

И.С. ЛИТВИНЕНКО, Л.А. ШИЛИНА

Геохимические особенности самородного золота Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла (Северо-Восток России)

Приведены результаты микрорентгеноспектральных исследований самородного золота рудных золото-редкометалльных проявлений и связанных с ними россыпных месторождений Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла, расположенного в восточной части Яно-Колымского золотоносного пояса. В целом по частоте встречаемости микропримесных элементов оно является висмутисто-медисто-ртутисто-теллуристым. По уровню концентраций определяющие типоморфные примеси – Bi, Te и Hg. В висмут-сульфотеллуридном минеральном типе руд преобладают высокопробные выделения самородного золота, в которых ведущую, индикаторную, роль играют примеси Fe, Cu и Bi. Для сульфидно-сульфоарсенидного типа руд характерны умеренно низкопробные и среднепробные его образования с повышенными содержаниями Pb, Se и Te. Низкопробное и весьма низкопробное золото серебро-полисульфидного минерального типа оруденения отличается повышенными концентрациями Te, Sb, As и Zn. По мере удаления от рудогенерирующей гранитной интрузии отмечается тенденция уменьшения железистости и висмутистости и возрастания серебртости, сурьмянистости, ртутистости и теллуристости самородного золота в рудах.

Ключевые слова: Северо-Восток России, золото-редкометалльное оруденение, минеральные типы, самородное золото, химический состав, примеси.

Geochemical features of native gold of the Lower Myakit ore-placer node (Northeast of Russia).
I.S. LITVINENKO (N.A. Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute, FEB RAS, Magadan),
L.A. SHILINA (Magadan Regional Museum of Local Lore, Magadan).

The article presents the results of X-ray spectral microanalyses of native gold from ore occurrences and associated placers in the Lower Myakit ore-placer node located in the eastern part of the Yana-Kolyma ore-bearing belt. In terms of the frequency of occurrence of impurity elements, the native gold is bismuth-cuprous-mercury-telluric gold. In terms of the concentration level, the determining typomorphic impurities are Bi, Te and Hg. In the bismuth-sulfotelluride type of ores, high fineness native gold separations prevail, with Fe, Cu and Bi impurities playing an indicator role. Characteristic for the sulfide-sulfoarsenide ore type are moderately lower fineness and medium fineness formations with higher grades of Pb, Se and Te. Lower and extremely lower fineness gold of the silver-polysulfide type of mineralization contains higher concentrations of Te, Sb, As and Zn. With distance from the ore-generating granite intrusion, bismuth and iron contents tend to lessen while silver, antimony, mercury, and tellurium grades in the ore native gold, tend to increase.

Key words: Northeast of Russia, gold-rare-metal mineralization, mineral types, native gold, chemical composition, impurities.

Введение

Основные золоторудные проявления Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла относятся к золото-редкометалльному формационному типу. На Северо-Востоке

*ЛИТВИНЕНКО Иван Степанович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник (Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, Магадан), ШИЛИНА Любовь Анатольевна – экскурсовод 1-й категории (Магаданский областной краеведческий музей, Магадан). *E-mail: litvinenko@neisri.ru

России золото-редкометалльные объекты с экономической точки зрения долгое время считались неинтересными или с неясными перспективами. Это определило низкую интенсивность поисковых работ на данный вид проявлений и относительно слабую их изученность. В последние десятилетия положительные примеры выявления и эксплуатации золото-редкометалльных месторождений (группа Reduced Intrusive-Related Gold Deposits [21–25 и др.]) способствовали активизации поисково-оценочных работ на объектах золото-редкометалльного типа.

Вследствие относительно слабой изученности золото-редкометалльных проявлений на Северо-Востоке России описание типоморфных свойств распространенного в них самородного золота в большинстве ранних публикаций носило лишь самый общий характер. Появившиеся в последующие годы материалы по золото-редкометалльным месторождениям [2, 3, 20 и др.] показали, что они отличаются широким разнообразием типоморфных свойств самородного золота. Поэтому выявление типоморфных признаков самородного золота на новых золото-редкометалльных объектах, безусловно, представляется актуальным, так как способствует установлению особенностей формирования различных минеральных типов золото-редкометалльного оруденения, входящего в состав различных рудно-формационных рядов.

Изучение типоморфных свойств самородного золота в рудных проявлениях Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла проводится с конца XX в. Его гранулометрический состав и пробность на исследованных участках развития оруденения рассматривались в работах Н.А. Горячева и П.П. Колесниченко [6], Н.Е. Саввы с соавторами [17], В.М. Кузнецова с соавторами [9], авторов настоящей статьи [11, 18 и др.]. Н.Н. Поздняковой с соавторами [15] охарактеризованы типоморфные признаки выделенных ими трех разновидностей самородного золота, распространенных в разных частях рудного интервала. Цель настоящей работы – выявление геохимических особенностей самородного золота минеральных типов золото-редкометалльного оруденения, развитого в пределах Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла.

Методика работ

Исследованное самородное золото извлечено из штучных и шлиховых проб, отобранных в ходе полевых работ 2008–2012 гг. Шлиховые концентраты получены после промывки на лотке рыхлого материала из реликтов отработанных россыпных месторождений и коллювиальных образований, перекрывающих рудные тела. Самородное золото из них извлекалось под биноклем. Раздробленный до 1,0 мм материал штучных проб последовательно растворялся в плавиковой и азотной кислотах. После каждой стадии растворения из полученного остатка проводился отбор зерен золота под биноклем.

Содержание элементов в зернах самородного золота из руд и россыпей (геохимический состав) определялось в монтированных аншлифах методом локального микрорентгено-спектрального анализа на микронзондовом анализаторе Camebax SX 100 фирмы Cameca (ГЕОХИ РАН, г. Москва, аналитик Н.Н. Кононкова). Анализ выполнялся на Au, Ag, Cu, Bi, Pb, Hg, Sb, Te, Fe, Zn, Se, As. Условия анализа: ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток зонда – 50 нА, диаметр пучка зонда 3–5 мкм. В качестве эталонов использованы: Au – Au металлическое; Ag, Te – гессит; Cu, Fe – халькопирит; Hg – колорадоит; Bi – Bi металлический; Pb – галенит; Zn – сфалерит; Sb – стибнит; As – арсенопирит; Se – CdSe (синтетический). Предел обнаружения элементов – 0,01 масс. %.

