

УДК 553.411+553.068.5+549.283

ШЛИХОВЫЕ АССОЦИАЦИИ МИНЕРАЛОВ ЗОЛОТОНОСНЫХ РОССЫПЕЙ МИАССКОЙ РОССЫПНОЙ ЗОНЫ (Южный Урал) И ВОЗМОЖНЫЕ КОРЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЗОЛОТА

А.К. Козин¹, С.Ю. Степанов¹, Р.С. Паламарчук¹, В.В. Шиловских³, В.С. Жданова²

¹Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
456317, Миасс, территория Ильменский заповедник, Россия

²Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН,
620016, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9, Россия

Россыпные месторождения долины р. Миасс на Южном Урале известны с начала XIX в., за два столетия отработки из аллювиальных и делювиально-аллювиальных россыпей было извлечено более 120 т золота. Несмотря на промышленную значимость территории, самородное золото россыпных месторождений практически не изучено, отсутствуют данные и о минеральном составе шлиховых ассоциаций. В работе представлено самородное золото и минералы тяжелой фракции из семи россыпей Миасской россыпной зоны делювиально-аллювиальных и аллювиальных типов. Исследование типоморфных особенностей самородного золота и закономерностей распределения минералов тяжелой фракции в рыхлых отложениях позволит определить генетические типы коренных источников россыпеобразования. В результате минералогических исследований установлено повсеместное преобладание в шлихах хромшпинелида и ильменита, в меньшей степени распространены магнетит, эпидот, рутил, титанит, клинопироксен, гематит, циркон, гранаты, монацит, ксенотим. Хромшпинелиды различных россыпей представлены хромитом и субферрихромитом, для них характерно высокое среднее содержание Cr_2O_3 (50.9 мас. %). Особенности химического состава хромшпинелида свидетельствуют о его поступлении в россыпные отложения из пород офиолитовой ассоциации. Состав и морфологические особенности фосфатов редкоземельных элементов (монацит и ксенотим) указывают на их метаморфогенную природу и поступление в россыпи из рифейских толщ. Самородное золото характеризуется слабой степенью окатанности. Минеральные включения в самородном золоте представлены сульфидами, арсенидами, висмутидами, медистым золотом, платиноидами. Состав самородного золота россыпей Миасской долины изменяется в широких пределах. Основными примесями являются серебро (4.5–23.4 мас. %) и ртуть (до 5.14 мас. %), в нескольких зернах отмечена примесь меди (до 2.03 мас. %). Исследование внутреннего строения самородного золота с применением метода дифракции обратнорассеянных электронов показало преобладание структур первичной кристаллизации, низкую степень деформации и развитие высокопробных кайм, имеющих тонкозернистое мозаичное строение. Образование высокопробных кайм на золотинах в россыпях объяснено процессами рекристаллизации деформированных при транспортировке участков. Формирование россыпей происходило за счет разрушения коренных источников, расположенных в верховьях водотоков или непосредственной близости от них, что подтверждает низкая степень окатанности индивидов. Состав самородного золота в совокупности с набором микровключений свидетельствуют о золотосульфидно-кварцевом типе оруденения большинства коренных источников.

Россыпи, минералы россыпей, россыпное золото, хромшпинелиды, монацит, микровключения, внутренние структуры, EBSD, Миасская долина, Южный Урал

MINERAL ASSOCIATIONS OF CONCENTRATES FROM GOLD-BEARING PLACERS OF THE MIASS PLACER ZONE (SOUTH URALS) AND POSSIBLE PRIMARY SOURCES OF GOLD

A.K. Kozin, S.Yu. Stepanov, R.S. Palamarchuk, V.V. Shilovskikh, V.S. Zhdanova

The placer deposits of the Miass valley in the Southern Urals have been known since the beginning of the 19th century. Over two centuries of mining more than 120 tons of gold have been extracted from alluvial and alluvial–deluvial placers. Despite the industrial significance of this territory, native gold of alluvial deposits is practically unstudied and there is no data on the mineral composition of concentrates. Native gold and heavy fraction minerals from seven placers of the Miass placer zone of deluvial–alluvial and alluvial types were researched. The study of the typomorphic features of native gold and distribution of heavy fraction minerals in loose deposits makes it possible to determine the genetic types of primary sources of placer formation. Chromespinel and ilmenite prevail in the concentrates, magnetite, epidote, rutile, titanite, clinopyroxene, hematite, zircon, garnets, and monazite are less common. Chromespinelides of various placers are represented by chromite

and subferrichromite, they are characterized by a high average content of Cr_2O_3 (50.9 wt.%). Chromespinelide chemical composition features show evidence of its penetration into placer sediments from rocks of the ophiolitic association. The composition and morphological features of phosphates of rare earth elements (monazite and xenotime) indicate their metamorphogenic nature and penetration into placers from the Riphean strata. Native gold is characterized by a low degree of roundness. Mineral inclusions in native gold are represented by sulfides, arsenides, bismuthides, cuprous gold, platinoids. Composition of native gold from the Miass River valley placers varies over a wide range. The main admixtures are silver (4.5–23.4 wt.%) and mercury (up to 5.14 wt.%), copper (up to 2.03 wt.%) was noted in several grains. The EBSD study of native gold internal structure showed predominance of primary crystallization structures, a low degree of deformation and growth of gold-rich rims with a fine-grained mosaic structure. Formation of gold-rich rims in gold grains in placers is explained by recrystallization of the most deformed parts of gold during transportation. Placers occurred due to the destruction of primary sources located in the upper reaches of streams or near them, which is confirmed by a low degree of grains' roundness. The composition of native gold in combination with a set of micro-inclusions indicate the gold-sulfide-quartz type of mineralization of most primary sources.

Placers, placer minerals, placer gold, chromespinelides, monazite, micro-inclusions, inner structure, EBSD, Miass River valley, south Urals

ВВЕДЕНИЕ

Золотоносные россыпи в долине р. Миасс известны с начала XIX в., в 1824 г. с находкой первого самородка золота началось их промышленное освоение, продолжающееся и по сей день. Миасская россыпная зона протягивается вдоль Главного Уральского разлома на 120 км. Она является наиболее богатой на Южном Урале и включает более 180 россыпных объектов [Попова и др., 1995]. За двухвековую историю промышленной отработки из россыпей было извлечено более 120 т золота, что значительно превышает объем добытого в регионе рудного золота. Мировую известность Миасской долине принесли многочисленные находки самородков, среди которых и крупнейший в России «Золотой треугольник» [Смолин, 1970].

Богатство Миасской долины золотоносными россыпями обусловлено сочетанием в пределах зоны ГУР большого количества месторождений и проявлений золота, относящихся к различным рудным формациям. В районе распространены месторождения и рудопроявления золото-полиметаллической формации, связанные с вулканогенно-осадочными толщами. В северо-миасском рудном поле расположены месторождения золото-порфировой формации: Тыелгинское и Наилинское [Сазонов и др., 2001]. Повсеместно в пределах Главного Уральского разлома встречаются месторождения и проявления золото-кварцевой и золото-сульфидно-кварцевой формаций, связанные с кварцевыми жилами в серпентинизированных массивах гипербазитов и сопровождающими их лиственитами. Они представлены многочисленными маломощными (0.1—2.0 м) одиночными кварцевыми жилами и системами оперяющих жил, послужившими объектами старательской добычи. Несмотря на небольшие размеры, эти месторождения имели существенную роль в формировании россыпей Миасской долины [Belogub et al., 2017].

Определяющее значение россыпных объектов в золотодобыче Южного Урала и уникальность россыпей долины р. Миасс обусловили большой интерес исследователей к данной территории. Детальное изучение микровключений рудных минералов в самородном золоте в сочетании с хорошей геолого-минералогической изученностью района позволили установить связь россыпей Миасской зоны с конкретными коренными месторождениями [Зайков и др., 2017a; Zaykov et al., 2017]. Исследование минералов элементов платиновой группы, обнаруженных в аллювиальных отложениях, показало связь Кыалимской и Малоиремельской золотоносных россыпей с Карабашским, Таловским и Нуралинским массивами альпинотипных гипербазитов [Зайков и др., 2016, 2017b]. Для россыпи Комья-Курай, относящейся к Атлянской группе, были описаны минеральные ассоциации и приведена вещественная характеристика самородного золота [Попова и др., 2016].

Изучение химического состава, морфологических особенностей и внутреннего строения россыпного золота может служить источником большого количества информации о природе коренного оруденения, его связи с россыпями и процессах транспортировки. Решению этих вопросов посвящены многочисленные исследования: от классических трудов основоположников изучения россыпного золота [Петровская, 1973; Николаева, 1978] до работ современных отечественных и зарубежных авторов [Савва, Прейс, 1990; Townley et al., 2003; Калинин и др., 2009; Chapman et al., 2009, 2011, 2017; Lalomov et al., 2017; Никифорова и др., 2018; Fominykh et al., 2020]. Анализ включений рудных и породообразующих минералов в самородном золоте может быть также использован для определения коренных источников россыпей [Chapman, Mortensen, 2016; Неволько и др., 2019; Savichev et al., 2021].

Несмотря на значительные достижения предыдущих исследователей в вопросах поиска возможных коренных источников и определения их генетических типов, практически неизученными остаются

минералы шлиховых ассоциаций из отложений Миасской зоны. Широкий набор типоморфных признаков этих минералов может быть применен для установления геологических комплексов, выступавших коренными источниками формирования россыпей. В настоящее время в недостаточной степени исследованы и особенности состава, морфологии и строения самородного золота миасских россыпей.

Учитывая спектр многочисленных нерешенных вопросов, целью данной работы стало выявление закономерностей распределения минералов шлиховой ассоциации, в том числе и самородного золота, в аллювиальных отложениях Миасской россыпной зоны. С целью оценки закономерностей преобразования самородного золота по мере поступления в россыпь, а затем в ходе нахождения этого минерала в россыпи были проведены исследования зерен золота с использованием дифракции обратнорассеянных электронов (EBSD).

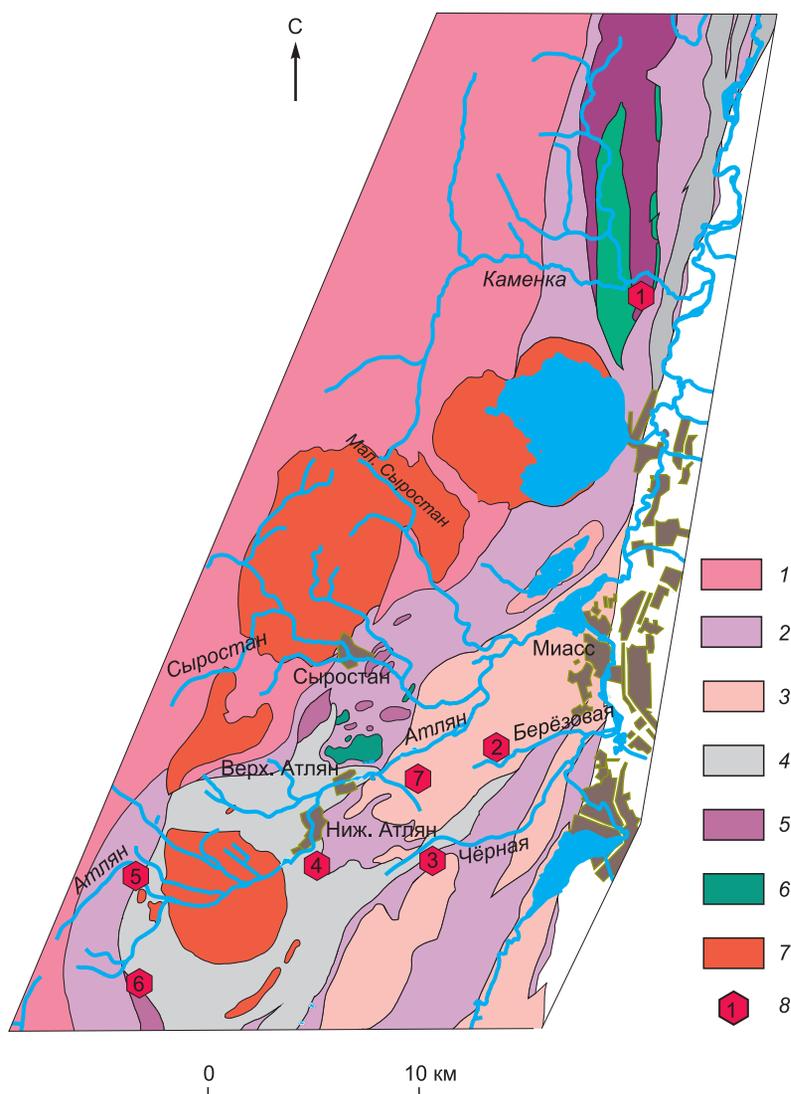
ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ПОЗИЦИЯ МИАССКОЙ РОССЫПНОЙ ЗОНЫ

