

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Общая и региональная геология, петрология и вулканология

УДК 553.4 (571.56)

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-5-30

Особенности золото-серебро-висмут-теллуровой минерализации Аллах-Юньской металлогенической зоны (Северо-Восток России)

Г.С. Анисимова^{1,*}, Л.А. Кондратьева¹, В.Н. Кардашевская¹, С.К. Мустафин²

¹Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

²Башкирский государственный университет, Уфа, Россия

*gsanisimova1952@mail.ru

Аннотация. В статье приводятся особенности вещественного состава, физико-химические параметры и условия образования золотого оруденения месторождений и рудопроявлений с серебро-висмут-теллуровой минерализацией Аллах-Юньской металлогенической зоны. В рудах установлено 20 минералов теллура: 10 теллуридов, 6 сульфотеллуридов и 4 теллурата, из которых 2 являются не идентифицированными. Обычно они образуют микро- и нановключения размером 1–20 мкм, исключением являются руды месторождений Одержимый и Тенистый, где размеры теллуровисмутита и/или тетрадимита достигают 3 мм. Преобладают минералы Te двух систем: Au–Bi–Te и Au–Ag–Te. Золото находится в ассоциации с минералами теллура и в составе теллуридов: калаверита ($AuTe_2$), сивьянита $(AuAg)_2Te_4$ и петцита (Ag_3AuTe_2) . В золоторудных месторождениях Аллах-Юньской металлогенической зоны выделено три минеральных типа золото-серебро-висмут-теллуровой минерализации: Au–Ag–Te, Au–Bi–Te, а также смешанный, в котором сочетается минерализация обеих систем. Данные по характеристикам флюидных включений позволяют отнести Au–Ag–Te-руды к низкотемпературным, Au–Bi–Te – мезотермальным, наиболее высокую температуру образования руд показывает оруденение Леводыбинского узла – 365–276 °С. Ыныкчанское рудное поле, судя по температуре образования 200–150 °С, обладает чертами эпитептермального оруденения. Смешанный Au–Ag–Bi–Te (Задержнинское месторождение) минеральный тип образован из гетерогенных растворов. Понижение пробности самородного золота согласуется с последовательностью и температурами образования минералов Te и ассоциирующих минеральных парагенезисов от мезотермального Au–Ag–Te (830–999 ‰) к эпитептермальному Au–Ag–Te (<600 ‰) типу. Составы изотопов Pb в галенитах золото-полисульфидной ассоциации месторождения Задержнинское на диаграммах в координатах $^{206}Pb/^{204}Pb$ – $^{207}Pb/^{204}Pb$ и $^{206}Pb/^{204}Pb$ – $^{208}Pb/^{204}Pb$ показали соответствие с таковой Нежданнинского золоторудного месторождения, а данные золото-серебро-теллуровой ассоциации Ыныкчанского рудного поля – с серебро-полиметаллическими объектами Тыры-Дыбинского узла. Предполагается генетическая и парагенетическая связь Au–Bi–Te-оруденения с гранитоидным магматизмом, а Au–Ag–Te – с щелочным магматизмом. Формирование золото-полисульфидного минерального типа Леводыбинского узла и Задержнинского месторождения происходило синхронно с внедрением крупных гранитоидных плутонов Южного Верхоянья.

По минеральному составу золоторудные месторождения и проявления Аллах-Юньской металлогенической зоны имеют схожие черты с Au–Ag-объектами Куларского и Верхнеиндигирского районов Верхояно-Колымской складчатой области и Охотско-Чукотского вулканического пояса, Приморья и близки к Au–Ag–Bi–Te-месторождениям Алданского щита и Центральной Азии. В качестве примера приводится описание компактного высокопродуктивного Au–Ag–Bi–Te-месторождения Джеруй в Кыргызстане, которое начинает интенсивно обрабатываться. Проведенные исследования выявили распространение Au–Te-минерализации в пределах Аллах-Юньской металлогенической

зоны. *Au–Ag–Bi–теллуриды являются важными вспомогательными минералами, показывающими физико-химические условия рудообразования месторождений. При этом из некоторых объектов могут попутно извлекаться серебро, теллур и висмут.*

Ключевые слова: золото-теллур-висмутовая минерализация, теллуриды, золото, Au–Bi–Te, Au–Ag–Te и смешанный Au–Ag–Bi–Te минеральные типы, гранитоидный и щелочной магматизм, самородный висмут, тетрадимит, петцит, флюидные включения, изотопы свинца в сульфидах, Задержнинское месторождение, рудопоявление Мугун, Ыныкчанское поле, Широкинский узел, Аллах-Юньская металлогеническая зона.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект №18-45-140045 p_a и частично по плану НИР ИГАБМ СО РАН.

Введение

Аллах-Юньская металлогеническая зона является одним из старейших крупных золотоносных районов Якутии. Несмотря на длительную с 30-х годов прошлого века историю изучения золотоносности, проблема коренных источников золота остается актуальной. До сих пор в Аллах-Юньской зоне приоритетным в добыче является россыпное золото, основные запасы которого истощаются. Месторождение Нежданинское, в котором сосредоточено 55,8 % промышленных запасов рудного золота в Якутии, только начинает эксплуатироваться АО «Полиметалл». В настоящее время добыча рудного золота ведется лишь на месторождении Дуэт.

В данной статье обсуждается теллуровая минерализация в золоторудных объектах Аллах-Юньской металлогенической зоны (рис. 1). Актуальность изучения теллуридов обусловлена их важной ролью как минералов-индикаторов физико-химических условий формирования золотого оруденения и минералов-концентраторов золота. В то же время теллур, висмут и серебро также попутно могут извлекаться при промышленной обработке месторождений.

Следует отметить, что направленная для испытания в лабораторию г. Иркутск валовая проба рудопоявления Одержимое показала средние содержания Au 7,8 г/т, Bi 500 и Te 200 г/т [1]. В результате технологического испытания пробы установлено, что свободное и в сростаниях с сульфидами, кварцем золото извлекается до 90–96 %. При этом затраты на переработку руды полностью окупаются извлекаемым теллуrom [1].

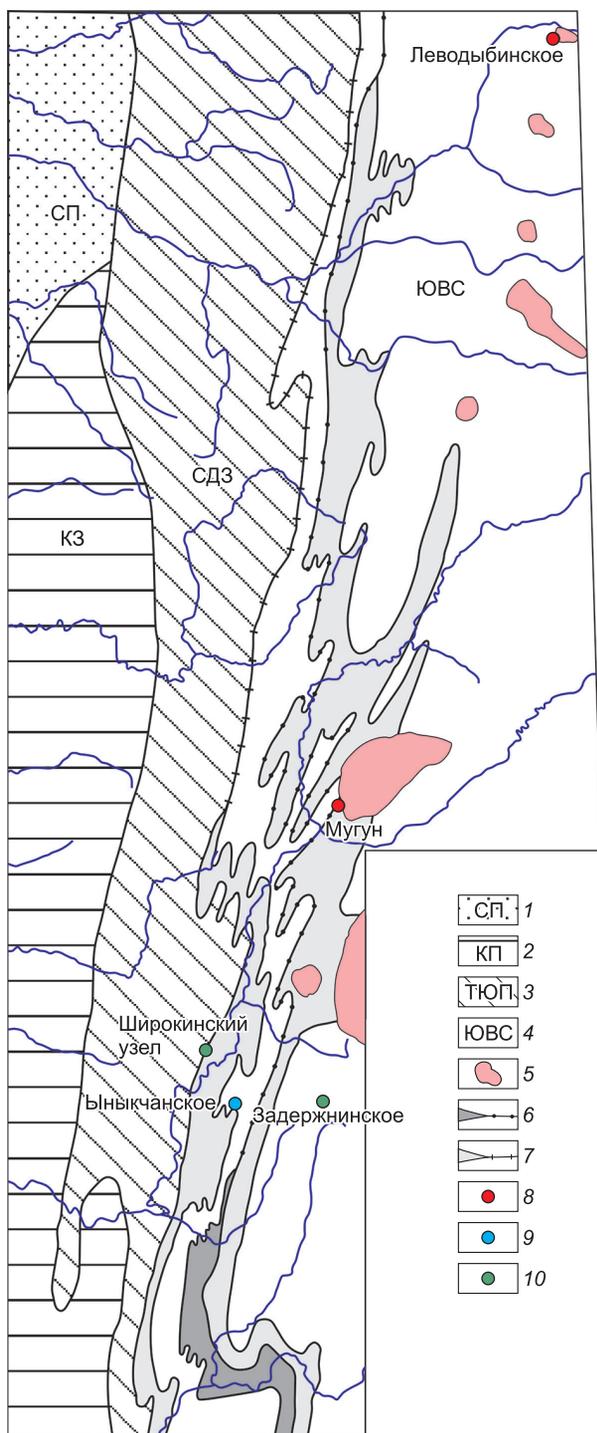
Золото-серебро-висмут-теллуровая (Au–Ag–Bi–Te) минерализация в Аллах-Юньской металлогенической зоне развита в рудопоявлениях золото-редкометалльного типа Леводыбинское (Одержимое), Курумское, Тарбаганнах (Мугун), Эсэлогдинское и др., расположенных преимущественно в экзоконтактах гранитоидных массивов ранне-позднемелового возраста среди пермских,

реже триасовых отложений верхоянского терригенного комплекса, Центральной зоны Южно-Верхоянского синклинория (ЮВС). Предполагается генетическая [3, 4] и парагенетическая [5, 6] связь оруденения с гранитоидным магматизмом и подчеркивается независимость от его состава и возраста. Основными рудными минералами являются арсенопирит, леллингит, самородный висмут, тетрадимит, висмутин, галеновисмутит, вольфрамит, шеелит, теллуриды золота (калаверит, сильванит, петцит), самородное золото.

В последнее время авторами получены новые данные по распространению Au(Ag)–Bi–Te-оруденения в регионе, как в экзоконтактах гранитоидных массивов, так и вне видимой связи, о чем будет написано ниже. В частности, это – месторождение Задержнинское, рудопоявление Мугун, Широкинский рудно-россыпной узел и Ыныкчанское рудное поле. Цель исследований: систематизировать и обобщить сведения по Te-минерализации региона, уточнить типоморфные свойства и условия образования минералов, провести типизацию и определить закономерности их пространственного распространения в пределах Аллах-Юньской металлогенической зоны.

Методы и материалы исследования

Минералогические исследования. Все полировки изучены под рудным микроскопом фирмы Jenavert в отраженном свете. С целью определения химического состава минералов (рудных, жильных и гипергенных), а также диагностики неизвестных минералов был использован микрозондовый анализ. Препараты были проанализированы на рентгеноспектральном микроанализаторе Camebax-micro фирмы «Самеса» (аналитик Христофорова Н.В.). Основной объем образцов был проанализирован на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6480LV с энергетическим спектрометром фирмы OXFORD (аналитики С.К. Попова, С.А. Карпова), на котором проводились фотосъемки. Количественный ана-



лиз проводился по методу XPP с использованием Software INCA Energy. Условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 1,08 нА, время измерения 10 сек. Условия съемки: напряжение 20 кВ, ток – 17 нА. Аналитические линии: Cu, Fe, Zn – K_{α} ; Sb, S – L_{α} . Стандарты: золото 750 ‰ – Au, Ag; HgTe (колорадоит) – Hg, Te, CuSbS₂ (халькостибит) – Cu, Sb, S; Tl–Tl (Br, I);

Рис. 1. Схема размещения золотого оруденения с Au–Ag–Bi–Te-минерализацией Аллах-Юньской металлогенической зоны. Геологическая основа по [2].

1 – Сибирская платформа (СП); 2 – Кыллахская зона (КЗ), 3 – Сетте-Дабанская зона (СДЗ), 4 – Южно-Верхоянский синклиорий (ЮВС); 5 – гранитоиды; 6 – отложения суркечанской свиты (C₃sr) – переслаивание алевролитов, песчаников, отдельные пласты конгломератов; 7 – отложения наталинской (C₂nt) и хальинской (P₁hl) свит – алевролиты с прослоями известняков, известковистых песчаников и алевролитов; 8–10 – золоторудные месторождения и рудопроявления с минерализацией (8 – Au–Bi–Te, 9 – Au–Ag–Te, 10 – Au–Ag–Bi–Te).

Fig. 1. Layout of gold mineralization with Au–Ag–Bi–Te mineralization of the Allah-Yun metallogenic zone. Geological base according to [2].

1 – Siberian platform (СП); 2 – Kyllakh zone (КЗ), 3 – Sette-Daban zone (СДЗ); 4 – South-Verkhoyansk synclinorium (ЮВС); 5 – massifs of granitoids; 6 – deposits of the Surkechanskaya suite (C₃sr) – interbedding of siltstones, sandstones, separate layers of conglomerates; 7 – deposits of the Natalinskaya (C₂nt) and Khalyinskaya (P₁hl) formations – siltstones with interlayers of limestones, calcareous sandstones and siltstones; 8–10 – gold deposits (8 – with Au–Bi–Te, 9 – with Au–Ag–Te, 10 – with mixed Au–Ag–Bi–Te mineralization).

ZnS (сфалерит) – Zn; CuFeS₂ (халькопирит) – Fe; PbS (галенит) – Pb; FeAsS (арсенопирит) – As.

Изучение флюидных включений. Термобаро-геохимические исследования флюидных включений проводились на кафедре минералогии СПбГУ в термокамере, установленной на микроскопе ПОЛАМ Р-211, а также в РЦ «Геомодель» на оптическом микроскопе Olympus BX53F в комплекте с термостолком THMSG-600-ес с системой охлаждения образца жидким азотом LNP95 при диапазоне температур –196...+600 °С. Точность измерений температуры составляет ±0,1 °С в интервале температур от –20 до +20 °С. Состав солей во флюидных включениях оценивался по температуре эвтектики [7]. Концентрация солей рассчитывалась по температуре плавления льда на основе данных для системы NaCl–H₂O. Давление оценено по пересечению изотермы и изохоры для сингенетических газово-жидких и углекислотно-водных включений. Температура и давление для пирит-пирротин-кварцевой ассоциации оценены по геотермометру Куллерада.

Состав газовой фазы флюидных включений в кварцах анализировался там же на рамановском спектрометре Horiba LabRam HR800 Ar-лазер с длиной волны 514,5 нм и 488 нм, время экспозиции 3 с, число повторений – 5, мощность лазера – 50 мВт, увеличение микроскопа – 50 (аналитик В.Н. Бочаров).