Всего проанализировано 196 гипогенных выделений самородного золота из двух рудных проявлений и шести россыпных месторождений. Кроме того, использованы результаты исследований 68 зерен самородного золота из рудных проявлений Фронт и Плацдарм, выполненных в ГЕОХИ РАН (аналитик Н.Н. Кононкова) на микронзондовом анализаторе

Сamebax SX 100 в ходе проведения на этих рудопроявлениях поисковых работ*. Содержание примесных элементов в зернах определялось как среднее из 2–3 микронзондовых анализов. Результаты обрабатывались с использованием пакета прикладных программ Leader (разработка Информационно-вычислительного центра ПГО «Севзапгеология»).

Приведенные в характеристике рудных проявлений и россыпных месторождений узла общие данные по лигатурной пробности распространенного в них самородного золота получены на микронзондовом анализаторе Samebax № 304, дополнительно укомплектованном энергодисперсионным спектрометром X-Max 50 фирмы Oxford Instruments, программное обеспечение Inca Energy (СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан, аналитики Т.В. Субботникова и Е.М. Горячева).

Геология исследованных рудных проявлений и россыпных месторождений Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла

Нижне-Мякитский (Лево-Мякитский) рудно-россыпной узел входит в состав Хурчан-Оротуканской золотоносной зоны юго-восточной части Яно-Колымского золотоносного пояса. В тектоническом отношении он расположен на участке юго-восточного замыкания Яно-Колымской складчатой системы Верхояно-Чукотской складчатой области вблизи ее границы с Охотско-Чукотским вулканогенным поясом (рис. 1).

Рудно-россыпной узел приурочен к Берентальскому штоку и восточному крылу одноименной интрузивно-купольной структуры. Берентальский шток сложен лейкократовыми средне- и мелкозернистыми гранитами. По последним данным [8], они относятся к гранитам S-типа коллизионной природы и включены в позднеюрско-раннемеловой гранитовый плутонический Каньонский комплекс. На восточном крыле Берентальской структуры развиты раннетриасовые отложения, представленные глинистыми и песчано-глинистыми сланцами, алевролитами и аргиллитами с маломощными горизонтами песчаников.

В пределах Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла установлено более 60 точек минерализации и мелких рудных проявлений. Геохимический состав самородного золота изучался на рудопроявлениях Фронт и Плацдарм (см. рис. 1) и россыпных месторождениях.

Рудопроявление Фронт расположено в южной части Берентальского штока. Оно представлено субгоризонтальными рудными зонами сульфидно-кварцевого прожилкования и березитизации, приуроченными к пологозалегающим силлообразным телам в различной степени грейзенизированных и березитизированных гранит-порфиоров. Богатая золоторудная минерализация связана с сульфидно-кварцевыми жилами и прожилками.

В исследованной авторами штучной пробе из сульфидно-кварцевой жилы среди рудных минералов преобладают арсенопирит и лёллингит. В небольшом количестве отмечаются пирит и железистый сфалерит. В качестве микровключений, в основном в лёллингите, реже в арсенопирите, выявлены округлые выделения пирротина. Незначительную долю составляют висмутовые минералы, представленные самородным висмутом, висмутином, сульфотеллуридами висмута переменного состава и мальдонитом. Среди них преобладают сульфотеллуриды висмута и мальдонит. Исследованное на рудопоявлении Фронт оруденение по классификации Н.А. Горячева и Г.Н. Гамянина [7] может быть отнесено к висмут-сульфотеллуридному минеральному типу.

Размер зерен золота в исследованной пробе не превышает 0,5 мм. Отмечаются две разновидности золотин: монолитные и губчатые (ветвисто-пористые) с оксидами висмута. Монолитные золотины, представляющие собой гипогенные образования самородного

*Шерстобитов П.А. Отчет о результатах поисковых работ, выполненных в 2016–2018 гг. в пределах прогнозируемого Берентальского рудного поля Мякитской перспективной площади (Магаданская область). Лицензия МАГ 04307 БП. Магадан, 2018. Инв. № 25520.

