu-Ag$ раствора наглядно отражен на тройной диаграмме в координатах $Ag-Au-Cu$, ат. % (см. рис. 5в), где составы минералов золота находятся в области $Au_3Cu + Au-Ag-Cu$ и $Au_3Cu + AuCu + Au-Ag-Cu$.

Для зерна Г29, в котором преобладает электрум с содержанием Au , Ag и Cu 67.27 ± 5.31 , 31.96 ± 5.35 , 0.84 ± 0.34 мас. % соответственно (см. табл. 2), также характерна “решетчатая” структура распада твердого раствора (см. рис. 4а). Однако на месте ранее существовавших медистых ламелей зафиксировано высокопробное золото пористого строения, которое, полностью замещая их,

наследует решетчатую структуру распада твердого раствора. Данный феномен охарактеризован в работе (Онищенко и др., 2020). При двухкомпонентном распаде в области сосуществования двух фаз “ $AuCu + Au-Ag-Cu$ ” (см. рис. 5г) состав медистых ламелей, полностью замещенных вторичным высокопробным золотом, соответствовал тетрааурикуприду. Отметим, что высокопробное золото (пробность 994 ± 7) зафиксировано также в виде вторичной оторочки по периферии зерна (см. табл. 2, рис. 4а).

Отличительной особенностью внутреннего строения зерна Г30 является его пятнисто-неоднородное строение, обусловленное различными содержаниями Au , Ag и Cu в электруме, варьирующимися в пределах 36.83–84.14, 16.50–63.01 и <0.1 –

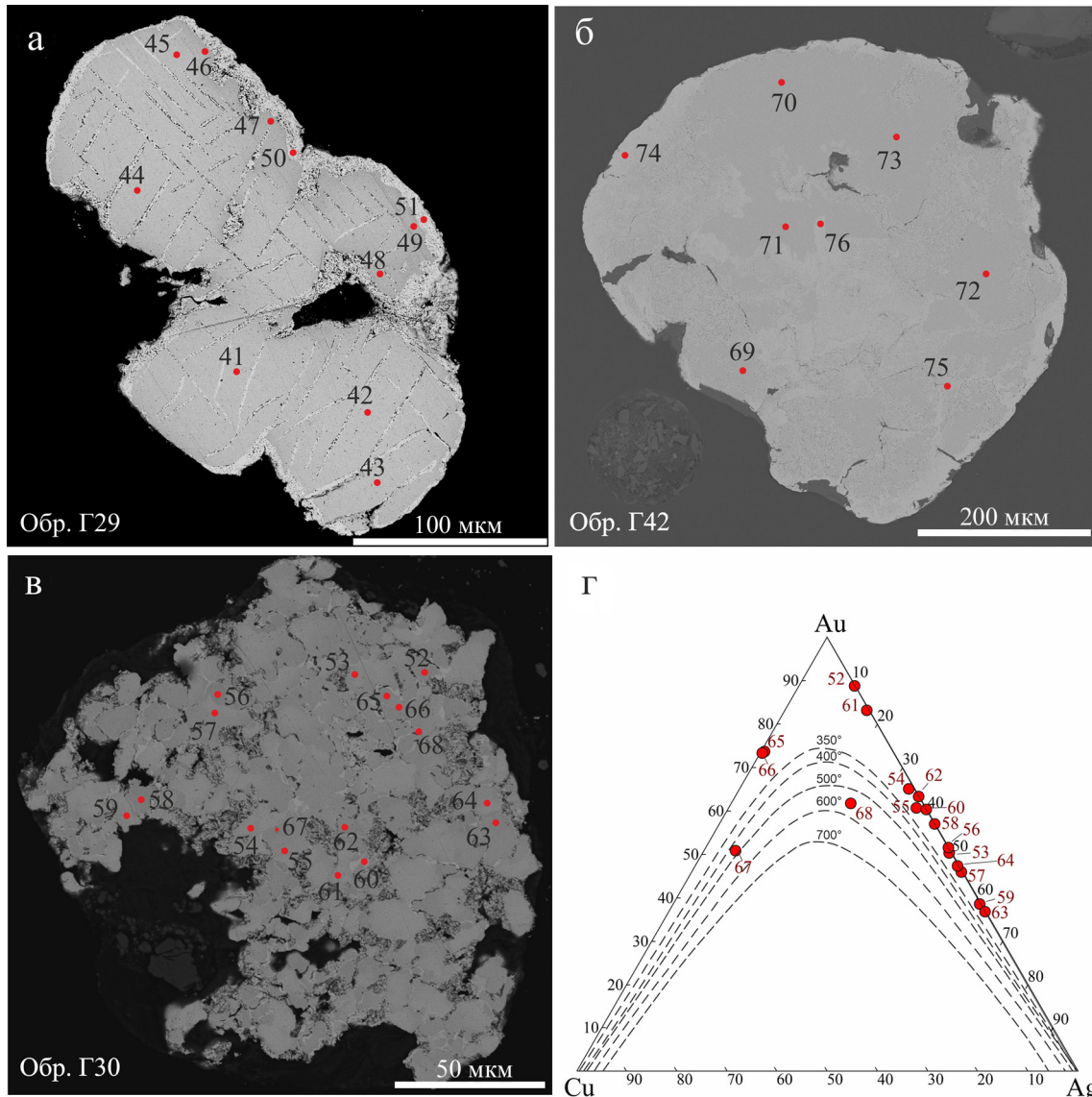


Рис. 4. Особенности внутреннего строения полифазных зерен самородного золота из четвертичных отложений р. Гулэ (а – обр. Г29, б – обр. Г42, в – обр. Г30) и состав полифазной ассоциации зерна золота Г30 на диаграмме Au–Cu–Ag (мас. %) (г).

Изображения в обратно рассеянных электронах с вещественным контрастом; точки с цифрами 41–75 на “а–г” – участки проведения рентгеноспектральных микроанализов, соответствующие таковым в табл. 2. На диаграмму (г) нанесены изотермы тройного твердого раствора по экспериментальным данным (Дриц и др., 1979).

Fig. 4. Back-scattered electron images featuring internal structure of polyphase grains of native gold from the Quaternary deposits of the Gule River (a – sample G29, б – sample G42; в – sample G30) and composition of polymineral assemblage within grain G30 in Au–Cu–Ag coordinates (wt %) (г).

Points with numbers 41–75 in “a–г” denote areas of electron microprobe analysis corresponding to the same numbers in Table 2. Isotherms of the ternary solid solution are plotted according to experimental data (Drits et al., 1979).