Анализ изотопного состава Pb в сульфидах проведен в лаборатории геохронологии и геохи-

мии изотопов ИГГД РАН (аналитик Саватенков В.М.). Монофракции сульфидов предварительно выщелачивались на теплой плитке в течение часа в 0,5N растворе HBr с целью удаления поверхностных загрязнений. Затем сульфиды растворялись в концентрированной царской водке на горячей плитке в плотно закрытой фторопластовой посуде в течение 2 часов. Галениты растворялись в 5N растворе соляной кислоты. После этого раствор доводился до концентрации Pb приблизительно 200–400 нг/мл. 2 мл полученного раствора наносились непосредственно на Re-ленгу без пропускания через ионообменную смолу. Химическое выделение Pb из сульфидов проводилось по стандартной методике на анионно-обменной смоле Bio-RadAG1-X8 (0,1 см³) в растворах кислот HBr и HCl [8]. Навески проб сульфидов составляли 10–20 мг соответственно. Изотопный анализ Pb и U выполнялся на многоколлекторном масс-спектрометре Finnigan MAT-261 в режиме одновременной регистрации ионных токов исследуемых элементов с погрешностью внутри опыта 0,01 % (2σ). Изотопный состав Pb измерялся в одноленточном режиме на Re-испарителях. Для измерений использовался силикатный эмиттер в смеси с H₃PO₄. Общий уровень лабораторного загрязнения Pb не превышал 0,1 нг. Поправка изотопных отношений Pb на фракционирование проводилась на коэффициент дискриминации масс (0,13 %), рассчитанный на основе измерения международного стандарта SRM982. Ошибки измерения изотопных отношений ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb и ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb, определенные по серии параллельных анализов стандарта породы BCR-1, не превышают 0,03, 0,03 и 0,05 % соответственно.

Результаты и обсуждение

Краткая геологическая характеристика объектов. Леводыбинское рудное поле с золоторудными проявлениями Одержимое и Тенистое расположено на левобережье р. Дыба. Кроме вышеупомянутых объектов здесь сосредоточен еще ряд проявлений, представленных мощными (до 2 м) и протяженными жилами кварца с арсенипитомом, в которых отмечаются (до 4 г/т) содержания золота; жилами, жильными зонами дробления и окварцевания с антимонитовой и полиметаллической минерализацией небольшой мощности по периферии Дыбинского массива гранодиоритов K₁₋₂ [6, 9].

Мугунское рудопроявление расположено на левобережье р. Аллах-Юнь, вдоль западного кон-

такта Тарбаганнахского гранитоидного массива в зоне Кидерикинского регионального разлома. Вмещающие породы представлены грубофлишовой толщей, состоящей из чередования пачек разнозернистых песчаников и алевролитов C₃-P₁. Оруденение локализуется в виде ярусно расположенных на нескольких продуктивных уровнях межпластовых и внутрипластовых кварцевых жил, типичных для Аллах-Юньской металлогенической зоны. Западная зона приурочена ко второй песчанистой пачке нижнехальчинской подсвиты на западном крыле антиклинали и вмещает «жилу Тарбаганнахскую». Кварц в жилах слабо ороговикован. Восточная зона располагается непосредственно в приконтактной части Тарбаганнахского массива в пределах зоны биотитовых роговиков и биотитизированных пород. Рудные тела представлены контактово-метаморфизованными субпластовыми кварцевыми жилами буларского типа, сложенными гранулированным кварцем, биотитом, диопсидом, амфиболом и альбитом, а также постинтрузивными гидротермальными проявлениями в гранитоидах – кварцевыми, кварц-полевошпатовыми и пегматитовыми жилами.

Месторождение Задержнинское расположено в бассейне р. Менджель, на левобережье р. Аллах-Юнь [10]. Рудовмещающие терригенные турбидиты нижней перми представлены переслаивающимися песчанистыми алевролитами и песчаниками бонсолчанской свиты. В пределах месторождения широко развиты маломощные дайки, выполненные породами среднего состава: диоритами, керсантитами, микродиоритами, диоритовыми порфиритами и спессартитами. В восточной части рудного поля закартированы два мелких штока диоритов. Наиболее поздними из дайковых образований золоторудного поля являются спессартиты, которые часто пространственно сопряжены с золотоносными кварцевыми жилами. В породах редко сохраняются реликты первичной кристаллическизернистой структуры. Промышленная золотоносность месторождения Задержнинское связана с рудными телами секущего морфоструктурного типа, представленными крутопадающими кварцевыми жилами и минерализованными зонами дробления с прожилково-вкрапленными рудам

Широкинский рудно-россыпной узел расположен на границе Сетте-Дабанской и Аллах-Юньской зон и занимает междуречье Силур–Суох, правых притоков рч. Аллах-Юнь. Вмещающий

комплекс узла представлен карбонатными и вулканогенно-осадочными породами PZ_{1-2} , прорванными редкими дайками диабазов (D), а также терригенными отложениями C_{1-2} [11]. Имеют место единичные выходы габбро-долеритов и ультракалийевых сиенитов [12]. Рудные тела представлены секущими кварцевыми и карбонат-кварцевыми жилами – апофизами зон дробления продольных субпараллельных разрывных нарушений Аллах-Юньского разлома, разграничивающего карбонатный комплекс Сетте-Дабанского антиклинория и терригенного комплекса Южно-Верхоянского синклиория.

Ыныкчанское рудно-россыпное поле входит в состав Юрско-Бриндакитского рудного района Аллах-Юньской металлогенической зоны, которая известна россыпными месторождениями по рч. Ыныкчан и его притоков (Заря, Мар, Тарагай, Наш, Том). В Ыныкчанском рудно-россыпном поле золотое оруденение развито в минерализованных зонах дробления с карбонат-кварцевым прожилкованием [13]. Пиритизированные алевролиты в зонах интенсивного смятия перетерты до глины желтого, белесого и синевато-серого цвета. Песчаники в зонах дробления брекчированы, сцементированы кварцевым, кварц-карбонатным материалом с сульфидами.

Позиция золото-серебро-висмут-теллуровой минерализации в общем ряду вещественного состава руд. Лево-Дыбинское (Одержимое) рудопоявление характеризуется малосульфидным (не более 3 %) составом руд. Типоморфным для месторождения является присутствие в ранних арсенидно-сульфоарсенидных ассоциациях минералов никеля и кобальта (никелин, кобальтин, герсдорфит). Золото ассоциируется с комплексом висмутовых минералов, которые представлены висмутином, сульфотеллуридами и теллуридами висмута, золото-висмутовыми интерметаллидами и сульфидами, самородным висмутом. В месторождении выявлена широкая дисперсия состава золота – 700–1000 ‰, причем пробность золота в рудных телах снижается с удалением от их контакта с интрузивом [4, 1].

Вещественный состав руд Мугунского месторождения изучался Г.Н. Гамяниным, с выделением двух минеральных типов: 1) арсенопиритового, связанного с рудными телами, удаленными от массива, и представленного арсенопиритом, галенитом, сфалеритом, золотом, леллингитом, пиритом, пирротинном, марказитом, халькопиритом и 2) висмутового, в эндо- и экзоконтакте грани-

тоидного массива, с молибденитом, арсенопиритом, пиритом, леллингитом, пирротинном, халькопиритом, самородным Bi и Au .

В результате минералогического исследования руд из кварцево-жильных тел, расположенных в эндо- и экзоконтакте Тарбаганнахского массива, авторами уточнен и существенно дополнен вещественный состав. Впервые были диагностированы мальдонит (Au_2Bi), хедлейит (Bi_2Te), бурнонит, пентландит, кобальтин (рис. 2), определены составы многих известных минералов, уточнена пробность самородного Au различных минеральных ассоциаций [14]. С учетом полученных данных установлены два минеральных типа: As-полиметаллический и золото-редкометалльный. Во втором типе выделяются пентландит-кобальтин-леллингитовая с самородным Au (I) средней пробы – 827 ‰, Au (II)-мальдонит-висмут-теллуридная и Au (III)-Ag-молибденитовая ассоциации. Появление весьма высокопробного Au (II) – 960–990 ‰ и самородного Bi , скорее всего, свидетельствует о разложении мальдонита в нестабильной обстановке. В ассоциации с этими минералами встречаются теллуриды Bi – хедлейит (Bi_2Te) и цумоит ($BiTe$). В поздней ассоциации появляются молибденит с реликтами бисмутита ($Bi_2O_2(CO_3)$), дискразит (Ag_3Sb), самородное Ag и низкопробное Au (III) – 660 ‰. Состав минералов Bi стехиометричен.

Минеральный состав руд Задержнинского месторождения детально освещен в ранних работах авторов [10, 15, 16]. Содержание сульфидов до 3–5 ‰, основной комплекс рудных минералов: галенит, сфалерит, арсенопирит, пирит, халькопирит, золото. Типоморфным эндогенным карбонатом Au -кварцевого оруденения является магнезиоанкерит-сидеродоломит I (12,86–33,71 $FeCO_3$, мол. %). $Au-Bi(Te)$ -оруденение, характеризующееся присутствием самородного висмута, висмутина, хедлейита, сульфотеллуридов Bi , минералов группы густавита и вторичных минералов – оксидов и теллуридов Bi с низкопробным золотом (рис. 3) локализуется в мелкозернистом до криптозернистого кварце, развитом на контакте с дайкой спессартитов в рудной зоне 2 месторождения, и накладывается на ранний катаклазированный арсенопирит II генерации Au -полисульфидного оруденения. Наложенность руд $Au-Bi(Te)$ -ассоциации подчеркивается также появлением примеси Bi (0,3–0,5 ‰) в галените данной рудной зоны, тогда как для дру-

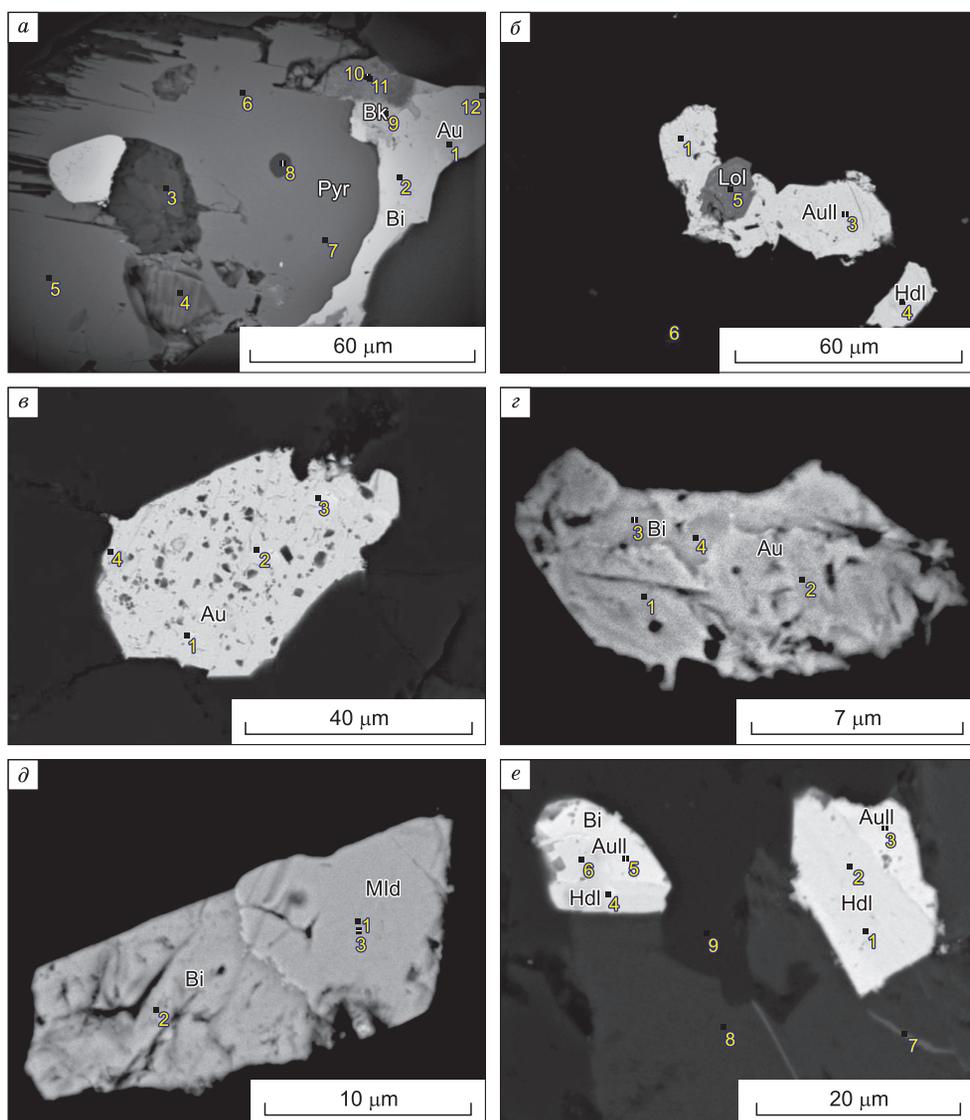


Рис. 2. Взаимоотношение минералов теллура с другими минералами Мугунского рудопроявления. *a* – обрастание самородным золотом (Au) и висмутом (Bi) зерна пирротина (Pyr); *б* – включение леллингита (Lol) в самородное золото II (AuII) в ассоциации с хедлейитом (Hdl); *в* – самородное золото (Au)-теллуридной ассоциации; *г* – самородное золото с включениями самородного висмута; *д* – тесное срастание самородного висмута (Bi) и мальдонита (Mld); *е* – ассоциация самородных висмута (Bi) и золота (AuII) с хедлейитом (Hdl). 1–4 – номера микрозондовых анализов (то же самое на рис. 3–5).

Fig. 2. Relation between tellurium minerals and other minerals of the Mugun ore occurrence. *a* – crustification of the native gold (Au) and bismuth (Bi) in pyrrhotite grain (Pyr), *б* – loellingite (Lol) inclusion in native gold II (AuII) in association with hedleyite (Hdl), *в* – native gold (Au) of the telluride association, *г* – native gold with native bismuth inclusions, *д* – close intergrowth of native bismuth (Bi) and maldonite (Mld), *е* – association of native bismuth (Bi) and gold (AuII) with hedleyite (Hdl). 1–4 – numbers of microprobe analyses (same on Figs. 3–5).