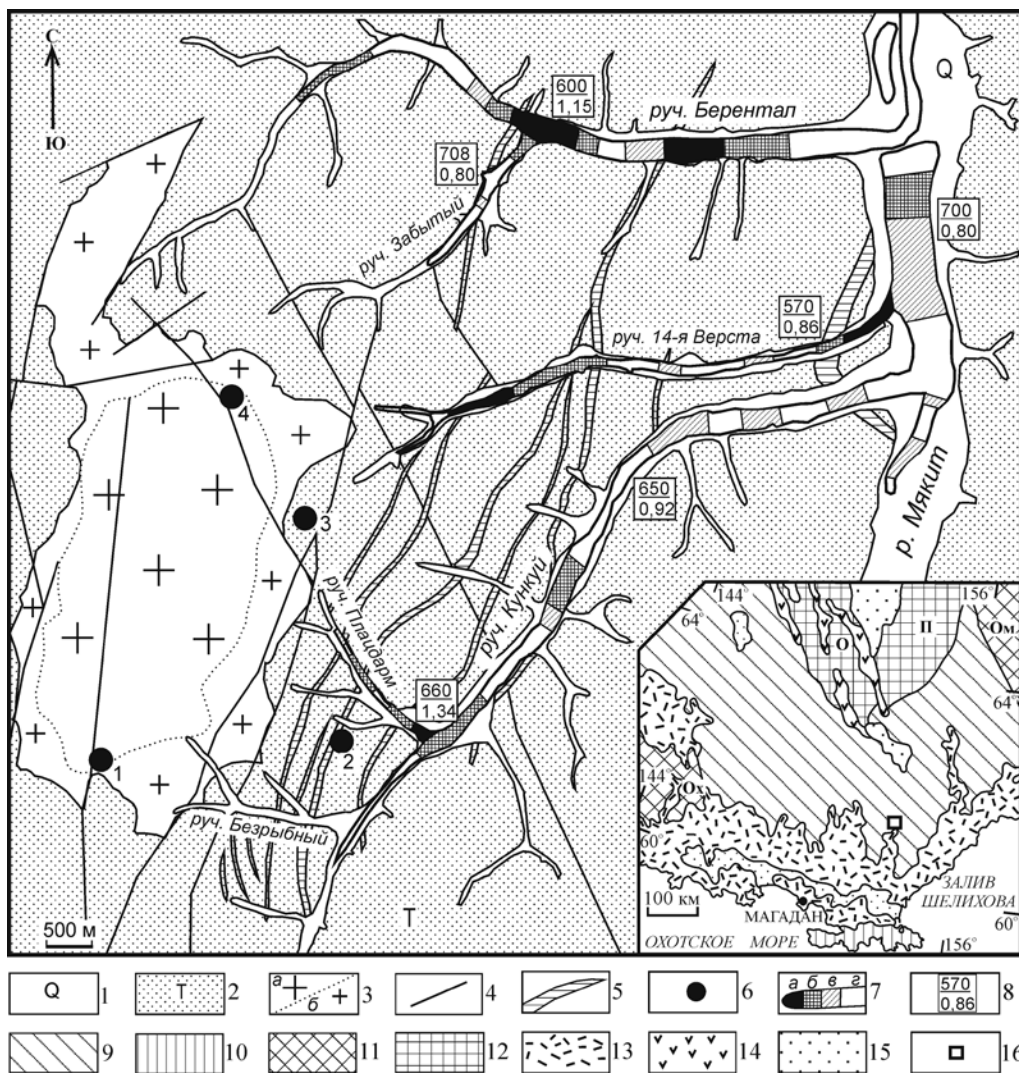


Рис. 1. Геологическая схема Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла. Схема составлена на геологической основе [В.В. Бурзайкин, 1995 г.], с дополнениями и упрощениями.

1 – четвертичные аллювиальные отложения речных долин; 2 – триасовые терригенные и вулканогенно-терригенные отложения Балыгычанского поднятия Яно-Кольмской складчатой системы; 3 – позднеюрско-раннемеловые среднезернистые (а) и мелкозернистые (б) биотитовые граниты Берентальского штока; 4 – разрывные нарушения; 5 – минерализованные зоны дробления с прожилково-жильным окварцеванием и вкрапленно-прожилковой рудной минерализацией; 6 – золоторудные проявления (1 – Фронт, 2 – Плацдарм, 3 – Палатка, 4 – Берентал); 7 – контуры россыпей с очень богатыми (а), богатыми (б), относительно богатыми (в) и бедными (г) участками; 8 – средняя пробность (над чертой) и средняя крупность (под чертой) самородного золота в россыпях по разведочным данным. Обозначения на врезке: 9, 10 – Верхояно-Чукотская (9) и Корьяско-Камчатская (10) складчатые области; 11 – Охотский (Ох) и Омолонский (Ом) срединные массивы; 12 – Омутевское (О) и Приколымское (П) поднятия; 13, 14 – Охотско-Чукотский (13) и Уяндино-Ясачненский (14) вулканогенные пояса; 15 – наложенные кайнозойские впадины; 16 – местоположение Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла

золота, отложившиеся из рудоносных растворов, в количественном отношении преобладают. Пробность их колеблется от 866 до 1000 % [18]. Губчатые зерна присутствуют в меньшем количестве. Сложены они золотом пробностью около 1000 % и, вероятно, образовались в результате гипогенного разложения мальдонита. В статистическую обработку были включены результаты анализов монолитного самородного золота.

Рудопроявление Плацдарм локализовано в триасовых терригенных отложениях на восточном крыле Берентальской интрузивно-купольной структуры (см. рис. 1). Прогнозируемые рудные тела представляют собой протяженные зоны смятия с элементами брекчирования пород, сопровождающиеся прожилково-жильным окварцеванием. Местами в них отмечаются участки развития тонкой вкрапленности сульфидов, системы сульфидно-кварцевых прожилков, гнезд и прожилков сульфидов.

В опробованной авторами системе сульфидных прожилков в междуречье Плацдарм–Безрыбный мощность прожилков составляет до 5 см. Сложены они арсенопиритом. В нем в виде вкрапленности отмечаются халькопирит, сфалерит и ковеллин. Спектральным анализом в материале прожилков помимо железа и мышьяка установлены сурьма (до 146 г/т), свинец (до 188 г/т), висмут (до 22 г/т), олово (до 20 г/т), медь (до 199 г/т), цинк (до 166 г/т), кобальт (до 166 г/т), а атомно-абсорбционным анализом – золото (до 2 г/т) и серебро (до 24 г/т). Размер выделенных из штучной пробы зерен золота не превышает 0,1 мм. Пробность их колеблется от 640 до 843 %, средняя составляет 724 %. В небольшом количестве присутствует высокопробное «горчичное» золото.

По минеральному составу охарактеризованное оруденение нами отнесено к сульфидно-сульфоарсенидному минеральному типу золото-редкометалльной формации (по классификации Н.А. Горячева и Г.Н. Гамянина [7] это висмут-арсенидно-сульфоарсенидный тип).

В статистическую обработку были включены результаты анализов монолитного самородного золота, выделенного из штучной пробы. Кроме того, использованы анализы золота, извлеченного из копушных шлиховых проб по коллювиальным отложениям в междуречье Плацдарм–Безрыбный. В тяжелой фракции шлиховых проб резко преобладают гидроксиды железа. В отдельных пробах в незначительном количестве отмечается пирит, в единичных зернах присутствуют халькопирит, сфалерит, сульфосоли серебра (?). Спектральный анализ тяжелой фракции шлихов помимо железа показал наличие в ней мышьяка (до 4433 г/т), свинца (до 276 г/т), молибдена (до 24 г/т), олова (до 22 г/т), меди (до 183 г/т), цинка (до 825 г/т), никеля (до 447 г/т), кобальта (до 203 г/т), золота (до 5 г/т) и серебра (до 3 г/т). По пробности выделяются две группы золота: низко-среднепробная (600–850 %) и весьма низкопробная (450–600 %). Наличие в коллювиальных образованиях весьма низкопробной группы указывает на присутствие золота из верхних эпипермаль-ных частей золото-редкометалльной рудной системы.

Россыпные месторождения располагаются в долинах р. Мяжит и ее левых притоков (см. рис. 1). Долины ручьев хорошо разработаны, корытообразной формы. Поверхность их коренного ложа зачастую неровная, с многочисленными западинами. Выполняющие долины рыхлые отложения представлены аллювием, подстилающим его долинным элювием (реликты линейной коры химического выветривания) и развитыми у бортов склоновыми образованиями.

Россыпи залегают преимущественно в пойменной части долин. Богатые участки в них располагаются в местах пересечения долинами рудоносных зон дробления (см. рис. 1). Золотоносный пласт приурочен к реликтовым образованиям коры выветривания и нижним горизонтам аллювия. Основная масса тяжелой фракции шлихов представлена оксидами и гидроксидами железа, гематитизированными и лимонитизированными обломками пород. В незначительном количестве отмечаются оксиды марганца, пирит, галенит, сфалерит, молибденит, арсенопирит, касситерит, шеселит, вольфрамит, ильменит, халькопирит, антимонит, пирротин, халькозин, акантит, самородные золото, медь, серебро, висмут.