1.86 мас. % соответственно (см. рис. 4в, табл. 2). Кроме того, установлены медистые минеральные фазы размером от 2 до 10 мкм, которые приурочены к границам “доменов” электрума. Они представлены тетраурикупритом ($\text{Au}_{0.95}\text{Cu}_{1.04}\text{Ag}_{0.01}$), минеральной фазой, по составу близкой к аурикуприту ($\text{Cu}_{2.72}\text{Au}_{1.04}\text{Ag}_{0.24}$), а также сплавом системы Au–

Cu–Ag, который при расчете на одну формульную единицу соответствует составу ($\text{Au}_{0.41}\text{Cu}_{0.30}\text{Ag}_{0.29}$) (см. табл. 2, ан. 65–68).

Полифазная ассоциация зерна Г42 состоит (см. табл. 2, рис. 4б) из тетраурикуприта ($\text{Au}_{0.98}\text{Ag}_{0.01}$) $\text{Cu}_{1.01}$, который преобладает над вторичным высокопробным золотом (пробность 994 ± 2),

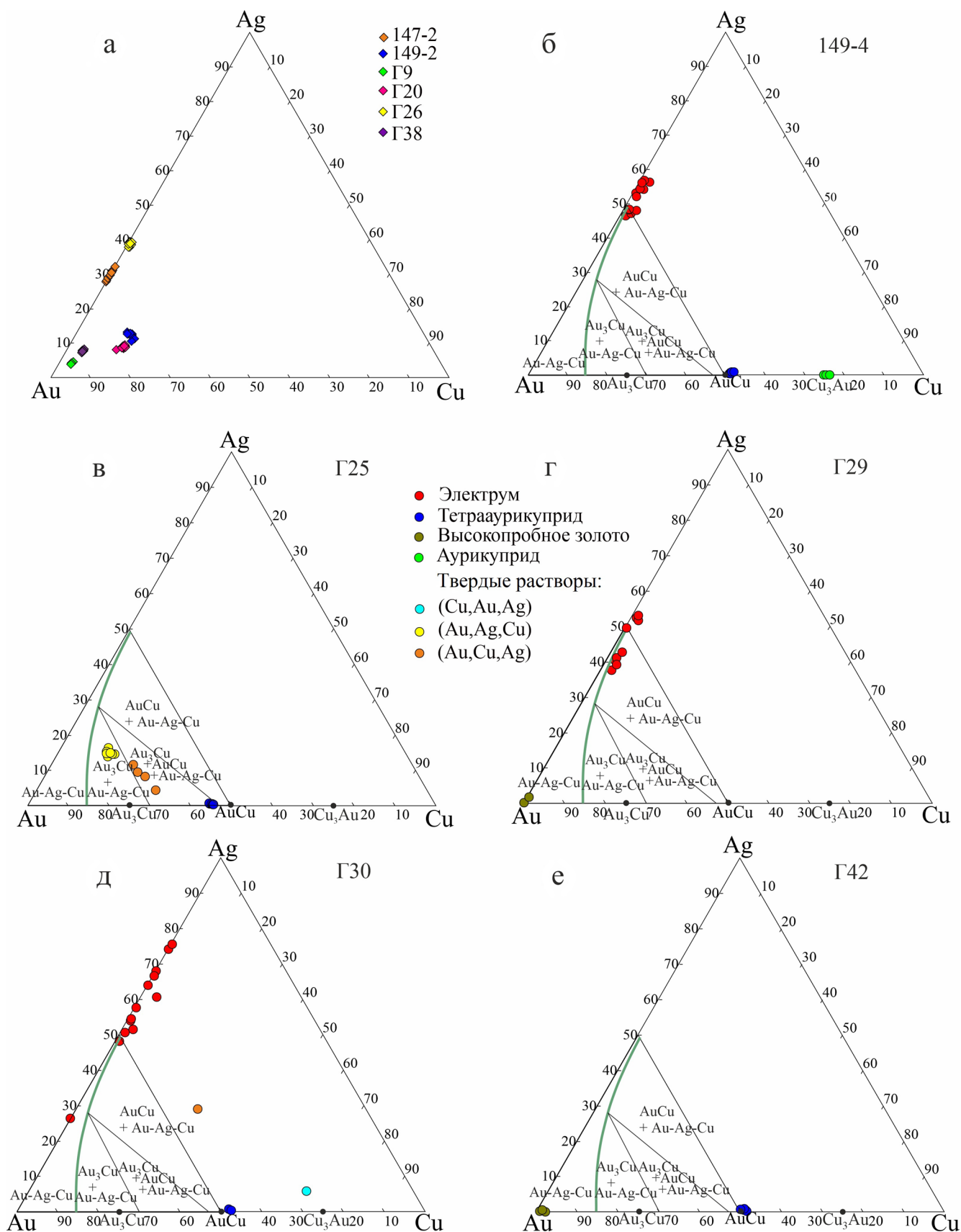


Рис. 5. Средние составы минералов золота монофазных зерен из кальцит-доломитовых карбонатов Гулинского массива (обр. 147-2, 149-2) и четвертичных отложений р. Гулэ (обр. Г9, Г20, Г26 и Г38) в координатах

Ag–Au–Cu, ат. % (а), химические составы минералов золота полифазных зерен из кальцит-доломитовых карбонатитов Гулинского массива (б – обр. 149-4) и четвертичных отложений р. Гулэ (в – обр. Г25, г – обр. Г29, д – обр. Г30, е – обр. Г42) в координатах Ag–Au–Cu, ат. %.

Фазовая диаграмма Au–Ag–Cu в богатой Au области – по (Онищенко и др., 2024). Точки на оси абсцисс соответствуют стехиометрическим соединениям Au₃Cu, AuCu и Cu₃Au. 1–6 – образцы: 1 – 147-2, 2 – 149-2, 3 – Г9, 4 – Г20, 5 – Г26, 6 – Г38; 7–10 – минералы: 7 – электрум, 8 – тетрааурикуприд, 9 – высокопробное золото, 10 – аурикуприд; 11–13 – твердые растворы: 11 – (Cu,Au,Ag), 12 – (Au,Ag,Cu), 13 – (Au,Cu,Ag).

Fig. 5. Average compositions of gold minerals in single-phase grains from calcite-dolomite carbonatite of the Guli massif (samples 147-2, 149-2) and Quaternary sediments of the Gule River (samples G9, G20, G26 and G38) in Ag–Au–Cu coordinates, at. % (a), chemical compositions of gold minerals in polyphase grains from calcite-dolomite carbonatite of the Guli massif (б – sample 149-4) and Quaternary sediments of the Gule River (в – sample G25, г – sample G29, д – sample G30 and е – sample G42) in Ag–Au–Cu coordinates, at. %.