гих рудных тел месторождения она не характерна. Наблюдается нестехиометричность состава сульфотеллуридов и теллуридов висмута. Основные изоморфные элементы в минералах висмута – Pb, Sb и Ag. Особенностью состава висмута являются ощутимые концентрации Pb (3,40–5,13 %) и Sb (0,93–1,79 %). Сульфотеллу-

риды Bi по химическому составу наиболее близки к ингдиту (Bi_2TeS), сульфоцумоиту ($\text{Bi}_3\text{Te}_2\text{S}$) и жозеиту В ($\text{Bi}_4\text{Te}_2\text{S}$). В виде примеси присутствуют Pb (до 4,76 %), реже Sb и Ag до 1 %. Сульфосоли Bi, Pb и Ag отнесены к ряду густавита. Оксиды и теллуриды Bi являются основными носителями данного элемента и доминируют над

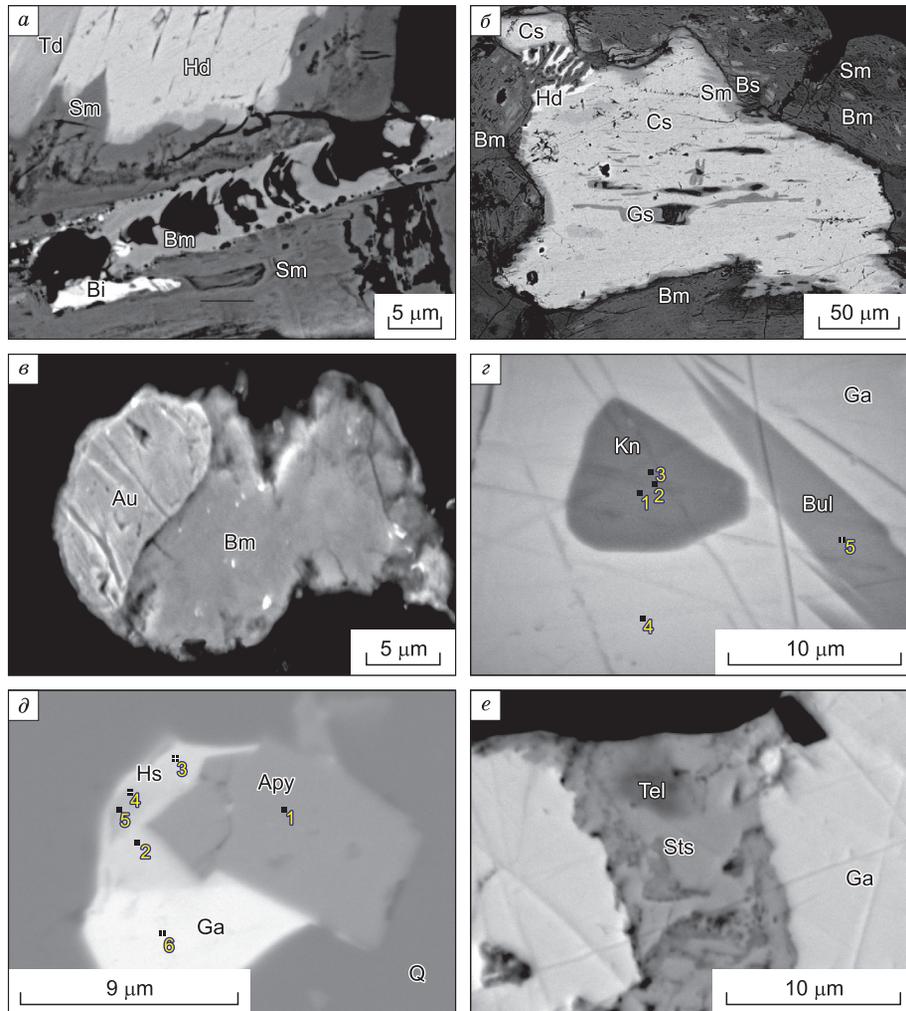


Рис. 3. Взаимоотношение минералов теллуридной ассоциации с другими минералами ранних ассоциаций Задержнинского месторождения:

a – выделение самородного висмута (Bi) в бисмите (Bm) и смирните (Sm), замещающем хедлейит (Hd) и сульфозумоит (Cs); *б* – развитие минералов группы густавита (Gs) по спайности сульфозумоита (Cs) и замещение хедлейита (Hd), сульфозумоита (Cs) и висмутина (Bs) оксидами – бисмитом (Bm) и теллуридами – смирнитом (Sm); *в* – ассоциация самородного золота с бисмитом (Bm); *г* – включение зерна канфильдита (Kn) и вытянутых выделений буланжерита (Bul) в галените (Ga); *д* – взаимоотношение арсенопирита (Apy), галенита (Ga) и гессита (Hs); *е* – замещение штютцитом (Sts) с теллуридами (Tel) галенита (Ga).

Fig. 3. Relation between minerals of the telluride association and other minerals of the earlier associations in the Zaderzhninskoe deposit:

a – native bismuth (Bi) in bismite (Bm) and smirnite (Sm), replacing hedleyite (Hd) and sulphotsumoite (Cs); *b* – development of minerals of the gustavite group (Gs) along cleavage of sulphotsumoite (Cs) and replacement of hedleyite (Hd), sulphotsumoite (Cs) and bismithine (Bs) by oxides – bismite (Bm) and tellurites – smirnite (Sm); *c* – native gold association with bismite (Bm); *d* – canfieldite (Kn) grain inclusion and elongated boulangerite (Bul) in galena (Ga); *e* – stutziite (Sts) and tellurates (Tel) replacing galena (Ga).

всей группой Вi-содержащих минералов. Все вышеприведенные теллуриды, сульфотеллуриды, сульфиды и сульфосоли Вi и Ag, самородное Au сконцентрированы в них в виде выделений и реликтов. По химическому составу теллуриды отнесены к смирниту (Bi_2TeO_5), а оксиды Вi – к бисмиту (Bi_2O_3). В теллуридах фиксируются Ag, Sb и Se. Единственным ассоциирующим рудным

минералом с Au–Вi–Te-минерализацией является катаклазированный арсенопирит.

Самородное золото тесно ассоциирует с оксидами висмута. Размер составляет 0,01–0,5 мм. Состав, %: Au – 74,95, Ag – 24,99, Hg – 0,41, сумма 100,35. Пробность – 747 %, соответствует пробности основной массы самородного Au месторождения.

В рудах Широкинского узла диагностировано около 50 минералов. Помимо преобладающих жильных (кварц, кальцит, доломит и серицит) и традиционных рудных минералов (пирит, галенит, сфалерит, блеклые руды, борнит, халькозин) в рудах выявлен ряд редких сульфидов, теллуридов, сульфостанатов, самородных элементов, интерметаллидов серебра, Hg-содержащих минералов, сформировавшихся в несколько стадий. Главным отличием руд Широкинского узла является отсутствие арсенопирита. Носителями мышьяка являются теннантит, энаргит, люционит и геокронит. Золотоносность руд низкая (0,2 г/т), соотношение Au/Ag – 10–100. Видимое самородное золото встречается крайне редко.

Висмутовые минералы найдены в ассоциации с минералами серебра. Теллуриды Bi, по составу отвечающие группе хедлейита, встречаются в халцедоновидном кварце в виде овальных, табличчатых и игольчатых включений среди гале-

нита. В тесном парагенезисе с теллуридами Bi отмечается гессит (Ag_2Te), между ними наблюдаются как взаимное прорастание, так и обрастание (рис. 4, а, в). Размеры выделений до 0,7 мм. По составу минерал отнесен к пильзениту (Bi_4Te_3) – характерному минералу продуктивных ассоциаций золотых и золото-серебряных месторождений (особенно вулканогенных). Отличительной особенностью теллурида Bi является постоянная примесь Sb и Pb. Самородный Bi наблюдается в галените в парагенезисе с гесситом и пильзенитом (см. рис. 4, а). Самородный Te найден с теллуридами Bi и Ag – продуктам распада теллуридов, в основном гессита и пильзенита, в ассоциации с алтаитом (PbTe) (см. рис. 4, а, б). Самородное золото выявлено в тесном сростании с гесситом, сивьянитом ($(AuAg)_2Te_4$), петцитом ($AuAg_3Te_2$) и шпютцитом ($Ag_{5-x}Te_3$) (см. рис. 4, в). Пробность золота теллуридной ассоциации варьирует от 540 до 700 ‰, а сульфидантимо-

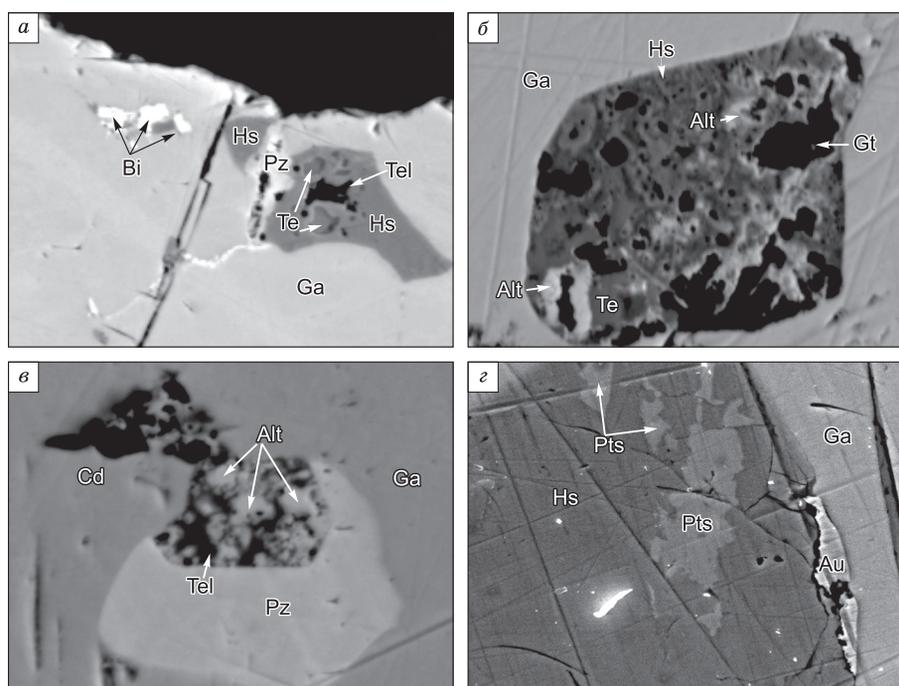


Рис. 4. Микропарагенезисы минералов теллуридной ассоциации Широкинского узла:

а – самородные висмут (Bi) и теллур (Te), пильзенит (Pz), гессит (Hs) и неидентифицированный теллуриат Ag, Bi (Tel) в галените (Ga); б – реликты алтаита (Alt), гессита (Hs) и самородного теллура (Te) в гетите (Gt) среди галенита (Ga); в – ободок пильзенита (Pz) вокруг неидентифицированного теллуриата Ag, Bi (Tel) с реликтами алтаита (Alt) и гринокита (Cd) в галените (Ga); г – табличчатое выделение гессита (Hs) с включениями петцита (Pts) и в сростании с самородным золотом (Au) в матрице – галените (Ga).

Fig. 4. Microparageneses of the telluride association minerals in the Shirokinskiy cluster:

а – native bismuth (Bi) and tellurium (Te), pilsenite (Pz), hessite (Hs) and unidentified tellurate of Ag, Bi (Tel) in galena (Ga); б – relicts of altaite (Alt), hessite (Hs) and native tellurium (Te) in goethite (Gt) in galena (Ga); в – pilsenite (Pz) rim around an unidentified tellurate of Ag, Bi (Tel) with altaite (Alt) and greenockite (Cd) relicts in galena (Ga); г – tabular hessite (Hs) with petzite (Pts) inclusions, with intergrowth of native gold (Au) in galena (Ga) matrix.

нитовой ассоциации – до 860 ‰, в виде примеси постоянно присутствуют Hg (до 1,86 ‰) и Cu. Au–Bi-минерализация Широкинского узла самостоятельного значения не имеет и входит в состав Au–Ag–Te-оруденения.

В пределах Ыныкчанского рудного поля содержание сульфидов в цементе 5–10 ‰, в обломочном материале – до 5 ‰. Жильные минералы – кварц, анкерит и железистый доломит, серицит и хлорит. Рудная минерализация представлена гнездами, вкрапленностью и прожилками пирита, галенита, сфалерита, реже пирротина, халькопирита и арсенопирита. Фрейбергит (Ag – 10,57–17,61 ‰), теллуриды Ag (штютцит, гессит), сульфотеллуриды Ag и Sb (бенлеонардит, цнигриит) и низкопробное (620–722 ‰) самородное золото отмечаются в виде микровключений в главных сульфидах. Проявление Au–Ag–Te-минерализации, наложенной на ранние пирит-арсенопиритовую и галенит-сфалеритовую, дает основания предполагать изменение условий рудообразования.

Единичные выделения теллуридов серебра (штютцит, гессит) овальной, таблитчатой, удлиненной форм наблюдаются в галените, а также в

виде самостоятельных выделений в кварце вблизи галенита (рис. 5, а, б). Состав минералов соответствует теоретическому.

Редкие минералы – сульфотеллуриды Ag и Sb обнаружены в парагенезисе с теллуридами Ag во взаимном прорастании и заключены в галенит. Бенлеонардит образует удлиненные изометричные зерна в тесном контакте с штютцитом (см. рис. 3, а), а цнигриит – с гесситом (см. рис. 5, б). Размеры выделений – от 15 до 40 мкм. По рельефу и отражению изученные минералы одинаковы с галенитом, оптически однородны; цвет – белый, с заметным голубовато-серым оттенком по сравнению с галенитом, анизотропия слабая. По химическому составу приводимые минералы охватывают интервал от бенлеонардита до цнигриита, подтверждая непрерывность гомологического ряда между ними.