Миасская долина расположена в сутурной зоне Уральской складчатой системы [Пучков, 2000]. Ее территория характеризуется сложным геологическим строением и вмещает большое количество различных по составу и генезису комплексов. В пределах россыпной зоны широко развит серпентинитовый меланж, карбонатно-терригенные осадочные толщи девонско-карбонового возраста, силурийско-девонские островодужные комплексы, сложенные вулканогенно-осадными породами основного, среднего и кислого состава. Интрузивные образования представлены ордовикскими Нуралинским и Таловским гипербазит-базитовыми массивами, каменноугольными Атлянским, Валеженским, Сыростанским и Тургоякским гранодиорит-гранитовыми массивами [Государственная геологическая..., 2015а, 2015б]. Территории на западе от Миасской россыпной зоны сложены толщами средне- и позднерифейских метаморфических сланцев, кварцитов, песчаников и конгломератов. С востока россыпная зона граничит с архейскими амфиболитами, средне- и позднерифейскими сланцами и амфиболитами (рис. 1).

Геологическое строение исследованных россыпей. Многолетние исследования крупнейших россыпных районов [Рожков, 1954; Билибин, 1955; Трушков, 1971; Избеков, 1995] позволили разработать подробную типизацию россыпей. Основой генетической классификации стали расположение россыпи относительно коренного источника и процессы, которые обусловили перемещение обломочного материала. В пределах Миасской зоны распространены три типа россыпей, образующих единый генетический ряд:

Рис. 1. Схема геологического строения Миасской россыпной зоны.

1 — протерозойские метаморфические сланцы; 2 — палеозойский амфиболитовый меланж; 3 — силурийско-девонские островодужные комплексы; 4 — девонско-карбоновые осадочные комплексы; 5 — ультрамафиты массивов альпинотипных гипербазитов; 6 — мафиты массивов альпинотипных гипербазитов; 7 — палеозойские кислые интрузивные комплексы; 8 — расположение опробованных россыпей: 1 — р. Каменка; 2 — р. Березовая; 3 — р. Черная; 4 — Семеновский лог; 5 — верховья р. Атлян; 6 — Архангельский лог; 7 — Козловский лог. По материалам [Государственная геологическая..., 2015а, 2015б] с изменениями.



элювиальные—делювиальные—аллювиальные. Каждый тип характеризуется собственными факторами россыпеобразования (физико-химическое выветривание, склоновое движение рыхлого материала и эрозионно-аккумулятивная деятельность водотоков соответственно) и связан с другими типами постепенными переходами, проявляющимися в формировании гетерогенных россыпей [Шило, 2002].

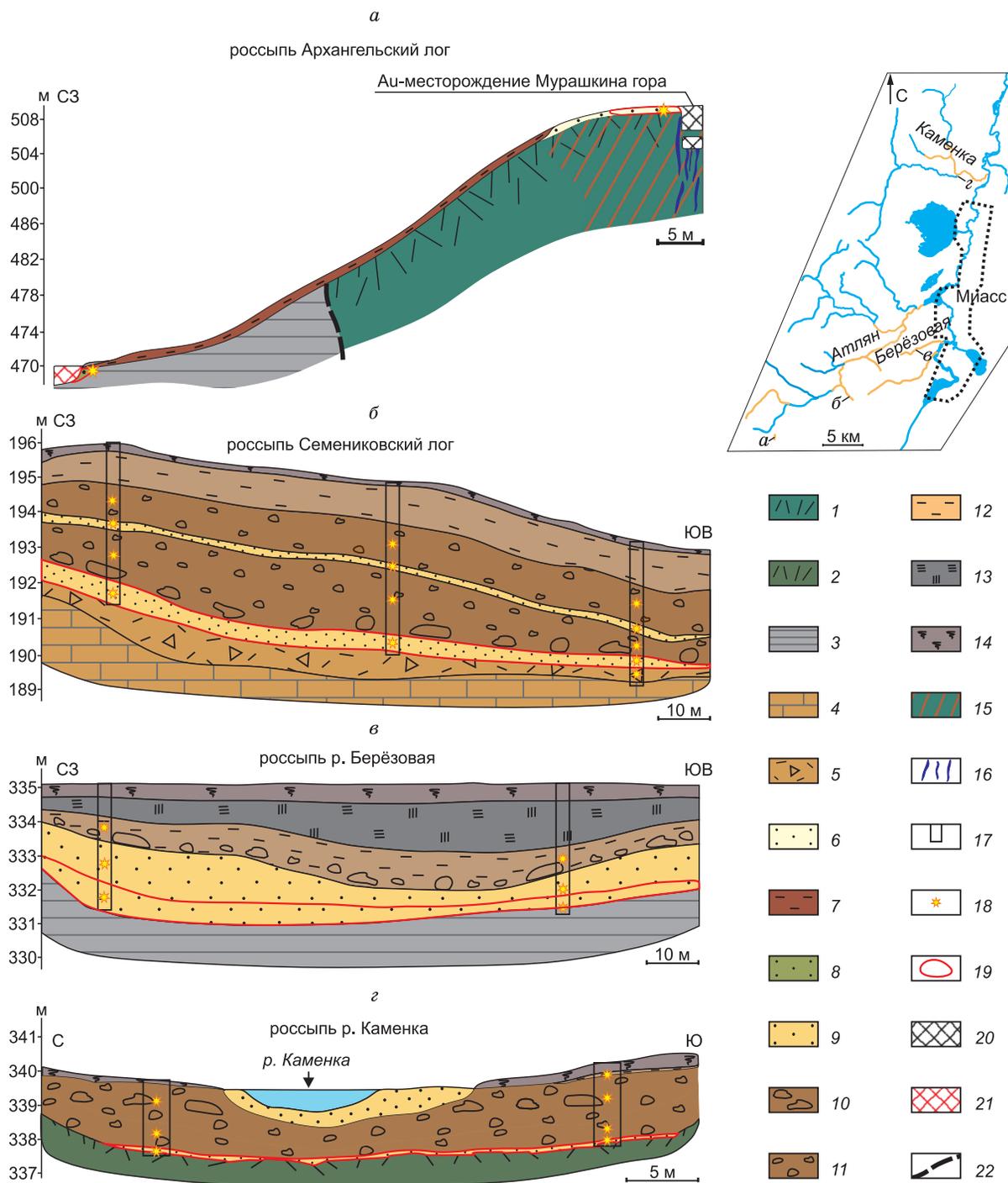


Рис. 2. Типовые разрезы россыпей золота различных генетических типов Миасской россыпной зоны:

a — Архангельский лог; *б* — Семениковский лог; *в* — р. Берёзовая; *г* — р. Каменка. 1 — дезинтегрированные серпентиниты, 2 — дезинтегрированные выветрелые базальты, 3 — кремнисто-глинистые сланцы, 4 — известняки, 5 — песчано-глинистая кора выветривания, 6 — песчанистые элювиальные отложения, 7 — глинистые делювиальные отложения, 8 — песчано-глинистые ложковые отложения, 9 — супеси, 10 — валуны, 11 — галечник с песчано-глинистым цементом, 12 — глины, 13 — торф, 14 — почвенно-растительный слой, 15 — ореол распространения кварц-карбонатных метасоматитов, 16 — кварцевые жилы, 17 — шурфы, 18 — точки отбора шлиховых проб, 19 — золотоносные отложения, 20 — отработанные части коренного месторождения, 21 — отработанные части россыпи, 22 — тектонический контакт. По результатам полевых наблюдений авторов и фоновым материалам (Зазуляк И.А., 1997 г.).

Изученные россыпные объекты разделены на четыре группы в соответствии с их расположением, особенностями геологического строения и удаления от потенциальных коренных источников.

Россыпь Архангельского лога относится к ложковому типу. Она расположена в непосредственной близости от коренного золоторудного месторождения Мурашкина гора. Лог дренирует листовитизированные гипербазиты с золотокварцевыми жилами, обеспечивая накопление в делювиально-аллювиальных отложениях самородного золота (рис. 2, а). С целью наибольшего охвата различных типов золота были опробованы также элювиальные отложения, залегающие непосредственно над рудным телом золоторудного месторождения Мурашкина гора.

Россыпи Атлянской группы локализованы в аллювиальных и делювиально-аллювиальных отложениях долины р. Атлян — левого притока р. Миасс. Эти россыпи относятся к долинному (Козловский лог, россыпи в верховьях реки) и ложковому (Семеновский лог) типам. В целом россыпи в частях, не затронутых отработками прошлых лет, имеют типичное строение. Под почвенно-растительным слоем залегают суглинки и супеси, средней мощностью 2 м. Их сменяют галечники с различным содержанием песчаного материала, которые могут быть определены как речник. В приплотиковой части рыхлые отложения представлены суглинками, песками с прослоями гальки и валунами. Отложения россыпей относят к плиоцен-плейстоценовому времени (Зазуляк И.А., 1997 г.). По результатам опробования установлено, что максимальные концентрации золота сосредоточены в супесях приплотиковой части разреза (см. рис. 2, б).

К Миасской группе отнесены аллювиальные долинные россыпи рек Березовая и Черная, принадлежащие к типу аллювиальных. В части разреза залегают торф мощностью до 1.5 м, сменяемый глинами с галькой и валунами, мощность которых не превышает 1 м. Ниже расположен пласт светлых супесей со значительными вариациями мощности (1—3 м). Плотик представлен дезинтегрированными кремнисто-глинистыми сланцами. Отложения россыпей принадлежат среднеплейстоценовому и голоценовому времени (Зазуляк И.А., 1997 г.). В результате шлихового опробования в супесях приплотиковой части обнаружены знаки самородного золота (см. рис. 2, в).

Россыпь р. Каменка находится в пределах Галовского габбро-гипербазитового массива. Исходя из особенностей локализации и закономерностей геологического строения, эта россыпь может быть отнесена к ложковому типу. В разрезе россыпи выделяются мощные (2 м) отложения галечника с песчано-глинистым цементом и пластами валунов основных и ультраосновных пород. Ниже залегают маломощные (до 20 см) супеси с кварцевой галькой, в которых обнаружены максимальные концентрации золота. Плотик россыпи сложен выветрелыми дезинтегрированными базальтами (см. рис. 2, г).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Отбор фактического материала. Основой для проведения исследований стали шлиховые пробы, отобранные в ходе полевых работ 2019—2021 гг. из семи золотых россыпей и россыпепроявлений Миасской долины: Архангельский лог, Атлянская группа (россыпи верховьев р. Атлян, Козловский и Семеновский лога), Миасская группа (Березовская и Чернореченская россыпи), россыпь р. Каменка. В ходе полевых работ шурфами были вскрыты аллювиальные и делювиально-аллювиальные отложения до плотика. С учетом литологических разновидностей были отобраны 70 шлиховых проб средним объемом 40 л, после промывки до серого шлиха.