Au–Ag–Cu phase diagram in the Au-rich area, after (Onishchenko et al., 2024). The points on the abscissa axis correspond to the stoichiometric compounds Au₃Cu, AuCu and Cu₃Au. 1–6 – samples: 1 – 147-2, 2 – 149-2, 3 – G9, 4 – G20, 5 – G26, 6 – G38; 7–10 – minerals: 7 – electrum, 8 – tetraauricupride, 9 – high-grade gold, 10 – auricupride; 11–13 – solid solutions: 11 – (Cu,Au,Ag), 12 – (Au,Ag,Cu), 13 – (Au,Cu,Ag).

распространенным по периферии или по внутри-зерновым трещинам.

Си-изотопные данные. Результаты изучения изотопного состава меди для минералов золота из кальцит-доломитовых карбонатитов и четвертичных отложений р. Гулэ представлены в табл. 3. Значения $\delta^{65}\text{Cu}$ для гомогенных и гетерогенных зерен самородного золота из кальцит-доломитовых карбонатитов, представленных электрумом Au_{0.70}Ag_{0.30} (обр. 147-2), природным сплавом Au_{0.74}Cu_{0.14}Ag_{0.12} (обр. 149-2) и полифазной ассоциацией электрума (Ag_{0.51}Au_{0.47}Cu_{0.02}), тетрааурикуприда (AuCu) и аурикуприда (Cu₃Au) (обр. 149-4), находятся в ограниченном диапазоне от –0.56 до –0.41‰ при среднем значении –0.49 и среднеквадратичном отклонении (СО) 0.08‰ (см. табл. 3). Си-изотопные результаты для гомогенных и гетерогенных зерен самородного золота из четвертичных отложений р. Гулэ демонстрируют диапазоны значений $\delta^{65}\text{Cu}$ в пределах –0.89 ... –0.12‰ (среднее значение $\delta^{65}\text{Cu} = -0.37 \pm \pm 0.35\%$, n = 4) и –0.44 ... +0.10‰ (среднее значение $\delta^{65}\text{Cu} = -0.23 \pm 0.26\%$, n = 4) соответственно (см. табл. 3). Таким образом, среднее значение $\delta^{65}\text{Cu}$ для всех зерен самородного золота из четвертичных отложений р. Гулэ, проанализированных в данном исследовании, составляет $0.30 \pm 0.30\%$, что неотличимо в пределах погрешности от такового для самородного золота из кальцит-доломитовых карбонатитов Гулинского массива.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Высокой смесимости Au, Ag и Cu способствует повышение температуры кристаллизации минералов золота. При снижении температуры область смесимости золота, серебра и меди, хорошо изученная экспериментально, резко сужается, однако проявляется даже при 300°C и ниже и при содержании меди в Au–Ag твердых растворах менее 1 мас. % (Мурзин, Малюгин, 1983). При осты-

вании высокотемпературный Au–Ag–Cu твердый раствор распадается на пластинчатые или решетчатые агрегаты бинарных минеральных фаз Au–Ag и Au–Cu (Новгородова и др., 1977; Мурзин, Суставов, 1989; Онищенко и др., 2024; Palyanova et al., 2024). Этот распад носит многоступенчатый характер с образованием промежуточных твердых растворов и сопровождается упорядочением структуры стехиометрических фаз путем зарождения и роста выпавшей из твердого раствора упорядоченной фазы ниже 410°C (AuCu), 390°C (Cu₃Au) и 240°C (Au₃Cu).

Анализ состава золотой минерализации и минералов-узников в россыпном золоте Гулинского массива, выполненный ранее (Сазонов и др., 2001; Малич и др., 2013; Рябчиков и др., 2016; Sazonov et al., 2021), позволил сделать вывод о длительном процессе формирования золотого оруденения – от высокотемпературной магматической (пентландит, диопсид, бадделит и др.) до низкотемпературной гидротермальной (галенит, гематит, хлорит и др.) стадии. Верхний температурный предел постмагматического рудообразования определяется формированием тетрааурикуприда – <410°C (Okamoto et al., 1987). При температуре <410°C устойчив отложенный из раствора тетрааурикуприд, для пластинок тетрааурикуприда в распавшемся твердом растворе эта температура является нижним пределом. В этом случае происходит его структурное упорядочение с образованием сверхструктуры. Однако в изученных нами зернах самородного золота также установлены более высокие температуры образования (450–550°C) для богатой медью минеральной фазы (Cu_{2.72}Au_{1.04}Ag_{0.24}) и природного сплава Au_{0.41}Cu_{0.30}Ag_{0.29} (см. рис. 4в, г). Интервал температур кристаллизации благороднометалльных минералов (240–550°C) в целом согласуется с таковым для сульфидов из фоскоритов и карбонатитов Гулинского массива (150–650°C) (Сорохтина и др., 2019; Malitch et al., 2026).

Таблица 3. Химический и Cu-изотопный ($\delta^{65}\text{Cu}$) состав самородного золота из кальцит-доломитовых карбонатитов и четвертичных отложений Гулинского массива

№ ан.	№ образца, рисунок	Минеральная ассоциация, природный сплав, минерал	Au, мас. %	Ag, мас. %	Cu, мас. %	Сумма	Au, ат. %	Ag, ат. %	Cu, ат. %	П	n	$\delta^{65}\text{Cu}$, ‰
Кальцит-доломитовые карбонатиты												
1	147-2, рис. 5а	Электрум	81.19	19.09	Н. п. о.	100.28	69.97	30.03	–	810	11	–0.41
2	149-2, рис. 5а	(Au,Cu,Ag)	86.85	7.93	5.26	100.04	73.83	12.32	13.85	868	10	–0.50
3	149-4, рис. 3а, 5б	Электрум	62.04	37.28	0.71	100.03	46.97	51.37	1.67	620	13	–0.56
		Тетрааурикуприд	74.39	0.55	25.36	100.30	48.31	0.65	51.05	742	5	
		Аурикуприд	49.93	Н. п. о.	50.17	100.10	24.31	–	75.69	499	4	
Четвертичные отложения р. Гулэ												
4	Г9, рис. 5а	Высокопробное золото	96.80	2.43	1.07	100.30	92.60	4.24	3.16	965	4	–0.12
5	Г20, рис. 5а	(Au,Cu,Ag)	89.43	5.64	5.16	100.23	77.28	8.90	13.82	892	19	–0.31
6	Г26, рис. 5а	Электрум	73.90	26.01	0.18	100.09	60.60	38.95	0.45	738	15	–0.89
7	Г38, рис. 5а	Высокопробное золото	94.25	4.59	1.45	100.29	87.98	7.82	4.20	940	12	–0.17
8	Г25, рис. 3б–е, 5в	(Au,Ag,Cu)	85.73	9.70	4.81	100.24	72.44	14.97	12.59	855	7	–0.14
		(Au,Cu,Ag)	84.49	5.81	9.74	100.04	67.46	8.50	24.05	845	4	
		Тетрааурикуприд	78.81	0.41	20.89	100.11	54.61	0.52	44.87	787	7	
9	Г29, рис. 4а, 5г	Электрум	67.27	31.96	0.84	100.07	52.61	45.35	2.04	672	9	–0.44
		Высокопробное золото	99.73	0.58	0.06	100.37	98.79	1.04	0.17	994	2	
10	Г30, рис. 4в, г, 5д	Электрум	55.50	44.25	0.41	100.16	41.20	57.87	0.93	554	13	+0.10
		Тетрааурикуприд	73.70	26.04	0.48	100.22	47.46	0.56	51.98	735	2	
		(Cu,Au,Ag)	50.91	6.31	42.79	100.01	26.10	5.91	67.99	509	1	
		(Au,Cu,Ag)	61.86	23.96	14.50	100.32	41.09	29.06	29.85	617	1	
11	Г42, рис. 4б, 5е	Тетрааурикуприд	74.63	0.49	24.94	100.06	48.84	0.58	50.58	746	5	–0.44
		Высокопробное золото	99.43	0.17	0.42	100.02	98.42	0.30	1.28	994	3	