Самородное золото в парагенезисе с пиритом образует включения в сфалерите (рис. 5, в, з). Форма выделений ксеноморфная, удлиненная, прожилковидная. Редко отмечаются выделения в кварце. Проба самородного золота колеблется от 620–722 ‰, т. е. соответствует низкопробной разности. Незначительные концентрации Fe (до

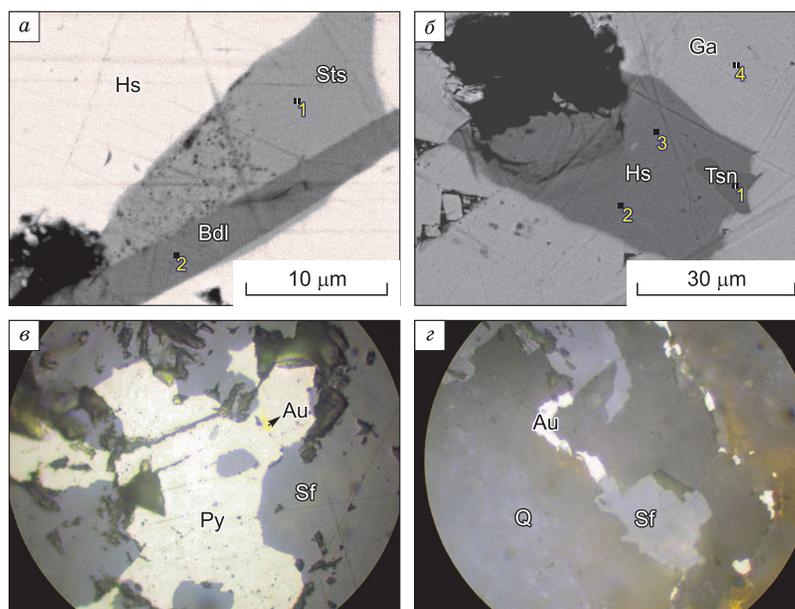


Рис. 5. Взаимотношение минералов Ыныкчанского рудного поля:

а – бенлеонардит (Bdl) и штютцит (Sts) в галените (Ga); б – гессит (Hs) с включением цнигриита (Tsn) в галените (Ga); в – включение самородного золота (Au) в зерне пирита (Py), ассоциирующего со сфалеритом (Sf); з – прожилковидные выделения самородного золота (Au) в кварце (Q) в тесном срастании со сфалеритом (Sf).

Fig. 5. Mineral relations of the Ynykchansky field:

а – benleonardite (Bdl) and stutzite (Sts) in galena (Ga); б – hessite (Hs) with tsnigrinite inclusion (Tsn) in galena (Ga); в – native gold (Au) inclusion in pyrite grain (Py); з – streaky inclusions of native gold (Au) in quartz (Q) in close intergrowth with sphalerite (Sf).

0,9 %), скорее всего, объясняются очень тесной ассоциацией золота с пиритом. Примесь Hg (до 0,46 %) в самородном золоте образует такие же концентрации, как и на соседних месторождениях (Задержнинское, Широкинское).

Физико-химические параметры и условия образования месторождений. Термобарогеохимические исследования непосредственно на наших объектах АЮМЗ проводили А.С. Борисенко и др. (1994 г.), Г.Н. Гамянин [17] и авторы статьи.

По данным Г.Н. Гамянина и др. [17], на месторождении Леводыбинское установлены высокие начальные температуры гомогенизации, отмечается гомогенизация CO_2 в жидкость и газ с критическими явлениями, а плотность флюида достаточно высока во всех генетических типах включений. По наличию высоких концентраций хлоридов при высоких температурах формирования месторождения Леводыбинское можно отнести к типичным месторождениям «granitoid related deposits». Для месторождения отмечаются повышенные температуры гомогенизации ГЖВ (до 500 °С) в жилах из роговиков ближайшего (100–200 м) экзоконтакта, по сравнению с жилами эндоконтакта и на удалении (300–400 м) от контакта с гранитоидами, установлен градиент понижения температур 15°/100 м на 300 м вертикального интервала. Полученные данные по изучению флюидных включений из жил свидетельствуют о высоких начальных температурах гомогенизации ГЖВ и концентрации солей мас. % экв. NaCl (46,0–1,1), малоглубинном уровне рудоотложения, нередко из кипящего водного флюида, хлоридно-калиевой специализации флюида, в целом незначительной роли углекислоты, устойчивом характере отношений концентраций компонентов при их различных концентрациях во флюидных включениях [17].

Для изучения условий формирования золотого оруденения Задержнинского месторождения ранее были проведены исследования флюидных включений в кварце пяти типов гидротермальных образований: 1) безрудных жил; 2) ранних Au–As-стратоидных жил, жильно-прожилкового и прожилково-вкрапленного оруденения секущего типа; 3) в турбидитах верхоянского комплекса с Au–Pb–Zn-минерализацией; 4) в дайках спессартитов; 5) в минерализованных зонах дробления. В двух последних оруденение Au-полисульфидного типа совмещено с поздней Au–Bi(Te)- и Au–Ag(Sb)-минерализацией [16].

Проведенные микротермометрические исследования флюидных включений в кварце показали, что ранние слабозолотоносные (Au–As) стратоидные жилы сформированы низко-солеными флюидами до 6,67 мас.% NaCl экв. в интервалах температур 130–291 °С. Главными особенностями рудообразующего флюида оруденения продуктивного этапа (Au–Pb–Zn + Au–Ag ± Au–Bi) являются повышение концентрации растворов до 10,61 мас.% NaCl экв., увеличение в газовой составляющей примесей CH_4 и N_2 , более широкий диапазон температур гомогенизации (90–340 °С) и относительное их снижение от раннего мезотермального этапа к позднему близповерхностному.

Впервые проведенные микротермометрические исследования флюидных включений в кварце Ыныкчанского рудно-россыпного поля показали, что формирование оруденения происходило с участием двух типов флюидов.

При оптическом изучении были выделены первичные включения, которые по фазовому составу при комнатной температуре подразделены на три типа:

I тип: однофазовые – существенно газовые;

II тип: двухфазовые – газовой-жидкие;

III тип: трехфазовые – углекислотно-водные.

I тип. Однофазовые ФВ – газовые включения, выполняющие 100 об. %, имеют размер от 5 до 50 мкм, чаще всего вытянутой формы.

II тип. Характеризуются присутствием двух фаз (газовая + жидкая) (рис. 6). В основной массе от 5 до 100 мкм. Газовый пузырек занимает 20–50 % от общего объема. Форма вакуолей округлая, угловатая, удлиненная, реже изометричная с отрицательной огранкой. Флюидные включения II типа в кварце гомогенизируются в жидкую фазу при температурах 158–188 °С. Они имеют температуру плавления льда от –1,5 до 3 °С, что соответствует концентрации солей 2,57–4,96 мас.% экв. NaCl.

III тип. Трехфазовые включения (газовая фаза+жидкая фаза+жидкость) – углекислотно-водного характера, округлые, почковидные, вытянутые, призматические (рис. 7). Газовый пузырек занимает 10–15 % от общего объема. Температуры гомогенизации первичных включений III типа изменяются в интервале от 270 до 330 °С. Концентрация солей в растворе флюидных включений этого типа составляет 7,86–5,56 мас. % экв. NaCl. Судя по величине температуры эвтектики

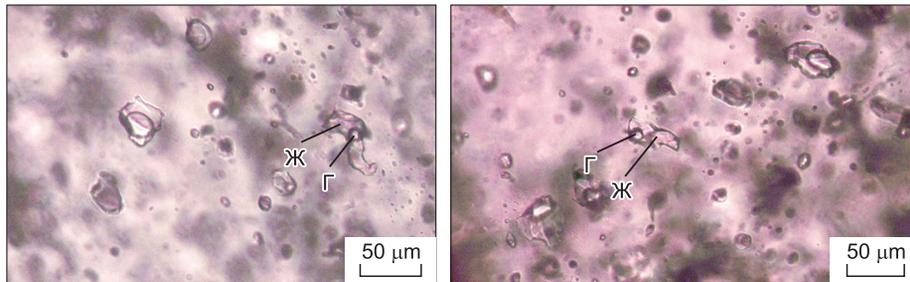


Рис. 6. Первичные двухфазовые флюидные включения. Г – газ; Ж – жидкость.

Fig. 6. Primary two-phase fluid inclusions. Г – gas; Ж – liquid.

(–23...–30 °С) в рудообразующих флюидах среди солей преобладают хлориды натрия и калия.

Гомогенизация углекислоты во флюидных включениях III типа, сингенетичных включениям II типа, происходит в жидкую фазу при температурах от +27,8 до +30,5 °С. Плавление углекислоты наблюдается в диапазоне от –57 до –57,9 °С. Температуры плавления ниже температуры плавления чистой углекислоты (–56,6 °С) связаны с наличием в ней небольшого количества примесей метана или азота. Плотность газовой фазы 0,58–0,64 г/см³.

Давление флюида оценено для включений III типа Ыныкчанского рудно-россыпного поля и составляет 810–884 бар.

Условия формирования первичных включений углекислотно-водного типа из натрий-хлоридных растворов с соленостью 5,56–7,89 мас. % NaCl экв. при температурах 270–330 °С отвечает условиям образования ранней пирит-арсенопиритовой минеральной ассоциации мезотермального оруденения. Завершается процесс рудообразования отложением эпитеpmальной Au–Ag–Te минерализации при температурах 158–189 °С с понижением солености до 2,57–4,96 мас. %. NaCl экв.

В кварце Широкинского узла термобарогеохимические исследования провести не удалось.

Резюмируя вышеописанное приводим обобщающую диаграмму (рис. 8).

Изотопы свинца в сульфидах. Проблема источников вещества в рудных месторождениях – одна из важнейших фундаментальных задач. Наиболее информативными в этом отношении, как известно, являются изотопы свинца в сульфидах [18]. Присутствие свинца в сульфидных рудах современных гидротермальных полей позволяет использовать его изотопный состав для установления источника рудного вещества, что приводится во многих публикациях [19–22]. Авторами предпринята попытка установления

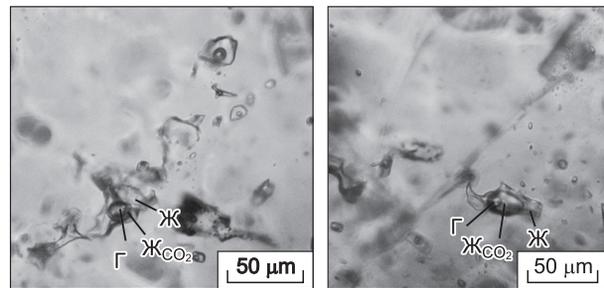


Рис. 7. Первичные трехфазовые флюидные включения. Г – газ; Ж – жидкость; Ж_{CO₂} – жидкая углекислота.

Fig. 7. Primary three-phase fluid inclusions. Г – gas; Ж – liquid; Ж_{CO₂} – liquid carbon dioxide.

источника вещества руд для Задержнинского месторождения и Ыныкчанского рудного поля. Анализы проведены в Институте докембрия РАН В.М. Саватенковым (табл. 1).

Фигуративные точки, представляющие изотопный состав Pb в сульфидах золото-полисульфидной ассоциации месторождения Задержнинское и золото-серебряно-теллуровой ассоциации Ыныкчанского рудного поля, на диаграммах в координатах ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb–²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb и ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb–²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb образуют компактную группу точек (рис. 9).

Малая выборка не позволяет делать каких-либо окончательных заключений, тем не менее, возраст вмещающих осадочных пород близок к возрасту наложенной активизации, с которой ассоциирует формирование рудной минерализации. Изотопные характеристики Pb в сульфидах месторождения явно указывают на то, что рудный компонент был мобилизован из вмещающих пород без привноса мантийного компонента.

Следует отметить, что изотопные составы Pb в сульфидах Задержнинского месторождения на изотопных диаграммах Pb–Pb находятся в верхнем окончании тренда изотопных составов Pb в галенитах Неждановского золоторудного место-

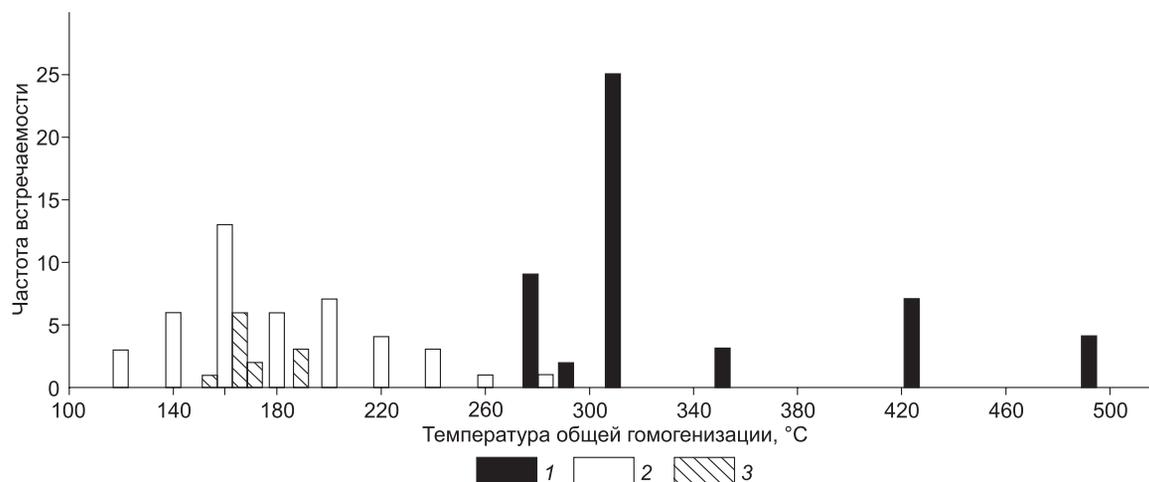


Рис. 8. Гистограмма температур гомогенизации во флюидных включениях в кварце золото-редкометалльных объектов Аллаха-Юньской металлогенической зоны.

1 – Леводыбинский рудный узел, 2 – Задержнинское месторождение, 3 – Ыныкчанское рудно-россыпное поле.

Fig. 8. Histogram of homogenization temperatures in fluid inclusions in quartz of gold-rare metal objects of the Allah-Yun metallogenic zone.

1 – Levodybinsky ore cluster, 2 – Zaderzhninskoye deposit, 3 – Ynykchansky ore-placer field.

рождения, расположенного севернее Задержнинского месторождения [21], а такие же данные для сульфидов Ыныкчанского рудного поля – в нижнем окончании тренда, где располагаются изотопные составы в сульфидах серебро-полиметаллических объектов Тыры-Дыбинского узла, приводимые в публикации И.В. Чернышева и др. [21]. В своей работе авторы отмечали, что галениты с низкими отношениями $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ассоциируют с серебро-полиметаллической ассоциацией, а галениты с высокими изотопными отношениями Pb – с золото-сульфидной минерализацией. Таким образом, источник золота соот-

ветствует более радиогенным составам Pb, отвечающим более молодому возрасту источника рудного вещества.

Здесь уместно отметить, что результаты изучения Rb-Sr изотопных систем магматических пород месторождения Задержнинское [23] показывают что гидротермальный флюид не связан с магматическими проявлениями рудного поля и имеет коровый генезис.

