

УДК 553.31:553.32:552.111(571.6)

## МАГМАТИЧЕСКОЕ САМОРОДНОЕ ЗОЛОТО: СОСТАВ, ФОРМЫ ВЫДЕЛЕНИЯ, ГЕНЕЗИС И ЭВОЛЮЦИЯ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

Н.В. Бердников, П.К. Кеpezинскas, В.Г. Невструев, В.О. Крутикова, Н.С. Коновалова

*Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 680000, Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65, Россия*

Приведены результаты исследований микроформ самородного золота и его сплавов в магматических породах, в разной степени измененных наложенными процессами. Обсуждаются характеристики состава и состояния как глубинных магматических золотосодержащих сплавов, так и продуктов их трансформации в условиях верхних горизонтов земной коры. Золотосодержащие адакиты и анкарами-ты Камчатки, базит-ультрабазиты массива Ильдеус и адакиты Становой складчатой области, дациты Боливийских Анд образовались непосредственно при плавлении надсубдукционного мантийного кли-на или погружающейся океанической коры. В деплетированных перидотитах Авачинского вулкана на Камчатке, надсубдукционных офиолитах Полярного Урала, Восточного Саяна и Бетско-Рифейского пояса Западного Средиземноморья золотосодержащее мантийное вещество подверглось глубинному воздействию высокотемпературных расплавов и флюидов субдукционного происхождения. Вулкани-ты, связанные с железомарганцевыми месторождениями Малого Хингана и месторождением Золотая Гора на Южном Урале, а также ультрамафиты Тарагайского массива в Южном Хингане обнаруживают субдукционные геохимические характеристики. Золотосодержащие трахиты Аппалач (Вирджиния, США) представляют собой кислые дифференциаты внутриплитных магм. Предполагается, что одной из основных форм транспорта золота в верхние горизонты земной коры являются частички состава Cu-Ag-Au, выделяющиеся из обогащенного халькофильными и сидерофильными элементами силикатного расплава, образовавшегося в результате плавления мантийных источников, в той или иной степени пре-терпевших воздействие субдукционных процессов. Магматические породы с такими частичками могут быть как самостоятельными источниками благородных металлов, так и служить прекурсорами для обра-зования самородного золота эпitherмальных и мезотермальных месторождений. Присутствие магмати-ческого золота в субдукционных изверженных и подвергшихся воздействию субдукционных расплавов и флюидов реститовых мантийных породах может свидетельствовать о существовании обогащенного золотом горизонта, глубина залегания которого сопоставима с глубиной образования первичных суб-дукционных и некоторых внутриплитных магм.

*Магматические породы, золотосодержащие сплавы, медистое золото, ликвация, субдукция, первично-магматическое золото, магматический источник рудного золота*

## MAGMATIC NATIVE GOLD: COMPOSITION, TEXTURE, GENESIS, AND EVOLUTION IN THE EARTH'S CRUST

N.V. Berdnikov, P.K. Kepezhinskas, V.G. Nevstruyev, V.O. Krutikova, N.S. Konovalova

Here we report results of microforms' studies of native gold and its alloys in igneous rocks, modified to varying degrees by secondary processes. We discuss the composition and occurrence of both the deep-seated magmatic gold-bearing alloys and the products of their transformation under conditions of the upper Earth's crust. Gold-bearing Kamchatka adakites and ankaramites, Ildeus massif mafic-ultramafic intrusions and adakites from the Stanovoy fold system as well as dacites from the Bolivian Andes were formed during melting of either the suprasubduction mantle wedge or the subducted oceanic crust. In depleted peridotites from the Avachinsky Volcano in Kamchatka as well as suprasubduction ophiolites from Polar Urals, Eastern Sayan and the Western Mediterranean Betic-Rifean belt, the gold-bearing mantle was hybridized by subduction-related melts and high-temperature fluids. Volcanic rocks associated with the Lesser Khingan Fe-Mn deposits and Zolotaya Gora Au deposit in Southern Urals as well as Taragai ultramafic rocks in the South Khingan Range display subduction-related geochemical characteristics. Gold-bearing trachytes in the Virginian Appalachians (USA) represent felsic differentiates of mafic intraplate magmas. We propose that one of the principal forms of gold transport into the upper crustal environments is represented by Cu-Ag-Au alloys, which precipitated from mantle-derived silicate melt enriched in chalcophile and siderophile elements. Such Cu-Ag-Au alloy-rich magmatic rocks can either constitute primary sources of precious metals in the mantle-crust system or serve as geochemical precursors to the formation of native gold assemblages in epithermal and mesothermal ore deposits. Presence of magmatic gold particles in subduction-related igneous rocks and mantle restites hybridized by subduction-derived melts and high-temperature fluids suggest the existence of gold-rich horizons in the Earth's mantle at depths comparable to typical depths of generation of primary convergent zone and some within-plate magmas.

*Igneous rocks, gold-bearing alloys, cupriferous gold, liquid immiscibility, subduction, primary magmatic gold, magmatic source of gold ore*

## ВВЕДЕНИЕ

Связи золотой минерализации с магматическими и гидротермальными процессами посвящены многочисленные исследования [Hedenquist, Lowenstern, 1994; Simon et al., 1999; Mungall, 2002; и др.]. Предполагается, что золото выносится с уровня метасоматизированной литосферной мантии [Saunders et al., 2018; Wang et al., 2019; Holwell et al., 2019] и концентрируется в областях развития магматизма, где образует месторождения с промышленными концентрациями [Henley, Berger, 2013; Kepezhinskas et al., 2020b, 2022a; и др.]. В богатых серой окисленных средних—основных магмах золото входит в состав сульфидов [Botcharnikov et al., 2011; Georgatou, Chiaradia, 2020], а в восстановительных условиях выделяется в самородном виде [Sisson, 2003; Rosa, 2005; Zhang et al., 2006; Li, Boudreau, 2019].

Основной объем знаний в области изучения золотоносных рудно-магматических систем относится к эпитермальным-мезотермальным золоторудным объектам, формирующимся на заключительных (гидротермальных) стадиях эволюции коровых магматическо-гидротермальных комплексов. В то же время поведение золота в связанных с такими системами магмах изучено недостаточно, хотя эти данные важны для понимания функционирования золотопроизводящих систем в целом. Исследования в этой области ограничены недостаточностью сведений о растворимости золота в силикатных расплавах при различных температурах и давлениях, летучести кислорода и серы, содержании примесных элементов [Simon et al., 2005; Pokrovsky et al., 2014], а также об их концентрации в глубинных оболочках Земли [Frimmel, 2008; Saunders et al., 2018]. Имеется ряд экспериментальных данных о поведении золота в силикатных и сульфидных расплавах, а также в системе расплав—флюид при физико-химических условиях, приближенных к таковым в земной коре и мантии [Bell et al., 2011; Li, Audetat, 2013; Li et al., 2019], однако прямые данные о формах поступления золота из глубинного магматического очага в верхние слои земной коры и об их эволюции на разных этапах развития рудно-магматических систем крайне ограничены [Li, Boudreau, 2019; Berdnikov et al., 2021]. Это связано с высокой мобильностью золота в эпитермальных условиях и, соответственно, практически полной заменой в развитых рудно-магматических системах первично-магматических форм золота на гидротермальные. Наибольшую вероятность обнаружения магматических форм самородного золота следует ожидать в магматических породах, слабо измененных гидротермальными процессами.

В работе приведены результаты исследований микроформ самородного золота и его сплавов в магматических породах, в разной степени измененных наложенными процессами. Обсуждаются характеристики состава и состояния как глубинных магматических золотосодержащих сплавов, так и продуктов их трансформации в условиях верхних горизонтов земной коры.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

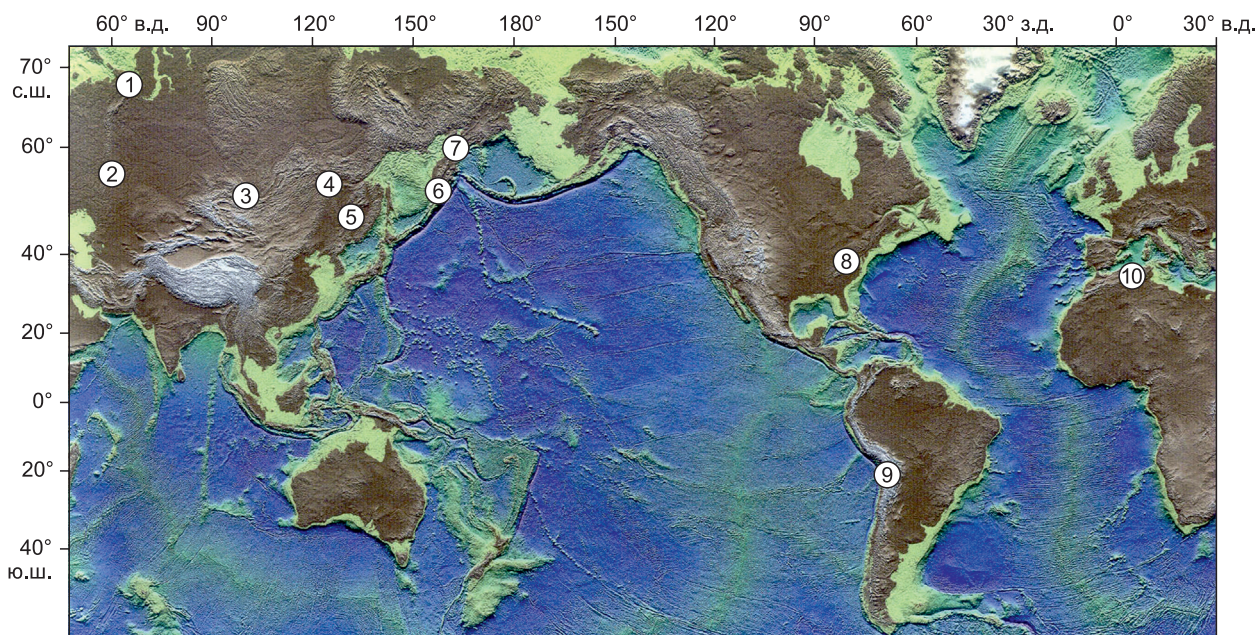
Образцы для исследования отобраны авторами в процессе полевых работ на месторождениях Мало-Хинганского рудного района и массива Тарагайский в Еврейской автономной области, на массиве Ильдеус в Амурской области, на Авачинском вулкане и в районе Валаовой на Камчатке, в Аппалачских горах и Боливийских Андах (рис. 1). Использованы образцы из коллекций, сформированных Территориальным фондом геологической информации по Дальневосточному округу при разведке месторождений, при разведочном бурении и штучном опробовании массива Ильдеус (ООО «Хинган»), а также опубликованные данные по массивам Полярного [Юричев, 2021] и Южного [Покровский и др., 1979; Спиридонов, Плетнев, 2002] Урала, Восточного Саяна [Григорьева и др., 2018] и Марокко [Oen, Kieft, 1974] (см. рис. 1).

Малые размеры (в большинстве случаев единицы—десятки микрометров) зерен золотосодержащих сплавов в магматических и ассоциирующих с ними горных породах предопределили основной метод их исследования — электронная сканирующая микроскопия с энергодисперсионным микроанализом (СЭМ-ЭДА). Микрочастицы таких сплавов выделялись путем дробления пород с последующим разделением на фракции по размерности и отмыванием в воде. При необходимости применялось разделение в тяжелой жидкости (бромформ) и растворение излишков магнетита, гематита и карбонатов соляной кислотой. Отбор микрочастиц золотосодержащих сплавов из обогащенного таким образом тяжелого шлиха производился с помощью стереомикроскопа Discovery V.12 (Карл Цейсс, Германия).

Микрочастицы золотых сплавов изучались также в срезах и свежих сколах пород, что дало возможность исследовать их взаимоотношения с минералами породы-хозяина. Подробное описание методик подготовки таких препаратов и особенностей их исследования дано в статье [Kepezhinskas et al., 2022b].

Для изучения морфологии и состава золотосодержащих микрочастиц использовался электронный сканирующий микроскоп VEGA 3 LMN (TESCAN, Чехия) с энергодисперсионным спектрометром X-max 80 (Оксфорд, Великобритания).

При СЭМ-ЭДА исследованиях микрообъектов в область возбуждения рентгеновского излучения неизбежно попадает окружающее его вещество — матрица. Излучение элементов матрицы добавляется



**Рис. 1. Положение мест находок образцов магматических и ассоциирующих с ними пород с зернами золотосодержащих сплавов (карта рельефа, по [Smith, Sandwell, 1997]):**

1 — хромититы Харчерузского массива, Полярный Урал [Юричев, 2021]; 2 — родингиты месторождения Золотая Гора, Южный Урал [Спиридонов, Плетнев, 2002]; 3 — серпентиниты и листвениты Оспинско-Китойского массива, Восточный Саян [Григорьева и др., 2018]; 4 — вебстериты массива Ильдеус и адакиты массива Утанак (Становая складчатая область) [Berdnikov et al., 2022]; 5 — дацит-андезитовые брекчии и ассоциирующие с ними магматические породы месторождений Поперечное, Костеньгинское и Кайланское [Berdnikov et al., 2021], гранатовые перидотиты Тарагайского массива (Малый Хинган); 6, 7 — ультраосновная лава и перидотитовые ксенолиты Авачинского вулкана (6) [Kepezhinskias et al., 2022b] и адакит района Валуев (7) (Камчатка); 8 — трахит Аппалачского подвижного пояса (США) [Kepezhinskias et al., 2022c]; 9 — дацит вулканического комплекса Лагуна Колорада (Боливийские Анды) [Kepezhinskias et al., 2022c]; 10 — серпентинит массива Бени Буосера (Марокко) [Oen, Kieft, 1974].