Методика аналитических исследований. Минеральный состав шлиховых концентратов, разделенных на фракции по магнитным свойствам минералов, был определен с помощью бинокулярного микроскопа по морфологическим и физическим свойствам минералов. Минералы немагнитной и электромагнитной фракций размером 100—250 мкм, помещенные в эпоксидные шайбы, изучены на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV (JEOL) с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 450 X-Max 80 (ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН, аналитики Л.В. Леонова, Н. С. Чебыкин). Морфологические особенности зерен самородного золота были исследованы с применением сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N с энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-Max 20 (РЦ «Геомодель» СПбГУ, аналитик В.В. Шиловских), состав самородного золота получен с помощью микроанализатора Cameca SX100 с волновыми спектрометрами (ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН, аналитики И.А. Даниленко, И.А. Готтман). Анализ проводился при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе электронного зонда 40 нА с использованием кристалл-анализаторов TAP, LPET, PET, LLIF, LIF. Время накопления импульсов в максимуме пика составило 10 с. При проведении ЭЗМА в качестве стандартов использовались: CuFeS_2 (для анализа содержания Fe, Cu), HgTe (Hg, Te), Ga Sb (Sb), InAs (As), Au, Ag, Bi. Анализ производился по линиям: K_α (Cu, Fe), L_α (Ag, Te, As, Sb) и M_α (Hg, Au, Bi).

Монтированные в эпоксидные шайбы зерна самородного золота были обработаны направленным пучком аргоновой плазмы на установке Oxford IonFab 300 (РЦ «Нанопотоника» СПбГУ, М.С. Ложкин).

Условия травления: экспозиция 10 мин, ускоряющее напряжение 500 В, ток 200 мА, угол 45°. Пространственное распределение ориентировок кристаллической решетки исследовано на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N с EBSD детектором Oxford NordLys Nano (РЦ «Геомодель» СПбГУ, аналитик В. В. Шиловских). Условия сбора данных: ускоряющее напряжение 30 кВ, ток пучка 3 нА.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Шлиховые ассоциации минералов в россыпях. Магнитная фракция шлиховой ассоциации Архангельского лога полностью состоит из магнетита, количество которого составляет около 5%¹ всей шлиховой пробы (рис. 3, *a*). Главные минералы электромагнитной фракции — хромит, составляющий до 55% шлиха, и ильменит, содержание которого изменяется от 30 до 35%. В количестве 5% в шлихах постоянно присутствуют псевдоморфозы гематита по кристаллам магнетита. Отмечается небольшое (до 5%) содержание минералов группы эпидота. Также в электромагнитной фракции обнаружены единичные зерна альмандина, ксенотима, амфиболов. Важной отличительной чертой минеральной ассоциации шлихов Архангельского лога является присутствие в неэлектромагнитной фракции железистого доломита, содержание которого достигает 10% объема шлиха. В неэлектромагнитной фракции выявлены пирит, частично замещенный гидроксидами железа, арсенопирит, мусковит.

Преобладающими минералами шлиховой ассоциации россыпей Атлянской группы являются хромит и ильменит, содержание которых изменяется от 35 до 50%. Менее распространены эпидот, рутил, гематит и магнетит, составляющие первые проценты от объема шлиха (см. рис. 3, *б*, *в*). Встречены единичные зерна пирита, циркона и альмандина.

Для шлихов Березовской и Чернореченской россыпей характерно преобладание хромита, содержание которого достигает 45% (см. рис. 3, *з*, *д*), широко распространены ильменит (25—35%), эпидот (5—20%). В электромагнитной фракции шлихов Чернореченской россыпи присутствует титанит в количестве до 5%. Магнитная фракция представлена магнетитом и составляет лишь небольшую часть объема шлиха (до 5%). Основным минералом неэлектромагнитной фракции является циркон, составляющий первые проценты объема шлиха. В пробах обнаружены единичные зерна альмандина, гематита, диопсида, монацита, ксенотима, рутила, апатита, пирита, замещенного гидроксидами железа, халькопирита.

Шлиховые ассоциации россыпи р. Каменка характеризуются преобладанием магнетита и хромита, которые содержатся практически в равном объеме (20—35%), менее распространен ильменит, со-

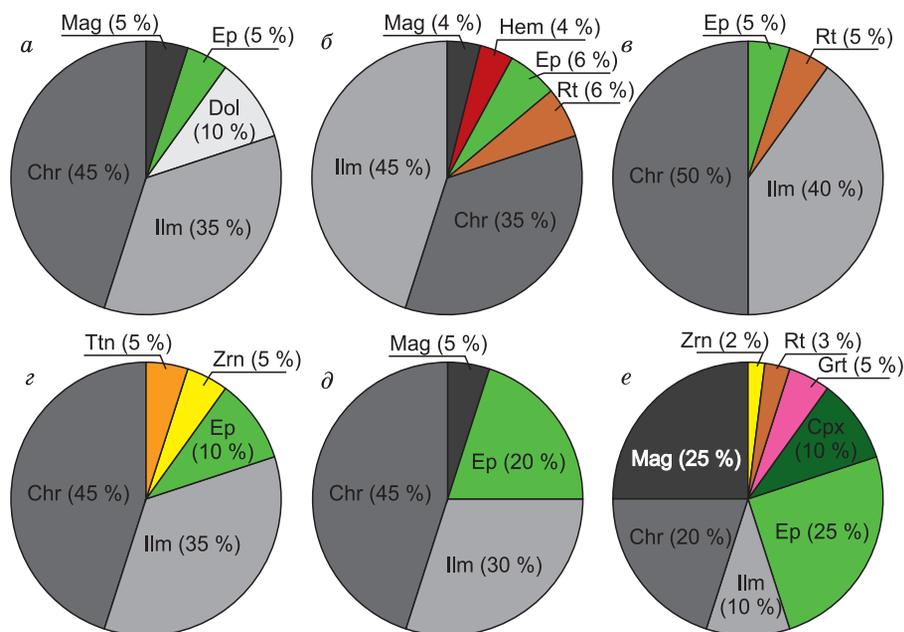


Рис. 3. Усредненный минеральный состав шлиховых ассоциаций россыпей Миасской долины.

a — Архангельский лог, *б* — р. Атлян, *в* — Семеновский лог, *з* — р. Черная, *д* — р. Березовая, *e* — р. Каменка. Chr — хромит, Crx — клинопироксен, Dol — доломит, Ep — эпидот, Grt — гранат, Hem — гематит, Ilm — ильменит, Mag — магнетит, Rt — рутил, Ttn — титанит, Zrn — циркон.

¹ Содержание минералов при описании состава шлиховых ассоциаций приводится в объемных процентах от всего шлиха.

ставляющий не более 15 % пробы (см. рис. 3, *e*). В большинстве шлихов отмечается высокое содержание эпидота, достигающее 25 %. Отличительной чертой минеральной ассоциации россыпи является присутствие пироксена (клиноэнстатит, диопсид), составляющего до 10 % шлиха. Отмечены две разновидности граната: розоватый альмандин и преобладающий желтовато-оранжевый гроссуляр-андрадит суммарным содержанием 5 %. Также встречены циркон и рутил, содержание которых не превышает первые проценты. Обнаружены единичные зерна монацита, ксенотима, титанита, гематита, апатита, стибнита, галенита и пирита.

Минералы шлиховой ассоциации. Было установлено, что хромшпинелид — это один из наиболее распространенных минералов в шлихах изученных россыпей Миасской долины. Для него характерно нахождение в виде неокатанных и слабоокатанных октаэдрических кристаллов, угловатых обломков и зерен сложной формы (рис. 4, *a—в*). Распространены сростания этого минерала с хлоритом и тальком. Часто обнаруживаются включения хромшпинелидов в кристаллах пироксенов (см. рис. 4, *a*). Отмечены зерна хромита с трещинами, выполненными магнетитом (см. рис. 4, *б*). По особенностям химического состава хромшпинелиды всех изученных россыпей могут быть отнесены к хромиту и субферрихромиту по классификации Н.В. Павлова [1949]. Характерной особенностью изученных хромшпинелидов является высокое среднее содержание Cr_2O_3 (50.9 мас. %) и относительно небольшое среднее содержание Al_2O_3 (9.7 мас. %) и MgO (5.1 мас. %). Во многих зернах хромшпинелида зафиксировано присутствие TiO_2 , среднее содержание которого составляет 0.5 мас. % (табл. 1). В целом хромшпинелиды различных россыпей Миасской долины имеют близкий химический состав, однако существуют отличия в содержании примесных компонентов. Например, отмечены широкие вариации содержания цинка.

Шлиховым ассоциациям минералов в россыпях Миасской зоны свойственно большое разнообразие аксессуаров, среди которых наиболее часто встречаются монацит, циркон, ксенотим, апатит, сульфиды. Особое положение среди них занимает монацит, являющийся самым распространенным и постоянно присутствующим в шлихах аксессуарным минералом. В большинстве шлиховых проб монацит обнаружен в единичных зернах. Монацит представляет собой медово-желтые и красновато-бурые угловатые зерна сложной формы низкой степени окатанности, лишенные кристаллографического ограни-

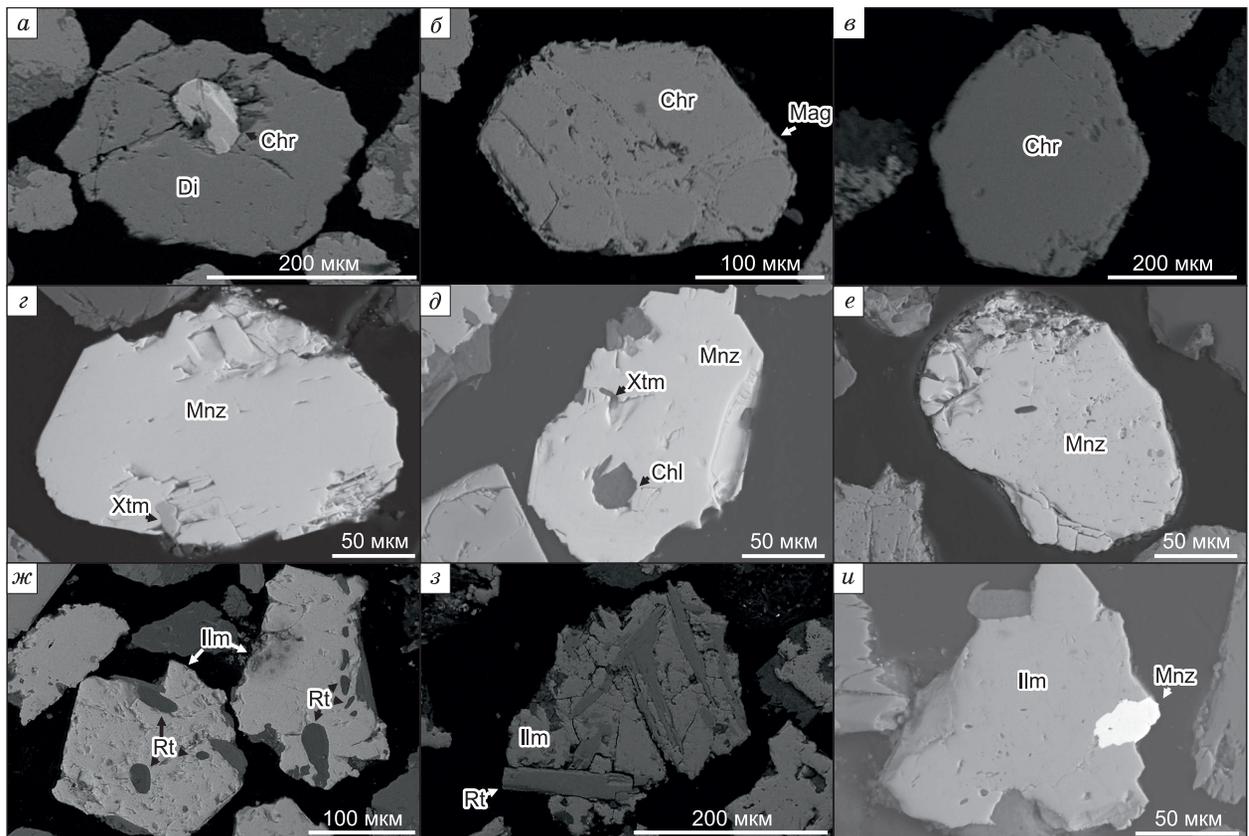


Рис. 4. Минералы шлиховой ассоциации россыпей Миасской долины.