Обсуждение

Как видно из вышеописанного, теллуровая минерализация Аллаха-Юньской зоны отличается

Таблица 1

Данные изотопного состава Pb в сульфидах из месторождения Задержнинское и Ыныкчанского рудного поля

Table 1

Pb isotopic composition data in sulfides from the Zaderzhninskoye deposit and the Ynykchan ore field

Номер образца	Минерал/Mineral	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2σ, %	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2σ, %	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2σ, %
Задержнинское/Zaderzhninskoye							
2-40	Галенит/Galena	18,595	0,043	15,638	0,047	38,903	0,057
с-37-19а	Галенит/Galena	18,528	0,043	15,617	0,047	38,746	0,057
с-32-10	Пирит/Pyrite	18,577	0,042	15,630	0,046	38,863	0,056
Ыныкчанское/Ynykchan							
0 302 б	Галенит/Galena	18,2171	0,043	15,5906	0,047	38,2497	0,057
0 308 а	Галенит/Galena	18,2045	0,043	15,5833	0,047	38,2185	0,057

видовым разнообразием. В рудах установлено 20 минералов теллура: 10 теллуридов, 6 сульфотеллуридов и 4 теллурата, из которых 2 являются не идентифицированными (табл. 2). Обычно они образуют микро- и нановключения размером 1–20 мкм, исключением являются руды месторождений Одержимый и Тенистый, где размеры теллуровисмутита и/или тетрадимита достигают 3 мм. Форма зерен округло-овальная, вытянутая, игольчатая либо неправильная угловатая. Минералы теллура встречаются как в виде моновключений, так и в ансамблях из двух-трех теллуридов.

Преобладают минералы Те двух систем: Au–Ag–Te и Au–Bi–Te. Наибольшим разнообразием характеризуются теллуриды системы Au–Ag–Te. Установлено семь минеральных видов. Минералы чаще образуют включения в пирите, пирротине, галените, встречаются также в кварце (см. рис. 2). Среди минералов системы Au–Bi–Te наиболее распространены теллуриды группы тетрадимита (теллуровисмутит, тетрадимит, цумоит, сульфоцумоит и хедлейит). Теллуриды обычно наблюдаются в пирите, галените, пирротине и кварце (см. рис. 3).

Анализ видового состава минералов Те в золоторудных месторождениях АЮМЗ позволил выделить три минеральных типа: Au–Ag–Te, Au–Bi–Te, а также тип, в котором сочетается минерализация обеих систем и выделяемый, как смешанный (табл. 3).

Au–Bi–Te минеральный тип. Au–Bi–Te-тип распространен на рудопроявлениях Одержимый, Тенистый и Мугун. Здесь развиты теллуриды Bi, в основном теллуровисмутит, реже хедлейит, пильзенит и сульфотеллуриды Bi – тетрадимит и сульфоцумоит. Ассоциирующиеся минералы – мальдонит, самородный висмут, висмутин (табл. 4).

Au–Ag–Te минеральный тип. Au–Ag–Te-тип минерализации развит в рудопроявлениях Ыныкчанского поля АЮМЗ. Этот тип представлен чаще гесситом и штюцитом, реже встречаются сульфотеллуриды серебра и сурьмы – бенлеонардит и цнигриит, канфильдит (табл. 5). Теллуриды Bi отсутствуют.

Смешанный Au–Ag–Bi–Te минеральный тип. На месторождениях со смешанной Au–Ag–Bi–Te-минерализацией Задержинского и Широкинского рудно-россыпного узла сосуществуют минералы обеих систем (табл. 6). Ассоциирующие минералы разнообразны – самородный висмут, галенит, акантит, сульфовисмутиды Pb

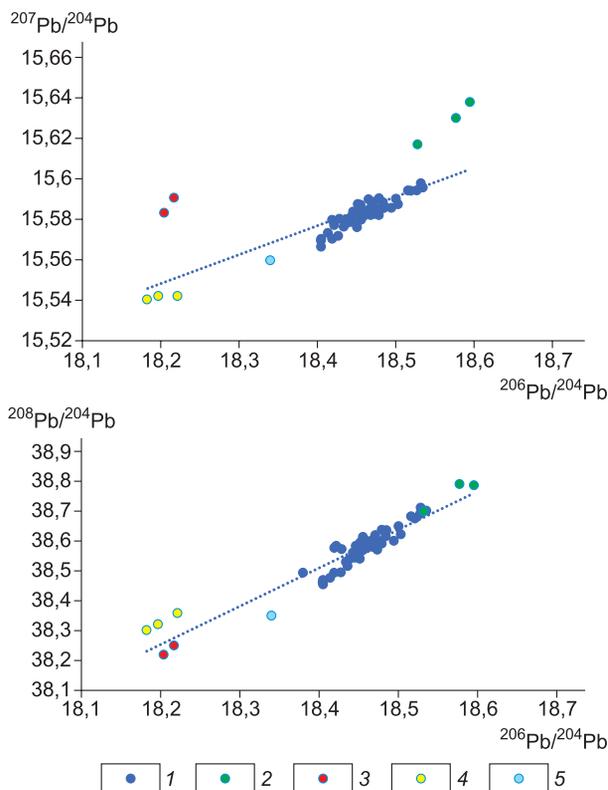


Рис. 9. Диаграммы $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ для сульфидов месторождений Аллах-Юньской металлогенической зоны:

1 – Нежданское месторождение [21], 2 – Задержинское месторождение, 3 – Ыныкчанское рудное поле, 4, 5 – серебряно-полиметаллические объекты Тыры-Дыбинского узла [21]; 4 – месторождение Менкече, 5 – рудопроявление Сентябрь.

Fig. 9. Diagrams $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ for sulfides of deposits of the Allakh-Yun metallogenic zone:

1 – Nezhdaninskoe deposit [21], 2 – Zaderzhinskoe deposit, 3 – Ynykchanskoe ore field, 4, 5 polymetallic objects of the Tyry-Dybinsky cluster [21]; 4 – Menkeche deposit, 5 – September ore occurrence

из группы лиллианита. В минералах Те отмечаются примеси Cu, Sb и Fe, захваченные из окружающих минералов – пирита, теннантита и борнита.

Рудообразующие системы обогащенных Те золотосеребряных эпitherмальных месторождений принадлежат к *A-muny* [24]. Их характерными особенностями являются тесная пространственная связь со щелочным магматизмом, типичная «мантийная» ассоциация элементов (Te, V и F), важная роль среди минералов теллуридов Au и Ag, флюорита и роскоэлита, а также [25] ванадийсодержащих сульфидов (колусит, некрасовит, стибикоколусит) и оксидов (касситерита). В разных классификациях такие месторождения

Минералы теллура Аллах-Юньской металлогенической зоны

Table 2

Tellurium minerals of the Allah-Yun metallogenic zone

Теллуриды Tellurides	Сульфотеллуриды Sulphotellurides	Теллураты, оксиды Tellurites, Oxides
Сильванит (AuAg) ₂ Te ₄ Sylvanite	Те-Канфильдит (Ag ₈ Sn(S,Te) ₆) Te-canfieldite	Смирнит (Bi ₂ TeO ₅) Smirnite
Петцит (Ag ₃ AuTe ₂) Petzite	Бенлеонардит (Ag ₈ (Sb,AS)Te ₂ (S) ₃) Benleonardite	Теллураты Bi, Ag Tellurates Bi,Ag
Штютцит (Ag _{4,7} Te) Stutzite	Цнигриит (Ag ₉ SbTe ₃ (S,Se) ₃) Tsnigriite	Оксиды Te, Sb Oxide Te, Sb
Гессит (Ag ₂ Te) Hessite	Тетрадимит Bi ₂ Te ₂ S Tetradymite	Бисмит (Bi ₂ O ₃) Bismite
Теллуровисмутит (Bi ₂ Te ₃) Tellurobismuthite	Сульфозумоит (Bi ₃ Te ₂ S) Sulphotsumoite	
Хедлейит (Bi ₇ Te ₃) Hedleyite	Жозеит В (Bi ₄ Te ₂ S) Joseite B	
Цумоит (BiTe) Tsumoite		
Пильзенит (Bi ₄ Te ₃) Pilsenite		
Алтаит (PbTe) Altaite		

выделялись как эпитермальный Au–Te–кварц–флюорит-адуляровый, щелочной Au–Ag эпитермальный, Au–Ag–Te жильный, Au–Ag–Te эпитермальный, «щелочной» тип эпитермальных месторождений Au [26, 27]. Характерной чертой таких рудообразующих систем является то, что эпитермальное оруденение на глубине часто сменяется Au–Cu порфировой минерализацией, ассоциирующей со щелочными габбро и сиенитами. Примерами месторождений А-типа являются такие объекты мирового класса как Крипл Крик (Колорадо, США, 673 т Au), Аккупан (Филиппины, 500 т Au, ~500 т Ag), Эмперор (Фиджи, >120 т Au), Лэдолам (Папуа-Новая Гвинея, 680 т Au), Кочбулак (Узбекистан) и др.

Многолетние исследования авторами геологии и минералогии Широкинского узла [28] показывают, что есть все признаки отнести благороднометалльное оруденение к А-типу золотосеребряных эпитермальных месторождений. В пользу данного предположения говорит следующий фактический материал: *геодинамическая позиция* – активная континентальная окраина; *ассоциирующие магматические породы* – ультракалийевые

сиениты (K₂O – 7,93–15,05 %); *формы проявления гидротермальной минерализации* – зоны дробления, жилы в разломах; *рудные минералы* – Au, Te, Bi, ртутистое Ag, электрум, теллуриды Au, Ag, Pb, Bi, сульфотеллуриды Ag и Sb, пирит, сульфиды цветных металлов, сульфосоли, V-содержащие сульфостаннаты, станнаты, ванадаты, рутил, Te-содержащий канфильдит, Cu-содержащий аргиродит; *жильные минералы* – кварц, халцедон, барит, флюорит, карбонаты, каолинит; *диагностические минералы* – Au–Ag-теллуриды (петцит, сильванит), V-содержащие сульфостаннаты (Zn-некрасовит, Zn-колусит, кестерит), станнаты (висмирновит, моусонит), ванадаты (карелианит), Te-содержащий канфильдит, флюорит; *геохимические признаки* – Au, Ag, Te, Bi, Sn, Pb, Zn; *смена на флангах* Au–Ag–Cu порфировой минерализацией.

Сравнение пробности разных типов теллуридной минерализации показывает, что пробность самородного золота оруденения Au–Ag–Te-типа колеблется с 520 до 722 ‰, в смешанном типе – от 650 до 878 ‰ и, наконец, в Au–Bi–Te-типе пробность составляет 830–999 ‰. Таким образом,

**Типоморфные особенности серебро-висмут-теллуридной минерализации
золотого оруденения Аллаш-Юньской метталлогенической зоны**

Table 3

**Typomorphic features of silver-bismuth-telluride mineralization of gold mineralization
of the Allah-Yun metallogenic zone**

Месторождение Ore deposit	Мугун Mugun	Одержимый Oderzhimuy	Задержинское Zaderzhinskoe	Широкинский Shirokinskiy	Ынычанский Ynykchanskiy
Гранитоидный магматизм Granitoid magmatism	Эзоконтакт Exocontact	Эзоконтакт Exocontact	Невысрыгнутый Unopened	Не проявлен Not manifested	Не проявлен Not manifested
Щелочной магматизм Alkaline magmatism				Ультракальцевые сиениты Ultrapotassium syenites	
Тип минерализации Mineralization type					
Au-Bi-Te-тип Au-Bi-Te type	Самородный Bi, мальдонит, хедлейит, цумоит Native Bi, maldonite, hedleyite, tsumoite	Висмутин, тетрадимит, самородный висмут, галеновисмутит Bismutin, tetradymite, native bismuth, galena bismuthite			
Смешанный Au-Ag-Bi-Te-тип Mixed Au-Ag- Bi-Te type			Самородный Bi, висмутин (Pb,Sb), хедлейит, сульфо-цумоит (Ag,Pb), жозеит В, теллуриды Ag и Bi, минералы лиллианит- густавитовой серии (Te,Sb), окислы: смирнит (Ag,Cu,Sb,Se), и бисмит (F, реже Te,Se) Native Bi, bismuthine (Pb, Sb), headleyite, sulphotumoite (Ag, Pb), joseite B, tellurites Ag and Bi, minerals of lillianitegustavite series (Te, Sb), oxides: (Ag, Cu, Sb, Se), and bismit (F, less often Te, Se)	Самородный Bi, пильзенит (Sb,Pb), теллуриды Ag и Bi, пелцит, сильванит, гессит (Se,Pb), алтаит, самородный Te (Ag), канфильдит Native Bi, pilsenite (Sb, Pb), tellurium Ag and Bi, petzite, hessite (Se, Pb), altaite, nativeny Te (Ag), canfieldite	

Окончание таблицы 3

Аu–Ag–Te-тип Au–Ag–Te type					Цингриит, бенлеонардит, гессит, штюццит, канфильдит Znigrinite, benleonardite, hessite, stutzite, canfieldite
Ассоциирующие минералы Associated minerals	Пирротин, арсенопирит, леллингит, молибденит, кобальтин, пентландит Pyrrhotite, arsenopyrite, löllingite, molybdenite, cobaltite, pentlandite	Арсенопирит, лёллингит, пирротин, пирит, кобальтин Arsenopyrite, löllingite, pyrrhotite, pyrite, cobaltite	Арсенопирит Arsenopyrite	Галенит, пирротин, гринокит Galena, pyrrhotite, greenockite	Пирит, арсенопирит, сфалерит, галенит Pyrite, arsenopyrite, sphalerite, galena
Пробность золота, % Gold fineness, ‰	960–990	890–960	740–760	540–700	620–722
Физико- химические параметры Physicochemical parameters	280 °С	410–220 °С	160 °С	Не изучен	158–189 °С

Примечание. В скобках даны элементы-примеси.

Note. Admixtures are given in parentheses.

можно констатировать понижение пробности самородного золота от Au–Bi–Te-типа к Au–Ag–Te. Понижение пробности самородного золота согласуется с последовательностью и температурами образования минералов Te и ассоциирующих минеральных парагенезисов от мезотермального Au–Bi–Te (830–999 ‰) к эпитеермальному Au–Ag–Te (<600 ‰) типу.

Г.Н. Гамяниным золото-редкометалльные месторождения отнесены к висмутовому [3], А.В. Кокиным – к золото-сульфотеллуридному минеральному типу, а по совокупности основных элементов-ассоциантов золота – As, Bi, Te, Co, W, редко Sb и Ag – к золото-теллур-висмутовому геохимическому типу [11].