Средняя крупность золота в россыпях варьирует от 0,86 до 1,34 мм, средняя пробность – от 570 до 700 % (см. рис. 1). Доля неокатанных зерен золота по месторождениям составляет до 76 %. У большого количества золотин (до 92 %) наблюдаются высокопробные гипергенные оболочки.

Залегание продуктивных пластов главным образом в реликтах линейной коры химического выветривания, широкое распространение в золоте гипергенных преобразований,

очень слабая степень его обработки указывают на остаточно-аллювиальный генезис россыпных месторождений узла. Коренными источниками россыпей послужили следующие минеральные типы золото-редкометалльного оруденения: серебро-полисульфидный с низкопробным, сульфидно-сульфоарсенидный с умеренно низкопробным-среднепробным и висмут-сульфотеллуридный с высокопробным золотом [10].

Геохимические особенности самородного золота золото-редкометалльного оруденения Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла

По результатам выполненного анализа в самородном золоте помимо Ag установлено 10 примесных (микропримесных) элементов, из которых наиболее распространены Te. Он обнаружен в 95 % исследованных золотинок. Часто отмечаются Hg, Cu, Bi и Fe, относительно часто – As и Sb. Реже встречаются Se, Zn, Pb (табл. 1).

Концентрации микропримесных элементов в самородном золоте рудных проявлений и россыпных месторождений Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла составляют сотые и десятые доли процента. Для большинства обнаруженных в золотинок элементов распределение их содержаний лучше аппроксимируется логнормальным законом. Наибольшие вариации содержаний характерны для Pb, Sb, Zn, наименьшие – для Te, Cu, Hg. Дисперсии натуральных логарифмов содержаний всех микропримесных элементов меньше 1,0. Это свидетельствует о том, что они входят в состав самородного золота не на минеральном (в виде микровключений минералов), а на геохимическом уровне [19].

Выполненные ранее исследования геохимического состава самородного золота золото-редкометалльных месторождений Северо-Востока России показали, что они характеризуются либо очень чистым, беспримесным золотом [20], либо золотом с ярко выраженной висмутистостью [5]. Самородное золото рудных и россыпных объектов Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла по частоте встречаемости в нем элементов-микропримесей является висмутисто-медисто-ртутисто-теллуристым (см. табл. 1). Медь и ртуть весьма широко распространены в золоте рудных и россыпных месторождений Яно-Колымского золотоносного пояса [5]. Поэтому типоморфными для самородного золота Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла определенно можно считать висмут и теллур.

В установленных рудных проявлениях Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла среди висмутовой минерализации обнаружен мальдонит [18], для отложения которого благоприятны малосернистые, теллуридные гидротермальные растворы [4]. На основании этого теллуристость самородного золота можно считать вполне закономерной для золото-редкометалльного оруденения Нижне-Мякитского узла. Она подтверждается составом самородного золота в рудных проявлениях узла, приведенным в работе Н.Н. Поздняковой с соавторами [15].

По уровню концентрации главными микропримесями в самородном золоте золото-редкометалльного оруденения Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла являются Bi, Te и Hg (см. табл. 1). При этом определяющую типоморфную нагрузку несут Bi и Te. Повышенное содержание в золоте ртути, очевидно, отражает региональную геохимическую обстановку и сложный многостадийный характер развития оруденения с большой долей «эпитермального» золота [14].

Частота встречаемости и содержание элементов-примесей в самородном золоте по простиранию россыпных месторождений сильно изменяется (рис. 2). Это указывает на многочисленность и разнотипность их коренных источников, распространенных на всем протяжении россыпей, и сложный характер их взаимоотношений на площади узла. В целом можно говорить о сурьмянистости и селенистости самородного золота в северной и восточной, свинцовистости и ртутистости – в южной, железистости и висмутистости – в западной частях Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла.

Таблица 1

Элементы-микроримеси в самородном золоте рудных проявлений и россыпных месторождений Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла

Объект	Пробность золота, %	Частота встречаемости, %									
		Fe	As	Cu	Pb	Zn	Sb	Bi	Te	Se	Hg
Рудопроявления Фронт (34) Плацдарм (54) Плацдарм, колловый (11) Россыпи руч. Кункуй (34) руч. Плацдарм (22) руч. 14-я Верста (28) руч. Забытый (14) руч. Беренгал (38) р. Мякит (29) Среднее взвешенное	870	64	38	94	26	21	68	71	94	27	100
	660	56	31	94	17	20	37	61	94	44	80
	662	55	55	45	64	27	18	55	82	36	82
	701	74	47	65	35	32	32	62	94	21	79
	703	68	59	55	27	36	41	64	91	27	73
	600	54	57	54	29	29	39	71	100	36	89
	749	50	43	79	7	29	36	64	93	57	93
	559	42	58	76	16	34	66	71	100	61	71
	670	55	45	62	24	28	55	62	100	24	72
	682	57	46	74	25	28	46	65	95	37	81
Содержание, масс. %											
Рудопроявления Фронт (34) Плацдарм (54) Плацдарм, колловый (11) Россыпи руч. Кункуй (34) руч. Плацдарм (22) руч. 14-я Верста (28) руч. Забытый (14) руч. Беренгал (38) р. Мякит (29) Среднее взвешенное	0,11 / 0,05	0,55 / 0,03	0,21 / 0,04	0,12 / 0,03	0,06 / 0,01	0,19 / 0,03	0,28 / 0,09	0,15 / 0,06	0,03 / 0,01	0,49 / 0,14	
	0,10 / 0,04	0,12 / 0,03	0,34 / 0,04	0,20 / 0,03	0,04 / 0,02	0,10 / 0,03	0,33 / 0,06	0,25 / 0,08	0,03 / 0,02	0,42 / 0,11	
	0,10 / 0,04	0,17 / 0,05	0,14 / 0,05	0,35 / 0,10	0,12 / 0,06	0,14 / 0,07	0,18 / 0,06	0,26 / 0,12	0,05 / 0,02	0,45 / 0,13	
	0,04 / 0,02	0,09 / 0,03	0,08 / 0,04	0,15 / 0,04	0,09 / 0,03	0,13 / 0,04	0,15 / 0,05	0,23 / 0,12	0,07 / 0,01	0,94 / 0,30	
	0,06 / 0,03	0,17 / 0,05	0,07 / 0,04	0,34 / 0,07	0,07 / 0,03	0,25 / 0,04	0,29 / 0,10	0,26 / 0,11	0,03 / 0,01	0,78 / 0,37	
	0,12 / 0,03	0,15 / 0,05	0,13 / 0,04	0,13 / 0,04	0,08 / 0,04	0,14 / 0,06	0,18 / 0,06	0,25 / 0,10	0,12 / 0,02	0,42 / 0,24	
	0,08 / 0,02	0,08 / 0,04	0,08 / 0,04	0,04 / 0,01	0,04 / 0,02	0,08 / 0,04	0,21 / 0,08	0,23 / 0,09	0,06 / 0,02	0,42 / 0,15	
	0,10 / 0,04	0,16 / 0,06	0,13 / 0,04	0,09 / 0,04	0,03 / 0,02	0,44 / 0,08	0,19 / 0,06	0,25 / 0,14	0,06 / 0,02	0,36 / 0,17	
	0,06 / 0,02	0,16 / 0,04	0,08 / 0,04	0,13 / 0,05	0,09 / 0,03	0,18 / 0,04	0,32 / 0,07	0,33 / 0,12	0,05 / 0,01	0,76 / 0,22	
	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,07	0,10	0,03	0,18	