Chr — хромит, Chl — хлорит, Di — диопсид, Mnz — монацит, Xtm — ксенотим. *a, ж* — Семениковский лог; *б* — Архангельский лог; *в, e* — р. Атлян; *з* — р. Каменка; *д, з, и* — р. Черная.

Таблица 1. Химический состав хромшпинелидов из россыпей Миасской долины, мас. %

№ анализа	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO _{общ}	MnO	MgO	ZnO	NiO	Сумма
1	—	9.13	50.32	40.05	—	—	1.41	—	100.90
2	0.27	1.44	53.71	48.27	—	—	0.71	—	104.40
3	0.50	9.49	50.04	38.08	—	0.53	0.88	—	99.52
4	0.18	5.72	54.88	37.07	—	—	1.04	—	98.89
5	0.22	11.42	56.35	20.88	—	9.87	—	—	98.74
6	0.25	21.58	44.56	21.35	—	11.92	—	—	99.66
7	0.33	8.80	52.47	28.32	—	9.67	—	—	99.59
8	0.44	—	49.53	36.65	—	11.98	—	—	98.60
9	0.10	10.29	51.80	31.13	0.25	6.41	0.34	0.12	100.31
10	0.12	11.64	48.84	36.55	0.54	0.64	1.94	—	100.26
11	0.22	10.38	52.87	33.69	0.12	2.34	0.40	0.08	100.02
12	0.30	9.28	50.54	37.71	—	1.59	—	—	99.42
13	0.42	11.70	52.16	31.51	—	3.58	—	—	99.37
14	0.25	12.89	47.91	36.19	—	1.92	0.91	—	100.07
15	0.29	8.94	52.05	34.28	1.01	—	3.20	—	99.77
16	0.42	13.49	51.80	25.67	—	6.76	0.35	—	98.48
17	0.23	18.82	48.54	21.53	—	9.28	0.24	—	98.64
18	0.23	13.02	49.87	22.83	—	7.40	0.35	—	98.48
19	—	19.91	46.62	22.41	—	9.00	0.32	—	98.27
20	0.37	7.65	51.39	33.53	0.58	7.08	—	—	100.61
21	0.27	8.33	54.66	29.73	—	7.53	—	—	100.53
22	0.35	11.09	51.47	29.33	—	7.41	—	—	99.66
23	—	12.60	49.23	30.00	0.57	4.86	—	—	97.26
24	0.33	7.46	51.79	35.57	1.51	0.52	1.39	—	98.56
25	—	13.23	47.83	34.03	—	5.55	—	—	100.64
26	0.38	9.67	45.44	41.50	32.52	1.08	0.32	—	100.90
27	0.28	6.33	57.57	35.31	32.68	—	0.78	—	100.27

Примечание. 1—4 — р. Атыян; 5—7 — р. Березовая; 8—11 — р. Чёрная; 12—15 — Семениковский лог; 16—19 — Архангельский лог; 20—23 — р. Каменка; 24—27 — Козловский лог. Анализы выполнены на микрозондовом анализаторе Cameca SX100 в ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН, аналитик И.А. Готтман.

ния. Внутреннее строение однородное, обычны включения кварца и мусковита, реже встречаются тоританит и ксенотим (см. рис. 4, *z—e*). В редких случаях монацит образует включения в зернах ильменита (см. рис. 4, *u*).

Монациты россыпей долины р. Миасс характеризуются близким химическим составом. Среднее содержание Ce₂O₃ составляет 32.20 мас. %. Для этого минерала выявлено высокое содержание La₂O₃ (9.14—23.81 мас. %) и Nd₂O₃ (6.29—27.33 мас. %) с практически постоянным преобладанием La. В монацитах аллювиальных и делювиально-аллювиальных отложений часто обнаруживается ThO₂, содержание которого изменяется в широких пределах: от долей процента до 11.86 мас. % (табл. 2). Распространены примеси Pr, Sm, Gd, их содержание не превышает первых процентов. Большинство изученных монацитов характеризуются распределением редкоземельных элементов типа Ce>La>Nd>Pr>Sm>Gd, для отдельных зерен установлен тип Ce>Nd>Sm>La>Pr>Gd.

Ксенотим распространен в минеральных ассоциациях изученных россыпей значительно меньше монацита, он диагностирован в шлиховых концентратах Архангельского и Козловского логов, а также россыпи р. Каменка. Минерал представлен неокатанными и слабоокатанными зернами сложной формы медово-желтого цвета, чаще встречается в виде включений в монаците и ильмените. Внутреннее строение зерен однородное, отмечены включения кварца, биотита и минералов группы хлорита.

Химический состав ксенотима характеризуется постоянным присутствием Gd, Dy, Er с суммарным содержанием оксидов этих элементов до 20 мас. %. В большинстве анализов обнаружен Yb (2.92—5.65 мас. %). В единичных пробах отмечены примеси Sm и U. Распределение редкоземельных элементов в ксенотиме соответствует типу Dy>Er>Yb>Gd.

Таблица 2. Химический состав монацита из россыпей Миасской долины, мас. %

№ анализа	CaO	P ₂ O ₅	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	ThO ₂	Сумма
1	0.69	32.13	17.60	33.11	—	11.58	—	—	4.32	99.43
2	0.98	33.80	14.37	29.35	—	12.84	2.22	1.59	4.85	100.00
3	1.69	34.51	11.89	24.50	—	11.51	3.13	2.34	10.19	99.77
4	0.85	34.01	15.69	30.85	—	12.64	2.00	—	3.77	99.81
5	1.74	35.15	15.39	29.36	—	11.57	—	—	7.65	100.86
6	0.71	33.55	15.74	31.34	—	14.45	—	—	3.64	99.43
7	0.90	34.58	16.57	31.05	—	13.03	—	—	3.92	100.05
8	—	34.21	12.97	31.55	—	20.26	—	—	0.64	99.64
9	0.27	30.07	9.14	30.06	3.97	18.46	2.83	1.34	3.11	99.23
10	—	31.90	4.91	23.45	4.15	27.33	7.61	2.23	—	101.58
11	0.15	30.55	13.51	33.46	3.85	15.24	1.59	1.16	1.61	101.12
12	0.66	30.89	12.68	32.23	3.30	14.30	1.54	—	5.44	101.05
13	0.27	30.68	21.81	34.46	2.35	8.82	—	—	3.05	101.45
14	1.16	30.00	17.25	33.30	3.16	11.86	0.93	—	2.61	100.26
15	0.32	32.56	16.91	34.15	—	13.77	1.70	—	2.22	101.64
16	0.70	29.26	20.89	36.27	2.96	11.54	—	—	—	101.63
17	0.60	27.87	16.11	30.16	3.16	12.69	2.04	1.57	5.18	99.38
18	0.53	29.72	15.95	32.29	2.94	14.46	—	—	2.55	98.44
19	0.98	33.18	16.78	33.42	—	12.27	—	—	5.48	102.11
20	0.92	32.36	17.71	33.16	—	13.42	—	—	4.51	102.08
21	0.69	31.74	17.60	33.11	—	12.83	—	—	4.43	100.39
22	—	31.46	16.56	38.57	3.32	9.88	—	—	1.41	101.21
23	—	30.00	17.73	30.45	3.29	13.65	1.54	0.64	3.25	100.55
24	0.55	29.81	20.35	30.14	2.93	13.14	—	—	3.57	100.48
25	1.06	30.98	17.78	29.16	2.52	11.36	1.76	1.08	6.41	102.12
26	0.77	32.40	13.90	30.35	—	12.29	1.92	—	7.98	99.61
27	—	34.12	14.43	31.84	—	13.06	1.51	—	3.08	98.02
28	0.69	32.59	16.43	30.24	—	12.17	2.30	—	5.29	99.71
29	1.13	29.55	20.09	33.72	2.43	11.79	1.78	—	—	100.49
30	—	28.79	17.75	33.88	3.09	15.55	1.53	—	—	100.58
31	0.66	27.14	19.52	30.70	2.96	11.35	1.78	—	5.83	99.95
32	0.27	29.04	18.84	34.31	2.70	14.09	—	—	1.30	100.56
33	1.20	28.72	20.98	33.40	2.06	11.50	—	—	2.72	100.57
34	0.66	28.45	21.60	33.43	2.31	9.67	—	—	3.81	99.92
35	0.46	27.78	21.54	32.95	2.33	10.64	—	—	4.30	100.00
36	—	30.90	13.61	34.27	—	14.53	—	—	7.13	100.45

Примечание. 1—8 — р. Каменка; 9—15 — р. Чёрная; 16—18 — Семениковский лог; 19—22 — Архангельский лог; 23—28 — р. Атлян; 29—36 — Козловский лог. Анализы выполнены на СЭМ JSM-6390LV (JEOL) с ЭДС INCA Energy 450 X-Max 80 (ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН, аналитики Л.В. Леонова, Н. С. Чебыкин).

Широко распространенным второстепенным минералом шлиховых ассоциаций россыпей Миасской долины является рутил. Наиболее часто рутил обнаруживается в виде темно-бурых слабоудлиненных призматических кристаллов с хорошо развитыми гранями дитетрагональной призмы, встречены сростания кристаллов рутила с ильменитом (см. рис. 4, з). Другой распространенной формой нахождения рутила в россыпях являются каплевидные и удлиненные включения в зернах ильменита размером 5—50 мкм (см. рис. 4, ж), которые, вероятно, являются продуктом распада твердого раствора.

Самородное золото россыпей Миасской долины характеризуется широкими вариациями в размере и морфологических особенностях индивидов и агрегатов. Размер зерен золота изменяется от 0.1 мм до 2.5 мм, при этом большая часть изученных золотин соответствует классу крупности $-0.5...+0.25$ мм. В аллювиальных и делювиально-аллювиальных отложениях Миасской россыпной зоны распространено самородное золото рудного облика, оно имеет сложные формы с многочисленными ответвлениями и

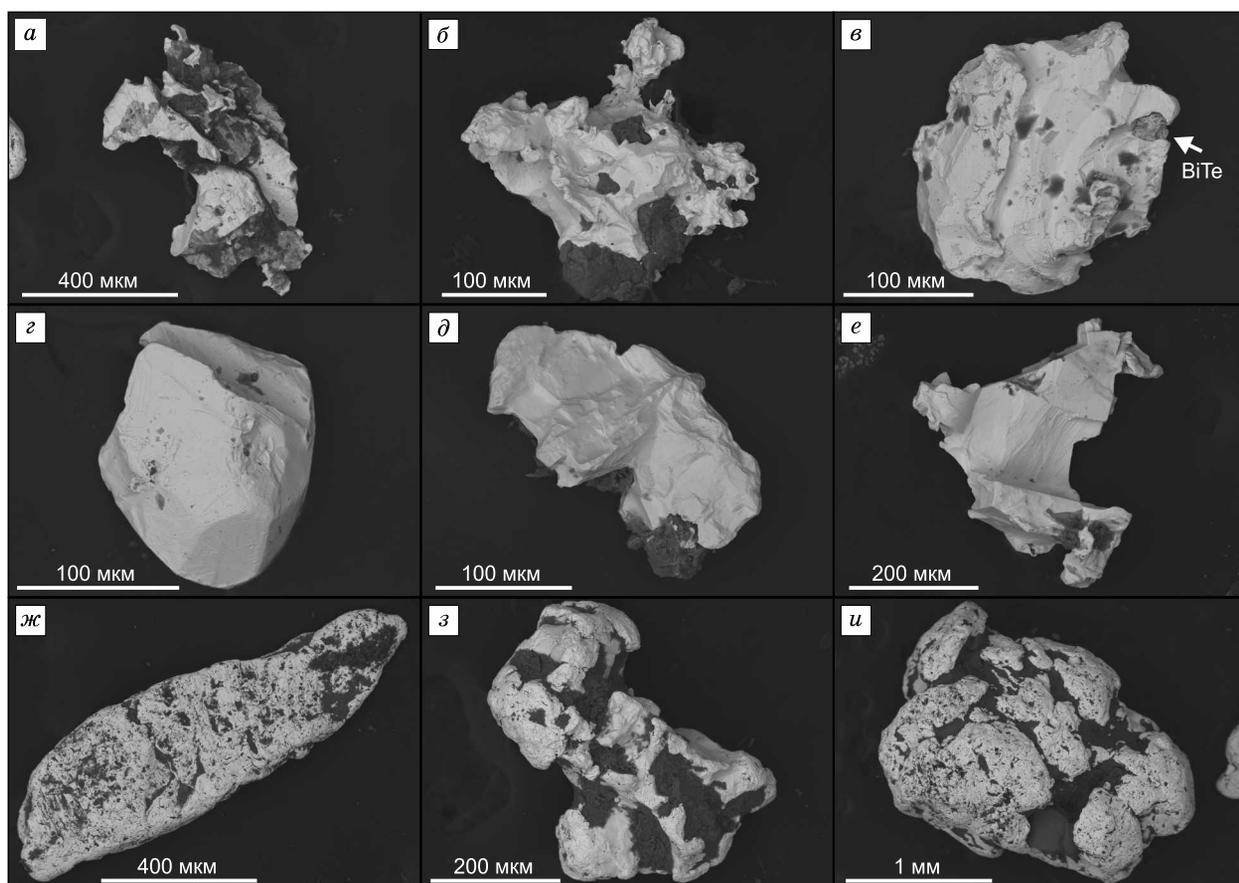


Рис. 5. Форма самородного золота россыпей Миасской долины.

a — Архангельский лог; *б—г* — р. Атлян; *д* — Семениковский лог; *е* — р. Березовая; *ж* — р. Черная; *з, и* — р. Каменка. Изображение BSE.