Примечание. П – пробность, n – количество анализов. Н. п. о. – ниже предела обнаружения.

Note. П – fineness, n – quantity of analyses. Н. п. о. – below the detection limit.

Золотое оруденение, генетически или парагенетически связанное с карбонатитами, характерно для ряда месторождений России, ЮАР и Австралии (Гусев, 2012). Например, в Ковдорском массиве, сложенном малиньитами и нефелиновыми сиенитами по периферии, сменяемыми турьяитами, ийолитами и пироксенитами, оливинитами и карбонатитами в центральной части, наибольшие концентрации благородных металлов установлены в борнит-халькопиритовой ассоциации магнетит-апатитовых пород карбонатитовой серии (Сорохтина и др., 2021). Количество сульфидов (пирротин, халькопирит, борнит, халькозин, пентландит, пирит и др.) в породах, как правило, не превышает 10 об. %. Минералы золота и серебра (Au-Ag сплавы, содержащие 7–35 мас. % Ag с примесями Cu и Pd до 0.8 мас. %), гессит Ag_2Te и аргентопентландит $Ag(Fe,Ni)_8S_8$) тесно ассоциируют с сульфидами, что трактуется как свидетельство общности процессов образования этих минералов (Рудашевский и др., 1995). Н.В. Сорохтиной с соавторами (2021) выделены ранняя и поздняя ассоциации сульфидов и показано, что совместно с сульфидами ранней борнит-халькопиритовой ассоциации в интервале температур 480–300°C последовательно кристаллизуются минералы платиноидов, золота и серебра магматического генезиса. Поздняя пирротин-халькопиритовая ассоциация с минералами серебра формируется при температуре ниже 300°C (Сорохтина и др., 2021).

Месторождение Люлекоп в центральной части Палаборского массива (Северо-Восточный Трансвааль, ЮАР) является единственным в мире карбонатитовым месторождением, из сульфидных концентратов которого, кроме меди, извлекается попутно Au, Ag, Pt, Pd и Rh (Verwoerd, 1986). Минералы золота и МПГ ассоциируют с высокотемпературными сульфидами пентландит-халькопирит-борнитовой ассоциации, которые встречаются в виде гнезд, линз и прожилков в карбонатитах и фоскоритах (Рудашевский и др., 2001; Rudashevsky et al., 2004). Самородное золото представлено тетрааурикупридом и Au-Ag твердыми растворами с пробностью менее 800 (Au₃Ag, электрум, Au-содержащее серебро), для которых также типичны структуры распада твердого раствора (тетрааурикуприда и электрума, а также Au-содержащего серебра и электрума), часто в сростаниях с борнитом, Co-содержащим пентландитом, дигенитом, самородным висмутом. Процессы кристаллизации минералов благородных металлов в карбонатитах месторождения Люлекоп оцениваются как средне- и низкотемпературные (480–80°C; Рудашевский и др., 2001).

Крупное золоторудное месторождение Вэллэби (Австралия), ассоциирующее с карбонатитами (Stoltze, 2004), свидетельствует о том, что золото может быть не только второстепенным ценным компонентом карбонатитовых месторождений, но

и выступать в роли главного полезного ископаемого. В данной связи новые минералогические признаки золотого типа оруденения карбонатитов Гулинского массива необходимо учитывать при постановке поисковых работ на золото, они могут повысить эффективность оценки подобных объектов.

Возможность использования изотопного состава меди в целях идентификации источника рудного вещества самородного золота впервые апробирована (Melchiorre et al., 2023) на россыпных месторождениях в районе Ла Чолла (La Cholla) в штате Аризона (США). В данном исследовании установлено различие изотопного состава меди для угловатоуплощенных и равномернозернистых разновидностей золота ($\delta^{65}Cu$ 0.54 ± 0.22 и $2.8 \pm 1.0\%$ соответственно). По мнению Е.Б. Мелчиорри с соавторами (Melchiorre et al., 2023), более низкие значения изотопного состава меди для золота угловатоуплощенной формы отражают их первичную характеристику, тогда как образование золота кристаллического облика обусловлено изотопно-тяжелым составом меди гидротермального флюида, который унаследован при образовании золота данного типа.

Первые результаты изотопного состава меди для минералов золота из кальцит-доломитовых карбонатитов Гулинского массива выявили идентичные в пределах погрешности значения $\delta^{65}Cu$. Действительно, гомогенный по составу электрум (обр. 147-2, см. рис. 1а), природный сплав $Au_{0.74}Cu_{0.14}Ag_{0.12}$ (обр. 149-2, см. рис. 1а) и полиминеральная ассоциация электрума, тетрааурикуприда и аурикуприда (обр. 149-4, см. рис. 1б), характеризуются значениями $\delta^{65}Cu$ (‰), равными -0.41 ± 0.14 , -0.50 ± 0.14 и -0.56 ± 0.14 соответственно при среднем значении $\delta^{65}Cu = -0.49 \pm 0.08\%$ ($n = 3$). Характерно, что данное среднее значение оказалось идентичным в пределах погрешности таковому ($\delta^{65}Cu = -0.30 \pm 0.30\%$, $n = 8$, данное исследование) для самородного золота из четвертичных отложений р. Гулэ, расположенных в непосредственной близости от коренных выходов кальцит-доломитовых карбонатитов, а также среднему значению $\delta^{65}Cu = -0.30 \pm 0.23\%$ ($n = 5$) для самородного золота из четвертичных отложений р. Дунитовая, расположенной в нескольких километрах к югу от Южного карбонатитового штока (Малич, Войтин, 2024). Отметим, что значения $\delta^{65}Cu$, близкие к 0‰, типичны для высокотемпературных Cu-содержащих минералов (Larson et al., 2003). В данном контексте значения $\delta^{65}Cu$ для изученных образцов коренного и россыпного золота в нашем исследовании свидетельствуют в пользу их происхождения из примитивного источника рудного вещества. Мы полагаем, что характер вариаций изотопного состава меди в минералах золота может быть использован в качестве дополнительного маркера, позволяющего по-новому охарактеризовать условия формирования золотой минерализации карбонатитов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере самородного золота из кальцит-доломитовых карбонатитов Южного штока и четвертичных отложений р. Гулэ, дренирующей карбонатиты Гулинского массива ультраосновных и щелочных пород с карбонатитами Маймеча-Котуйской провинции охарактеризованы минеральные ассоциации, химические и изотопно-геохимические параметры самородного золота. При проведении исследований использован междисциплинарный подход с привлечением рентгеноспектрального микроанализа и Cu-изотопно-геохимического метода анализа.