Примечание. В скобках указано количество (шт.) исследованных золотин. В числителе – максимальное, в знаменателе – среднее содержание элементов-примесей.

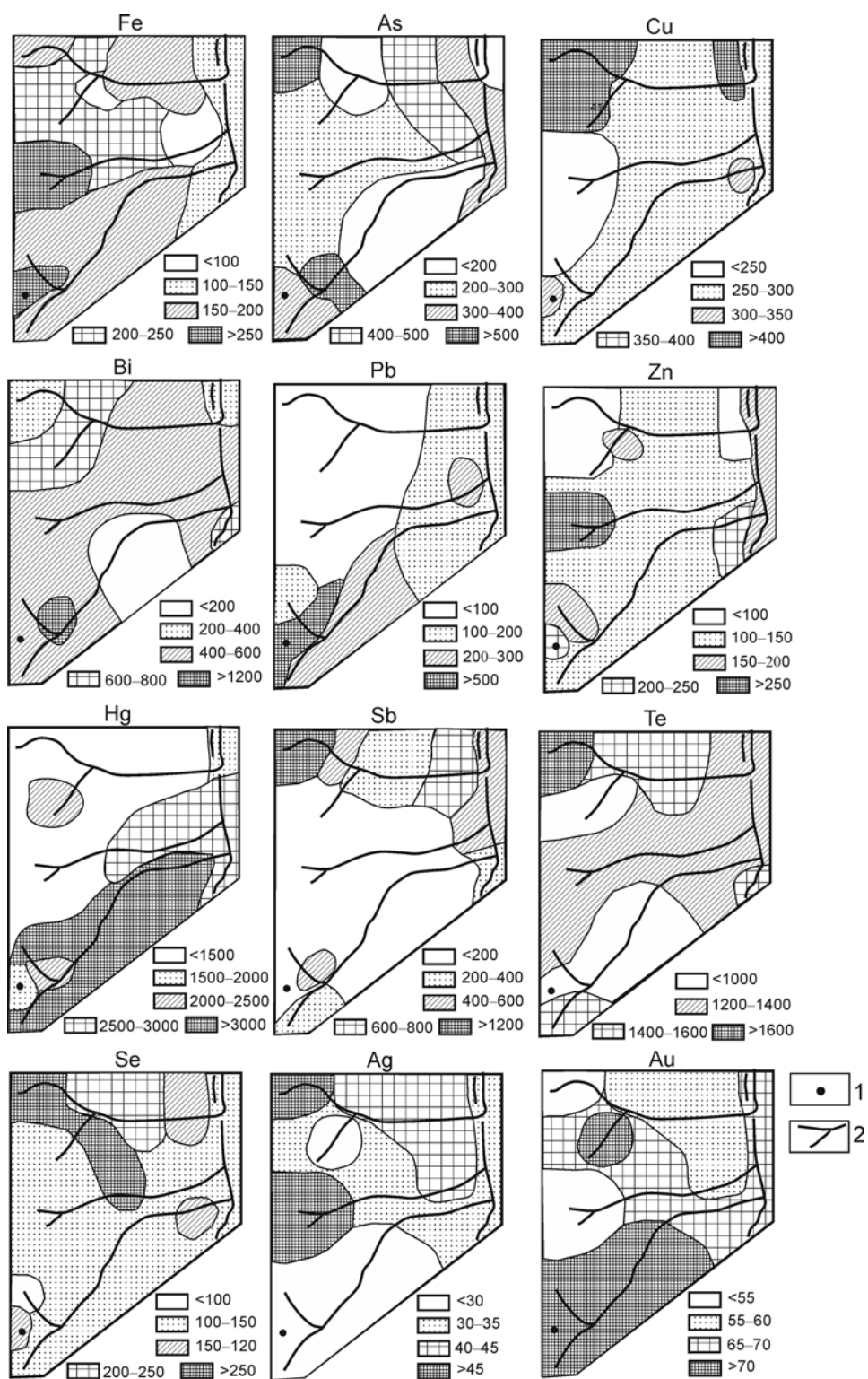


Рис. 2. Схема распределения средних содержаний элементов в самородном золоте россыпей Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла.

1 – местоположение коллювиальной россыпи Плацдарм; 2 – аллювиальные россыпные месторождения золота. Содержания Fe, As, Cu, Bi, Te, Se, Hg, Pb, Zn, Pb, Sb – в г/т, Ag, Au – в масс.%

Геохимические особенности самородного золота минеральных типов золото-редкометалльного оруденения Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла

В россыпных месторождениях Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла достаточно определено были выделены три группы самородного золота: высокопробная (850–1000 ‰), умеренно низкопробная-среднепробная (700–850 ‰) и низкопробная (350–700 ‰). Их связь соответственно с висмут-сульфотеллуридным, сульфидно-арсенидным и серебро-полисульфидным типами золото-редкометалльной минерализации [10] позволяет рассматривать данные группы золота как генерации, а их геохимические особенности как типоморфную характеристику самородного золота соответствующих минеральных типов золото-редкометалльного оруденения.