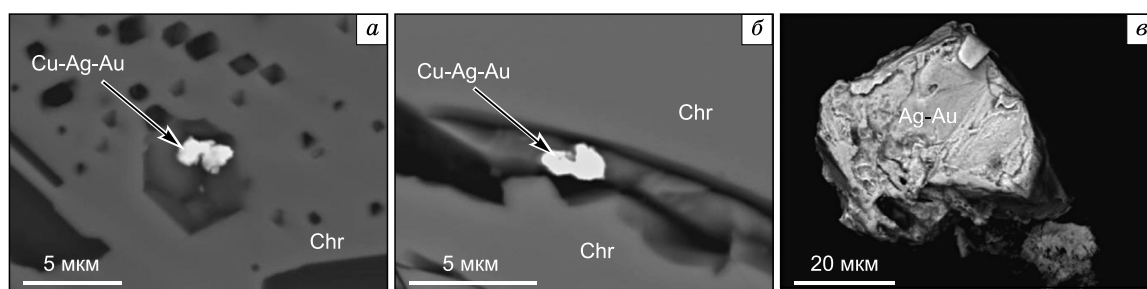
к спектру анализируемого микрообъекта, что усложняет интерпретацию его состава. В нашей работе приведены результаты анализов состава микрообъектов, по возможности «очищенные» от влияния состава матрицы. Основным принципом такой очистки являлся учет в результатах анализов микрообъектов только тех элементов, которые отсутствуют в составе матрицы. Принимались во внимание также соотношения концентраций элементов в анализах микрообъекта и матрицы: если отношение концентраций элементов в микрообъекте и в матрице одинаково, то эти элементы с большой долей вероятности относились к матричным и также исключались из результатов анализа микрообъектов. Значения «очищенных» таким образом составов нормировались на сумму слагающих их компонентов.

#### **КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Харчерузский ультрамафитовый массив входит в состав палеозойского Хадатинского офиолитового пояса на севере системы офиолитовых комплексов Полярного Урала (1 на рис. 1). Массив сложен серпентинизированными дунитами с метасоматически измененными гарцбургитами и габброидами в западной части. Петрологические данные [Юричев, 2017] свидетельствуют о происхождении этого мафит-ультрамафитового массива в зоне преддугового спрединга в палеозойской островной дуге, сопровождавшемся интенсивной переработкой океанического мантийного субстрата раннесубдукционными бонинитовыми расплавами. В дунитах присутствуют линзообразные тела хромититов с повышенным содержанием платиноидов, в которых обнаружены зерна золотосодержащих сплавов размером до 10 мкм (рис. 2, а, б), приуроченных преимущественно к трещинкам и зонкам кавернозности внутри зерен хромшпинелидов [Юричев, 2021].

Состав золотосодержащих микрочастиц из хромититов этих массивов, а также из пород охарактеризованных ниже объектов показан на рис. 3. На рисунке представлены тройные диаграммы Cu—Ag—Au, в которых суммированы результаты точечных СЭМ-ЭДА и волнового микронзондового анализов поверхности и срезов микрочастиц в местах, свободных от включений и каверн, данные СЭМ-ЭДА





**Рис. 2. Зерна Au-Cu-Ag в хромитите Харчерузского массива:**

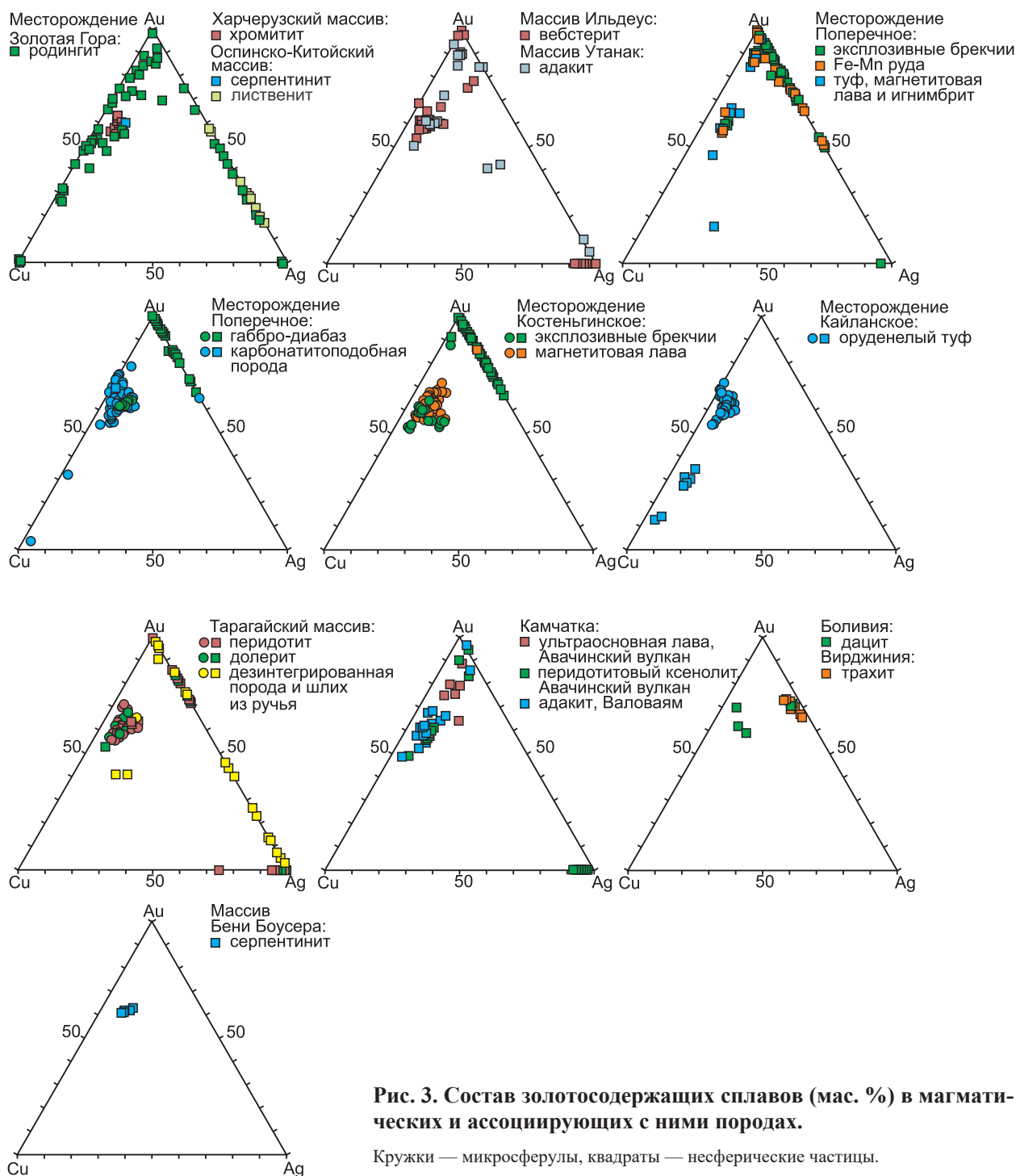
*a* — в микрокаверне, *б* — в трещинке, по [Юричев, 2021], *в* — Au-Ag (кюстелит) в листвените Оспинско-Китойского массива, по [Григорьева и др., 2018]. Chr — хромит. Здесь и далее сокращения названий минералов на рисунках, в подписях к ним и в тексте, по [Witney, Evans, 2010].

сканирования срезов, а также небольшое количество данных пробирного анализа (для месторождения Золотая Гора [Покровский и др., 1979]).

Золоторудная минерализация месторождения Золотая Гора связана с родингитами, развитыми по альпинотипным ультрабазитам силурийского Карабашского офиолитового комплекса Южного Урала [Покровский и др., 1979; Спиридонов, Плетнев, 2002] (2 на рис. 1). Девонские вулканиты, вмещающие Карабашский массив, дифференцированы от анкармитов и бонинитов до дацитов и риолитов и имеют отчетливый известково-щелочной островодужный характер [Фролова, Бурикова, 1977; Косарев и др., 2020], а сам Карабашский гипербазитовый массив по ряду петролого-минералогических признаков (крайне низкие содержания Al и Ca в составах перидотитов; хромистые составы шпинелей, типичные для реститовых мантийных образований фронтальных частей островных дуг) относится к надсубдукционным офиолитам [Мурзин и др., 2013; Попова и др., 2022]. Отличительной чертой рудного золота месторождения является присутствие в нем меди, иногда в весьма значительном количестве, а также неоднородное строение золотин, обусловленное замещением и срastанием различных минералов системы Cu—Ag—Au и продуктами распада твердых растворов Cu—Au.

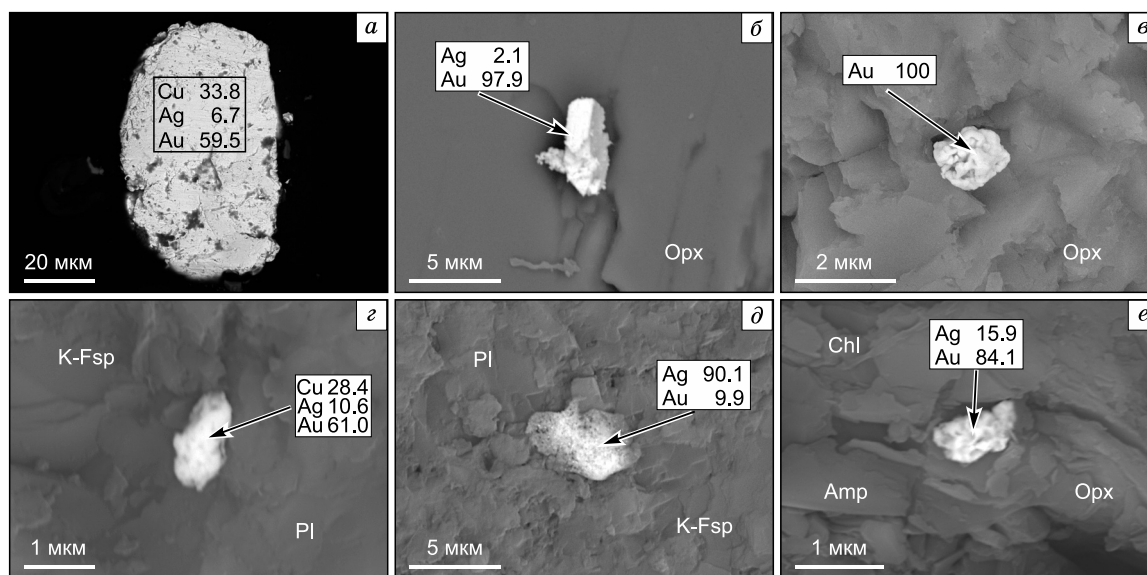
Оспинско-Китойский гипербазитовый массив (Восточный Саян, 3 на рис. 1) представляет собой часть ордовик-силурийского [Добрецов, 1985] офиолитового покрова, пластины которого подстилаются серпентинитовым меланжем. Реститовые гипербазиты массива представлены серпентинизированными гарцбургитами и дунитами, кумулятивный комплекс сложен дунитами, хромититами, верлитами, оливиновыми клинопироксенитами, оливиновыми габбро, пироксенитами и анортозитами. Фракционированное распределение платиноидов [Киселева и др., 2012] и минералогия Оспинско-Китойских перидотитов (сосуществующие высокомагнезиальный оливин и хромистая шпинель, пониженный потенциал кислорода) [Анциферова, 2006] идентифицируют этот офиолитовый массив в качестве фрагмента надсубдукционной литосферы, сформированной во фронтальной части энсиматической островной дуги [Dobretsov et al., 1992]. В углеродизированных серпентинитах массива наряду с платиноидной и сульфидной минерализацией зафиксированы зерна сплава Cu-Ag-Au, а в тальк-брейнерит-кварцевых лиственитах, развивающихся на контакте ультраосновных пород с гранодиоритами, зерна состава Ag-Au (см. рис. 2, *в*).