По внутреннему строению изученные зерна золота подразделяются на гомогенные и гетерогенные. Первые характеризуются однородным химическим составом. Вторые содержат высокопробное золото, электрум, Au-Ag-Cu фазы, тетраурикуприд, аурикуприд, часто в виде структур распада твердых растворов, сформировавшихся в температурном интервале 550–240°C.

Данные по изотопному составу меди для минералов системы Au-Ag-Cu из кальцит-доломитовых карбонатитов Гулинского массива выявили близкие в пределах погрешности значения $\delta^{65}\text{Cu}$ со средним значением $\delta^{65}\text{Cu} = -0.49 \pm 0.08\text{‰}$ ($n = 3$). Изотопный состав меди самородного золота из четвертичных отложений р. Гулэ, расположенных в непосредственной близости к кальцит-доломитовым карбонатитам, характеризуется близкими значениями $\delta^{65}\text{Cu}$ в диапазоне от -0.89 до 0.10‰ со средним значением $\delta^{65}\text{Cu} = -0.30 \pm 0.30\text{‰}$ ($n = 8$). Выявленные Cu-изотопные данные для коренного и россыпного золота неотличимы в пределах погрешности друг от друга, свидетельствуя в пользу ювенильного источника рудного вещества.

С учетом геологической обстановки расположения русловых и террасовых отложений р. Гулэ, незначительного характера переноса россыпного золота, сходства минеральных ассоциаций, химического и Cu-изотопного состава самородного золота из кальцит-доломитовых карбонатитов и четвертичных отложений р. Гулэ главными источниками золота являлись породы маймеча-котуйского ийолит-карбонатитового комплекса.

Благодарности

Авторы выражают признательность В.А. Булатову, Т.Г. Окуневой, А.Д. Рыбаковой и Н.С. Чебыкину за помощь при проведении минералогических и изотопных аналитических работ, а также М.М. Гончарову и Г.Г. Лопатину за многолетнее сотрудничество при изучении благороднометалльной минерализации Маймеча-Котуйской провинции. Авторы благодарны анонимным рецензентам за конструктивные замечания и редакционную правку, которые способствовали улучшению рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баданина И.Ю., Малич К.Н., Гончаров М.М., Туганова Е.В. (2010) Благороднометалльные россыпи Гулинского массива (север Сибирской платформы): новые данные о необычных минеральных ассоциациях золота и платиноидов. *Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований*. Мат-лы Всерос. конф. (с междунар. участием). Т. 1. М.: ИГЕМ РАН, 56-58.
- Балмасова Е.А., Смольская Л.С., Лопатина Л.А., Лопатин Г.Г., Лазаренков В.Г., Малич К.Н. (1992) Самородный осмий и иридоосмий Гулинского массива. *Докл. АН*, **323**(4), 748-751.
- Гусев А.И. (2012) Золотоносные щелочные магматические комплексы. *Успехи соврем. естествознания*, (9), 47-52.
- Дриц М.Е., Бочвар Н.Р., Гузей Л.С., Лысова Е.В., Падежнова Е.М., Рохлин Л.Л., Туркина Н.И. (1979) Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: Справочник. (Отв. ред. Н.Х. Абрикосов). М.: Наука, 248 с.
- Егоров Л.С. (1991) Ийолит-карбонатитовый плутонизм (на примере маймеча-котуйского комплекса Полярной Сибири). Л.: Недра, 260 с.
- Когарко Л.Н., Сенин В.Г. (2011) Первая находка золота в коренных породах Гулинского массива (Полярная Сибирь). *Докл. АН*, **441**(1), 81-82.
- Липенков Г.В., Машак М.С., Наумов М.В. (2018) Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-6 1:1 000 000. 3-е покол. Сер. Норильская. Лист R-47 (Хета). Карта дочетвертичных образований. СПб.: Картограф. фабрика ВСЕГЕИ.
- Лопатин Г.Г. (2001) К открытию россыпей благородных металлов в Маймеча-Котуйской провинции / Очерки по истории открытий минеральных богатств Таймыра. (Отв. ред. А.Г. Самойлов). Новосибирск: Изд-во Новосибирск. ун-та, фил. "Гео" Изд-ва СО РАН, 156-158.
- Малич К.Н. (2022) Комплексные платинометалльные месторождения Полярной Сибири (состав, источники вещества и условия образования). Дисс. ... докт. геол.-мин. наук. Новосибирск, 269 с.
- Малич К.Н. (1999) Платиноиды клинопироксенит-дунитовых массивов Восточной Сибири (геохимия, минералогия, генезис). СПб.: Картограф. фабрика ВСЕГЕИ, 296 с.
- Малич К.Н., Войтин А.А. (2024) Морфология и состав самородного золота из россыпи реки Дунитовой (Маймеча-Котуйская провинция, Полярная Сибирь). *Зап. РМО*, **153**(6), 3-27. <https://doi.org/10.31857/S0869605524060017>
- Малич К.Н., Липенков Г.В., Озорнин Д.А., Наумов М.В., Баданина И.Ю., Булатов В.А., Войтин А.А. (2024) Золотая минерализация кальцит-доломитовых карбонатитов Гулинского массива (Маймеча-Котуйская провинция, Полярная Сибирь): первые данные. *Докл. РАН. Науки о Земле*, **519**(1), 116-124. <https://doi.org/10.31857/S2686739724110137>
- Малич К.Н., Лопатин Г.Г. (1997а) Геология и формационная принадлежность ультрамафитов Гулинского интрузива. *Недра Таймыра*, вып. 2, 86-103.