В соответствии с правилом Гесса–Ферсмана, сочетание минералов в конкретной термодинамической (геологической) обстановке определяется геохимической ассоциацией элементов. Д.В. Рундквист [29] установил для стандартного ряда минеральных типов единую главную последовательность выделения геохимических парагенезисов, которая проявляется для различных гипо-, мезо-, эпитеермальных месторождений золота: /Au–W/Au–Mo/Au–(Mo,Cu)/Au–As/Pb–Zn–Au–Ag/Au–Te/Au–Ag/Au–Sb/Au–Ag–Sb–As–Hg/. По примесному составу минералов Bi и геохимии минералов-ассоциантов висмуто-

Таблица 4
Средние составы (масс. %) теллуридов и ассоциирующих минералов Мугунского проявления (Au–Bi–Te-тип)

Table 4
Average compositions (wt%) of tellurides and associated minerals of the Mugun occurrence (Au–Bi–Te type)

Минерал Mineral	Au	Bi	Te	Сумма Total
Сам.висмут Native		100,4		100,4
Мальдонит Maldonite	64,66	36,49		101,16
Пильзенит Pilzenite		67,75	33,8	101,56

вой минерализации Аллах-Юньской металлогенической зоны наблюдается смена гипо-мезотермального оруденения (W–Mo–As–Co–Ni) Мугунского и Одержимого проявлений в экзоконтактах гранитоидных интрузий, мезо-эпитеермальным (Au–Pb–Ag–Sb) Задержнинского и эпитеермальным (Ag–Au–Te–Sb) Широкинского узла и Ыныкчанского рудного поля.

Данные по характеристикам флюидных включений позволяют отнести Au–Ag–Te-руды к низ-

Средний (масс. %) химический состав минералов теллура Ыныкчанского поля (Au–Ag–Te-тип)

Average (wt%) chemical composition of tellurium minerals in the Ynykchansk field (Au–Ag–Te type)

Минерал Mineral	Ag	Sb	Te	S	Сумма Total
Теллуриды Au, Ag Tellurides of Au, Ag					
Гессит (3) Hessite	63,32		37,31		100,63
Штютцит (2) Stutzite	59,21		41,28		100,49
Сульфотеллуриды Ag, Sb, Pb Sulphotellurides Ag, Sb, Pb					
Цнигриит (1) Tsnigriite	61,71	7,91	24,52	5,47	99,61
Бенлеонардит (2) Benleonardite	62,43	9,17	19,72	7,3	98,62

Средний (масс. %) химический состав минералов теллура Задержнинского месторождения и Широкинского узла (смешанный Au–Ag–Bi–Te тип)

Table 6

Average (wt%) chemical composition of tellurium minerals from the Zaderzhninskoe deposit and the Shirokinsky cluster (mixed Au–Ag–Bi–Te type)

Месторождение Ore deposit	Au	Ag	Fe	Pb	Bi	Sb	Sn	Se	Te	S	Сумма Total
<i>Теллуриды Au, Ag</i> <i>Tellurides of Au, Ag</i>											
Гессит Hessite											
Задержнинское (5) Zaderzhninskoe (5)		60,92	1,97						35,93	1,24	100,76
Широкинский (7) Shirokinskiy (7)		61,67							37,23		98,93
Штютцит Stutzite											
Задержнинское (2) Zaderzhninskoe (2)		58,9							40,93		99,83
Широкинский (1) Shirokinskiy (1)		58,17							40,94		99,11
Петцит Petzite											
Широкинский (3) Shirokinskiy (3)	24,27	43,4							31,86		99,53
Сильванит Sylvanite											
Широкинский (3) Shirokinskiy (3)	24,81	13,13							61,97		99,91
<i>Теллуриды Bi</i> <i>Tellurides of Bi</i>											
Хедлейит											
Задержнинское (2) Zaderzhninskoe (2)					78,07				21,88		99,95
Пильзенит Pilzenite											
Широкинский (31) Shirokinskiy (31)			0,17	0,82	68,86	0,72			30,31		100,88
<i>Теллуриды Pb</i> <i>Tellurides of Pb</i>											
Алтаит Altaite											
Широкинский (3) Shirokinskiy (3)				62					37,18		99,18

Месторождение Ore deposit	Au	Ag	Fe	Pb	Bi	Sb	Sn	Se	Te	S	Сумма Total
<i>Сульфотеллуриды Bi, Ag, Sb, Pb</i> <i>Sulthotellurides Bi, Ag, Sb, Pb</i>											
Сульфоцумоит Sulthotsumoite											
Задержнинское (10) Zaderzhninskoe (10)		0,72		3,26	65,79				25,71	5,5	100,98
Жозеит В Joseite B											
Задержнинское (10) Zaderzhninskoe (10)					74,52				22,15	2,79	99,46
Канфильдит Canfieldite											
Задержнинское (2) Zaderzhninskoe (2)		59,68		11,45			5,92	1,59	10,72	11,34	100,69
Широкинский (2) Shirokinskiy (2)		61,48					9,19		18,67	9,43	98,77
Бенлеонардит Benleonardite											
Широкинский (2) Shirokinskiy (2)		62,5				9,1			18,1	9,6	99,3

котемпературным, Au–Bi–Te – мезотермальным, наиболее высокую температуру образования руд показывает оруденение Леводыбинского узла – 365–276 °С. Ыныкчанское рудное поле, судя по температуре образования 200–150 °С, обладает чертами эпитеермального оруденения. Смешанный Au–Ag–Bi–Te (Задержнинское месторождение) минеральный тип образован из гетерогенных растворов и имеет разную глубину формирования.

Данные по изотопам Pb в сульфидах золото-полисульфидной ассоциации месторождения Задержнинское и золото-серебро-теллуровой ассоциации Ыныкчанского рудного поля на диаграммах в координатах $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ образуют компактную группу точек. При этом показали соответствие с таковой Нежданского золоторудного месторождения у данных Задержнинского месторождения, а у Ыныкчанского рудного поля – с серебро-полиметаллическими объектами Тыры-Дыбинского узла.

Наблюдаемые на графиках соотношения изотопного состава Pb галенита [30] предполагают,

что основным источником поступления свинца в гидротермальные системы Задержнинского месторождения и Ыныкчанского рудного поля служили терригенно-карбонатные толщи.

Возраст магматических пород и золотого оруденения. Из всех описываемых объектов достоверный возраст магматических пород и оруденения определен для Леводыбинского узла [31] и Задержнинского месторождения. Дыбинский гранитный шток, в пределах которого локализована серия Au-редкометалльных проявлений (Тенистое, Контактное и Одержимое), имеет раннемиловый возраст ($122,3 \pm 0,4$ млн лет биотит, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ [32]), а возраст образца серицита, полученного из призальбандовой оторочки в кварцевой жиле с Au–Bi-минерализацией Дыбинского рудного узла, установлен $124,8 \pm 1,5$ млн лет ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) [31].

Возраст Тарбаганнахского плутона, с которым генетически связывается оруденение, связанное с интрузивами рудопроявления Мугун, как описано выше, оценивается 123 ± 1 млн лет [33].

Возраст основного продуктивного золото-полисульфидного оруденения Задержнинского ме-

сторождения определен методом $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (аналитик А.В. Травин, ИГМ СО РАН) по серициту из кварца рудной зоны 20, расположенной на южном фланге месторождения [34]. Полученная датировка $123,5 \pm 1,6$ млн лет близка ранее установленным возрастам крупных гранитоидных плутонов Южного Верхоянья. Это позволяет предположить, что формирование золотополисульфидного минерального типа золотокварцевого оруденения Задержнинского месторождения происходило синхронно с внедрением крупных гранитоидных плутонов Южного Верхоянья.

В пределах Широкинского рудно-россыпного узла найдены ультракалийевые сиениты (K_2O до 15,03 %) [12]. По Rb–Sr-изотопным исследованиям изохронный возраст приводимых пород равен 151 ± 3 млн лет. По нашему предположению, оруденение Широкинского узла имеет парагенетическую связь с этими магматическими породами.

В пределах Ыныкчанского поля на современном уровне магматические породы не выявлены.

По минеральному составу золоторудные месторождения и проявления имеют схожие черты с Au–Ag-объектами Куларского [35] и Верхнеиндигирского районов Верхоянно-Колымской складчатой области [36] и Охотско-Чукотского вулканогенного пояса [37], Приморья [38], но оно также близко и к Au–Ag–Bi–Te-месторождениям Алданского щита [39, 40] и Центральной Азии [41].

В качестве наглядного примера обработки компактного высокопродуктивного Au–Ag–Bi–Te-объекта в Кыргызстане приведем месторождение Джеруй, которое относится к Суусамыр-Караджоргинскому золоторудному поясу. Месторождение приурочено к массиву кварцевых диоритов и монцодиоритов ($\text{O}_{1,2}$), прорывающих кварцевослюдистые гнейсы, мигматиты, известковистые сланцы ортогауской свиты (R_2) [42]. Субвертикальная, трубообразная структура месторождения (протяженность на глубину до 900 м), в центральной части выполненная кварцем, к периферии постепенно переходит в кварцевый штокверк и далее в кварцевое прожилкование в измененных кварцевых диоритах [43].

Оруденение относится к золотокварцевому убогосульфидному минеральному типу; рудные минералы (составляющие 1–2 %), представлены пиритом, халькопиритом, галенитом, минералами висмута (тетрадимитом, висмутином), реже халькозином, бурнонитом [44]. Самородное зо-

лото образует сростания с кварцем (до 85 %), висмутином и тетрадимитом. Пробность золота 850–957 ‰, преобладает мелкое золото (менее 0,2 мм), размеры выделений от 0,001 до 0,2 мм. В золотоносных рудах как сопутствующие компоненты устанавливаются серебро (порядка 1 г/т), висмут – 0,014 %, что хорошо коррелируется с золотоносностью, теллур – 0,0016 %. В интенсивно окварцованных центральных частях штокверков содержания золота от 5 до 30 г/т (редко до 50–100 г/т), менее окварцованные периферические зоны менее золотоносны (1–5 г/т), зальбанды рудных тел окварцованы и золотоносны слабо (до 1 г/т).

17 марта 2021 года при участии президентов Кыргызской Республики и Российской Федерации был запущен Таласский золоторудный комбинат, основу сырьевой базы которого составят руды месторождения Джеруй; ежегодная добыча золота составит 5,5 т. Российская компания «Альянс Алтын» (дочерняя компания ОАО «Восток-геологодобыча»), входящая в состав корпорации «Русская платина», владеет лицензией на право пользования недрами месторождения Джеруй до 2035 г.

Заключение

Систематизация и обобщение известных и новых данных по Te-минерализации позволили установить видовое разнообразие и расширить территорию распространения Au–Ag–Bi–Te-минерализации в Аллаха-Юньской металлогенической зоне. При этом минералы теллура развиты во всех известных типах гидротермальных образований. Данные по характеристикам флюидных включений позволяют отнести Au–Ag–Te-руды к низкотемпературным, Au–Bi–Te – мезотермальным, наиболее высокую температуру образования руд показывает оруденение Леводыбинского узла – 365–276 °C. Составы изотопов Pb в галенитах золото-полисульфидной ассоциации месторождения Задержнинское на диаграммах в координатах $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ показали соответствие с таковой Неждановского золоторудного месторождения, а данные золото-серебро-теллуровой ассоциации Ыныкчанского рудного поля – с серебро-полиметаллическими объектами Тыры-Дыбинского узла. По соотношениям изотопного состава Pb галенита предполагается, что основным источником поступления

свинца в гидротермальные системы служили терригенно-карбонатные толщи.

Формирование золотополисульфидного минерального типа Леводыбинского узла и Задержнинского месторождения происходило синхронно с внедрением крупных гранитоидных плутонов Южного Верхоянья.

Золото находится не только в невидимом состоянии в пирите и в виде самородного золота разной пробы, но также входит в состав разнообразных соединений: калаверита (AuTe_2) и силванита $(\text{AuAg})_2\text{Te}_4$, петцита (Ag_3AuTe_2) и мальдонита (AuBi). Au–Ag–Bi–теллуриды являются важными вспомогательными минералами, несущими определенную долю запаса золота. При этом из некоторых объектов также могут попутно извлекаться серебро, теллур и висмут.

Литература

1. *Кокин А.В.* Золоторудное проявление Одержимый – перспективный объект для промышленного освоения золота, висмута и теллура // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: мат-лы VII всероссийской науч.-практич. конф., посвященной 60-летию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН, 5–7 апреля 2017 г. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2017. Т. I. С. 90–95.
2. *Окунев А.Е., Данилов В.П.* Новые проявления золото-кварц-сульфидной формации Аллах-Юньской металлогенической зоны // Вестник ЯГУ. 2010. Т. 7, № 1. С. 41–46.
3. *Гринберг Г.А., Бахарев А.Г., Гамянин Г.Н. и др.* Гранитоиды Южного Верхоянья. М.: Наука, 1970. 216 с.
4. *Гамянин Г.Н., Гончаров В.И., Горячев Н.А.* Золото-редкометалльные месторождения Востока России // Тихоокеанская геология. 1998. Т. 17, № 3. С. 94–103.
5. *Кокин А.В.* Минеральные типы золоторудных месторождений Юго-Восточной Якутии // Отечественная геология. 1994. № 8. С. 10–17.
6. *Кокин А.В.* Золото-редкометалльное оруденение Южного Верхоянья. Проблемы поисков и перспективы освоения месторождений // Геодинамика, магматизм и минерагения континентальных окраин Севера Пацифики. Магадан, 2003. Т. 3. С. 111–115.
7. *Борисенко А.С.* Изучение солевого состава газовой-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
8. *Кокин А.В.* Рудно-геохимическая зональность эндогенных рудных месторождений как следствие распространенности, периодичности и термодинамических свойств элементов // Вестник Пермского университета. Геология. 2015. Вып. 3 (28). С. 43–55.
9. *Manhes G., Allegre C.J., Provost A.* U–Th–Pb systematics of the eucrite «Juvinas». Precise age determination and evidence for exotic lead // *Geochem. Cosmochem. Acta* // 1984. Vol. 48, No. 12. P. 2247–2264.
10. *Кондратьева Л.А., Анисимова Г.С., Холмогоров А.И.* Структура и минералогия Задержнинского золоторудного поля // Отечественная геология. 2005. № 5. С. 23–28.
11. *Anisimova G.S., Kondratieva L.A., Leskova N.V.* Gold and Silver tellurides on Shirokinsky Ore-and-Placer Cluster, the Sette-Daban Ridge, Yakutia // *Geology of Ore Deposits*. 2011. Vol. 53, № 7. P. 620–625
12. *Анисимова Г.С., Зайцев А.И., Заякина Н.В.* Ультракалийевые породы Широкинского рудно-россыпного узла Аллах-Юньского металлогенического пояса // Отечественная геология. 2014. № 5. С. 89–95.
13. *Анисимова Г.С., Лыткин С.Ф.* Коренная золотоносность и сереброносность Ыныкчанского рудно-россыпного поля Аллах-Юньской металлогенической зоны // Отечественная геология. 2013. № 5. С. 10–18.
14. *Анисимова Г.С., Кондратьева Л.А.* Au–Ag–Te–Bi–REE–U минерализация Мугунского рудопроявления // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 3с, ч. 1. С. 41–45.
15. *Анисимова Г.С., Кондратьева Л.А.* Золото-теллур-висмутовая минерализация месторождения Задержнинское (Южное Верхоянье, Восточная Якутия) // *Минералогия*. 2016. № 2. С. 10–19.
16. *Кондратьева Л.А., Анисимова Г.С., Зайцев А.И.* Задержнинское золоторудное месторождение: минеральный состав, флюидные включения, возраст формирования (Южное Верхоянье) // Геология и геофизика. 2018. № 10. С. 1606–1622.
17. *Гамянин Г.Н., Викентьева О.В., Прокофьев В.Ю.* Изотопно-геохимические особенности рудообразующего флюида золотовисмутовых месторождений Северо-Востока России // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: мат-лы VII всероссийской науч.-практич. конф., посвященной 60-летию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН, 5–7 апреля 2017 г. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2017. Т. I. С. 46–51.
18. *Чернышев И.В., Чугаев А.В., Шатагин К.Н.* Высокоточный изотопный анализ Рb методом многоколлекторной ICP-масс-спектрометрии с нормированием по $^{205}\text{Tl}^{203}\text{Tl}$: оптимизация и калибровка метода для изучения вариации изотопного состава Рb // *Геохимия*. 2007. № 11. С. 1155–1168.
19. *Чернышев И.В., Чугаев А.В., Сафонов Ю.Г. и др.* Изотопный состав по данным высокоточного MS-ICP-MS метода и источники вещества крупномасштабного благороднометалльного месторождения Сухой Лог (Россия) // Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51, № 6. С. 550–559.
20. *Чугаев А.В., Чернышев И.В., Сафонов Ю.Г., Сароян М.Р.* Свинцово-изотопные характеристики