Массив Ильдеус, расположенный в пределах Становой складчатой области (4 на рис. 1), является частью крупного мезозойского (Т) островодужного магматогенного сооружения [Kepezhinskis et al., 2020b; Berdnikov et al., 2022]. Он сложен зональным комплексом ультраосновных (дуниты, гарцбургиты, лерцолиты, верлиты) и основных (двупироксеновые габбро, нориты, габбро-анортозиты) пород, интродуцированных дайками ультрамафитового и кислого состава. Магматические породы массива претерпели как минимум два этапа вторичных изменений. Низкотемпературный метаморфизм амфиболитовой фации местами привел к существенному замещению первично-магматических минералов метаморфическими. В отдельный этап выделяются крупномасштабный тальк-хлорит-серпентинитовый метасоматоз и формирование кварц-карбонатных с сульфидами жил и штокверков. Породы массива характеризуются неравномерной золотоносностью (до 596 г/т в отдельных образцах), представленной относительно крупными (до 0.2 мм) зернами сплава Cu-Ag-Au (см. рис. 4, *а*), микронными зернами сплава Ag-Au (см. рис. 4, *б*) и практически чистого золота (см. рис. 4, *в*), состав которых приведен на рис. 3. Зерна зафиксированы в ассоциации практически со всеми основными минералами пород массива (оливин, пироксены, плагиоклаз, калиевый полевой шпат, амфибол, хлорит, биотит).



Сплавы золота, меди и серебра были также обнаружены в меловых (114—117 млн лет) адакитах участка Утанак (4 на рис. 1), расположенного в 70 км к востоку от Ильдеусского базит-ультрабазитового массива [Kerezhinskas et al., 2022a]. Адакиты участка представлены порфировыми андезитовыми лавами с вкрапленниками, сложенными амфиболом трех генераций с включениями магнетита и зональным плагиоклазом. Геохимические характеристики этих пород — повышенные содержания  $K_2O$  ( $> 2$  мас. %), Th (до 15.8 г/т) и Nb (до 11.5 г/т) в совокупности с низкими содержаниями Y (12—13 г/т) и Yb ( $< 1.3$  г/т) и повышенными отношениями Sr/Y ( $> 50$ ) и La/Yb ( $> 20$ ) — свидетельствуют о выплавлении адакитов Утанак из базитового вещества утолщенной нижней коры под Становым коллизийным швом [Kerezhinskas et al., 2022a].

Месторождения Поперечное, Костеньгинское и Кайланское являются представителями крупного (более 30 месторождений и проявлений) кластера железорудных и железомарганцевых месторождений



**Рис. 4. Зерна Cu-Ag-Au (а), Ag-Au (б) и практически чистого золота (в) в ультраосновных породах массива Ильдеус; зерна Cu-Ag-Au (г) и Ag-Au с различным содержанием компонентов (д, е) в адakitах массива Утанак.**

Pl — плагиоклаз, K-Fsp — калиевый полевой шпат, Chl — хлорит, Amp — амфибол, Орх — ортопироксен. Здесь и далее в табличках показано содержание элементов в мас. %, стрелки указывают на места СЭМ-ЭДА анализов.

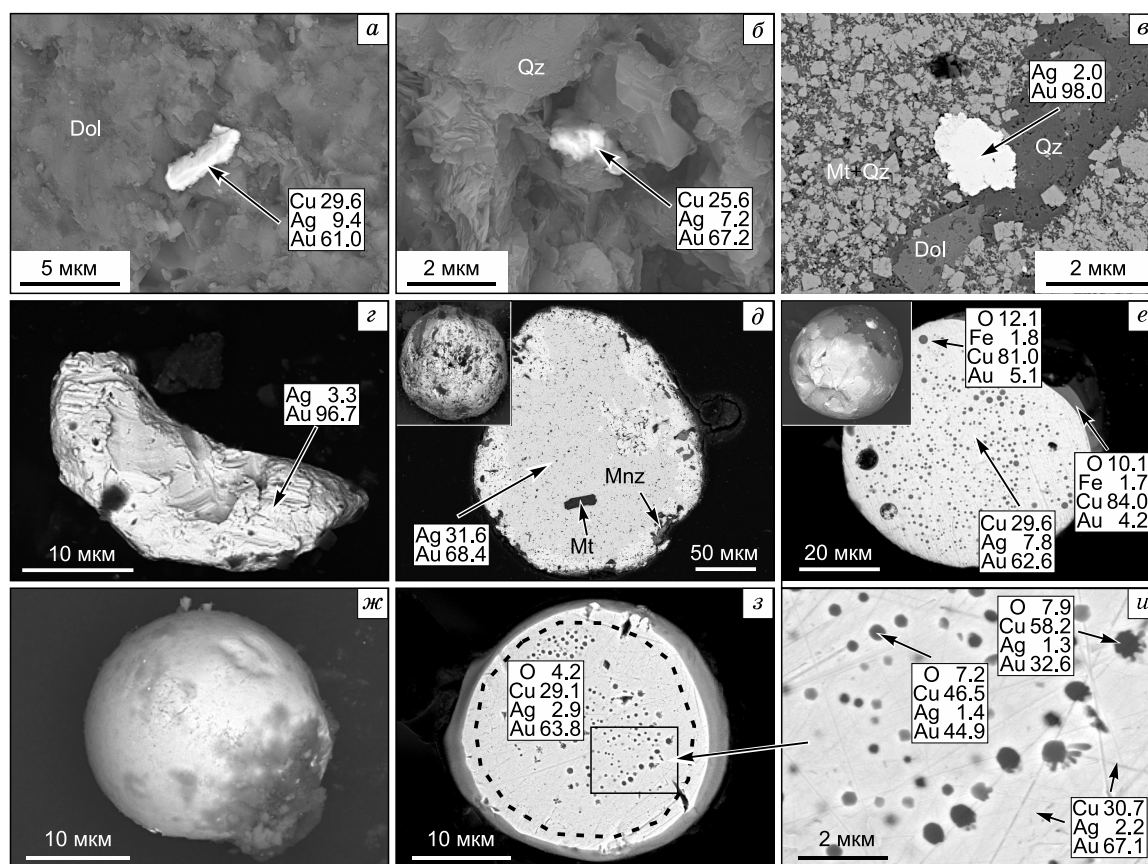
Мало-Хинганского рудного района [Egorov, Timofeieva, 1973; Бердников и др., 2016] на Дальнем Востоке России (5 на рис. 1). Общим для этих месторождений является их залегание среди венд-кембрийских карбонатно-терригенных толщ, входящих в состав Цзямусы-Буреинско-Ханкайского композитного террейна на востоке Центрально-Азиатского орогенного пояса [Тектоника ..., 2004; Wilde et al., 2010; Berdnikov et al., 2020]. Для их геологического строения характерно наличие эксплозивных брекчий, лав и туфов базальт-андезит-дацитового состава, а также насыщенных магнетитом эффузивных образований («магнетитовые лавы»). Эксплозивные брекчии — это гибридные породы с матриксом андезит-дацитового состава, в котором фиксируются обломки вмещающих доломитов, руд и брекчий ранних генераций размером от долей миллиметра до десятков сантиметров. В брекчиях и рудах месторождения Поперечное обнаружены промышленные содержания платины, платиноидов (до 11.3 г/т) и золота (до 2.5 г/т) [Невструев и др., 2018], время внедрения брекчий по  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  изотопному методу оценено в 125 млн лет [Ханчук и др., 2020]. На восточном фланге месторождения среди вмещающих доломитов установлены крутопадающие тела базальтоидов (обогащенные Nb андезибазальты), которые южнее переходят в рудоносные брекчии, а на южном — тела карбонатитоподобных преимущественно доломитовых пород с оливином, ортопироксеном, фтор-апатитом, корундом, магнетитом и титаномagnetитом, плагиоклазом, рутилом, амфиболом тремолит-актинолитового ряда, хлоритом, пиритом, кварцем, волластонитом. Самородные сплавы золота изучены в эксплозивных брекчиях, магнетитовой лаве, туфе, рудах, базальтоидах и в карбонатитоподобной породе [Berdnikov et al., 2021].

В образцах эксплозивной брекчии, руд, туфов, магнетитовых лав и игнимбритов в ассоциации с доломитом, кварцем, магнетитом и минералами марганца присутствуют зерна Cu-Ag-Au (рис. 5, а, б) наряду с многочисленными зернами золото-серебряных сплавов (см. рис. 5, в). В базальтоидах наиболее многочисленными являются бесформенные с элементами огранки зерна состава Au-Ag (см. рис. 5, г). Встречаются также округлые золото-серебряные зерна с включениями магнетита и монацита (см. рис. 5, д) и микросферулы Cu-Ag-Au с выделениями медно-оксидного состава на поверхности и внутри сферул (см. рис. 5, е).

В карбонатитоподобных породах преобладают микросферулы (см. рис. 5, ж), в которых отмечены округлые, частично ограненные и дендритовидные выделения оксида меди (см. рис. 5, з, и), редко встречаются внутренне гомогенные Cu-Ag-Au микросферулы.

Магнетит-гематитовые руды месторождения Костеньгинское представляют собой полосчатую кварц-магнетит-гидрослюдистую породу с флюидаальной структурой, подчеркнутой вытянутыми пустотами, ленточными выделениями кварца, гидрослюды и гидроксидов железа. По ряду структурных и минералогических признаков некоторые образцы магнетитовой руды имеют первично-магматическое





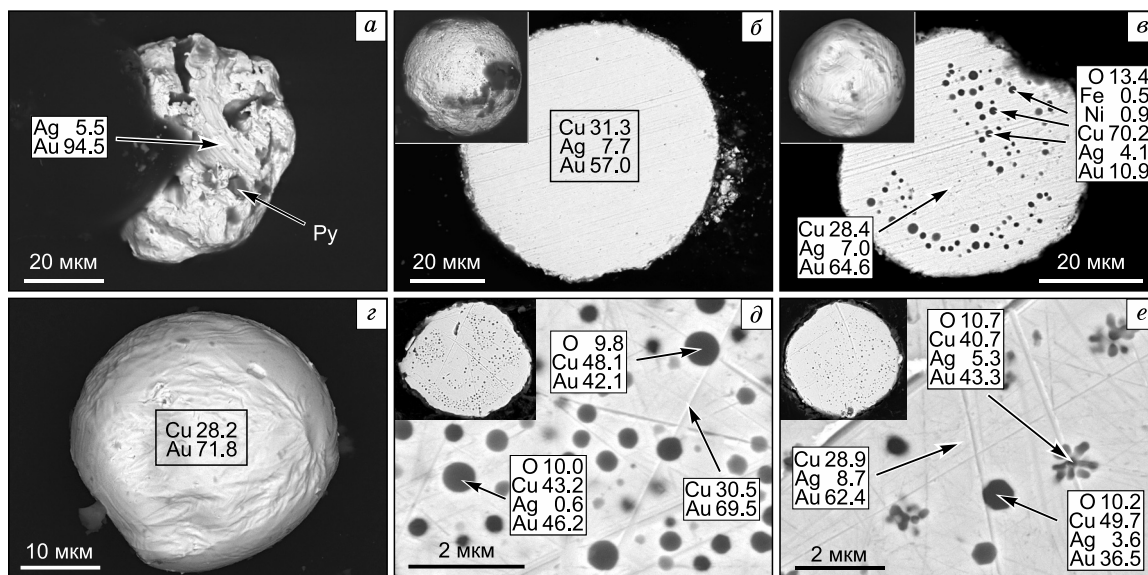
**Рис. 5. Зерна золотосодержащих сплавов в породах и рудах месторождения Поперечное:**

*a–в* — в эксплозивных брекчиях (*a*), в туфах (*б*) и магнетитовых рудах (*в*); *з–е* — золото-серебряные бесформенные (*з*), округлые золото-серебряные с включениями магнетита и монацита (*д*) и микросферы Cu-Ag-Au с выделениями медно-оксидного состава на поверхности и внутри сплава (*е*) в базальтоидах (приведены по [Berdnikov et al., 2021] с изменениями); *ж–и* — внешний вид (*ж*), срез с результатом анализа сканированием по области, обозначенной штриховой линией (*з*) и увеличенный участок среза с округлыми, частично ограниченными и дендритовидными выделениями оксида меди (*и*) Cu-Ag-Au микросферул из карбонатитоподобных пород. Здесь и далее: на врезках внешний вид зерен. Dol — доломит, Qz — кварц, Mt — магнетит, Mnz — монацит.

происхождение («магнетитовая лава»). Руды тесно ассоциируют с эксплозивными брекчиями, игнибритами, туфами, в составе которых присутствуют обломки вмещающих карбонатных пород. В эксплозивных брекчиях и «магнетитовых лавах» Костеньгинского месторождения обнаружены многочисленные бесформенные зерна состава Ag-Au (рис. 6, *a*) и сферические зерна состава Cu-Ag-Au (см. рис. 6, *б*, *в*) со следами усадочных деформаций на поверхности. Часть микросферул гомогенна (см. рис. 6, *б*), в других, как и в микросферулах из пород месторождения Поперечное, обнаруживаются округлые микро-включения оксида меди с примесью железа и никеля (см. рис. 6, *в*). В относительно крупных медно-оксидных включениях виден затвердевший мениск, свидетельствующий об их первично-жидком двухфазном состоянии [Бердников и др., 2021].