- Малич К.Н., Лопатин Г.Г. (1997б) Новые данные о металлогении уникального Гулинского клинопироксенит-дуניתового массива (Северная Сибирь, Россия). *Геол. руд. месторожд.*, **39**(3), 247-257.
- Малич К.Н., Малич Н.С., Симонов О.Н., Лопатин Г.Г., Науменко Н.Г. (1998) Ирридиево-осмиевые россыпи Маймеча-Котуйской провинции – новый российский источник тугоплавких платиноидов. *Отчет геол.*, (3), 30-35.
- Малич К.Н., Рудашевский Н.С. (1992) О коренной минерализации платиноидов хромититов Гулинского массива. *Докл. АН*, **325**(5), 1026-1029.
- Малич К.Н., Сорохтина Н.В., Баданина И.Ю., Кононкова Н.Н. (2013) О коренных источниках благороднометаллических россыпей Гулинского массива (Полярная Сибирь): новые минералогические данные. *Докл. АН*, **351**(1), 87-89.
- Мурзин В.В., Малюгин А.А. (1983) Новые данные о нестабильности природных твердых растворов системы Au–Ag–Cu в области температур менее 350°C. *Докл. АН СССР*, **269**(3), 723-724.
- Мурзин В.В., Сустанов С.Г. (1989) Твердофазные превращения в природном медистом золоте. *Изв. АН СССР. Сер. геол.*, (11), 94-104.
- Новгородова М.И., Цепин А.И., Горшков А.И., Кудревич И.М., Вяльсов Л.Н. (1977) Новые данные по кристаллохимии и свойствам природных интерметаллических соединений системы Cu–Au. *Зап. ВМО*, **106**(5), 540-552.
- Онищенко С.А., Кузнецов С.К., Тропников Е.М. (2020) Эпигенетические изменения медистого золота в структуре распада Au–Ag–Cu–Pd-твердого раствора. *Докл. РАН. Науки о Земле*, **492**(2), 35-38.
- Онищенко С.А., Пархачева Г.К., Глухов Ю.В., Кузнецов С.К., Никулова Н.Ю., Тропников Е.М. (2024) Распад твердых растворов в области Au–Au₃Cu и уточнение фазовой диаграммы Au–Ag–Cu. *Геохимия*, **69**(11), 1012-1021.
- Пальянова Г.А. (2020) Минералы золота и серебра в сульфидных рудах. *Геол. руд. месторожд.*, **62**(5), 426-449.
- Рудашевский Н.С., Кнауф В.В., Краснова Н.И., Рудашевский В.Н. (1995) Платинометаллическая и золото-серебряная минерализация в рудах и карбонатитах щелочно-ультраосновного комплекса (Ковдорский массив, Россия). *Зап. РМО*, **124**(5), 1-15.
- Рудашевский Н.С., Крейер Ю.Л., Булах А.Г., Краснова Н.И., Рудашевский В.Н., Карчевский П.И. (2001) Минералы платины, палладия, золота и серебра в карбонатитовых рудах месторождения Люлекоп (Массив Палабора, ЮАР). *Зап. РМО*, **130**(5), 21-35.
- Рябчиков И.Д., Когарко Л.Н., Сазонов А.М., Кононкова Н.Н. (2016) Условия формирования золоторудной минерализации в щелочно-ультраосновных магматических комплексах. *Докл. АН*, **468**(6), 680-683.
- 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. (2001) Платиноносные щелочно-ультраосновные интрузии Полярной Сибири. Томск: Изд-во ЦНТИ, 510 с.
- Сорохтина Н.В., Зайцева В.А., Петров С.В., Кононкова Н.Н. (2021) Оценка температуры формирования благороднометаллической минерализации Ковдорского щелочно-ультраосновного массива (Кольский п-ов). *Геохимия*, **66**(5), 407-424.
- Сорохтина Н.В., Когарко Л.Н., Зайцев В.А., Кононкова Н.Н., Асавин А.М. (2019) Сульфидные ассоциации карбонатитов и фоскоритов Гулинского массива (Полярная Сибирь) и их перспективность на благородные металлы. *Геохимия*, **64**(11), 1111-1132.
- Larson P.B., Maher K., Ramos F.C., Chang Z.S., Gaspar M., Meinert L.D. (2003) Copper isotope ratios in magmatic and hydrothermal ore-forming environments. *Chem. Geol.*, **201**(3-4), 337-350.
- Malitch K.N., Sorokhtina N.V., Izokh A.E., Voitin A.A., Badanina I.Yu., Murzin V.V. (2026) Sulfur isotope composition of sulfides from phoscorite and carbonatite of the Guli massif (Maimecha-Kotui Province, Russia): First results. *Dokl. Earth Sci.*, **526**(2). Art. 39.
- Maréchal C., Albarède F. (2002) Ion-exchange fractionation of copper and zinc isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **66**, 1499-1509.
- Mathur R., Zhao Y. (2023) Copper isotopes used in mineral exploration. *Isotopes in Economic Geology, Metallogenesis and Exploration*. (Eds D. Huston, J. Gutzmer). Cham, Switzerland: Springer, 443-450.
- Melchiorre E.B., Mathur R., Kamenov G., Paredes J. (2023) Geochemical overprinting and secondary placer crystal formation in the La Cholla District, Quartzsite, Arizona, USA: evidence from copper isotopes, morphology, and trace elements. *Minerals*, **13**, 1444. <https://doi.org/10.3390/min13111444>
- Okamoto H., Chakrabarti D.J., Laughlin D.E., Massalski T.B. (1987) The Au–Cu (Gold–Copper) system. *Bull. Alloy Phase Diagrams*, **8**(5), 454-474.
- Okuneva T.G., Karpova S.V., Streletskaya M.V., Soloshenko N.G., Kiseleva D.V. (2022) The method for Cu and Zn isotope ratio determination by MC ICP-MS using the AG MP-1 resin. *Geodynamics & Tectonophysics*, **13**(2s), 0615. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0615>
- Palyanova G.A., Beliaeva T.V., Savelyev D.P., Seryotkin Y.V. (2024) Minerals of the Au-Cu-Ag system in grains from the placers of the Olkhovaya-1 River (Eastern Kamchatka, Russia). *Minerals*, **14**. Art. 448. <https://doi.org/10.3390/min14050448>
- Rudashevsky N.S., Kretser Yu.L., Rudashevsky V.N., Sukharzhevskaya E.S. (2004) A review and comparison of PGE, noble-metal and sulphide mineralization in phoscorites and carbonatites from Kovdor and Phalaborwa. *Phoscorites and carbonatites from mantle to mine: the key example of the Kola alkaline province*. (Eds A. Zaitsev, F. Wall). London: Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 375-406.
- Sazonov A.M., Romanovsky A.E., Gertner I.F., Zvyagina E.A., Krasnova T.S., Grinev O.M., Silyanov S.A., Kolmakov Yu.V. (2021) Genesis of precious metal mineralization in intrusions of ultramafic, alkaline rocks and carbonatites in the north of the Siberian Platform. *Minerals*, **11**, 354. <https://doi.org/10.3390/min11040354>
- Shields W.R., Goldich S.S., Garner E.L., Murphy T.J. (1965) Natural variations in the abundance ratio and the atomic weight of copper. *J. Geophys. Res.*, **70**, 479-491.
- Stoltze A.M. (2004) A genetic link between carbonatite magmatism and gold mineralization at the Wallaby gold deposit, Eastern Goldfields, Western Australia. *32 Int. Geol. Congress. Abstracts*. Florence, p. 512.
- Verwoerd W.J. (1986) Mineral deposits associated with carbonatites and alkaline rocks. *Mineral Deposits of Sou-*

thern Africa. (Eds C.R. Anhaeusser, S. Maske). Geological Society of South Africa. V. 2. Pretoria, South Africa. P. 2173-2191.