сульфидов крупных месторождений золота Байкало-Патомского нагорья (Россия) по данным высокоточного MC-ICP-MS анализа свинца // Докл. РАН. 2010. Т. 434, № 5. С. 677–680.

21. Чернышев И.В., Бортников Н.С., Чугаев А.В., Гамянин Г.Н., Бахарев А.Г. Источники металлов крупного орогенного золоторудного Нежданинского месторождения (Якутия), Россия) результаты высокоточного изучения изотопного состава свинца (MSSICPPMS) и стронция // Геология рудных месторождений. 2011. Т. 53, № 5. С. 395–418.

22. Чугаев А.В., Знаменский С.Е. Свинцово-изотопные характеристики месторождения золота Миндяк (Южный Урал): к вопросу об источниках металлов // Геология рудных месторождений. 2018. Т. 60, № 1. С. 57–67.

23. Кондратьева Л.А., Зайцев А.И., Анисимова Г.С. Параметры Rb-Sr систем магматических пород Задержнинского золоторудного поля (Южное Верхоянье) // Отечественная геология. 2011. № 5. С. 11–19.

24. Коваленкер В.А. Рудообразующие системы эпitherмальных золото-серебряных месторождений: концепции, реальность, модели // Проблемы рудной геологии, петрологии, минералогии и геохимии. М.: ИГЕМ РАН, 2004. С. 160–184.

25. Коваленкер В.А. Минералого-геохимические закономерности формирования эпitherмальных руд золота и серебра: Дисс. д. г.-м. н. М.: ИГЕМ РАН, 1995. 102 с.

26. Bonhan H.F., Jr. Models for volcanic-hosted epithermal precious metal deposits a review // Int. Volcanol. Congress. Hamilton, New Zealand. Symp. 5. February 1986. P. 13–18.

27. Richards J.P. Alcalic-type epithermal gold deposits – a review // Magmas, fluid and ore deposits / J.E.H. Thomsson, ed. Minerflogical Assoc. of Canada. Short course ser. 1995. Vol. 23. P. 367–400.

28. Кондратьева Л.А., Анисимова Г.С., Стручков К.К. Комплексная рудоносность и алмазонасность Белореченской зоны Сетте-Дабанского палеорифта // Отечественная геология. 2010. № 6. С. 3–11.

29. Рундквист Д.В. Фактор времени при формировании гидротермальных месторождений: периоды, эпохи, этапы и стадии рудообразования // Геология рудных месторождений. 1997. № 1. С. 11–24.

30. Чугаев А.В., Чернышев И.В. Pb–Pb изотопная систематика орогенных месторождений золота Байкало-Патомского складчатого пояса (Северное Забайкалье, Россия) и оценка роли неопротерозойской коры в их формировании // Геохимия. 2017. № 11. С. 1027–1040.

31. Layer P.W., Newberry R., Fujita K., Parfenov L.M., Trunilina V.A., Bakharev A.G. Tectonic setting of the plutonic belts of Yakutia, northeast Russia, based on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and trace element geochemistry // Geology. 2001. Vol. 29, No. 2. P. 167–170.

32. Прокопьев А.В., Борисенко А.С., Гамянин Г.Н., Фридовский В.Ю., Кондратьева Л.А., Анисимова Г.С., Трунилина В.А., Васюкова Е.А., Иванов А.И., Травин А.В., Королева О.В., Васильев Д.А., Пономарчук А.В. Возрастные рубежи и геодинамические обстановки формирования месторождений и магматических образований Верхояно-Колымской складчатой области // Геология и геофизика. 2018. № 10. С. 1542–1563.

33. Prokopiev A.V., Toro J., Hourigan J.K., Bakharev A.G., Miller E.L. Middle Paleozoic-Mesozoic boundary of the North Asian craton and the Okhotsk terrane: new geochemical and geochronological data and their geodynamic interpretation // Stephan Mueller Spec. Publ. Ser. 2009, Vol. 4. P. 71–84.

34. Кондратьева Л.А., Анисимова Г.С., Бахарев А.Г., Травин А.В., Прокопьев А.В., Борисенко А.С. Задержнинское золоторудное месторождение (Южное Верхоянье): геологическая позиция, вещественный состав руд и возраст оруденения // Материалы Всероссийской конференции «Новые и нетрадиционные типы месторождений полезных ископаемых Прибайкалья и Забайкалья», Улан-Удэ, 10–12 ноября 2010 г. Улан-Удэ: ГИН СО РАН, 2010. С. 105–106.

35. Анисимова Г.С., Москвитин С.Г. Редкие минералы и интерметаллические соединения в золоторудных формациях Куларского поднятия // Редкие самородные металлы и интерметаллиды коренных и россыпных месторождений Якутии. Якутск: ЯНЦ, 1992. С. 40–49.

36. Гамянин Г.Н. Минералого-генетические аспекты золотого оруденения Верхояно-Колымских мезозойд. М.: ГЕОС, 2001. 222 с.

37. Савва Н.Е. Минералогия серебра Северо-Востока России. М.: Триумф, 2019. 541 с.

38. Лотина А.А. Висмут-теллуровая минерализация участка Болотистый (Северо-Западный Сихотэ-Алинь) // Тихоокеанская геология. 2011. Т. 30, № 1. С. 97–107.

39. Анисимова Г.С., Кардашевская В.Н., Соколов Е.П. Золоторедкометалльное (Au-Mo-Te-Bi) оруденение Верхнеалгоминского золотоносного района (Южная Якутия) // Отечественная геология. 2017. № 5. С. 12–22.

40. Анисимова Г.С., Кондратьева Л.А., Соколов Е.П., Кардашевская В.Н. Золотое оруденение лебединского и куранахского типов в Верхнеамгинском районе (Южная Якутия) // Отечественная геология. 2018. № 5. С. 3–13.

41. Конеев Р.И., Халматов Р.А., Мун Ю.С. Наноминералогия и наногеохимия руд золоторудных месторождений Узбекистана // Геология рудных месторождений. 2010. Вып. 52, № 8. С. 755–766.

42. Никоноров В.В., Караев Ю.В., Борисов Ф.И. и др. Золото Кыргызстана. Геология. Условия локализации. Бишкек: Наси, 2004. 271 с.

43. Дженчураева Р.Д., Пак Н.Т., Никоноров В.В., Ивлева Е.А. Золоторудные месторождения Кыргызстана. Бишкек, 2020. 494 с.

44. Мустафин С.К., Пономарева А.М., Миколайчук Г.А. и др. Минералого-технологическая типизация золотосодержащих руд // Роль технологической

минералогии в расширении сырьевой база СССР. Челябинск: ВМО, 1986. С. 667–668.

Поступила в редакцию 11.07.2021

Принята к публикации 12.08.2021

Об авторах

АНИСИМОВА Галина Семеновна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия,

<https://orcid.org/0000-0002-1275-5393>, gsanisimova1952@mail.ru;

КОНДРАТЬЕВА Лариса Афанасьевна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия,

<https://orcid.org/0000-0001-9347-6427>, lkon12@yandex.ru;

КАРДАШЕВСКАЯ Вероника Николаевна, младший научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия,

<https://orcid.org/0000-0003-1069-2533>, kardashevskaya92@mail.ru;

МУСТАФИН Сабир Кабирович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Башкирский государственный университет, 450076, Уфа, ул. Заки Валиди, 32, Россия,

<https://orcid.org/0000-0002-4241-4004>, sabir.mustafin@yandex.ru.

Информация для цитирования

Анисимова Г.С., Кондратьева Л.А., Кардашевская В.Н., Мустафин С.К. Особенности золото-серебро-висмут-теллуровой минерализации Аллах-Юньской металлогенической зоны (Северо-Восток России) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26, № 3. С. 5–30. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-5-30>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-26-3-5-30

Features of the gold-silver-bismuth-tellurium mineralization in the Allakh-Yun metallogenic zone (North-East of Russia)

G.S. Anisimova^{1,*}, L.A. Kondratieva¹, V.N. Kardashevskaya¹, S.K. Mustafin²

¹Diamond and Precious Metal Geology Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia

²Bashkir State University, Ufa, Russia

*gsanisimova1952@mail.ru

Abstract. The features of the substance composition, physicochemical parameters and conditions of the formation of gold mineralization of deposits and ore occurrences with the silver-bismuth-tellurium mineralization in the Allakh-Yun metallogenic zone are reported. The ores were determined to contain 20 tellurium minerals: 10 tellurides, 6 sulfotellurides, and 4 tellurates, two of them are unidentified. Usually they form micro- and nano-inclusions 1–20 μm in size, except for the ores of the Oderzhimyi and Tenistyi deposits, in which the size of tellurobismuth and/or tetradimite reach 3 mm. Tellurium minerals of two systems dominate: Au–Bi–Te and Au–Ag–Te. Gold is present in association with tellurium telluride minerals: calaverite (AuTe₂), sylvanite (AuAg)₂Te₄ and petzite (Ag₃AuTe₂). Three types of gold and silver-bismuth-tellurium mineralization are revealed in the gold ore deposits of the Allakh-Yun metallogenic zone: Au–Ag–Te, Au–Bi–Te, and the mixed type, combining the mineralization of both system. A decrease in the fineness of

gold corresponds to the sequence and temperatures of the formation of Te minerals and associating mineral parageneses from mesothermal Au–Bi–Te (830–999 ‰) to epithermal Au–Ag–Te (<600 ‰). The data on the characteristic of fluid inclusions allow us to relate Au–Ag–Te ores to low-temperature, Au–Bi–Te – to mesothermal; the highest temperature of ore formation is demonstrated by the mineralization of the Levodybinskiy ore cluster: 365–276 °C. Ynykchanskoye ore field, judging from formation temperature 200–150 °C, possesses the features of epithermal mineralization. The mixed Au–Ag–Bi–Te (the Zaderzhninskoye deposit) mineral type is composed of heterogeneous solutions. The compositions of Pb isotopes in galena of the gold-polysulfide association of the Zaderzhninskoye in the diagrams composed in the coordinates $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ demonstrated the agreement with the corresponding data on the Nezhdaninskoye gold deposit, and the data on the gold–silver–tellurium association of the Ynykchanskoye ore field – with the silver-polymetallic objects of the Tyry-Dybinskiy cluster. Genetic and paragenetic association of Au–Bi–Te mineralization with granitoid magmatism is assumed, while Au–Ag–Te mineralization is assumed to be associated with alkaline magmatism. The formation of the gold-polysulfide mineral type of the Levodybinskiy cluster and the Zaderzhninskoye deposit proceeded synchronously with the intrusion of large granitoid plutons of the Southern Verkhoyan territory. The gold ore deposits and occurrences in the Allakh-Yun metallogenic zone have some similar features in their mineral composition with the Au–Ag objects of the Verkhoyan-Kolyma folded zone and the Okhotsk-Chukotka volcanic belt, Primorye, and are close to the Au–Ag–Bi–Te deposits of the Aldanian shield and Central Asia. The description of the Dzheruy, a compact highly productive Au–Ag–Bi–Te deposit which is at the start of its intense development in Kyrgyzstan, is presented as an example. The studies revealed that Au–Te mineralization is spread within the boundaries of the Allakh-Yun metallogenic zone. The Au–Ag–Bi tellurides are essential auxiliary minerals revealing the physicochemical conditions of ore formation in the deposits. Silver, tellurium and bismuth may also be extracted as accompanying components from several deposits.

Keywords: gold–tellurium–bismuth mineralization, tellurides, gold, Au–Bi–Te, Au–Ag–Te and mixed Au–Ag–Bi–Te mineral types, granitoid and alkaline magmatism, native bismuth, tetradimite, petzite, fluid inclusions, lead and sulfide sulfur isotopes, Zaderzhninskoye deposit, Mugun ore occurrence, Ynykchanskoye field, Shirokinskiy cluster, Allakh-Yun metallogenic zone.

Acknowledgements. The research was carried out with support from the Russian Foundation for Basic Research (Project № 18-45-140045 r_a) and partly according to the research plan of Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS).