Руды Кайланского месторождения представлены маломощными (0.2–2.4 м) пластами железистых кварцитов, реже сливных гематитовых руд. С ними тесно ассоциируют эксплозивные брекчии и железистые туфы, в основной массе которых диагностированы кварц, карбонаты, хлорит, амфибол (тремолит), слюды, оливин (?). Нередко матриksom брекчий является сплошная гематитовая масса, в которую погружены неокатанные, часто деформированные обломки вмещающих карбонатов. Выделенные из образцов железистого туфа Cu-Au и Cu-Ag-Au микросферулы имеют «шагреновую» поверхность, деформированную вследствие усадки при остывании (см. рис. 6, *з*). Две из них обладают гомогенным внутренним строением, большинство же содержит обогащенные медью включения, в основном сферические (см. рис. 6, *д*), иногда отчетливо ограниченные или дендритовидные (см. рис. 6, *е*).

Трубообразное тело (270 × 320 м в плане) Тарагайского массива гранатовых перидотитов интрузирует раннепалеозойские граниты и венд-кембрийские карбонаты Цзямусы-Буреинско-Ханкайского террейна (5 на рис. 1) [Моисеенко, Дементенко, 2012]. На поверхности массив представляет собой

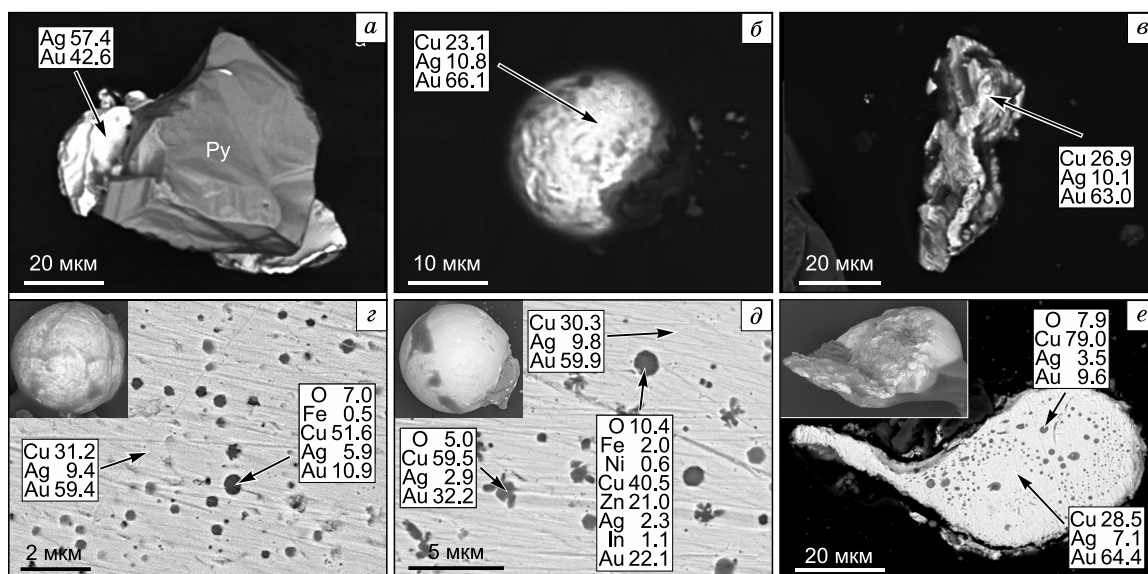


**Рис. 6. Зерна золотосодержащих сплавов в «магнетитовой лаве» Костеньгинского (а—в) и в железистом туфе Кайланского (з—е) месторождений:**

а — бесформенное зерно Ag-Au с включением пирита; б — однородная микросфера Cu-Ag-Au; в — округлые микровключения оксида меди с примесью Fe и Ni в микросфере Cu-Ag-Au; з — внешний вид микросферы Cu-Au с «шагреновой» поверхностью; округлые, дендритовидные и огранные микровключения оксида меди в микросферах Cu-Au (д) и Cu-Ag-Au (е). Py — пирит.

дезинтегрированные или слабосцементированные образования, в которые включены глыбы в различной степени серпентинизированных перидотитов, что свидетельствует в пользу взрывного характера внедрения (ультраосновная трубка взрыва). Сплавы золота выделены из образцов дезинтегрированных пород, слабоизмененных перидотитов, дайки долеритов, а также из донных отложений пересекающего массив руч. Каменистый.

В дезинтегрированных породах преобладают зерна Ag-Au (рис. 7, а), найдено также несколько микросферул состава Cu-Ag-Au (см. рис. 7, б).



**Рис. 7. Микрочастицы золотосодержащих сплавов из пород Тарагайского массива:**

уплощенная частица Ag-Au в сростке с пиритом (а) и микросфера Cu-Ag-Au (б) из дезинтегрированных пород; бесформенная частица (в) и микросфера Cu-Ag-Au (з) из слабоизмененного перидотита; шарообразная (д) и деформированная (е) микросферы из долерита.



В перидотите присутствуют многочисленные бесформенные, часто уплощенные зерна состава Cu-Ag и Ag-Au с различными соотношениями компонентов, а также зерна (см. рис. 7, в) и микросферулы (см. рис. 7, з) сплава Cu-Ag-Au. На срезе микросферул видны округлые, дендритовидные и частично ограниченные микровключения преимущественно медно-оксидного состава (см. рис. 7, з). В образцах долерита, как и в образцах перидотита, обнаружены зерна составов Cu-Ag, Ag-Au и Cu-Ag-Au, а также округлые (см. рис. 7, д) и деформированные (см. рис. 7, е) микросферулы Cu-Ag-Au. Для округлых микросферул характерны сферические, дендритовидные и частично ограниченные микровключения медно-оксидного состава с примесью Fe, Ni, Zn и In (см. рис. 7, д), в деформированных микросферулах медно-оксидные микровключения вблизи области приложения деформирующего воздействия уплощены (см. рис. 7, е).

Активный влк. Авачинский (6 на рис. 1) и позднемиоценовый (5—8 млн лет) валоваямский вулканогенный комплекс (7 на рис. 1) расположены соответственно в южной и северной частях Камчатской островодужной вулканической системы [Kepezhinskias et al., 1997]. Минеральный состав и геохимические характеристики ультраосновных ксенолитов в лавах и пирокластике Авачинского вулкана свидетельствуют о наличии под Камчаткой клина деплетированной мантии, в различной степени затронутой субдукционным метасоматозом [Kepezhinskias, Defant, 1996; Kepezhinskias et al., 2022b]. Ксенолиты шпинелевых перидотитов Авачинского вулкана образовались, по разным оценкам, при 800—1040 °C, 1—3 ГПа и  $\Delta\lg(f_{O_2})_{FMQ}$  от -0.76 до +1.9 [Kepezhinskias et al., 2022b]. Анкарамиты того же Авачинского вулкана сформировались в результате фракционирования шпинель-оливин-пироксеновой ассоциации минералов в диапазоне температур от 1010 до 1095 °C, давлении около 25—30 кбар и нулевых или слабоотрицательных значениях  $\Delta\lg(f_{O_2})_{FMQ}$  из магмы, возникшей при частичном плавлении метасоматизированных лерцолитов или верлитов надсубдукционного мантийного клина [Kepezhinskias et al., 1997].

Позднемиоценовый валоваямский вулканогенный комплекс сложен базальт-андезит-дацитовыми вулканитами, а также адакитами и высокониобиевыми базальтами, образованными в результате плавления погружающейся под Северную Камчатку молодой (менее 15 млн лет) океанической коры Командорской впадины Берингово моря [Hochstaedter et al., 1994; Kepezhinskias et al., 1997]. Адакиты валоваямского комплекса представлены амфибол-плаггиоклаз-порфиrowыми лавами с характерными для классических адакитов [Drummond et al., 1996] низкими содержаниями иттрия (< 15 г/т) и иттербия (< 1.5 г/т), а также повышенными отношениями Sr/Y и La/Yb [Hochstaedter et al., 1994; Kepezhinskias et al., 1997]. Sr-Nd-Pb изотопные характеристики адакитов Валоваяма однозначно указывают на магматический источник, соответствующий деплетированным базальтам срединно-океанических хребтов типа N-MORB [Kepezhinskias et al., 1997], и на широкое развитие процессов гибридизации вещества мантийного клина (индикаторная ассоциация адакит—высоко-Nb базальт), типичных для тектонических обстановок, связанных с плавлением вещества субдуцирующей океанической плиты [Defant, Kepezhinskias, 2001; Kepezhinskias et al., 2020a].

Зерна золотосодержащих сплавов обнаружены и изучены в образцах ультраосновной лавы и шпинелевых перидотитов из Авачинского вулкана, а также в адакитах из района Валоваям.

На срезах образцов ультраосновной лавы Авачинского вулкана зафиксированы бесформенные микрочастицы состава Cu-Ag-Au в ассоциации с ортопироксеном (рис. 8, а), оливином и плаггиоклазом (см. рис. 8, б).

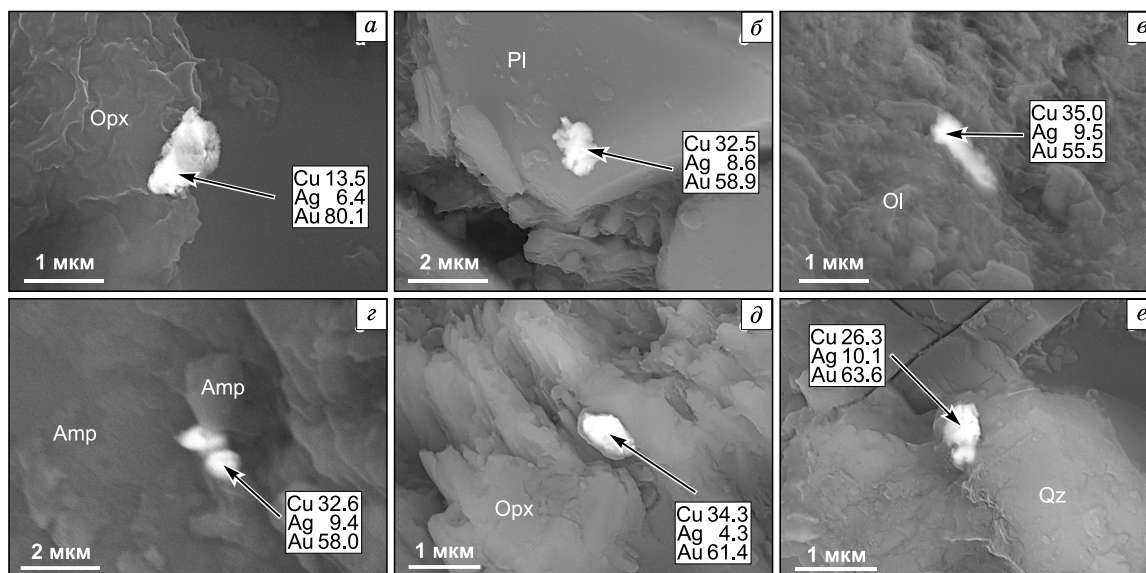
В ксенолитах шпинелевых перидотитов из магнезиальных андезибазальтов Авачинского вулкана обнаружены микрочастицы Cu-Ag, Ag-Au и Cu-Ag-Au в ассоциации с первичным оливином (см. рис. 8, в), ортопироксеном и метасоматическим амфиболом (см. рис. 8, з) [Kepezhinskias et al., 2022b].

В адакитах района Валоваям зафиксирована лишь одна частица Ag-Au с содержанием золота 93.9 мас. %, все остальные имеют состав трехкомпонентного сплава Cu-Ag-Au и ассоциируют с ортопироксеном (см. рис. 8, д), плаггиоклазом, K-Na-полевым шпатом, ильменитом и кварцем (см. рис. 8, е).

Обогащенные ниобием эоценовые трахиты Аппалачского подвижного пояса (Вирджиния, США, 8 на рис. 1) интерпретируются как дифференциаты внутриплитных мафитовых магм, образовавшихся из мантийного источника OIB-типа в режиме локального посторогенного растяжения в пределах Аппалачской континентальной окраины [Mazza et al., 2017; Kepezhinskias et al., 2022c]. Высококалийевый дацит вулканического комплекса Лагуна Колорада (Боливийские Анды, 9 на рис. 1) образовался в результате фракционирования Fe-Mg силикатов из базальтовой магмы, источником которой была измененная субдукцией мантия в тылу активного вулканического фронта Андийской магматической дуги [Kepezhinskias et al., 2022c].

В образцах трахитов и дацитов преобладают микрочастицы Cu-Ag-Au, при этом в микрочастицах из трахитов больше серебра и золота, но меньше меди (см. рис. 3, 9).