Warr L.N. (2021) IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineral. Magaz.*, **85**, 291-320.

REFERENCES

- Badanina I.Yu., Malitch K.N., Goncharov M.M., Tuganova E.V. (2010) Precious metal placers of the Gulinsky massif (north of the Siberian platform): new data on unusual mineral associations of gold and platinum group metals. *Native gold: typomorphism of mineral associations, conditions for the formation of deposits, problems of applied research*. Materials of the All-Russian conference (with international participation). V. 1. Moscow, IGEM RAN Publ., 56-58. (In Russ.)
- Balmasova Y.A., Smol'skaya L.S., Lopatina L.A., Lopatin G.G., Lazarenkov V.G., Malitch K.N. (1992) Native osmium and iridosmine from the Guli massif. *Earth Sci. Sect.*, **325**(5), 154-157 (translated from *Dokl. AN*, **323**(4), 748-751).
- Gusev A.I. (2012) Gold-bearing alkaline igneous complexes. *Uspekhi Sovremennogo Estestvoznaniya*, (9), 47-52. (In Russ.)
- Drits M.E., Bochvar N.R., Guzei L.S., Lysova E.V., Padezhnova E.M., Rokhlin L.L., Turkina N.I. (1979) Binary and multicomponent copper-based systems: Handbook. (Ed. N.Kh. Abrikosov). Moscow, Nauka Publ., 248 p. (In Russ.)
- Egorov L.S. (1991) Iyolite-carbonatite plutonism (the Maimecha-Kotui Complex of Polar Siberia as an example). Leningrad, Nedra Publ., 260 p. (In Russ.)
- Kogarko L.N., Senin V.G. (2011) The first find of native gold in parent rocks of the Gulinskii Massif (Polar Siberia). *Dokl. Earth Sci.*, **441**(1), 1512-1513 (translated from *Dokl. AN*, **441**(1), 81-82).
- Larson P.B., Maher K., Ramos F.C., Chang Z.S., Gaspar M., Meinert L.D. (2003) Copper isotope ratios in magmatic and hydrothermal ore-forming environments. *Chem. Geol.*, **201**(3-4), 337-350.
- Lipenkov G.V., Mashchak M.S., Naumov M.V. (2018) The 1:1 000 000 State Geological Map of the Russian Federation, 3rd ed., Ser. Noril'sk, Sheet No. R-47 Kheta, Pre-Quaternary Formation Map. St.Petersburg, Cartographic Factory VSEGEI. (In Russ.)
- Lopatin G.G. (2001) About the discovery of noble-metal placers in the Maimecha-Kotui province. *Feature articles about the history of discoveries of mineral wealth of Taimyr*. (Ed. A.G. Samoilov). Novosibirsk, Novosibirsk University Publishing House, 156-158. (In Russ.)
- Malitch K.N. (2022) Complex PGE deposits of the Polar Siberia (composition, sources and conditions of Formation). Habil. Dr. thesis. Novosibirsk, 269 p. (In Russ.)
- Malitch K.N. (1999) Platinum-group elements in clinopyroxenite-dunite massifs of the Eastern Siberia (geochemistry, mineralogy, genesis). St.Petersburg, Cartographic Factory VSEGEI, 296 p. (In Russ.)
- Malitch K.N., Lipenkov G.V., Ozornin D.A., Naumov M.V., Badanina I.Yu., Bulatov V.A., Voitina A.A. (2024) Gold mineralization from calcite-dolomite carbonatite of the Guli massif (Maimecha-Kotui province, Polar Siberia): first results. *Dokl. Earth Sci.*, **519**(1), 1899-1905 (translated from *Dokl. RAN. Nauki o Zemle*, **519**(1), 116-124). <https://doi.org/10.1134/S1028334X24603079>
- Malitch K.N., Lopatin G.G. (1997a) Geology and petrographic association of ultramafites of the Guli intrusion. *Nedra Taimyra*, vyp. 2, 86-103. (In Russ.)
- Malitch K.N., Lopatin G.G. (1997b) New data on the metallogeny of the unique Guli clinopyroxenite-dunite Massif, Northern Siberia, Russia. *Geol. Ore Depos.*, **39**(3), 209-218 (translated from *Geol. Rud. Mestorozhd.*, **39**(3), 247-257).
- Malitch K.N., Malitch N.S., Simonov O.N., Lopatin G.G., Naumenko N.G. (1998) Iridium-osmium placers of the Maimecha-Kotuy province – the new Russian source for refractory platinum-group elements. *Otech. Geol.*, (3), 30-34. (In Russ.)
- Malitch K.N., Rudashevskii N.S. (1992) Bedrock platinum-metal mineralization in chromitite of the Guli Massif. *Earth Sci. Sect.*, **32**(8), 165-169 (translated from *Dokl. AN*, **325**(5), 1026-1029).
- Malitch K.N., Sorokhtina N.V., Badanina I.Yu., Kononkova N.N. (2013) Parent sources of noble-metal placers of the Guli massif (Polar Siberia): new mineralogical data. *Dokl. Earth Sci.*, **451**(1), 743-745 (translated from *Dokl. AN*, **351**(1), 87-89).
- Malitch K.N., Sorokhtina N.V., Izokh A.E., Voitina A.A., Badanina I.Yu., Murzin V.V. (2026) Sulfur isotope composition of sulfides from phoscorite and carbonatite of the Guli massif (Maimecha-Kotui Province, Russia): First results. *Dokl. Earth Sci.*, **526**(2). Art. 39.
- Malitch K.N., Voitina A.A. (2024) Morphology and composition of gold minerals from a placer deposit of the Dunitovaya River (Maimecha-Kotui Province, Polar Siberia). *Zapiski RMO*, **153**(6), 3-27. (In Russ.)
- Maréchal C., Albarède F. (2002) Ion-exchange fractionation of copper and zinc isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **66**, 1499-1509.
- Mathur R., Zhao Y. (2023) Copper isotopes used in mineral exploration. *Isotopes in Economic Geology, Metallogenesis and Exploration*. (Eds D. Huston, J. Gutzmer). Cham, Switzerland, Springer, 443-450.
- Melchiorre E.B., Mathur R., Kamenov G., Paredes J. (2023) Geochemical overprinting and secondary placer crystal formation in the La Cholla District, Quartzsite, Arizona, USA: evidence from copper isotopes, morphology, and trace elements. *Minerals*, **13**, 1444. <https://doi.org/10.3390/min13111444>
- Murzin V.V., Malyugin A.A. (1983) New data on the instability of natural solid solutions of the Au-Ag-Cu system at temperatures below 350°C. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **269**(3), 723-724. (In Russ.)
- Murzin V.V., Sustavov S.G. (1989) Solid-phase transformations in natural copper-bearing gold. *Izv. Akad. Nauk. Geol. Ser.*, (11), 94-104. (In Russ.)
- Novgorodova M.I., Tsepin A.I., Gorshkov A.I., Kudrevich I.M., Vyal'sov L.N. (1977) New data on the crystal chemistry and properties of natural intermetallic compounds of the Cu-Au system. *Zap. VMO*, **106**(5), 540-552. (In Russ.)
- Okamoto H., Chakrabarti D.J., Laughlin D.E., Massalski T.B. (1987) The Au–Cu (Gold–Copper) system. *Bull. Alloy Phase Diagr.*, **8**(5), 454-474.
- Okuneva T.G., Karpova S.V., Streletskaya M.V., Soloshenko N.G., Kiseleva D.V. (2022) The method for Cu and Zn isotope ratio determination by MC ICP-MS using the AG MP-1 resin. *Geodynamics & Tectonophysics*, **13**(2s),