На основании вышеизложенного проанализированное рудное и россыпное золото было объединено в три генерации: низкопробную (золотины пробностью 350–700 ‰), умеренно низкопробную-среднепробную (700–850 ‰) и высокопробную (850–1000 ‰).

Статистическая обработка геохимических характеристик самородного золота рассматриваемых генераций показала, что минеральные типы распространенного в пределах Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла золото-редкометалльного оруденения различаются как по частоте встречаемости в самородном золоте примесных элементов, так и по уровню их концентраций (табл. 2).

Расчет «геохимических паспортов» позволил более строго и определенно выявить геохимические особенности самородного золота рассматриваемых минеральных типов оруденения. В основу расчетов «геохимических паспортов» положено определение показателя «нормированное отклонение содержания элементов в данной выборке» (Δ), рассчитываемого по формуле:

$$\Delta = (C_v - C_o) / \sigma,$$

где C_v и C_o – соответственно средние значения логарифмов концентраций элемента в данной выборке и в остальной части проб, σ – стандартное отклонение логарифмов концентраций элемента во всей совокупности проб. По этому показателю оценивается индикаторная роль элементов в рассматриваемых выборках геохимических характеристик. Если среднее содержание элемента в выборке превышает его среднее содержание в остальной части проб, то показатель нормированного отклонения имеет положительное значение. Чем выше этот показатель, тем более высокую индикаторную роль играет элемент в данной выборке. Диаграмма нормированных отклонений содержаний элементов в выборке является своеобразным «геохимическим паспортом», определяющим ее геохимическую индивидуальность.

Согласно «геохимическим паспортам» наибольшей насыщенностью примесными элементами характеризуется низкопробное самородное золото серебро-полисульфидного минерального типа (рис. 3). Оно отличается повышенными содержаниями Te, Sb, As, Zn, а также Hg и Se. В умеренно низкопробном-среднепробном самородном золоте сульфидно-сульфоарсенидного минерального типа руд по уровню концентраций ведущую, индикаторную, роль играют примеси Pb, Se и Te. Присущая висмут-сульфотеллуриднему минеральному типу оруденения высокопробная генерация самородного золота характеризуется повышенными содержаниями в золотилах Fe, Cu и Bi.

От висмут-сульфотеллуридного типа оруденения центральных частей связанной с Берентальской интрузией золоторудной системы (по К.Дж.Р. Харту [22], зона с Au-Bi-Te±W «стилем» минерализации) к сульфидно-сульфоарсениднему (зона с As-Au (As-Sb-Au) «стилем» минерализации) и серебро-полисульфидному (зона с Ag-Pb-Zn «стилем» минерализации) минеральным типам руд средней и периферийной частей рудной системы отмечается закономерное уменьшение в самородном золоте средних содержаний железа и

Таблица 2

Элементы-микропримеси в самородном золоте минеральных типов золото-редкометалльного оруденения Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла

Минеральный тип оруденения	Пробность золота, %	Fe	As	Cu	Pb	Zn	Sb	Bi	Te	Se	Hg
		Частота встречаемости, %									
Серебро-полисульфидный (110)	541	52	56	66	25	34	38	67	99	39	75
Сульфидно-сульфоарсенидный (104)	732	64	43	74	23	25	43	66	91	37	82
Висмут-сульфотеллуридный (50)	887	55	48	90	26	20	70	58	96	27	94
Среднее взвешенное	682	57	46	74	25	28	46	65	95	37	81
		Содержание, масс. %									
Серебро-полисульфидный (110)		0,01-0,12 0,02	0,01-0,17 0,05	0,01-0,25 0,04	0,01-0,34 0,04	0,01-0,12 0,03	0,01-0,44 0,06	0,01-0,33 0,06	0,03-0,33 0,13	0,01-0,12 0,02	0,01-0,94 0,19
Сульфидно-сульфоарсенидный (104)		0,01-0,10 0,03	0,01-0,17 0,03	0,01-0,14 0,04	0,01-0,35 0,05	0,01-0,08 0,02	0,01-0,13 0,04	0,01-0,33 0,07	0,02-0,26 0,10	0,01-0,07 0,03	0,01-0,83 0,17
Висмут-сульфотеллуридный (50)		0,01-0,11 0,04	0,01-0,55 0,03	0,01-0,34 0,05	0,01-0,20 0,04	0,01-0,09 0,02	0,01-0,19 0,03	0,02-0,28 0,08	0,01-0,15 0,05	0,01-0,03 0,02	0,01-0,78 0,16

Примечание. В скобках указано количество (шт.) исследованных золотин. Над чертой – пределы колебаний, под чертой – среднее содержание элементов-примесей в самородном золоте.

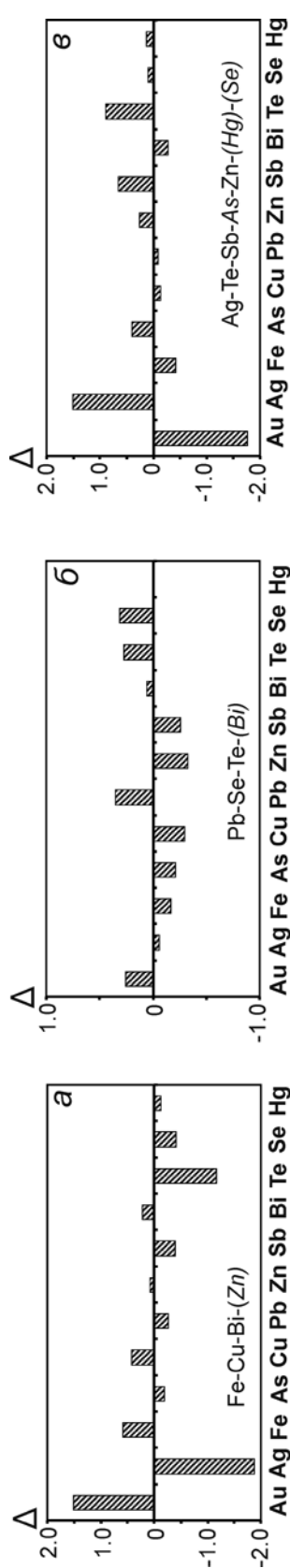


Рис. 3. Индикаторная роль элементов в самородном золоте висмут-сульфотеллуридного (а), сульфидно-сульфоарсенидного (б) и серебро-полисульфидного (е) минеральных типов золото-редкометалльного оруденения Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла.