В трахите зафиксирована лишь одна микрочастица с составом Ag 40.6, Au 59.4 мас. %, в даците частиц подобного состава не обнаружено. В трахите золотосодержащие микрочастицы ассоциируют с плаггиоклазом (см. рис. 9, а), амфиболом (см. рис. 9, б), цирконом, апатитом, титанитом, рутилом, иль-

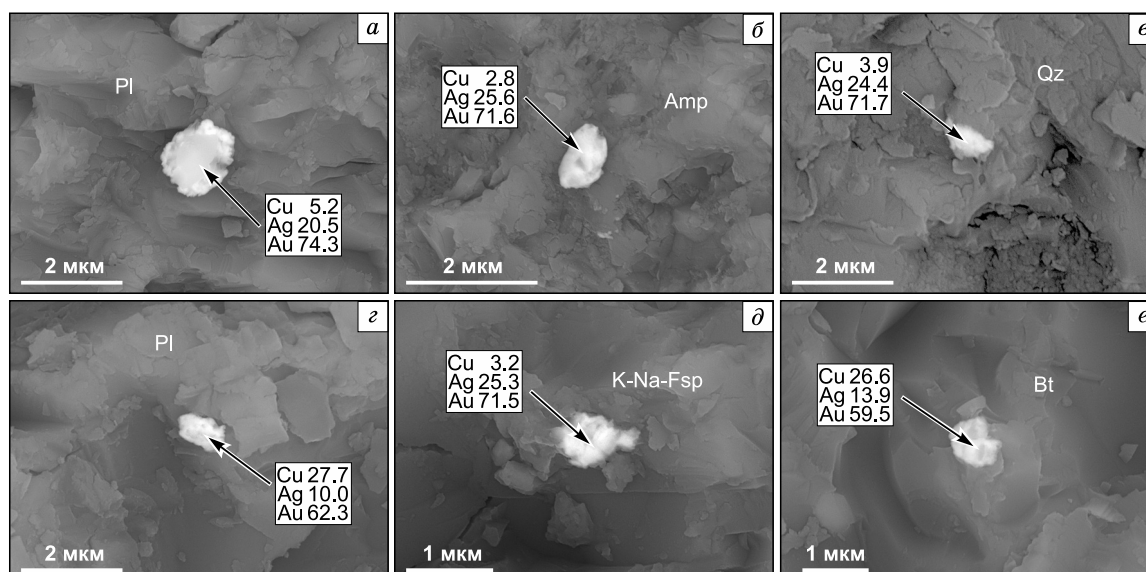


**Рис. 8.** Микрочастицы Cu-Ag-Au в ультраосновной лаве (*а, б*), ксенолитах шпинелевых перидотитов (*в, г* приведены по [Kepzhinskas et al., 2022b]) Авачинского вулкана и адакита района Валовая (*д, е*) на Камчатке.

Ol — оливин.

менитом, магнетитом, кварцем (рис. 9, *в*), а в даците с плагиоклазом (см. рис. 9, *г*), магнетитом, полевым шпатом (см. рис. 9, *д*) и биотитом (рис. 9, *е*).

Массив Бени Боусера (Марокко, 10 на рис. 1) сложен лерцолитами, в меньшей степени гарцбургитами и дунитами [Kornprobst, 1969]. Радиоизотопные исследования свидетельствуют, что кристаллизация этих пород происходила в мантийных условиях примерно 1.2—1.4 млрд лет [Reisberg, Lorand, 1995; Pearson, Nowell, 2004; Marchesi et al., 2010], после чего они были выведены на поверхность в результате тектонической эволюции висячего блока зоны субдукции [Van der Wal, Vissers, 1993, 1996] или в задуговой обстановке [Garrido et al., 2011; Marchesi et al., 2012]. Изотопно-геохимические исследова-



**Рис. 9.** Микрозерна сплавов Cu-Ag-Au в трахитах Аппалачского подвижного пояса (*а—в*) и дацитов Боливийских Анд (*г—е*), по [Kepzhinskas et al., 2022c] с изменениями.

K-Na-Fsp — K-Na полевой шпат, Bt — биотит.

ния ультрамафитов Бени Боусера свидетельствуют о несомненном влиянии субдукционных расплавов и флюидов, а пироксенитовые породы массива интерпретируются в качестве коровых образований, возникших при гибридизации мантийных перидотитов бонинитами или другими примитивными островодужными расплавами [Gysi et al., 2011; Chetouani et al., 2016]. В никель-хромовых рудах в хромититах среди серпентинизированных перидотитов Бени Боусера установлены зерна Cu-Ag-Au сплавов в ассоциации с никелином, пирротинном, кубанитом и леллингитом [Oen, Kieft, 1974].

Детальные электронно-микроскопические исследования микрочастиц золотосодержащих сплавов из пород и руд различного местонахождения (см. рис. 1), состава (от ультраосновных до дацитов) и возраста (от докембрия до современного) позволили определить ряд их характерных свойств. По морфологии все изученные частицы можно разделить на две группы — бесформенные (иногда с элементами огранки) и сферические (микросферулы), по составу — на медь-золото-серебряные и золото-серебряные.

### СТРУКТУРА ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ МИКРОЧАСТИЦ

Поверхность бесформенных, часто уплощенных золотосодержащих микрочастиц обычно незакономерно бугорчатая, реже с элементами частичной идиоморфной или индукционной огранки. На ней отмечаются вроски ассоциирующих минералов (полевой шпат, кварц, пирит), следы механических деформаций. Поверхность микросферул в основном гладкая, без следов выхода внутренних кристаллических структур. Как правило, она осложнена усадочными деформациями, которые могут быть как линейного (опускание фрагмента микросферулы относительно соседнего по «микросбросу», рис. 10, *а*), так и локального («вмятины») характера, а также в виде «шагреновой кожи» (см. рис. 10, *б*). На поверхности ряда микросферул фиксируются фрагменты фазы сложного состава (см. рис. 10, *б*). Граница между ними и поверхностью микросферулы сферически выгнута в сторону фазы сложного состава (затвердевший мениск?), что свидетельствует в пользу первично-жидкого состояния этих фаз.

Внутренняя структура золотосодержащих микрочастиц может быть гомогенной, насыщенной медно-оксидными включениями, «ячеистой» или гетерогенной. Гомогенная структура характерна для большинства бесформенных зерен Ag-Au и для некоторых Cu-Ag-Au микросферул (см. рис. 6, *б*), что подтверждается СЭМ-сканированием с высоким контрастом, а также сканированием в характеристических излучениях меди, серебра и золота. Микросферулы Cu-Ag-Au, как правило, насыщены округлыми, дендритовидными, частично или полностью ограненными микровключениями оксида меди с примесями железа, никеля, цинка. В ряде случаев наблюдается пластическая (см. рис. 7, *е*) деформация округлых включений, что говорит об их пластическом (жидком) состоянии во время деформации и подтверж-

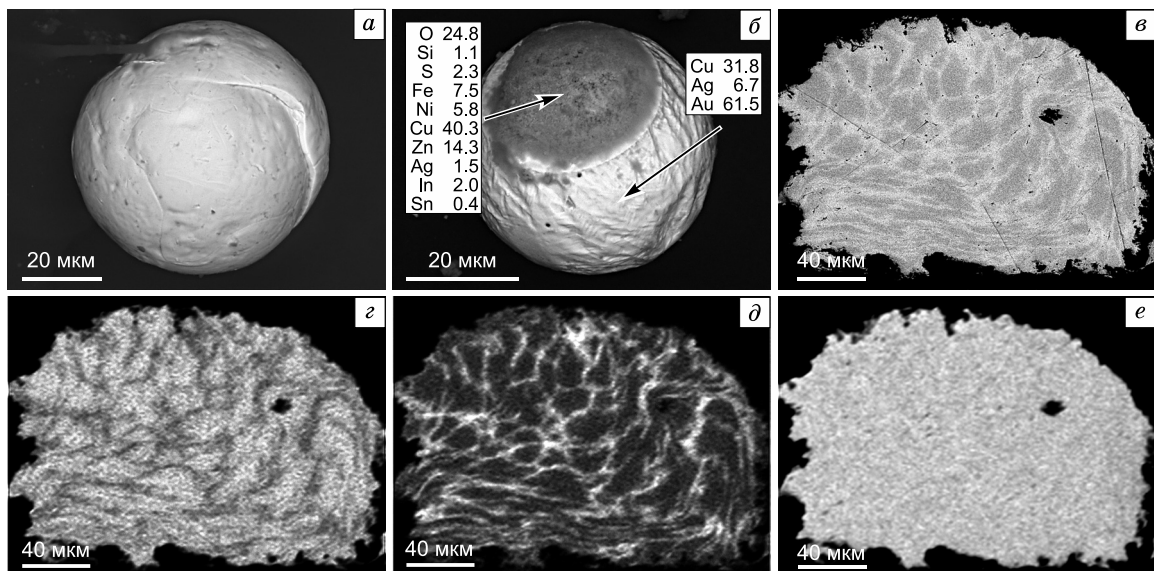


Рис. 10. Линейные (*а*), локальные деформации и «шагреновая кожа», фрагмент фазы сложного состава (*б*) на поверхности Cu-Ag-Au микросферул из «рудной лавы» Костеньгинского месторождения; *в–е* — срез крупной бесформенной частицы Cu-Ag-Au из ультраосновных пород массива Ильдеус: *в* — высококонтрастное BSE изображение, *г–е* — результат сканирования в характеристических излучениях Cu  $K_{\alpha 1}$  (*г*), Ag  $L_{\alpha 1}$  (*д*) и Au  $M_{\alpha 1}$  (*е*).

Изображения *в–е*, по [Berdnikov et al., 2022].



дает вывод об их образовании в результате ликвации в жидком Cu-Ag-Au сплаве [Бердников и др., 2021]. В микросферах отмечаются полости, декорированные дендритами, состав которых сходен с составом матрицы, в Ag-Au сферической частице из базальтоида месторождения Поперечное зафиксированы включения магнетита и монацита.

На срезе относительно крупных (до 0.5 мм) бесформенных зерен из верлитов массива Ильдеус СЭМ-сканированием в BSE режиме с повышенной контрастностью выявлена ячеистая структура [Berdnikov et al., 2022]. На рисунке 10, в—д видно, что в нижней части изображения «ячейки» уплощены, что говорит о механической деформации структуры уже после ее формирования. Сканирование в характеристических излучениях меди, серебра и золота показало, что содержимое доменов «ячеек» обогащено медью, а их границы — серебром (см. рис. 10, г, д). Золото при формировании такой структуры не мобилизуется (см. рис. 10, е).

Гетерогенная структура золотосодержащих сплавов, обусловленная сростанием, взаимозамещением или распадом твердых растворов системы Cu—Ag—Au детально описана в работе [Knight, Leitch, 2001; Спиридонов, Плетнев, 2002; и др.]. Согласно имеющимся у нас данным, такая гетерогенная структура типична только для бесформенных зерен и не встречается в Cu-Ag-Au микросферах.

### СОСТАВ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ МИКРОЧАСТИЦ

Состав золотосодержащих частиц из пород изученных объектов показан на рис. 3. Для точек на тройных диаграммах Cu—Ag—Au в первую очередь использовались значения, полученные при СЭМ-ЭДА сканировании срезов частиц «по площади» с максимальным захватом области среза (см. рис. 5, з). Нам представляется, что они наиболее полно отражают интегральный состав частиц. Использованы также точечные СЭМ-ЭДА анализы матрицы гомогенных частиц, а также точечные анализы матрицы на удалении от медно-оксидных включений, поскольку нашими исследованиями показано, что они не более чем на 1 мас. % беднее медью, чем анализы по «площади». Из рисунка видно, что точки анализов в основном группируются в поле со средним составом Cu~30, Ag~10, Au~60 мас. % и вдоль Ag—Au стороны треугольника. В поле  $\text{Cu}_{30}\text{Ag}_{10}\text{Au}_{60}$  локализованы составы микросферул, в меньшей степени составы бесформенных частиц, на линиях Cu—Au и Ag—Au исключительно составы бесформенных частиц.

Состав округлых, дендритовидных и ограненных микровключений в микросферах Cu-Ag-Au, вероятнее всего, отвечает куприту с примесью ряда элементов (Fe, Ni, Zn) [Бердников и др., 2021]. Сходный состав имеют и фрагменты фазы сложного состава (см. рис. 10, б) на поверхности микросферул. Расширенный набор элементов в результатах их анализов обусловлен большим объемом анализируемого вещества в области возбуждения рентгеновского излучения, чем в случае микровключений, на результаты анализа которых большое влияние оказывает Cu-Ag-Au матрица [Бердников и др., 2021; Berdnikov et al., 2021].

### УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ МИКРОЧАСТИЦ

Сферическая форма Cu-Ag-Au микросферул и содержащихся в них округлых микровключений куприта, наличие усадочных деформаций на их поверхности свидетельствуют о первично-жидком состоянии слагающего их сплава. Согласно фазовой диаграмме Cu—Ag—Au [Wise, 1964], сплавы из области составов  $\text{Cu}_{30}\text{Ag}_{10}\text{Au}_{60}$  становятся жидкими при температуре выше 950 °C. Как показано в работах [Бердников и др., 2021; Berdnikov et al., 2021], наличие в микросферах каплевидных (округлых) микровключений куприта говорит о развитии в них ликвационных процессов с выделением жидкого оксида меди, температурный интервал существования которых в жидком виде, согласно [Neumann et al., 1984], составляет 1223—1350 °C. Видимо, температуры именно такого порядка сопутствовали образованию жидких Cu-Ag-Au микросферул.