тонкими выступающими частями. Эти золотины либо слабо окатаны, либо часто вовсе неокатаны. Индивиды самородного золота имеют преимущественно ксеноморфную форму, а на их поверхности обнаружены многочисленные отпечатки зерен других минералов, нередко участки с отпечатками штриховки и ступенчатые поверхности совместного роста (рис. 5, *a—e*).

Установлены лишь два индивида самородного золота с частичным собственным огранением (см. рис. 5, *г*). Золото рудного облика наиболее распространено в россыпях Архангельского, Семениковского и Козловского логов, рек Атлян и Березовая. Средне- и хорошо окатанное самородное золото комковидных и уплощенных форм со сглаженными очертаниями (см. рис. 5, *ж—и*) встречается значительно реже. Эти индивиды отличаются большим количеством царапин, неровностей, следов смятия и перековки. Поверхность самородного золота неровная, со множеством каверн. Окатанное самородное золото наиболее часто встречается в россыпях рек Черная и Каменка. Индивиды из россыпей долины р. Миасс практически лишены минеральных включений и сростаний. Только в двух золотилах обнаружены включения изометричных зерен теллуридов висмута размером 20 мкм (см. рис. 5, *в*).

Выявлены значительные вариации химического состава самородного золота. Серебро является основной примесью и присутствует практически повсеместно, однако его содержание непостоянно и изменяется в широких пределах (табл. 3). Среднее содержание серебра в центральных частях индивидов самородного золота изменяется от 23.4 мас. % в россыпи Архангельского лога до 4.5 мас. % в россыпи Семениковского лога. В пределах одной россыпи самородное золото имеет постоянный состав, а вариации содержания серебра не превышают первых процентов. Другой характерной чертой самородного золота является отсутствие меди, только в нескольких индивидах ее содержание приближается к 1 мас. %. Также обнаружена примесь ртути, не превышающая 1 мас. %. В качестве исключения необходимо отметить, что для золота россыпей рек Черная и Каменка установлено относительно повышенное содержание ртути со средними значениями 1.7 и 2.2 мас. % соответственно.

Применение дифракции обратнорассеянных электронов позволило полноценно охарактеризовать внутреннее строение самородного золота россыпей. В россыпях, наиболее приближенных к коренным источникам, самородное золото обычно встречается в виде монокристаллов и агрегатов зерен размером 30—100 мкм, слабдеформированных и практически лишенных высокопробных кайм (рис. 6, а—в). По мере удаления от потенциальных коренных источников степень деформации индивидов и агрегатов самородного золота увеличивается: проявляется двойникование, отдельные кристаллы испытывают механическую деформацию, в сильнодеформированных частях и вдоль границ зерен формируются мелкозернистые агрегаты самородного золота (см. рис. 6, г—и).

Особое внимание было уделено изучению каемок вокруг зерен самородного золота. У отдельных индивидов в периферийной зоне получают развитие прерывистые или цельные каймы с пониженным содержанием в золоте примесей вплоть до полного их отсутствия (рис. 7, а, в). Каймы мощностью 10—30 мкм представляют собой мозаичный микрозернистый агрегат, состоящий из субполиэдрических зерен высокопробного самородного золота размером 1—10 мкм (см. рис. 7, г). Установлено, что развитие высокопробных кайм напрямую зависит от степени деформации исходных индивидов и агрегатов самородного золота. Так, в россыпях, наиболее удаленных от коренного источника, индивиды золота деформированы сильнее и подвержены развитию высокопробных каемок рекристаллизации. Чаще всего высокопробные каймы обнаруживаются у хорошо окатанных индивидов самородного золота из россыпей Семениковского лога, рек Каменка и Черная. Самые мощные оболочки, захватывающие более половины объема золотин, обнаружены в россыпи р. Черная. Важно отметить, что индивиды самородного золота рудного облика из делювиальных или слабоудаленных россыпей не подвержены замещению микрозернистыми агрегатами высокопробного золота. Редкое распространение тонкозернистых агрегатов высокопробного самородного золота отмечено в зернах золота только в сильнодеформированных фрагментах (см. рис. 7, а).

Важное генетическое значение имеет тот факт, что индивиды, слагающие высокопробные каймы, однородны по строению, лишены двойников и не деформированы. В то же время крупные зерна, по которым получают распространение тонкозернистые каймы, сохраняют следы многочисленных деформаций (см. рис. 6, ж). Границы кайм и отчетливо деформированных исходных индивидов самородного золота имеют сложную извилистую форму.

Таблица 3. Химический состав самородного золота из россыпей Миасской долины, мас. %

№ анализа	Au	Ag	Cu	Hg	Bi	Сумма
1 ц	88.29	11.09	—	0.82	0.16	100.41
2 к	88.35	12.57	—	0.77	0.24	101.96
3 ц	88.46	11.97	—	0.73	—	101.16
4 к	87.09	13.91	—	0.84	0.13	101.97
5 ц	85.78	13.84	—	0.95	0.18	100.76
6 к	86.41	13.19	—	0.65	—	100.25
7 ц	91.05	9.67	—	0.90	0.25	101.89
8 к	90.51	9.81	—	1.11	0.11	101.54
9 ц	84.07	16.39	—	0.62	—	101.16
10 к	84.16	16.60	—	0.75	0.04	101.58
11 ц	87.67	5.88	—	3.67	—	97.22
12 к	96.42	1.15	—	0.19	—	97.80
13 ц	93.40	7.01	—	1.24	—	101.65
14 к	100.27	0.25	—	0.03	0.07	100.62
15 ц	88.00	10.22	—	0.77	0.24	99.26
16 к	87.03	12.30	—	0.76	0.09	100.26
17 ц	87.83	12.30	—	0.18	0.16	100.54
18 к	97.70	1.82	—	0.37	0.30	100.21
19 ц	98.53	0.88	—	0.59	0.02	100.02
20 к	99.83	1.00	—	0.49	—	101.38
21 ц	100.13	1.04	—	0.17	0.17	101.53
22 к	97.03	1.09	—	0.14	0.05	98.34
23 ц	85.43	14.25	—	0.06	0.15	99.89
24 к	84.92	16.63	—	0.16	0.09	101.80
25 ц	81.13	16.74	0.11	0.24	0.10	98.37
26 к	82.44	18.81	0.05	0.33	0.28	101.92
27 ц	75.30	24.26	—	0.06	—	99.64
28 к	77.09	24.45	—	0.13	0.12	101.83
29 ц	94.17	5.51	—	0.09	—	99.77
30 к	95.88	4.26	—	0.25	0.17	100.60
31 ц	87.88	5.68	2.03	5.14	0.13	100.86
32 к	95.27	5.44	—	0.12	0.12	100.97
33 ц	97.84	1.61	—	0.04	0.21	99.76
34 к	98.61	1.08	—	—	0.04	99.84

Примечание. ц — центральные части зерен; к — краевые. 1—6 — р. Атлян; 7—10 — р. Березовая; 11—16 — р. Черная; 17—22 — Семениковский лог; 23—28 — Архангельский лог; 29—34 — р. Каменка. Анализы выполнены на микронзондовом анализаторе Cameca SX100 в ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН, аналитик И.А. Готтман.

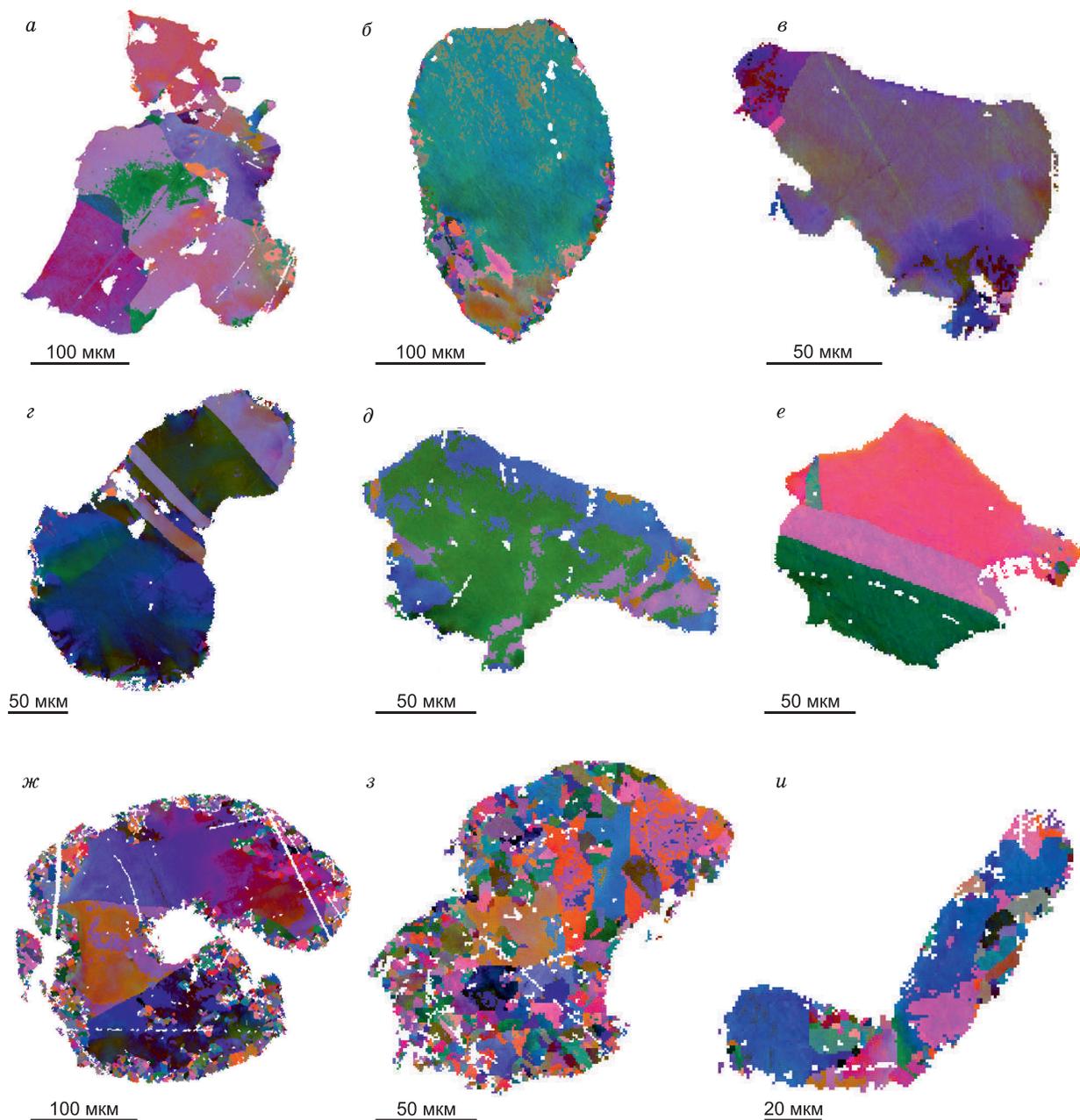


Рис. 6. Внутреннее строение самородного золота из россыпей Миасской россыпной зоны.

a–в — слабоизмененное золото; *z–e* — среднеизмененное золото; *ж–и* — сильноизмененное золото. Карты в кодировке цветов Эйлера, демонстрирующие ориентировку кристаллической решетки. *a* — Архангельский лог; *б, z* — р. Каменка; *в, д* — р. Атлян; *e* — р. Березовая; *ж, з* — Семениковский лог; *и* — р. Черная.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате изучения шлиховых ассоциаций был установлен ряд общих закономерностей распределения минералов. Для всех изученных россыпей в шлихах свойственно высокое содержание хромшпинелидов и ильменита, составляющих основную часть тяжелой фракции (см. рис. 3). При этом каждый россыпной объект имеет собственным набором второстепенных и аксессуарных минералов, наследующих специфику минерального состава коренных источников. Например, отличительной чертой минеральной ассоциации россыпи Архангельского лога является присутствие железистого доломита, который встречается в кварц-карбонатных жилах в лиственитах месторождения Мурашкина гора [Артемьев и др., 2014].