Δ – нормированное отклонение содержания элементов в самородном золоте. В надписях на диаграммах – элементы-примеси, играющие положительную индикаторную роль, расположенные в порядке убывания значений для них показателя нормированного отклонения содержания элементов

висмута и возрастание средних содержаний сурьмы, теллура и ртути (см. табл. 2). Менее определенно проявлены тенденции снижения в самородном золоте от висмут-сульфотеллуридного к серебро-полисульфидному минеральным типам руд концентраций меди и возрастания концентраций мышьяка и цинка. Свинец и селен характеризуются варьирующим распределением.

Высокая частота встречаемости висмута в низкопробном самородном золоте (см. табл. 2) подтверждает представления [10, 15 и др.] о том, что на золото-редкометалльных объектах Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла золотосеребряная минерализация не связана с позднемеловым этапом развития оруденения золотосеребряного формационного типа, обусловленным становлением Охотско-Чукотского вулканогенного пояса [9]. Она входит в серебро-полисульфидный минеральный тип золото-редкометалльного оруденения, который совместно с висмут-сульфотеллуридным и сульфидно-сульфоарсенидным типами формировался в ходе развития единой рудно-магматической системы.

На принадлежность серебро-полисульфидного минерального типа оруденения к единой с другими минеральными типами золото-редкометалльной рудно-магматической системе указывает также и отношение содержаний в низкопробных золотилах микропримесей висмута и сурьмы. В золото-серебряных месторождениях Верхояно-Колымских мезозоид содержание сурьмы в самородном золоте в десятки раз превышает содержание висмута [5]. В наиболее же сурьмянистом самородном золоте серебро-полисульфидного минерального типа руд оно превышает содержание висмута максимум в 1,5–2,0 раза.

Формирование серебро-полисульфидного минерального типа руд в единой с другими минеральными типами золото-редкометалльной рудно-магматической системе подтверждается и характером корреляционных связей элементов в самородном золоте, выявленных комбинированными методами корреляционного и факторного анализов [1] (рис. 4). На графиках близость фигуративных точек к окружности определяет величину общности, т.е. сумму квадратов факторных нагрузок по 1–2 факторам (когда эта сумма равна единице, то фигуративная точка элемента лежит точно на окружности). Мерой связи между элементами служит коэффициент корреляции, который численно равен косинусу угла между радиусами, проведенными из центра круга к соответствующим фигуративным точкам элементов [16].

По корреляционным связям в комплексе слагающих самородное золото элементов во всех минеральных типах оруденения отмечаются две антагонистические группы. Ядро первой группы составляют Au, Hg и Bi, второй – Ag, Sb, Te. Это может указывать на формирование рассматриваемых минеральных типов оруденения в схожих минералогическо-геохимических условиях единой рудно-магматической системы.

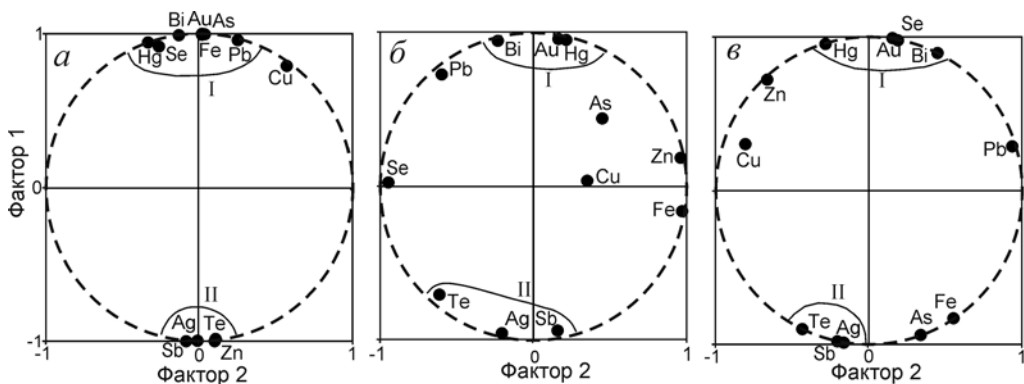


Рис. 4. Структура комплекса элементов в самородном золоте висмут-сульфотеллуридного (а), сульфидно-сульфоарсенидного (б) и серебро-полисульфидного (в) минеральных типов золото-редкометалльного оруденения Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла

Заключение

В Нижне-Мякитском рудно-россыпном узле широкое развитие в золото-редкометалльном оруденении рудно-магматической системы, связанной с Берентальской интрузией, серебро-полисульфидного минерального типа руд определило специфичность геохимического состава распространенного в нем самородного золота. В целом по частоте встречаемости микропримесных элементов (более 60 %) оно является висмутисто-медисто-ртутисто-теллуристым. Среди микропримесных элементов в повышенных концентрациях присутствуют Hg, Te и Bi. Это отличает золото-редкометалльное оруденение Берентальской рудно-магматической системы от большинства золото-редкометалльных объектов России, для которых и по частоте встречаемости, и по содержанию в самородном золоте примесных элементов определяющими являются Cu и Fe [12, 13].

Минералого-геохимические условия различных стадий развития Берентальской рудно-магматической системы проявились в геохимических особенностях самородного золота формировавшегося золото-редкометалльного оруденения. В преобладающем высокопробном золоте висмут-сульфотеллуридного типа оруденения ведущую, индикаторную, роль по уровню концентраций в нем микропримесных элементов играют Fe, Cu и Bi. В сульфидно-сульфоарсенидном типе руд преобладают умеренно низкопробные и среднепробные образования самородного золота с повышенным содержанием Pb, Se и Te. Преимущественно низкопробное и весьма низкопробное золото серебро-полисульфидного минерального типа характеризуется повышенными концентрациями Te, Sb, As и Zn.

В целом по мере удаления от выхода на поверхность Берентальского рудогенерирующего интрузивного массива отмечаются тенденции уменьшения висмутистости и возрастания серебртости, теллуристости и сурьмянистости самородного золота в рудах. Данные тенденции отражают пространственно-временную последовательность развития оруденения от висмут-сульфотеллуридного типа к серебро-полисульфидному, что согласуется с установленной на золоторудных месторождениях Аляски зональностью рудно-магматических систем, связанных с интрузивами гранитоидов [22].