Сплав Cu-Ag-Au исключительно чувствителен к окислительному потенциалу окружающей среды [Gammons, Williams-Jones, 1995; Fiege et al., 2017]. В жидком состоянии при  $\lg p_{\text{O}_2}$  выше  $-4$  он активно реагирует с кислородом с образованием жидкой ( $T > 1223$  °C) или твердой ( $T < 1223$  °C) фазы оксида меди (округлые и ограненные микровключения в микросферах). При более низких (950—250 °C) температурах частицы твердого сплава Cu-Ag-Au покрываются коркой оксида меди.

Особого внимания заслуживает полное отсутствие как на поверхности, так и внутри микросферул признаков распада твердого раствора Cu-Ag-Au с обособлением твердых металлических фаз (субфаз) с различным содержанием Cu, Ag и Au, которое возможно лишь при экстремально быстром охлаждении сплава. Об этом же свидетельствует сохранение частью микровключений оксида меди округлой формы, приобретенной в процессе жидкофазной ликвации, в то время как другие микровключения этого состава успевают ограниться.

Бесформенные зерна Ag-Au преимущественно структурно и композиционно гомогенны, их составы, как правило, близки к составам минералов золота в большинстве известных месторождений

[Чудненко, Пальянова, 2014; Гаськов, 2017; и др.], образовавшихся в эпитеpmальных условиях. Данные о гетерофазном строении таких зерен немногочисленны. В первую очередь это относится к золоту месторождения Золотая Гора в родингитах, развитых по альпинотипным ультрабазитам карабашского офиолитового комплекса Южного Урала [Покровский и др., 1979; Спиридонов, Плетнев, 2002]. Неоднородное строение его зерен обусловлено замещением и срастанием различных минералов системы Cu—Ag—Au, а также продуктами распада твердых растворов Cu—Au. Яркие примеры неоднородного (зонального или пятнистого) строения зерен золота с примесью серебра и меди в гидротермальных месторождениях Ирландии (Сперрин Маунтин и Доннегал), Шотландии (Ривер Эйр), Британской Колумбии (Бонанза Крик и Болдер Крик) и Танзании (Лэйк Туркана) рассмотрены Р. Чэпменом с соавторами [Chapman et al., 2021]. В работе [Knight, Leitch, 2001] приведены данные исследования зерен Cu—Ag—Au из родингитов в серпентинитах проявления 15-я Миля и из россыпи Уитон Крик в Британской Колумбии, обнаруживающих хорошо оформленные ламинарные структуры распада на фазы с различным содержанием Cu, Ag и Au. По мнению [Knight, Leitch, 2001], такой «продвинутый» распад мог быть реализован только в условиях весьма длительной (тысячи, если не миллионы лет) выдержки при приповерхностных температурах, что экспериментально недостижимо. В ходе нашего исследования начальные этапы такого распада зафиксированы в бесформенных зернах из ультраосновного массива Ильдеус, где замедленное охлаждение привело к возникновению «ячеистых» структур, пластически деформированных, вероятнее всего, во время тектонического выведения этого массива в верхние горизонты земной коры (см. рис. 10, в—е).

### ГЕОЛОГО-ПЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

Наши исследования показали, что происхождение пород, в которых были обнаружены микроchaстицы сплавов системы Cu—Ag—Au, в той или иной степени (за исключением эоценовых внутриплитных трахитов Вирджинского сегмента Аппалачского пояса) связаны с субдукционными процессами, включающими их возможное взаимодействие с преддуговыми и задуговыми мантийными плюмами, а также разрыв сплошности погружающейся океанической плиты вплоть до отрыва слэба и возникновения субдукционных тектонических окон с вовлечением в субдукционный процесс неистощенного вещества астеносферной мантии (таблица). Подобные идеи были высказаны ранее на основании изучения микронных включений золота в оливине, пироксене, сульфидах и интерстициальных стеклах мантийных ксенолитов массива Десеадо в Аргентинской Патагонии [Tassara et al., 2017], а также в метасоматизированных перидотитовых ксенолитах Талланте (Юго-Восточная Испания), представляющих собой мантийное вещество под Иберийской континентальной окраиной [Schettino et al., 2022]. При этом нужно отметить, что метасоматические преобразования ксенолитов Талланте (высоко-Sr/Y гранодиоритовые прожилки, секущие мантийные перидотиты), скорее всего, связаны с субдукционными адакитовыми расплавами [Shimizu et al., 2004], аналогичными золотосодержащим адакитам, изученным в рамках данной статьи.

Действительно, Харчерузский (Полярный Урал, 1 на рис. 1), Карабашский (Южный Урал, 2 на рис. 1), Оспинско-Китойский (Восточный Саян, 3 на рис. 1) и Бени Боусера (Марокко, 10 на рис. 1) ультраосновные массивы являются частями разновозрастных супрасубдукционных офиолитовых комплексов [Покровский и др., 1979; Добрецов, 1985; Спиридонов, Плетнев, 2002; Gysi et al., 2011; Chetouani et al., 2016; Юричев, 2017]. Базит-гипербазитовый массив Ильдеус (Становая складчатая область, 4 на рис. 1) входит в состав мезозойского островодужного сооружения, связанного с субдукцией коры Монголо-Охотского океана под южный край Сибирского кратона [Kepzhinskis et al., 2020b]. В образовании месторождений Поперечное, Костеньгинское и Кайланское (Малый Хинган, 5 на рис. 1), ранее считавшихся вулканогенно-осадочными, в соответствии с последними данными [Berdnikov et al., 2020, 2021; Ханчук и др., 2020; Бердников и др., 2021], участвовали флюидно-магматические продукты мезозойской субдукции под Мало-Хинганский террейн. Генезис расположенного в его пределах Тарагайского перидотитового массива (5 на рис. 1) в настоящее время дискусионен, однако его связь с субдукционными процессами, по мнению авторов, весьма вероятна, а ультраосновные породы этого массива обнаруживают геохимические характеристики (истощение высокозарядными литофильными элементами по отношению к редкоземельным и высокозарядным литофильным элементам), типичные как для первичных субдукционных магм, так и для островодужных ультрамафических кумулятов [McCulloch, Gamble, 1991; Kepzhinskis et al., 1993; Greene et al., 2006]. Деятельность современных вулканов Южной и позднекайнозойских палеовулканических построек Северной Камчатки (6 и 7 на рис. 1) определяется субдукцией Тихоокеанской плиты и Командорской микроплиты соответственно под южный и северный сегменты Камчатской островодужной системы [Kepzhinskis et al., 1997, 2022b]. Дадит из вулканического комплекса Лагуна Колорада (Боливийские Анды, 9 на рис. 1) является продуктом дифференциации базальтовой магмы, генерированной веществом мантийного клина под влиянием субдукции Тихо-

### Возраст пород и геодинамическая обстановка формирования объектов исследования

Объект (его номер на рис. 1)	Возраст	Геодинамическая обстановка	Источник
Харчерузский массив, Полярный Урал (1)	Палеозой	Преддуговой спрединг; гибридизация океанической мантии над зачаточной зоной субдукции; супрасубдукционный офиолит	[Юричев, 2017]
Месторождение Золотая Гора (2)	Палеозой (девон)	Древняя островная дуга	[Спиридонов, Плетнев, 2002]
Оспинско-Китойский массив (3)	Палеозой	Гибридизация мантии мафическими расплавами над древней зоной субдукции; супрасубдукционный офиолит	[Киселева и др., 2012]
Массивы Ильдеус и Утанак (4)	Триас (232—233 млн лет)	Мезозойская зона субдукции—коллизии	[Kepezhinskas et al., 2020b; Berdnikov et al., 2022]
Месторождения Поперечное, Костеньгинское, Кайлан (5)	Поствендский	Вмещающие вулканы имеют субдукционные геохимические характеристики; древняя зона субдукции (?)	[Berdnikov et al., 2021]
Тарагайский ультраосновной массив (трубка взрыва) (5)	Постраннепалеозойский	Ультрамафиты имеют субдукционные геохимические характеристики и пространственно связаны с адакитовыми гранитоидами; древняя зона субдукции (?)	(Бердников и др., неопубликованные данные)
Ультраосновные лавы Авачинского вулкана (6)	Голоцен	Современная зона субдукции	[Kepezhinskas et al., 1997]
Перидотитовые ксенолиты Авачинского вулкана (6)	Вынесены на поверхность голоценовыми вулканиками	Отторженцы надсубдукционного мантийного клина под Южной Камчаткой	[Kepezhinskas et al., 2022b]
Адакиты района Валавьям (7)	Поздний миоцен (5—8 млн лет)	Субдукция океанической коры Командорской котловины под аккреционные структуры Северной Камчатки	[Kepezhinskas et al., 1997]
Трахиты Аппалачского пояса (8)	Эоцен	Внутриплитные магмы в обстановке локального растяжения в пределах пассивной континентальной окраины	[Mazza et al. 2017; Kepezhinskas et al., 2022c]
Дациты Лагуна Колорада (9)	Верхний плейстоцен (0.3—0.8 млн лет)	Тыловая зона активного вулканического пояса Анд	[Salisbury et al., 2011; Kepezhinskas et al., 2022c]
Массив Бени Боусера (10)	Кристаллизация в мезопротерозое (1200—1400 млн лет); метасоматоз и гранитизация в герцинское время; диапиризм в мезозойское время	Фрагменты субконтинентальной мантии, выведенные в верхние горизонты коры в процессе мезозойской субдукции; супрасубдукционный (орогенный) перидотит-пироксенитовый комплекс	[Gysi et al., 2011; Chetouani et al., 2016; Vannuchi et al., 2020]

океанской плиты под Андийскую активную окраину [Kepezhinskas et al., 2022c]. Только трахиты Аппалачского подвижного пояса (Вирджиния, 8 на рис. 1) образовались за счет мантийных мафитовых магм, выплавившихся в режиме посторогенного растяжения [Kepezhinskas et al., 2022c].

Высокие температуры образования, резко восстановительные условия, нахождение в магматических породах, содержащих высокотемпературные самородные металлы (платина, вольфрам) и сплавы (вольфрам с титаном и кобальтом, платина с железом и хромом), указывают на глубинное первично-магматическое происхождение изученных нами частиц сплавов Cu-Ag-Au. Образование частиц Cu-Ag-Au размером в первые микрометры, а тем более в десятки и сотни микрометров свидетельствует о пересыщении магматических расплавов этими металлами, что приводит к их выделению в виде отдельной фазы сплава Cu-Ag-Au. В высокотемпературных расплавах такое выделение происходит по механизму ликвации и может иметь место как в области генерации субдукционных или плюмажных магм, так и в процессе их эволюции при подъеме к поверхности. Возможность появления и сохранность Cu-Ag-Au ликватов в силикатных расплавах определяется многими факторами, в первую очередь активностью кислорода и серы. Обогащение расплавов серой при фракционировании первичных субдукционных магм в окислительных условиях приводит к связыванию золота в сульфидах [Botcharnikov et al., 2011; Li, Audetat, 2013; Li et al., 2019], в то время как в восстановительных условиях золотосодержащие сплавы будут выделяться и сохраняться в виде самостоятельной фазы. Насыщенные металлами расплавы могли возникнуть в результате смешения магм различного состава, что весьма характерно для субдук-



ционных обстановок [Edmonds et al., 2010; Mandon et al., 2021], в которых формировалось большинство изученных нами объектов (см. таблицу). «Судьба» обособившихся порций сплава Cu-Ag-Au при достижении глубинными расплавами верхних горизонтов земной коры, согласно нашим данным, может быть двоякой. Если транспортирующие их расплавы были насыщены флюидами вплоть до образования флюидолитов, что также типично для субдукционных обстановок, то их участие в вулканической деятельности могло происходить в виде взрывов с образованием аэрозолей силикатных расплавов, включающих микросферы Cu-Ag-Au (эксплозивные брекчии месторождений Мало-Хинганского района). Подобные процессы образования аэрозолей, богатых частицами таких металлов, как золото, серебро, медь и платина, были описаны для извержений 1975—1976 и 2012—2013 гг. влк. Толбачик на Камчатке [Chaplygin et al., 2015; Zelenski et al., 2020] и активных фумарольных выбросов на влк. Колима в Мексике [Taran et al., 2000]. Вулканические аэрозоли влк. Кудрявый в Курильской островной дуге содержат разнообразные выделения сплавов Cu-Ag-Au [Юдовская и др., 2003]. Диспергирование силикатных расплавов могло происходить и при импрегнировании их порций в трещины и полости, раскрывающиеся в процессе прорыва магмы в верхние горизонты коры. В этом случае перепады температур были очень значительны за счет адиабатического расширения газов, что обусловило экстремально быстрое охлаждение и затвердевание микросфер Cu-Ag-Au. Вероятно, именно на этой стадии за счет окисления кислородом воздуха в изначально гомогенных микросферах Cu-Ag-Au появляются микровключения оксида меди. Если же глубинные расплавы не достигали поверхности, то охлаждение и затвердевание порций сплавов Cu-Ag-Au происходило относительно медленно в интерстициях между высокотемпературными породообразующими минералами породы-хозяина, что обусловило их «бесформенный» облик (массив Ильдеус).