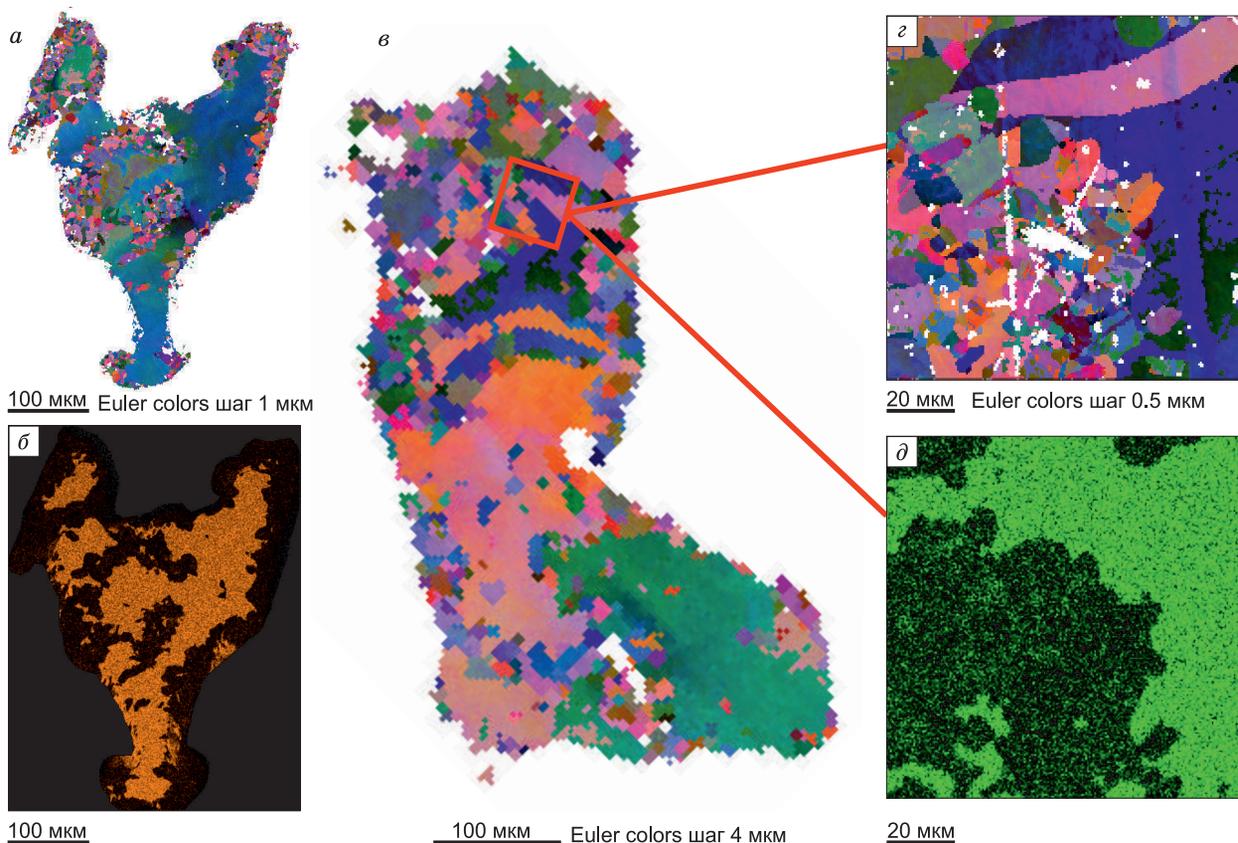


Рис. 7. Структура высокопробных кайм на самородном золоте из россыпей Миасской долины.

a, б — россыпь Архангельского лога; *в—д* — россыпь р. Черная. *a, в, з* — карты в кодировке цветов Эйлера, демонстрирующие ориентировку кристаллической решетки; *б, д* — карты распределения серебра.

Хромшпинелиды аллювиальных и делювиально-аллювиальных отложений Миасской россыпной зоны близки по составу и образуют компактное поле на классификационной диаграмме Al—Cr—Fe³⁺ (рис. 8) [Савельев и др., 2008, 2010, 2017]. Особенности химического состава хромшпинелидов в совокупности с их повсеместным распространением и преобладанием в шлиховых ассоциациях россыпей позволяют говорить об определяющем значении ультрамафитов дунит-гарцбургитовых массивов в формировании шлиховых ассоциаций аллювиальных и делювиально-аллювиальных отложений Миасской долины. Выявленная закономерность подтверждает важную роль в процессах образования россыпей Южного Урала месторождений золото-лиственитовой формации, субстратом для формирования которых являлись ультрамафит-мафитовые породы дунит-гарцбургитовых массивов [Belogub et al., 2017]. На что указывает также нахождение в россыпях Миасской зоны МПГ [Зайков и др., 2017а].

Фосфаты редкоземельных элементов, обнаруженные в большинстве россыпей долины р. Миасс, имеют схожий химический состав. Монацит Миасской россыпной зоны по характеру распределения основных редкоземельных элементов (Ce, La, Nd) сопоставим с монацитом из аллювиальных и аллювиально-делювиальных отложений западного склона Южного Урала [Паленова и др., 2018] (рис. 9). Сопоставимы в монацитах этих территорий содержания примесей Pr, Sm, Gd и Th. Ксенотим россыпей Миасской долины схож с ксенотимом аллювия Башкирского антиклинория [Алексеев, Тимофеева, 2008] по содержанию Gd, Dy, Er. Особенности химического состава и внутреннего строения позволяют предположить общность происхождения фосфатов редкоземельных элементов россыпей Миасской долины и отложений водотоков восточной части Башкирского антиклинория, для которых установлена связь с метаморфизованными рифейскими отложениями [Алексеев, Тимофеева, 2008; Паленова и др., 2018]. Метаморфическое происхождение монацита и ксенотима косвенно подтверждается их сонахождением и срастанием в шлиховых концентратах с такими типично метаморфогенными минералами, как ильменит, эпидот, цоизит, алемандин, рутил, хлорит.

Самородное золото россыпей характеризуется значительными различиями в степени окатанности и сохранности первичных форм. Большая часть изученных зерен имеет рудный облик и практически не

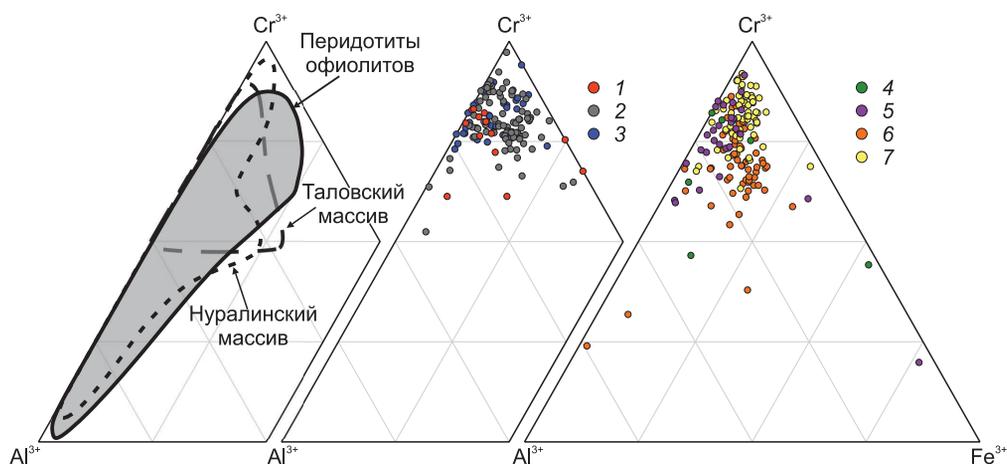


Рис. 8. Диаграмма Al—Cr—Fe³⁺ для составов хромшпинелидов из россыпей Миасской долины.

1 — р. Черная, 2 — Архангельский лог, 3 — верховья р. Атлян, 4 — р. Березовая, 5 — Семеновский лог, 6 — р. Каменка, 7 — Козловский лог. Поля проведены по данным [Савельев и др., 2008, 2010, 2017; Barnes, Roeder, 2001].

окатана, а также отличается гладкой поверхностью с отпечатками граней жильных минералов, что свидетельствует о малой степени переноса и близком расположении коренного источника благороднометалльной минерализации. Реже встречаются хорошо окатанные уплощенные индивиды со следами перековки и смятия, ямчатой и бугристой поверхностью, типичными для самородного золота, находившегося в гидродинамической среде [Никифорова и др., 2020]. Наиболее характерно такое золото для россыпей рек Каменка и Черная, особенности его морфологии объясняются более дальней транспортировкой от коренного источника.

Структуры большинства изученных золотин соответствуют структурам первичной кристаллизации рудного золота [Петровская, 1973; Николаева, Яблокова, 2007; Николаева и др., 2015]. На основании выявленных закономерностей внутреннего строения можно сделать ряд заключений о последовательности изменений, которым подверглось самородное золото из россыпей Миасской долины в экзогенных условиях. Преобразование золота в зоне окисления коренных источников — широко распространенный процесс, в рамках которого описано формирование межзерновых прожилков, высокопробных пористых оболочек [Петровская, 1973; Никифорова и др., 2020], нарастание новообразованного гипергенного золота [Калинин и др., 2009]. В результате проведенных исследований установлено, что золото из кор выветривания и россыпей с малым расстоянием переноса обломочного материала практически не подвержено преобразованиям. В редких случаях наблюдаются участки развития высокопробного самородного золота, слагающего микрозернистый агрегат. Таким образом, можно сделать вывод о слабом изменении самородного золота из россыпей Миасской долины в зонах окисления коренных рудных месторождений.

Большинство ранее проведенных исследований внутреннего строения самородного золота из россыпей базировалось на травлении агрегатов и индивидов, что привело к возникновению противоречивых моделей по-

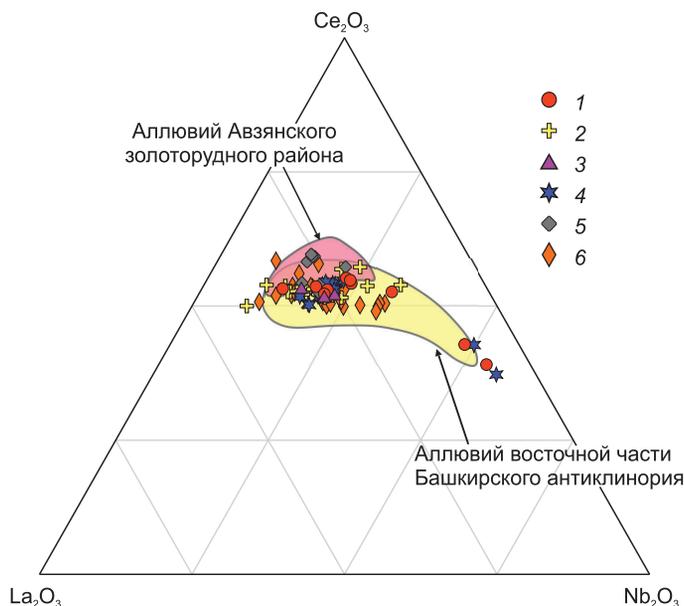


Рис. 9. Диаграмма La₂O₃—Ce₂O₃—Nd₂O₃ для составов монацитов из россыпей Миасской долины.