0615. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0615>
- Onishchenko S.A., Kuznetsov S.K., Tropnikov E.M. (2020) Epigenetic alteration of copper-rich gold in the Au–Ag–Cu–Pd exsolution texture. *Dokl. Earth Sci.*, **492**(2), 418–421 (translated from *Dokl. RAN. Nauki o Zemle*, **492**(2), 35–38).
- Onishchenko S.A., Parkhacheva G.K., Glukhov Yu.V., Kuznetsov S.K., Nikulova N.Yu., Tropnikov E.M. (2024) Exsolution in the Au–Au₃Cu region and correction of the Au–Ag–Cu phase diagram. *Geochem. Int.*, **69**(11), 1174–1183 (translated from *Geokhimiya*, **69**(11), 1012–1021).
- Palyanova G.A. (2020) Gold and silver minerals in sulfide ore. *Geol. Ore Depos.*, **62**(5), 383–406 (translated from *Geol. Rud. Mestorozhd.*, **62**(5), 426–449).
- Palyanova G.A., Beliaeva T.V., Savelyev D.P., Seryotkin Y.V. (2024) Minerals of the Au–Cu–Ag system in grains from the placers of the Olkhovaya-1 River (Eastern Kamchatka, Russia). *Minerals*, **14**(Art. 448). <https://doi.org/10.3390/min14050448>
- Rudashevskii N.S., Knauf V.V., Krasnova N.I., Rudashevskii V.N. (1995) Platinum-metal and gold-silver mineralization in ores and carbonatites of the alkaline-ultramafic complex (Kovdor massif, Russia). *Zapiski RMO*, **124**(5), 1–15. (In Russ.)
- Rudashevskii N.S., Kretser Yu.L., Bulakh A.G., Krasnova N.I., Rudashevskii V.N., Karchevskii P.I. (2001) Platinum, palladium, gold, and silver minerals in carbonatite ores of the Loolekop deposit (Phalaborwa massif, South Africa). *Zapiski RMO*, **130**(5), 21–35. (In Russ.)
- Rudashevsky N.S., Kretser Yu.L., Rudashevsky V.N., Sukharzhevskaya E.S. (2004) A review and comparison of PGE, noble-metal and sulphide mineralization in phoscorites and carbonatites from Kovdor and Phalaborwa. *Phoscorites and carbonatites from mantle to mine: the key example of the Kola alkaline province*. (Eds A. Zaitsev, F. Wall). London, Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 375–406.
- Ryabchikov I.D., Kogarko L.N., Sazonov A.M., Kononkova N.N. (2016) Formation of gold mineralization in ultramafic alkaline magmatic complexes. *Dokl. Earth Sci.*, **468**(2), 623–625 (translated from *Dokl. AN*, **468**(6), 680–683).
- Sazonov A.M., Romanovsky A.E., Gertner I.F., Zvyagina E.A., Krasnova T.S., Grinev O.M., Silyanov S.A., Kolmakov Yu.V. (2021) Genesis of precious metal mineralization in intrusions of ultramafic, alkaline rocks and carbonatites in the north of the Siberian Platform. *Minerals*, **11**(354). <https://doi.org/10.3390/min11040354>
- Sazonov A.M., Zvyagina E.A., Leont'ev S.I., Gertner I.F., Krasnova T.S., Kolmakov Yu.V., Panina L.I., Chernyshov A.I., Makeev S.M. (2001) Platinum-bearing alkaline-ultrabasic intrusions of Polar Siberia. Tomsk, TsNTI Publ., 510 p. (In Russ.)
- Shields W.R., Goldich S.S., Garner E.L., Murphy T.J. (1965) Natural variations in the abundance ratio and the atomic weight of copper. *J. Geophys. Res.*, **70**, 479–491.
- Sorokhtina N.V., Kogarko L.N., Zaitsev V.A., Kononkova N.N., Asavin A.M. (2019) Sulfide mineralization in the carbonatites and phoscorites of the Guli Massif (Polar Siberia), and their noble-metal potential. *Geochem. Int.*, **64**(11), 1125–1146 (translated from *Geokhimiya*, **64**(11), 1111–1132).
- Sorokhtina N.V., Zaitseva V.A., Petrov S.V., Kononkova N.N. (2021) Estimation of formation temperature of the noble metal mineralization of the Kovdor alkaline-ultrabasic massif (Kola Peninsula). *Geochem. Int.*, **66**(5), 474–490 (translated from *Geokhimiya*, **66**(5), 407–424).
- Stoltze A.M. (2004) A genetic link between carbonatite magmatism and gold mineralization at the Wallaby gold deposit, Eastern Goldfields, Western Australia. *32 Int. Geol. Congress. Abstracts*. Florence, 512.
- Verwoerd W.J. (1986) Mineral deposits associated with carbonatites and alkaline rocks. *Mineral Deposits of Southern Africa*. (Eds C.R. Anhaeusser, S. Maske). Geological Society of South Africa. V. 2. Pretoria, South Africa. P. 2173–2191.
- Warr L.N. (2021) IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Miner. Mag.*, **85**, 291–320.