Обращает на себя внимание близость состава изученных микрочастиц Cu-Ag-Au всех изученных объектов к среднему составу  $\text{Cu}_{30}\text{Ag}_{10}\text{Au}_{60}$  (см. рис. 3). Как следует из наших данных, такой «универсальный» состав изученных зерен магматического золота не зависит от состава (от ультраосновного до кислого), возраста (от триаса до современного), морфотипа (мантийные рститы, интрузии, брекчии, эффузивы, туфы) и местонахождения (Урал—Саяны—Малый Хинган—Становик—Камчатка—Вирджиния—Боливия—Марокко) вмещающих магматитов. Особенности механизма появления магматического золота такого «универсального» состава требуют дальнейшего изучения, однако любые модели такого механизма, по-видимому, предполагают существование на глубине, соизмеримой с глубиной формирования субдукционных и некоторых внутриплитных расплавов, горизонта, обогащенного Cu, Ag и Au в указанном соотношении.

На основании результатов проведенных исследований предполагается, что одной из основных (наряду с растворенной в силикатных расплавах и минералах) форм транспорта золота в верхние горизонты земной коры являются самородные частички состава Cu-Ag-Au, выделившиеся из обогащенного халькофильными и сидерофильными элементами глубинного силикатного расплава. Образовавшиеся из такого расплава магматические породы могут быть самостоятельными источниками благородных металлов (массив Ильдеус, до 596 г/т золота в форме Cu-Ag-Au сплава; возможно, не измененное специфическим «родингитовым» метасоматозом «протозолото» месторождения Золотая Гора). Магматические породы, претерпевшие гидротермальные изменения, кроме рститовых частиц «первично-магматического» золота Cu-Ag-Au содержат частицы состава Ag-Au, типичного для самородного золота эпitherмальных и мезотермальных месторождений [Gasparini, 1993; Пальянова, 2020]. Мы полагаем, что их образование связано с трансформацией «первично-магматического» золота Cu-Ag-Au в окислительных условиях верхних горизонтов коры. В пользу этого, в частности, свидетельствует интенсивная миграция золота и образование золотых пленок на поверхности медно-золотых сплавов при постепенном повышении потенциала кислорода в экспериментах [Okada et al., 2016]. Окисление сплава Cu-Ag-Au вызывает обеднение его медью, которая выносится и формирует собственные минералы [Berdnikov et al., 2021, 2022]. Неполное окисление сплава Cu-Ag-Au приводит к возникновению медистого золота, которое «является хорошим индикатором, указывающим на возможную генетическую связь золотого оруденения с базит-гипербазитовыми комплексами...» [Гаськов, 2017, с. 1372]. Полное освобождение сплава Cu-Ag-Au от меди, вероятнее всего, происходит при его гидротермальном переотложении с формированием самородных интерметаллидов Ag-Au. Таким образом, «первично-магматическое» золото Cu-Ag-Au может служить одним из источников золота для формирования гидротермальных месторождений, а содержащие его изверженные горные породы могут быть использованы в качестве маркеров для прогноза и поиска как магматических, так и связанных с ними эпitherмальных золоторудных месторождений.

Авторы выражают глубокую благодарность редактору и двум анонимным рецензентам, конструктивные замечания которых позволили существенно улучшить содержание статьи. Мы также благодарны сотрудникам Территориального фонда геологической информации по Дальневосточному округу (г. Хабаровск) за предоставление образцов для исследования Костеньгинского месторождения и коллегам-геологам за помощь при проведении исследований в пределах Ильдеусского массива.

Исследование осуществлено в рамках Госзадания ИТиГ ДВО РАН при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 22-17-00023) с использованием научного оборудования Хабаровского инновационно-аналитического центра ИТиГ ДВО РАН.

#### ЛИТЕРАТУРА

**Анциферова Т.Н.** Петролого-геохимические особенности гипербазитов Оспинского массива (Восточный Саян): Автореф. дис.... к.г.-м.н. Улан-Удэ, ГИН СО РАН, 2006, 27 с.

**Бердников Н.В., Невструев В.Г., Саксин Б.Г.** Источники и условия формирования железо-марганцевой минерализации Буреинского и Ханкайского массивов (Дальний Восток России) // Тихоокеанская геология, 2016, т. 35, № 4, с. 28—39.

**Бердников Н.В., Невструев В.Г., Кепежинская П.К., Крутикова В.О., Коновалова Н.С., Астапов И.А.** Силикатные, железо-оксидные и золото-медь-серебряные микросферулы в рудах и пирокластике Костеньгинского железорудного месторождения (Дальний Восток России) // Тихоокеанская геология, 2021, т. 40, № 3, с. 67—84.

**Гаськов И.В.** Главные элементы-примеси самородного золота и связь их с условиями его образования на примере месторождений складчатых поясов Азии // Геология и геофизика, 2017, т. 58 (9), с. 1359—1376.

**Григорьева А.В., Дамдинов Б.Б., Служеникин С.Ф.** Рудная минерализация в ультрабазитах и метасоматитах Оспинско-Китойского массива (Восточный Саян) // Геология рудных месторождений, 2018, т. 60, № 2, с. 141—163.

**Добрецов Н.Л.** О покровной «тектонике» Восточного Саяна // Геотектоника, 1985, № 1, с. 39—50.

**Киселева О.Н., Агафонов Л.В., Цимбалист В.Г.** Распределение элементов платиновой группы и генезис ультрабазитов, хромитовых руд Оспинско-Китойского и Харанурского массивов (Восточный Саян) // Изв. Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле», 2012, т. 5, № 1, с. 157—175.

**Косарев А.М., Шафигуллина Г.Т., Минибаева К.Р.** Ирландская развитая островная дуга раннеэффузивного возраста: вулканизм, колчеданное оруденение, платиновая минерализация // Геологический вестник, 2020, № 3, с. 84—93.

**Моисеенко В.Г., Дементенко А.И.** Гранатовые перидотиты Малого Хингана и их благороднометаллическая минерализация // ДАН, 2012, т. 444, № 5, с. 545—548.

**Мурзин В.В., Варламов Д.А., Ронкин Ю.Л., Шанина С.Н.** Происхождение золотоносных рудингитов Карабашского массива альпинотипных гипербазитов на Южном Урале // Геология рудных месторождений, 2013, т. 55, № 4, с. 320—341.

**Невструев В.Г., Бердников Н.В., Диденко А.Н., Саксин Б.Г., Лаврик Н.А.** Флюидолиты как источник коренной золото-платиноидной минерализации на примере месторождения Поперечное (Малый Хинган) // ДАН, 2018, т. 482, № 2, с. 202—205.

**Пальянова Г.А.** Минералы золота и серебра в сульфидных рудах // Геология рудных месторождений, 2020, т. 62, № 5, с. 426—449.

**Покровский П.В., Мурзин В.В., Берзон Р.О., Юников Б.А.** К минералогии самородного золота месторождения Золотая Гора // Записки ВМО, 1979, ч. 108 (3), с. 317—326.

**Попова В.И., Белогуб Е.В., Рассомахин М.А., Попов В.А., Хворов П.В.** Минералогия хромитов Поклонной горы Карабашского массива на Южном Урале // Минералогия, 2022, т. 8, № 4, с. 15—33.

**Спиридонов Э.М., Плетнев П.А.** Месторождение медистого золота Золотая гора (О «золото-рудингитовой» формации). М., Научный мир, 2002, 220 с.

**Тектоника**, глубинное строение и минерагения Приамурья и сопредельных территорий / Под ред. Г.А. Шаткова, А.С. Вольского. СПб, Изд-во ВСЕГЕИ, 2004, 190 с.

**Фролова Т.И., Бурикова И.А.** Геосинклинальный вулканизм. М., Изд-во Моск. ун-та, 1977, 279 с.

**Ханчук А.И., Мочалов А.Г., Рассказов И.Ю., Якубович О.В., Бердников Н.В., Невструев В.Г.** Изотопный возраст самородной платины из флюидолитов андезитового состава месторождения Поперечное (Малый Хинган, Россия) // Тихоокеанская геология, 2020, т. 39, № 1, с. 48—52.

**Чудненко К.В., Пальянова Г.А.** Термодинамические свойства твердых растворов в системе Ag—Au—Cu // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (3), с. 449—463.

**Юдовская М.А., Дистлер В.В., Чаплыгин И.В., Мохов А.В., Трубкин Н.В.** Формы нахождения золота в продуктах кристаллизации современных высокотемпературных газовых флюидов вулкана Кудрявый, Курильские острова // ДАН, 2003, т. 391, № 4, с. 535—539.

**Юричев А.Н.** Рудные хромшпинелиды массивов Сыум-Кеу и Харчерузский: химизм и генетическая природа // Руды и металлы, 2017, № 1, с. 51—58.

**Юричев А.Н.** Акцессорная золото-серебряная минерализация из хромититов Харчерузского ультрамафитового массива (Полярный Урал) // Известия Томского политехнического университета, 2021, т. 332 (3), с. 229—236.

**Bell A.S., Simon A., Guillon M.** Gold solubility in oxidized and reduced, water-saturated mafic melt // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2011, v. 75, p. 1718—1732.

**Berdnikov N.V., Nevstruev V.G., Kepezhinskas P.K., Mochalov A.G., Yakubovich O.V.** PGE mineralization in andesite explosive breccias associated with the Poperechny iron-manganese deposit (Lesser Khingan, Far East Russia): Whole-rock geochemical,  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  isotopic, and mineralogical evidence // *Ore Geol. Rev.*, 2020, v. 118, 103352.

**Berdnikov N., Nevstruev V., Kepezhinskas P., Astapov I., Konovalova N.** Gold in mineralized volcanic systems from the Lesser Khingan Range (Russian Far East): textural types, composition and possible origins // *Geosciences*, 2021, v. 11 (2), 103.

**Berdnikov N., Kepezhinskas P., Konovalova N., Kepezhinskas N.** Formation of gold alloys during crustal differentiation of convergent zone magmas: constraints from an Au-rich websterite in the Stanovoy suture zone (Russian Far East) // *Geosciences*, 2022, v. 12 (3), 126.

**Botcharnikov R.E., Linnen R.L., Wilke M., Holtz F., Jugo P.J., Berndt J.** High gold concentrations in sulphide-bearing magma under oxidizing conditions // *Nat. Geosci.*, 2011, v. 4, p. 112—115.

**Chaplygin I., Yudovskaya M., Vergasova L., Mokhov A.** Native gold from volcanic gases at Tolbachik 1975–76 and 2012–13 Fissure Eruptions, Kamchatka // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2015, v. 307, p. 200—209.

**Chapman R.J., Banks D.A., Styles M.T., Walshaw R.D., Piazzolo S., Morgan D.J., Grimshaw M.R., Spence-Jones C.P., Matthews T.J., Borovinskaya O.** Chemical and physical heterogeneity within native gold: implications for the design of gold particle studies // *Miner. Deposita*, 2021, v. 56, p. 1563—1588.

**Chetouani K., Bodinier J.-L., Garrido C.J., Marchesi C., Amri I., Targuisti K.** Spatial variability of pyroxenite layers in the Beni Bousera orogenic peridotite (Morocco) and implications for their origin // *C.R. Geosci.*, 2016, v. 348, p. 619—629.

**Defant M.J., Kepezhinskas P.** Evidence suggests slab melting in arc magmas // *EOS Trans., AGU*, 2001, v. 82 (6), p. 65—68.

**Dobretsov N.L., Konnikov E.G., Dobretsov N.N.** Precambrian ophiolitic belts of Southern Siberia, Russia, and their metallogeny // *Precambrian Res.*, 1992, v. 58, p. 427—446.

**Drummond M.S., Defant M.J., Kepezhinskas P.K.** The petrogenesis of slab-derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas // *Trans. R. Soc. Edinburgh: Earth Sci.*, 1996, v. 87, p. 205—215.

**Edmonds M., Aiuppa A., Humphreys M., Moretti R., Giudice G., Martin R.S., Herd R.A., Christopher T.** Excess volatiles supplied by mingling of mafic magma at an andesite arc volcano // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2010, v. 11, Q04005.

**Egorov E.V., Timofeeva M.W.** Effusive iron-silica formations and iron-ore deposits of the Maly Khingan // *Genesis of Iron and Manganese Deposits. Proc. Kiev Symp. Paris, UNESCO*, 1973, p. 181—185.

**Fiege A., Ruprecht P., Simon A.** A magma mixing redox trap that moderates mass transfer of sulphur and metals // *Geochem. Perspect. Lett.*, 2017, v. 3, p. 190—199.

**Frimmel H.E.** Earth's continental crustal gold endowment // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2008, v. 267, p. 45—55.

**Gammons C.H., Williams-Jones A.E.** Hydrothermal geochemistry of electrum; thermodynamic constraints // *Econ. Geol.*, 1995, v. 90, p. 420—432.