1 — р. Черная, 2 — Козловский лог, 3 — Семеновский лог, 4 — верховья р. Атлян, 5 — Архангельский лог, 6 — р. Каменка. Поля проведены по данным [Алексеев, Тимофеева, 2008; Паленова и др., 2018].

ведения золота в россыпях. Использование дифракции обратнорассеянных электронов позволило впервые однозначно установить, что новообразованные каймы вокруг зерен представляют собой микрозернистые агрегаты.

Выявлена прямая зависимость между степенью распространения механических деформаций зерен самородного золота и развитием новообразованных кайм. Высокопробные каймы пространственно тяготеют к зонам сильной деформации и смятия золотин, которые могли возникнуть только в результате транспортировки в делювии или водных потоках.

Было установлено, что слагающие каймы мелкие зерна характеризуются однородным строением и не несут следов деформации, в то время как зерна, по которым получают распространения каймы, отчетливо деформированны. Более того, новообразованное золото не содержит элементов примесей. Таким образом, можно сделать вывод, что формирование высокопробных кайм происходит только в деформированных индивидах самородного золота, а основной причиной этих механических деформаций могут служить гидродинамические процессы в россыпях. Этот вывод подтверждается отсутствием или ограниченным развитием высокопробных кайм в самородном золоте из коренных руд, элювиальных отложений и слабоудаленных россыпей.

В качестве основного механизма формирования высокопробных кайм и участков в самородном россыпном золоте наиболее корректно рассматривать процесс рекристаллизации деформированных фрагментов зерен. В результате ранее проведенных многочисленных исследований установлено, что перекристаллизация или рекристаллизация приводят к снятию механических напряжений и в целом очищению индивидов минералов от разного рода дефектов [Петровская, 1973; Григорьев, Жабин, 1975; Попов, 2011]. Описаны случаи, когда перекристаллизация деформированных участков самородного золота приводила к очищению индивидов и от примесных компонентов [Craw et al., 2017; Stewart et al., 2017]. Именно эти процессы установлены в ходе проведенных исследований.

В ложковой россыпи Архангельского лога обнаружены индивиды золота как с высокопробными каймами, так и без них, при этом высокопробные оболочки развиваются только у деформированных золотин. Схожие закономерности отмечены и другими исследователями [Синюгина и др., 1967; Николаева, 1978]. Эти наблюдения позволяют говорить об определяющей роли пластических деформаций самородного золота при образовании высокопробных кайм не только в россыпях со значительным расстоянием обломочного материала, но и в молодых россыпных объектах.

Индивиды самородного золота, характеризующиеся высокой степенью окатанности и развитием высокопробных кайм, могут быть рассмотрены как переотложенные из промежуточных коллекторов [Савва, Прейс, 1990] на заключительном этапе формирования россыпей Уральского региона либо претерпевшие транспортировку на значительное расстояние. Отмечен однородный химический состав и одинаковая степень окатанности золота в пределах каждой россыпи. В условиях сложного геологического строения региона с большим количеством коренных объектов с проявленной золоторудной минерализацией маловероятно формирование гомогенных с точки зрения состава и формы золота россыпей путем дальнего переноса. Преобладание в аллювиальных и делювиально-аллювиальных отложениях индивидов самородного золота рудного облика позволяет говорить об определяющей роли в образовании россыпей Миасской долины коренных источников, находящихся в верховьях водотоков и непосредственной близости от россыпей. Перемыв древних золотоносных отложений имеет подчиненное значение в россыпеобразовании данного района, с ним связана небольшая часть современных россыпей, самородное золото которых окатано и характеризуется наличием высокопробных кайм.

Индивиды самородного золота практически лишены минеральных включений, только в двух зернах золота россыпи р. Атлян обнаружены включения зерен теллуrowисмутита размером около 10 мкм. Включения теллуrowисмутита, других минералов висмута и теллура в самородном золоте Юкона [Chapman et al., 2010, 2011] рассматриваются как признак связи россыпей с плутоногенно-гидротермальными рудными месторождениями (в иностранной номенклатуре intrusion-related gold deposits). Обнаруженные включения в золоте и расположение р. Атлян в пределах одноименного гранитового массива позволяют предполагать формирование россыпи за счет коренной золоторудной минерализации, связанной с флюидно-гидротермальной проработкой пород, вмещающих этот интрузив.

Основной примесью в самородном золоте из россыпей Миасской долины является серебро. Обогащение самородного золота серебром и небольшая примесь ртути описаны для орогенных гидротермальных систем с золоторудной минерализацией [Chapman et al., 2010, 2011; Chapman, Mortensen, 2016]. При этом для месторождений золота в листовенитах, расположенных на Южном Урале, обоснована их орогенная природа [Belogub et al., 2017]. Широкие вариации содержания серебра в самородном золоте (рис. 10), постоянное присутствие ртути, включения теллуrowисмутита в совокупности с нахождением в россыпях сульфидов являются индикаторными признаками золотосульфидно-кварцевого типа коренного оруденения [Николаева и др., 2008; Никифорова и др., 2018; Никифорова, Толстов, 2022]. С наиболь-

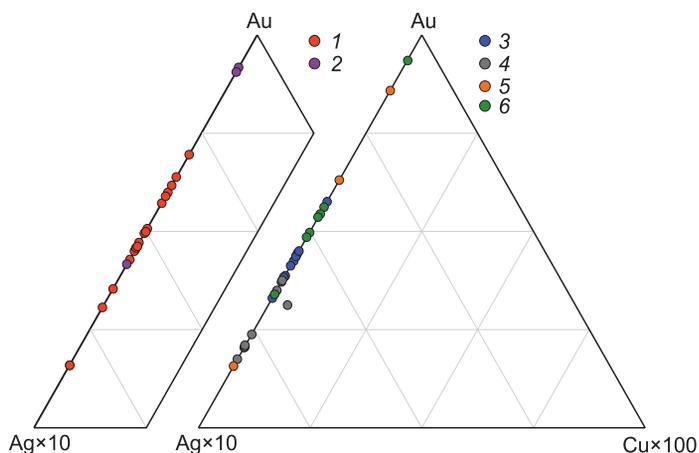


Рис. 10. Диаграмма Au—Ag × 10—Cu × 100 для составов самородного золота из россыпей Миасской долины.

1 — р. Черная; 2— Семеновский лог; 3 — р. Березовая; 4 — верховья р. Атлян; 5 — Архангельский лог; 6 — р. Каменка.

шей степенью вероятности именно этот тип коренного оруденения был основным источником золота для россыпей Миасской зоны.

Состав самородного золота из россыпи Архангельского лога сопоставим с составом золота из коренного источника. В ходе исследования золотого оруденения место-

рождения Мурашкина гора [Артемьев и др., 2013] было выделено две группы самородного золота, характерных для различных пород. В кварцевых жилах в лиственитах распространено золото средней пробностью 716 ‰, а к рудоносным талькитам тяготеет самородное золото средней пробностью 800 ‰. В ложковых отложениях Архангельского лога нами выявлены две группы самородного золота средней пробностью 760 и 820 ‰. Данный пример подтверждает логичную корреляцию состава самородного золота коренных источников и связанных с ними россыпей ложкового типа. Незначительная разница в пробности золота из россыпи и коренного месторождения может быть объяснена зональностью коренного золотого оруденения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Проведенные комплексные исследования позволили впервые охарактеризовать вещественные особенности шлиховых ассоциаций из россыпей Миасской системы — одного из самых освоенных золотодобывающих регионов.

В результате исследований установлено, что большая часть индивидов самородного золота в шлиховых ассоциациях обладает рудным обликом, комковидными формами, низкой степенью окатанности и отсутствием высокопробных кайм в периферической зоне, ровными поверхностями с отпечатками жильных минералов, что свидетельствует о формировании россыпей долины р. Миасс в условиях краткосрочного переноса самородного золота из коренных источников, находящихся в верховьях водотоков и непосредственной близости от россыпей. В россыпях рек Черная и Каменка, Семеновского лога самородное золото хорошо окатано, имеет округлые и уплощенные формы и высокопробные каймы, что позволяет сделать вывод о формировании отдельных россыпей Миасской россыпной зоны в результате перемыва и переотложения более древних аллювиально-делювиальных и ложковых россыпей.

Впервые было определено, что зерна золота в большинстве случаев сложены одним или несколькими отдельными индивидами, в той или иной степени испытавшими пластические деформации. Образование периферических оболочек, сложенных высокопробным золотом, происходило в результате рекристаллизации наиболее деформированных участков золотин. Малая распространенность и незначительное развитие кайм в индивидах самородного золота из большинства россыпей подтверждает вывод о небольшой дальности расположения коренных источников. При этом золото р. Черная характеризуется развитием очень мощных высокопробных кайм, что свидетельствует о весьма долгосрочном нахождении самородного золота из этой россыпи в активной гидродинамической среде, что, скорее всего, сопровождалось переотложением золота из промежуточных коллекторов.

Основной примесью в самородном золоте является серебро, содержание которого в центральных частях зерен изменяется в широких пределах (1.5—25.0 ‰, среднее 12.57); практически всегда присутствует небольшая примесь ртути (0—5.1 ‰, среднее 1.06). Особенности состава золота в совокупности с обнаруженными в нем микровключениями теллурувисмутита и нахождением в шлиховых ассоциациях сульфидов позволяют прийти к заключению, что в качестве основного источника для россыпей выступили рудные объекты с золотосульфидно-кварцевым типом оруденения.

Минеральные ассоциации россыпей объединяет повсеместное присутствие хромшпинелида, а особенности химического состава свидетельствуют о его поступлении в россыпи из ультраосновных пород офиолитовой ассоциации. Такое распространение хромшпинелида в совокупности с геологическим строением района указывает на то, что субстратом для формирования коренных месторождений золотосульфидно-кварцевой формации, образовавших россыпи, служили породы дунит-гарцбургитовых массивов. Примером таких коренных объектов являются кварц-карбонатные жилы в лиственитах

месторождения Мурашкина гора, послужившие коренным источником формирования ложковой россыпи золота Архангельский лог. С учетом широкого распространения в зоне ГУР месторождений золота в листовенитах можно сделать вывод об определяющем значении данного типа коренных источников в формировании россыпей Миасской россыпной зоны.

На основании анализа полученных результатов и данных предшественников установлено, что монацит и ксенотим (основные акцессорные минералы шлихов) поступали в россыпи из протерозойских метаморфических толщ к западу от ГУР. Однако свидетельств связи самородного золота с протерозойскими образованиями западнее ГУР не обнаружено.

Авторы благодарны профессору Санкт-Петербургского горного университета д.г.–м.н. Александру Владимировичу Козлову, чья конструктивная критика позволила улучшить статью.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН № 075-01324-23-00.

ЛИТЕРАТУРА

Алексеев А.А., Тимофеева Е.А. Редкоземельные фосфаты в горных и аллювиальных отложениях западного склона Южного Урала // Литосфера, 2008, № 1, с. 140—145.

Артемьев Д.А., Блинов И.А., Анкушев М.Н. Самородное золото месторождения листовенитового типа Мурашкина гора (Южный Урал) // Материалы III Международной научно-практ. конференции молодых ученых и специалистов памяти акад. А. П. Карпинского. СПб, ВСЕГЕИ, 2013, с. 183—187.

Артемьев Д.А., Анкушева Н.Н. Условия формирования золото-сульфидно-кварцевой минерализации месторождения Мурашкина гора (Миасский район, Южный Урал) // Металлогения древних и современных океанов — 2014. Миасс, ИМин УрО РАН, 2014, с. 142—145.