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровиков Л.И., Бурков Ю.К. Корреляционный анализ закономерностей распределения малых элементов для решения вопросов седиментогенеза // Генезис и классификация осадочных пород. М.: Наука, 1968. С. 128–135.
2. Волков А.В., Савва Н.Е., Сидоров А.А., Прокофьев В.Ю., Горячев Н.А., Вознесенский С.Д., Альшевский А.В., Чернова А.Д. Золоторудное месторождение Школьное (Северо-Восток России) // Геология рудных месторождений. 2011. Т. 53, № 1. С. 3–31.
3. Гамянин Г.Н., Гончаров В.И., Горячев Н.А. Золото-редкометалльные месторождения Северо-Востока России // Тихоокеан. геология. 1998. Т. 17, № 3. С. 94–103.
4. Гамянин Г.Н., Некрасов И.Я., Самусиков В.П. Мальдонит из золоторудных проявлений Восточной Якутии // Минер. журн. 1986. Т. 8, № 3. С. 65–71.
5. Гамянин Г.Н. Минералого-генетические аспекты золотого оруденения Верхояно-Колымских мезозоид. М.: ГЕОС, 2001. 222 с.
6. Горячев Н.А., Колесниченко П.П. Граниты и грейзены Мякитского интрузива как пример локальной рудно-магматической системы // Рудно-магматические системы Северо-Востока СССР / под ред. Н.А. Шило, В.И. Гончарова. Хабаровск: Хабаров. политехн. ин-т, 1990. С. 41–53.
7. Горячев Н.А., Гамянин Г.Н. Золото-висмутовые (золото-редкометалльные) месторождения Северо-Востока России: типы и перспективы промышленного освоения // Золоторудные месторождения Востока России: Тр. III Всерос. симпоз. «Золото Сибири и Дальнего Востока: геология, геохимия, технология, экономика, экология». Улан-Удэ, 21–25 сент. 2004 г. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2006. С. 50–61.
8. Зименко М.И., Карелин Ю.П., Зименко Е.А., Жигулина А.С., Воропаев В.С. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Изд. 2-е. Серия Сугойская. Лист Р-56-XXI (Мякит): объяснительная записка / Мин-во природных ресурсов и экологии РФ, Роснедра, Департамент по недропользованию по Дальневосточ. фед. округу, АО «Северо-Восточное ПГО». СПб.: Картогр. фабрика ВСЕГЕИ, 2018. 192 с.
9. Кузнецов В.М., Горячев Н.А., Жигалов С.В., Савва Н.Е. Структура и рудоносность Мякит-Хурчанского рудно-россыпного узла // Вестн. СВНЦ ДВО РАН. 2011. № 4. С. 37–51.

10. Литвиненко И.С., Шилина Л.А. Реконструкция коренных источников россыпных месторождений Нижне-Мякитского рудно-россыпного узла (Северо-Восток России) на основе изучения типоморфных признаков россыпного золота // Вестн. СВНЦ ДВО РАН. 2020. № 1. С. 30–46.
11. Литвиненко И.С., Шилина Л.А. Типоморфизм самородного золота рудопроявления Плацдарм (Северо-Восток России) // Чтения памяти академика К.В. Симакова: материалы докл. Всерос. науч. конф. Магадан, 22–24 ноября 2017 г. / под ред. Н.А. Горячева. Магадан: МАОБТИ, 2017. С. 88–90.
12. Николаева Л.А., Некрасова А.Н., Миялев С.А., Яблокова С.В., Гаврилов А.М. Геохимические особенности самородного золота месторождений различных рудно-формационных типов // Геология рудных месторождений. 2013. Т. 55, № 3. С. 203–213.
13. Николаева Л.А., Гаврилов А.М., Некрасова А.Н., Яблокова С.В., Шатилова Л.В. Самородное золото рудных и россыпных месторождений России: атлас. М.: Акварель, 2015. 200 с.
14. Петровская Н.В. Самородное золото. М.: Наука, 1973. 347 с.
15. Позднякова Н.Н., Ивасенко Р.Н., Роднов Ю.Н., Попов Ю.В. Типоморфизм самородного золота рудопоявления Берентальского рудного поля, Магаданская область // Руды и металлы. 2019. № 3. С. 61–70.
16. Приставко В.А., Пляшкевич А.А., Трушнин А.В., Морозова С.Г. Распределение ареалов комплексного оруденения по геохимическим данным (Омукчанский район) // Проблемы металлогении рудных районов Северо-Востока России. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2005. С. 220–233.
17. Савва Н.Е., Парфенов М.И., Комина В.И. Генетическая природа бимодального распределения пробности шлихового золота россыпи руч. Плацдарм (южные отроги Мякитского интрузива) // Геодинамика, магматизм и минерагения континентальных окраин Севера Пацифики. В 3 т.: материалы Всерос. совещ., посвящ. 90-летию акад. Н.А. Шило (XII годовичное собрание Сев.-Вост. отделения ВМО). Магадан, 3–6 июня 2003 г. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003. Т. 3. С. 132–135.
18. Соломенцева Л.А., Литвиненко И.С. Типоморфизм самородного золота золото-редкометалльного рудного проявления Фронт (Северо-Восток России) // Вестн. СВНЦ ДВО РАН. 2015. № 2. С. 28–39.
19. Таусон Л.В., Дубов Р.И., Козлов В.Д., Кузьмин М.И. Геохимические значения дисперсии концентраций редких элементов в гранитах // Вопросы геохимии изверженных горных пород и рудных месторождений Восточной Сибири. М.: Наука, 1965. С. 12–22.
20. Шило Н.А., Гончаров В.И., Альшевский А.В., Ворцепнев В.В. Условия формирования золотого оруденения в структурах Северо-Востока СССР. М.: Наука, 1988. 181 с.
21. Hart C.J.R., McCoy D.T., Goldfarb R.J., Smith M., Roberts P., Hulstein R., Bakke A.A., Bundtzen T.K. Geology, exploration and discovery in Tintinagold province Alaska and Yukon // Soc. Econ. Geol. Spec. Publ. 2002. N 9. P. 241–274.
22. Hart C.J.R. Reduced intrusion-related gold systems // Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods: special publication / ed. W.D. Goodfellow; Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division. 2007. N 5. P. 95–112.
23. Lang J.R., Baker T., Hart C.J.R., Mortensen J.K. An exploration model for intrusion-related gold systems // SEG Newsletter. 2000. N 40. P. 6–15.
24. Lang J.R., Baker T. Intrusion-related gold systems: the present level of understanding // Miner. deposita. 2001. N 36. P. 477–489.
25. Thompson J.F.H., Sillitoe R.H., Baker T., Lang J.R., Mortensen J.K. Intrusion-related gold deposits associated with tungstentint provinces // Miner. deposita. 1999. N 34. P. 323–334.