**Garrido C.J., Gueydan F., Booth-Rea G., Precigout J., Hidas K., Padrón-Navarta J.A., Marchesi C.** Garnet lherzolite and garnet-spinel mylonite in the Ronda peridotite: Vestiges of Oligocene backarc mantle lithospheric extension in the western Mediterranean // *Geology*, 2011, v. 39, p. 927—930.

**Gasparrini C.** Gold and other precious metals: from ore to market. Berlin, Heidelberg, Springer, 1993, 336 p.

**Georgatou A.P., Chiaradia M.** Magmatic sulfides in high-potassium calc-alkaline to shoshonitic and alkaline rocks // *Solid Earth*, 2020, v. 11, p. 1—21.

**Greene A.R., DeBari S.M., Kelemen P.B., Blusztain J., Cliff P.D.** A detailed geochemical study of island arc crust: the Talkeetna arc section, South-Central Alaska // *J. Petrol.*, 2006, v. 47, p. 1051—1093.

**Gysi A.P., Jagoutz O., Schmidt M.W., Targuisti K.** Petrogenesis of pyroxenites and melt infiltrations in the ultramafic complex of Beni Bousera, northern Morocco // *J. Petrol.*, 2011, v. 52, p. 1679—1735.

**Hedenquist J.W., Lowenstern J.B.** The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits // *Nature*, 1994, v. 370, p. 519—527.

**Henley R.W., Berger B.R.** Nature's refineries – Metals and metalloids in arc volcanoes // *Earth Sci. Rev.*, 2013, v. 125, p. 146—170.

**Hochstaedter A.G., Kepezhinskas P.K., Defant M.J., Drummond M.S., Bellon H.** On the tectonic significance of arc volcanism in Northern Kamchatka // *J. Geol.*, 1994, v. 102, p. 639—654.

**Holwell D.A., Fiorentini M., McDonald I., Lu Y., Giuliani A., Smith D.J., Keith M., Locmelis M.** A metasomatized lithospheric mantle control on the metallogenic signature of post-subduction magmatism // *Nat. Commun.*, 2019, v. 10, 3511.



**Kepezhinskas N., Kamenov G.D., Foster D.A., Kepezhinskas P.** Petrology and geochemistry of alkaline basalts and gabbroic xenoliths from Utila Island (Bay Islands, Honduras): insights into back-arc processes in the Central American Volcanic Arc // *Lithos*, 2020a, v. 352—353, 105306.

**Kepezhinskas P., Defant M.J.** Contrasting styles of mantle metasomatism above subduction zones: constraints from ultramafic xenoliths in Kamchatka // *Subduction Top to Bottom. AGU Geophys. Monograph Ser.*, 1996, v. 96, p. 307—314.

**Kepezhinskas P.K., Reuber I., Tanaka H., Miyashita S.** Zoned calc-alkaline plutons in Northeastern Kamchatka: implications for the crustal growth in magmatic arcs // *Mineral. Petrol.*, 1993, v. 49, p. 147—174.

**Kepezhinskas P., McDermott F., Defant M.J., Hochstaedter A., Drummond M.S., Hawkesworth C.J., Koloskov A.V., Maury R.C., Bellon H.** Trace element and Sr-Nd-Pb isotopic constraints on a three-component model of Kamchatka Arc petrogenesis // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1997, v. 61, p. 577—600.

**Kepezhinskas P.K., Kepezhinskas N.P., Berdnikov N.V., Krutikova V.O.** Native metals and intermetallic compounds in subduction-related ultramafic rocks from the Stanovoy mobile belt (Russian Far East): Implications for redox heterogeneity in subduction zones // *Ore Geol. Rev.*, 2020b, v. 127, 103800.

**Kepezhinskas P., Berdnikov N., Kepezhinskas N., Konovalova N.** Adakites, high-Nb basalts and copper-gold deposits in magmatic arcs and collisional orogens: an overview // *Geosciences*, 2022a, v. 12, 29.

**Kepezhinskas P., Berdnikov N., Kepezhinskas N., Konovalova N.** Metals in Avachinsky peridotite xenoliths with implications for redox heterogeneity and metal enrichment in the Kamchatka mantle wedge // *Lithos*, 2022b, v. 412—413, 106610.

**Kepezhinskas P., Berdnikov N., Konovalova N., Kepezhinskas N., Krutikova V., Kirichenko E.** Native metals and alloys in trachytes and shoshonite from the continental United States and high-K dacite from the Bolivian Andes: magmatic origins of ore metals in convergent and within-plate tectonic settings // *Russ. J. Pac. Geol.*, 2022c, v. 16 (5), p. 405—426.

**Knight J., Leitch C.H.B.** Phase relations in the system Au-Cu-Ag at low temperatures, based on natural assemblages // *Can. Mineral.*, 2001, v. 39, p. 889—905.

**Kornprobst J.** Le massif ultrabasique des Beni Bouchera (Rif Interne, Maroc): Etude des péridotites de haute température et de haute pression, et des pyroxénolites, à grenat ou sans grenat, qui leur sont associées // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1969, v. 23, p. 283—322.

**Li P., Boudreau A.E.** Vapor transport of silver and gold in basaltic lava flows // *Geology*, 2019, v. 47, p. 877—880.

**Li Y., Audétat A.** Gold solubility and partitioning between sulfide liquid, monosulfide solid solution and hydrous mantle melts: Implications for the formation of Au-rich magmas and crust-mantle differentiation // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2013, v. 118, p. 247—262.

**Li Y., Feng L., Kiseeva E., Gao Z., Guo H., Du Zh., Wang F., Shi L.** An essential role for sulfur in sulfide-silicate melt partitioning of gold and magmatic gold transport at subduction settings // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2019, v. 528, 115850.

**Mandon C.L., Christenson B.W., Seward T.M., Schipper C.I.** Magma mixing, degassing and late sulfide saturation: insights into the 1976–2000 eruptive sequence at White Island, New Zealand // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2021, v. 417, 107299.

**Marchesi C., Griffin W.L., Garrido C.J., Bodinier J.-L., O'Reilly S.Y., Pearson N.J.** Persistence of mantle lithospheric Re-Os signature during asthenospherization of the subcontinental lithospheric mantle: insights from in situ isotopic analysis of sulfides from the Ronda peridotite (Southern Spain) // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2010, v. 159, p. 315—330.

**Marchesi C., Garrido C.J., Bosch D., Bodinier J.-L., Hidas K., Padrón-Navarta J.A., Gervilla F.** A Late Oligocene suprasubduction setting in the westernmost Mediterranean revealed by intrusive pyroxenite dikes in the Ronda peridotite (Southern Spain) // *J. Geol.*, 2012, v. 120, p. 237—247.

**Mazza S.E., Gazel E., Johnson E.A., Bizimis M., McAleer R., Biryol C.B.** Post-rift magmatic evolution of the eastern North American “passive-aggressive” margin // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2017, v. 18, p. 3—22.

**McCulloch M.T., Gamble J.A.** Geochemical and geodynamic constraints on subduction zone magmatism // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1991, v. 102, p. 358—374.

**Mungall J.E.** Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits // *Geology*, 2002, v. 30, p. 915—918.

**Neumann J.P., Zhong T., Chang Y.A.** The Cu-O (Copper-Oxygen) system // *Bull. Alloy Phase Diagrams*, 1984, v. 5, p. 136—140.

**Oen I.S., Kieft C.** Nickeline with pyrrhotite and cubanite exsolutions, Ni-Co rich loellingite and an Au-Cu alloy in Cr-Ni ores from Beni-Bousera, Morocco // *Neues Jahrb. Mineral. Monatsh.*, 1974, p. 1—8.

- Okada M., Tsuda Y., Oka K., Kojima K., Diño W.A., Yoshigoe A., Kasai H.** Experimental and theoretical studies on oxidation of Cu-Au alloy surfaces: effect of bulk Au concentration // *Sci. Rep.*, 2016, v. 6, 31101.
- Pearson D.G., Nowell G.M.** Re–Os and Lu–Hf isotope constraints on the origin and age of pyroxenites from the Beni Bousera peridotite massif: implications for mixed peridotite–pyroxenite mantle sources // *J. Petrol.*, 2004, v. 45, p. 439–455.
- Pokrovski G.S., Akinfiev N.N., Borisova A.Y., Zotov A.V., Kouzmanov K.** Gold speciation and transport in geological fluids: insights from experiments and physical-chemical modelling // *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, 2014, v. 402, p. 9–70.
- Reisberg L., Lorand J.-P.** Longevity of sub-continental mantle lithosphere from osmium isotope systematics in orogenic peridotite massifs // *Nature*, 1995, v. 376, p. 159–162.
- Rosa D.R.N.** The incompatible behavior of gold in reduced magmas: A working hypothesis // *Comun. Geol.*, 2005, v. 92, p. 75–78.
- Salisbury M.J., Jicha B.R., de Silva S.L., Singer B.S., Jiménez N.C., Ort M.H.**  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  chronostratigraphy of Altiplano-Puna volcanic complex ignimbrites reveals the development of a major magmatic province // *GSA Bull.*, 2011, v. 123, p. 821–840.
- Saunders J.E., Pearson N.J., O'Reilly S.Y., Griffin W.L.** Gold in the mantle: a global assessment of abundance and redistribution processes // *Lithos*, 2018, v. 321, p. 376–391.
- Schettino E., Marchesi C., González-Jiménez J.M., Saunders E., Hidas K., Gervilla F., Garrido C.J.** Metallogenic fingerprint of a metasomatic lithospheric mantle feeding gold endowment in the western Mediterranean basin // *GSA Bull.*, 2022, v. 134, p. 1468–1484.
- Shimizu Y., Shoji A., Morishita T., Yurimoto H., Gervilla F.** Petrochemical characteristics of felsic veins in mantle xenoliths from Tallante (SE Spain): an insight into activity of silicic melt within the mantle wedge // *Trans. R. Soc. Edinburgh: Earth Sci.*, 2004, v. 95 (1) p. 265–276.
- Simon A.C., Frank M.R., Pettke T., Candela P.A., Piccoli P.M., Heinrich C.A.** Gold partitioning in melt-vapor-brine systems // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2005, v. 69, p. 3321–3335.
- Simon G., Kesler S.E., Russell N., Hall C.M., Bell A., Piñero E.** Epithermal gold mineralization in an old volcanic arc: The Jacinto Deposit, Camagüey District, Cuba // *Econ. Geol.*, 1999, v. 94, p. 487–506.
- Sisson T.W.** Native gold in a Hawaiian alkaline magma // *Econ. Geol.*, 2003, v. 98, p. 643–648.
- Smith W.H., Sandwell D.T.** Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings // *Science*, 1997, v. 277, p. 1956–1962.
- Taran Y.A., Bernard A., Gavilanes J.C., Africano F.** Native gold in mineral precipitates from high-temperature volcanic gases of Colima volcano, Mexico // *Appl. Geochem.*, 2000, v. 15, p. 337–346.
- Tassara S., González-Jiménez, J., Reich M., Schilling M.E., Morata D., Begg G., Saunders E., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Grégoire M., Barra F., Corgne A.** Plume-subduction interaction forms large auriferous provinces // *Nat. Commun.*, 2017, v. 8 (1), 843.
- Van der Wal D., Vissers R.L.M.** Uplift and emplacement of upper-mantle rocks in the Western Mediterranean // *Geology*, 1993, v. 21, p. 1119–1122.
- Van der Wal D., Vissers R.L.M.** Structural petrology of the Ronda peridotite, SW Spain: Deformation history // *J. Petrol.*, 1996, v. 37, p. 23–43.
- Vannuchi P., Morgan J.P., Polonia A., Molli G.** The life cycle of subcontinental peridotites: from rifted margins to mountains via subduction processes // *Geology*, 2020, v. 48, p. 1154–1158.
- Wang Z., Cheng H., Zong K., Geng X., Liu Y., Wu F., Becker H., Foley S., Yan Wang C.** Metasomatized lithospheric mantle for Mesozoic giant gold deposits in the North China craton // *Geology*, 2019, v. 48, p. 169–173.
- Wilde S.A., Wu F.Y., Zhao G.** The Khanka Block, NE China, and its significance for the evolution of the Central Asian Orogenic Belt and continental accretion // *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, 2010, v. 338, p. 117–137.
- Wise J.** Gold recovery, properties and applications. The Netherlands, D. Van Nostrand Company, 1964, 167 p.
- Witney D.L., Evans B.W.** Abbreviations for names of rock-forming minerals // *Am. Mineral.*, 2010, v. 95, p. 185–187.
- Zelenski M., Kamenetsky V.S., Taran Yu., Kovalskii A.M.** Mineralogy and origin of aerosol from an arc basaltic eruption: case study of Tolbachik volcano, Kamchatka // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2020, v. 21, e2019GC008802.
- Zhang Z., Mao J., Wang F., Pirajno F.** Native gold and native copper grains enclosed by olivine phenocrysts in a picrite lava of the Emeishan large igneous province, SW China // *Am. Mineral.*, 2006, v. 98, p. 643–648.