Билибин Ю.А. Основы геологии россыпей. М., Изд-во АН СССР, 1955, 472 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Издание второе. Серия Южно-Уральская. Лист N-41-VII. Объяснительная записка / Петров В.И., Шалагинов А.Э., Пунегов Б.Н., Горлова Л.И., Забелкина Л.Г., Григорова Т.Б., Никольский В.Ю., Шалагинова Т.И., Петрова А.С., Середа В.В. М., МФ ВСЕГЕИ, 2015а, 167 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1 : 200 000. Издание второе. Серия Южно-Уральская. Лист N-40-XII. Объяснительная записка / Б.Н. Аулов, Ю.А. Владимирцева, Н.И. Гвоздик, З.Г. Королькова, Ф.Д. Левин, А.В. Липаева, М.Н. Поташова, В.А. Самозванцев. М., МФ ВСЕГЕИ, 2015б, 365 с.

Григорьев Д. П., Жабин А. Г. Онтогенез минералов: индивиды. М., Наука, 1975, 339 с.

Зайков В.В., Мелекесцева И.Ю., Котляров В.А., Зайкова Е.В., Крайнев Ю.Д. Сrostки минералов ЭПГ в Миасской россыпной зоне (Южный Урал) и их коренные источники // Минералогия, 2016, № 4, с. 31—47.

Зайков В.В., Котляров В.А., Зайкова Е.В., Блинов И.А. Микровключения рудных минералов в золоте Миасской россыпной зоны (Южный Урал) как показатель коренных источников // ДАН, 2017а, т. 476, № 6, с. 670—674, doi: 10.7868/S0869565217300156.

Зайков В.В., Попов В.А., Зайкова Е.В., Блинов И.А., Котляров В.А. Состав и форма кристаллов платиноидов из россыпей Южного Урала // Минералогия, 2017б, № 3, с. 51—56.

Избеков Э.Д. Система коренной источник—россыпь. Якутск, Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1995, 202 с.

Калинин Ю.А., Ковалев К.Р., Наумов Е.А., Кириллов М.В. Золото коры выветривания Суздальского месторождения (Казахстан) // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (3), с. 241—257.

Неволько П.А., Колпаков В.В., Нестеренко Г.В., Фоминых П.А. Самородное золото аллювиальных россыпей Северо-Западного Салаира: состав, типы и минеральные микровключения // Геология и геофизика, 2019, т. 60 (1), с. 79—100, doi: 10.15372/GiG2019005.

Никифорова З.С., Толстов А.В. Золотоносные россыпеобразующие формации востока Сибирской платформы: происхождение и перспективы // Геология рудных месторождений, 2022, т. 64, № 2, с. 165—190, doi: 10.31857/S0016777022020022.

Никифорова З.С., Герасимов Б.Б., Глушкова Е.Г., Каженкина А.Г. Индикаторные признаки россыпного золота как показатель прогнозирования формационных типов золоторудных месторождений (восток Сибирской платформы) // Геология и геофизика, 2018, т. 59 (10), с. 1643—1657, doi: 10.15372/GiG20181009.

Никифорова З.С., Калинин Ю.А., Макаров В.А. Эволюция самородного золота в экзогенных условиях // Геология и геофизика, 2020, т. 61 (11), с. 1514—1534, doi:10.15372/GiG2020109.

Николаева Л.А. Генетические особенности самородного золота как критерии при поисках и оценке руд и россыпей. М., Недра, 1978, 102 с.

- Николаева Л.А., Яблокова С.В.** Типоморфные особенности самородного золота и их использование при геолого-разведочных работах // Руды и металлы, 2007, т. 6, с. 41—57.
- Николаева Л.А., Гаврилов А.М., Некрасова А.Н., Яблокова С.В.** Обобщенные признаковые модели самородного золота месторождений различных рудно-формационных типов // Руды и металлы, 2008, № 3, с. 62—68.
- Николаева Л.А., Гаврилов А.М., Некрасова А.Н., Яблокова С.В., Шатилова Л.В.** Самородное золото рудных и россыпных месторождений России: атлас. М., ЦНИГРИ, 2015, 200 с.
- Павлов Н.В.** Химический состав хромшпинелидов в связи с петрографическим составом пород ультраосновных интрузивов. М., Наука, 1949, 88 с.
- Паленова Е.Е., Новоселов К.А., Белолюб Е.В., Блинов И.А., Григорьева С.Д.** Минералогия аллювиальных отложений Авзянского золоторудного района (Южный Урал) // Литосфера, 2018, № 3, с. 459—474, doi: 10.24930/1681-9004-2018-18-3-459-474.
- Петровская Н.В.** Самородное золото: общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса. М., Наука, 1973, 347 с.
- Попова В.И., Никандрова Н.К., Сарафанов Л.В., Попов В.А.** Россыпь золота Комья-Курай Атланской группы в Миасской долине и перспективы дополнительной отработки россыпью золота на Южном Урале // Минералогия, 2016, № 3, с. 71—78.
- Попов В.А.** Практическая генетическая минералогия. Екатеринбург, УрО РАН, 2011, 165 с.
- Попова В.И., Попов В.А., Толканов О.А.** Богатства недр Миасского района (краткая справка) // Изв. вузов. Горный журнал. Уральское горное обозрение, 1995, № 10—12, с. 161—163.
- Пучков В.Н.** Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа, Даурия, 2000, 146 с.
- Рожков И.С.** Геология золотых и платиновых россыпей Северного и Среднего Урала и закономерности их развития. М., Госгеолтехиздат, 1954, 272 с.
- Савва Н.Е., Прейс В.К.** Атлас самородного золота Северо-Востока СССР. М., Наука, 1990, 293 с.
- Савельев Д.Е., Сначев В.И., Савельева Е.Н., Бажин Е.А.** Геология, петрогеохимия и хромитосодержание габбро-гипербазитовых массивов Южного Урала. Уфа, ДизайнПолиграфСервис, 2008, 320 с.
- Савельев Д.Е., Пучков В.Н., Бажин Е.А., Сначев В.И., Романовская М.А.** Новые данные о геологии и геохимии Таловского габбро-гипербазитового массива (Южный Урал) // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, 2010, № 3, с. 51—56.
- Савельев Д.Е., Зайков В.В., Котляров В.А., Зайкова Е.В., Крайнев Ю.Д.** Хромшпинелиды и аксессуарная минерализация в хромититах и ультрамафитах Нуралинского массива (Южный Урал) // Записки Российского минералогического общества, 2017, т. 146, № 1, с. 59—84.
- Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Коротеев В.А., Поленов Ю.А.** Месторождения золота Урала. Екатеринбург, Изд-во УГГГА, 2001, 622 с.
- Синюгина Е.Я., Воларович Г.П., Яблокова С.В.** О связи аллювиальных россыпей золота с коренными источниками // Труды ЦНИГРИ, 1967, № 76, с. 170—188.
- Смолин А.П.** Самородки золота Урала. М., Недра, 1970, 144 с.
- Трушков Ю.Н.** Условия формирования и закономерности распределения россыпей в мезозоидах Якутии. М., Наука, 1971, 265 с.
- Шило Н.А.** Учение о россыпях: теория россыпеобразующих рудных формаций и россыпей. Владивосток, Дальнаука, 2002, 576 с.
- Barnes S.J., Roeder P.L.** The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks // J. Petrol., 2001, v. 42 (12), p. 2279—2302, doi: 10.1093/petrology/42.12.2279.
- Belogub E.V., Melekestseva I.Yu., Novoselov K.A., Zabolotina M.V., Tret'yakov G.A., Zaykov V.V., Yuminov A.M.** Listvenite-related gold deposits of the South Urals (Russia): A review // Ore Geol. Rev., 2017, v. 85, p. 247—270, doi: 10.1016/j.oregeorev.2016.11.008.
- Chapman R.J., Mortensen J.K.** Characterization of gold mineralization in the northern Cariboo Gold District, British Columbia, Canada, through integration of compositional studies of lode and detrital gold with historical placer production: a template for evaluation of orogenic gold districts // Econ. Geol., 2016, v. 111, p. 1321—1345, doi: 10.2113/econgeo.111.6.1321.
- Chapman R.J., Leake R.C., Bond D.P.G., Stedra V., Fairgrieve B.** Chemical and mineralogical signatures of gold formed in oxidizing chloride hydrothermal systems and their significance within populations of placer gold grains collected during reconnaissance // Econ. Geol., 2009, v. 104, p. 563—585, doi: 10.2113/econgeo.104.4.563.
- Chapman R.J., Mortensen J.K., Crawford E., LeBarge W.** Microchemical studies of placer and lode gold in the Klondike District, Yukon, Canada: 1. Evidence for a small, gold-rich, orogenic hydrothermal system in the Bonanza and Eldorado Creek area // Econ. Geol., 2010, v. 105, p. 1369—1392, doi: 10.2113/econgeo.105.8.1369.

Chapman R.J., Mortensen J.K., LeBarge W. Styles of lode gold mineralization contributing to the placers of the Indian River and Black Hills Creek, Yukon Territory, Canada as deduced from microchemical characterization of placer gold grains // *Miner. Deposita*, 2011, v. 46, p. 881—903, doi: 10.1007/s00126-011-0356-5.

Chapman R.J., Mileham T.J., Allan M.M., Mortensen J.K. A distinctive Pd-Hg signature in detrital gold derived from alkaline Cu-Au porphyry systems // *Ore Geol. Rev.*, 2017, v. 83, p. 84—102, doi: 10.1016/j.oregeorev.2016.12.015.

Craw D., McLachlan C., Negrini M., Becker, N. Quantification and prediction of bulk gold fineness at placer gold mines: a New Zealand example // *Minerals*, 2017, v. 7, 226, doi: 10.3390/min7110226.

Fominykh P.A., Nevolko P.A., Svetlitskaya T.V., Kolpakov V.V. Native gold from the Kamenka-Barabanovsky and Kharuzovka alluvial placers (Northwest Salair Ridge, Western Siberia, Russia): Typomorphic features and possible bedrock sources // *Ore Geol. Rev.*, 2020, v. 126, 103781, doi: 10.1016/j.oregeorev.2020.103781.

Lalomov A.V., Chefranov R.M., Naumov V.A., Naumova O.B., LeBarge W., Dilly R.A. Typomorphic features of placer gold of Vagran cluster (the Northern Urals) and search indicators for primary bedrock gold deposits // *Ore Geol. Rev.*, 2017, v. 85, p. 321—335, doi: 10.1016/j.oregeorev.2016.06.018.

Savichev A.A., Nevolko P.A., Kolpakov V.V., Redin Yu.O., Mokrushnikov V.P., Svetlitskaya T.V., Sukhorukov V.P. Typomorphic features of placer gold from the Bystrinsky ore field with Fe-Cu-Au skarn and Mo-Cu-Au porphyry mineralization (Eastern Transbaikalia, Russia) // *Ore Geol. Rev.*, 2021, v. 129, 103948, doi: 10.1016/j.oregeorev.2020.103948.

Stewart J., Kerr G., Prior D., Halfpenny A., Pearce M., Hough R., Craw D. Low temperature recrystallisation of alluvial gold in paleoplacer deposits // *Ore Geol. Rev.*, 2017, v. 88, p. 43—56, doi: 10.1016/j.oregeorev.2017.04.020.

Townley B.K., Hérail G., Makshev V., Palacios C., de Parseval P., Sepulveda F., Orellana R., Rivas P., Ulloa C. Gold grain morphology and composition as an exploration tool: application to gold exploration in covered areas // *Geochem.: Explor. Environ. Anal.*, 2003, v. 3, p. 29—38, doi: 10.1144/1467-787302-042.

Zaykov V.V., Melekestseva I.Yu., Zaykova E.V., Kotlyarov V.A., Kraynev Yu.D. Gold and platinum group minerals in placers of the South Urals: Composition, microinclusions of ore minerals and primary sources // *Ore Geol. Rev.*, 2017, v. 85, p. 299—320, doi: 10.1016/j.oregeorev.2016.10.001.