References

1. Kokin A.V. Zolotorudnoye proyavleniye Oderzhimyy – perspektivnyy obyekt dlya promyshlennogo osvoyeniya zolota, vismuta i tellura // Geologiya i mineralno-syryevyye resursy Severo-Vostoka Rossii: mat-ly VII vsrossiyskoy nauch.-praktich. konf., posvyashchennoy 60-letiyu Instituta geologii almaza i blagorodnykh metallov Sibirskogo otdeleniya RAN. 5–7 aprelya 2017 g. Yakutsk: Izdatelskiy dom SVFU. 2017. Vol. I. P. 90–95.
2. Okunev A.E., Danilov V.P. Novyye proyavleniya zoloto-kvarts-sulfidnoy formatsii Allakh-Yunskoy metallogenicheskoy zony // Vestnik YaGU. 2010. Vol. 7, No. 1. P. 41–46.
3. Grinberg G.A., Bakharev A.G., Gamyarin G.N. i dr. Granitoidy Yuzhnogo Verkhoyania. M.: Nauka 1970. 216 p.
4. Gamyarin G.N., Goncharov V.I., Goryachev N.A. Zoloto-redkometalnyye mestorozhdeniya Vostoka Rossii // Tikhookeanskaya geologiya. 1998. Vol. 17, No. 3. P. 94–103.
5. Kokin A.V. Mineralnyye tipy zolotorudnykh mestorozhdeniy Yugo-Vostochnoy Yakutii // Otechestvennaya geologiya. 1994. No. 8. P. 10–17.
6. Kokin A.V. Zoloto-redkometalnoye orudneniye Yuzhnogo Verkhoyania. Problemy poiskov i perspektivy osvoyeniya mestorozhdeniy / Geodinamika. magmatizm i mineralniya kontinentalnykh okrain Severa Patsifiki. Magadan. 2003. Vol. 3. P. 111–115.
7. Borisenko A.S. Izucheniye solevogo sostava gazo-vo-zhidkikh vklyucheniye v mineralakh metodom kriometrii // Geologiya i geofizika. 1977. No. 8. P. 16–27.
8. Kokin A.V. Rudno-geokhimicheskaya zonalnost endogennykh rudnykh mestorozhdeniy kak sledstviye rasprostranennosti, periodichnosti i termodinamicheskikh svoystv elementov // Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya. 2015. Iss. 3 (28). P. 43–55.
9. Manhes G., Allegre C.J., Provost A. U–Th–Pb systematics of the eucrite «Juvinas». Precise age determination and evidence for exotic lead // Geochem. Cosmochem. Acta // 1984. Vol. 48, No. 12. P. 2247–2264.
10. Kondratyeva L.A., Anisimova G.S., Kholmogorov A.I. Struktura i mineralogiya Zaderzhninskogo zolo-

- torudnogo polya // *Otechestvennaya geologiya*. 2005. No. 5. P. 23–28.
11. *Anisimova G.S., Kondratieva L.A., Leskova N.V.* Gold and Silver tellurides on Shirokinsky Ore-and-Placer Cluster, the Sette-Daban Ridge, Yakutia // *Geology of Ore Deposits*. 2011. Vol. 53, № 7. P. 620–625
12. *Anisimova G.S., Zaytsev A.I., Zayakina N.V.* Ultrakaliyevyye porody Shirokinskogo rudno-rossypnogo uzla Allakh-Yunskogo metallogenicheskogo poyasa // *Otechestvennaya geologiya*. 2014. No. 5. P. 89–95.
13. *Anisimova G.S., Lytkin S.F.* Korennaya zolotonosnost i serebronost Ynykchanskogo rudno-rossypnogo polya Allakh-Yunskoy metallogenicheskoy zony // *Otechestvennaya geologiya*. 2013. No. 5. P. 10–18.
14. *Anisimova G.S., Kondratyeva L.A.* Au-Ag-Te-Bi-REE-U mineralizatsiya Mugunskogo rudoproyavleniya // *Geologiya i mineralno-syryevyye resursy Sibiri*. 2014. No. 3s. Ch. 1. P. 41–45.
15. *Anisimova G.S., Kondratyeva L.A.* Zoloto-tellurivismutovaya mineralizatsiya mestorozhdeniya Zaderzhninskoye (Yuzhnoye Verkhoyanye. Vostochnaya Yakutiya) // *Mineralogiya*. 2016. No. 2. P. 10–19.
16. *Kondratyeva L.A., Anisimova G.S., Zaytsev A.I.* Zaderzhninskoye zolotorudnoye mestorozhdeniye: mineralny sostav, flyuidnyye vklyucheniya, vozrast formirovaniya (Yuzhnoye Verkhoyanye) // *Geologiya i geofizika*. 2018. No. 10. P. 1606–1622.
17. *Gamyranin G.N., Vikentyeva O.V., Prokofyev V.Yu.* Izotopno-geokhimicheskiye osobennosti rudoobrazuyushchego flyuida zolotovismutovykh mestorozhdeniy Severo-Vostoka Rossii // *Geologiya i mineralno-syryevyye resursy Severo-Vostoka Rossii: mat-ly VII vserossiyskoy nauch.-praktich. konf. posvyashchennoy 60-letiyu Instituta geologii almaza i blagorodnykh metallov Sibirskogo otdeleniya RAN. 5–7 aprelya 2017 g.* Yakutsk: Izdatelskiy dom SVFU. 2017. Vol. I. P. 46–51.
18. *Chernyshev I.V., Chugayev A.V., Shatagin K.N.* Vysokotochnyy izotopnyy analiz Pb metodom mnogokollektornoj ICP-mass-spektrometrii s normalizatsiyey po $^{205}\text{Tl}/^{203}\text{Tl}$: optimizatsiya i kalibrovka metoda dlya izucheniya variatsii izotopnogo sostava Pb // *Geokhimiya*. 2007. No. 11. P. 1155–1168.
19. *Chernyshev I.V., Chugayev A.V., Safonov Yu.G. i dr.* Izotopnyy sostav po dannym vysokotochnogo MC-ICP-MS metoda i istochniki veshchestva krupnomasshtabnogo blagorodnometallnogo mestorozhdeniya Sukhoy Log (Rossiya) // *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*. 2009. Vol. 51, No. 6. P. 550–559.
20. *Chugayev A.V., Chernyshev I.V., Safonov Yu.G., Saroyan M.R.* Svintsovo-izotopnyye kharakteristiki sulfidov krupnykh mestorozhdeniy zolota Baykalo-Patomskogo nagoria (Rossiya) po dannym vysokotochnogo MC-ICP-MS analiza svintsa // *Dokl. RAN*. 2010. Vol. 434, No. 5. P. 677–680.
21. *Chernyshev I.V., Bortnikov N.S., Chugayev A.V., Gamyranin G.N., Bakharev A.G.* Istochniki metallov krupnogo orogenno zolotorudnogo Nezhdaninskogo mestorozhdeniya (Yakutiya). Rossiya) rezultaty vysokotochnogo izucheniya izotopnogo sostava svintsa (MCCICPPMS) i strontsiya // *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*. 2011. Vol. 53, No. 5. P. 395–418.
22. *Chugayev A.V., Znamenskiy S.E.* Svintsovo-izotopnyye kharakteristiki mestorozhdeniya zolota Mindyak (Yuzhnyy Ural): k voprosu ob istochnikakh metallov // *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*. 2018. Vol. 60, No. 1. P. 57–67.
23. *Kondratyeva L.A., Zaytsev A.I., Anisimova G.S.* Parametry Rb-Sr sistem magmaticheskikh porod Zaderzhninskogo zolotorudnogo polya (Yuzhnoye Verkhoyanye) // *Otechestvennaya geologiya*. 2011. No. 5. P. 11–19.
24. *Kovalenker V.A.* Rudoobrazuyushchiye sistemy epitermalnykh zoloto-serebryanykh mestorozhdeniy: kontseptsii, realnost, modeli // *Problemy rudnoy geologii. petrologii. mineralogii i geokhimii. M.: IGEM RAN*, 2004. P. 160–184.
25. *Kovalenker V.A.* Mineralogo-geokhimicheskiye zakonomernosti formirovaniya epitermalnykh rud zolota i serebra: Dis. d. g.m. n. M.: IGEM RAN, 1995. 102 p.
26. *Bonhan H.F., Jr.* Models for volcanic-hosted epithermal precious metal deposits a review // *Int. Volcanol. Congress. Hamilton, New Zealand. Symp. 5. Febrary 1986*. P. 13–18.
27. *Richards J.P.* Alcalic-type epithermal gold deposits—a review // *Magma, fluid and ore deposits / J.E.H. Thomson, ed. Minerflogical Assoc. of Canada. Short course ser.* 1995. Vol. 23. P. 367–400.
28. *Kondratyeva L.A., Anisimova G.S., Struchkov K.K.* Kompleksnaya rudonosnost i almazonosnost Belorechenskoy zony Sette-Dabanskogo paleorifta // *Otechestvennaya geologiya*. 2010. No. 6. P. 3–11.
29. *Rundkvist D.V.* Faktor vremeni pri formirovanii gidrotermalnykh mestorozhdeniy: periody, epokhi, etapy i stadii rudoobrazovaniya // *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*. 1997. No. 1. P. 11–24.
30. *Chugayev A.V., Chernyshev I.V.* Pb–Pb izotopnaya sistematika orogennykh mestorozhdeniy zolota Baykalo-Patomskogo skladchatogo poyasa (Severnoye Zabaykalye. Rossiya) i otsenka roli neoproterozoyskoy kory v ikh formirovanii // *Geokhimiya*. 2017. No. 11. P. 1027–1040.
31. *Layer P.W., Newberry R., Fujita K., Parfenov L.M., Trunilina V.A., Bakharev A.G.* Tectonic setting of the plutonic belts of Yakutia, northeast Russia, based on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and trace element geochemistry // *Geology*. 2001. Vol. 29, No. 2, P. 167–170.
32. *Prokopyev A.V., Borisenko A.S., Gamyranin G.N., Fridovskiy V.Yu., Kondratyeva L.A., Anisimova G.S., Trunilina V.A., Vasyukova E.A., Ivanov A.I., Travin A.V., Koroleva O.V., Vasilyev D.A., Ponomarchuk A.V.* Vozrastnyye rubezhi i geodinamicheskiye obstanovki formirovaniya mestorozhdeniy i magmaticheskikh obra-

zovaniy Verkhoyano-Kolymskoy skladchatoy oblasti // Geologiya i geofizika. 2018. No. 10. P. 1542–1563.

33. Prokopyev A.V., Toro J., Hourigan J.K., Bakharev A.G., Miller E.L. Middle Paleozoic-Mesozoic boundary of the North Asian craton and the Okhotsk terrane: new geochemical and geochronological data and their geodynamic interpretation // Stephan Mueller Spec. Publ. Ser. 2009. Vol. 4. P. 71–84.

34. Kondratyeva L.A., Anisimova G.S., Bakharev A.G., Travin A.V., Prokopyev A.V., Borisenko A.S. Zaderzhninskoye zolotorudnoye mestorozhdeniye (Yuzhnoye Verkhoyanye): geologicheskaya pozitsiya. veshchestvennyy sostav rud i vozrast orudneniya // Materialy Vserossiyskoy konferentsii «Novyye i netraditsionnyye tipy mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh Pribaykalia i Zabaykalia». Ulan-Ude. 10–12 noyabrya 2010 g. Ulan-Ude: GIN SO RAN, 2010. P. 105–106.

35. Anisimova G.S., Moskvitin S.G. Redkiye mineraly i intermetallicheskiye soyedineniya v zolotorudnykh formatsiyakh Kularskogo podnyatiya // Redkiye samorodnyye metally i intermetallidy korennykh i rossypnykh mestorozhdeniy Yakutii. Yakutsk: YaNTs, 1992. P. 40–49.

36. Gamyarin G.N. Mineralogo-geneticheskiye aspekty zolotogo orudneniya Verkhoyano-Kolymskikh mezozoid. Moskva: GEOS, 2001. 222 p.

37. Savva N.E. Mineralogiya serebra Severo-Vostoka Rossii. M.: Triumf, 2019. 541 p.

38. Lotina A.A. Vismut-tellurovaya mineralizatsiya uchastka Bolotistyy (Severo-Zapadnyy Sikhote-Alin) // Tikhookeanskaya geologiya. 2011. Vol. 30, No. 1. P. 97–107.

39. Anisimova G.S., Kardashevskaya V.N., Sokolov E.P. Zolotoredkometallnoye (Au–Mo–Te–Bi) orudneniye Verkhnealgominskogo zolotonosnogo rayona (Yuzhnaya Yakutiya) // Otechestvennaya geologiya. 2017. No. 5. P. 12–22.

40. Anisimova G.S., Kondratyeva L.A., Sokolov E.P., Kardashevskaya V.N. Zolotoye orudneniye lebedinskogo i kuranakhskego tipov v Verkhneamginskoy rayone (Yuzhnaya Yakutiya) // Otechestvennaya geologiya. 2018. No. 5 P. 3–13.

41. Koneyev R.I., Khalmatov R.A., Mun Yu.S. Nanomineralogiya i nanogeokhimiya rud zolotorudnykh mestorozhdeniy Uzbekistana // Geologiya rudnykh mestorozhdeniy. 2010. Iss. 52, No. 8. P. 755–766.

42. Nikonorov V.V., Karayev Yu.V., Borisov F.I. i dr. Zoloto Kyrgyzstana. Geologiya. Usloviya lokalizatsii. Bishkek: Nasi, 2004. 271 p.

43. Dzhenchurayeva R.D., Pak N.T., Nikonorov V.V., Ivleva E.A. Zolotorudnyye mestorozhdeniya Kyrgyzstana. Bishkek, 2020. 494 p.

44. Mustafin S.K., Ponomareva A.M., Mikolaychuk G.A. i dr. Mineralogo-tekhnologicheskaya tipizatsiya zolotosoderzhashchikh rud // Rol tekhnologicheskoy mineralogii v rasshirenii syryevoy baza SSSR. Chelyabinsk: VMO, 1986. P. 667–668.

About the authors

ANISIMOVA, Galina Semenovna, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), leading researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-1275-5393>, gsanisimova1952@mail.ru;

KONDRATIEVA, Larisa Afanasyevna, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), senior researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-9347-6427>, lkon12@yandex.ru;

KARDASHEVSKAIA, Veronika Nikolaevna, junior researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-1069-2533>, kardashevskaya92@mail.ru;

MUSTAFIN, Sabir Kabirovich, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), professor, Bashkir State University, 32 Zaki Validi st., Ufa 450076, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-4241-4004>, sabir.mustafin@yandex.ru.

Citation

Anisimova G.S., Kondratieva L.A., Kardashevskaya V.N., Mustafin S.K. Features of the gold-silver-bismuth-tellurium mineralization in the Allakh-Yun metallogenic zone (North-East of Russia) // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021. Vol. 26, No. 3. pp. 5–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-5-30>