

МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА, ПОИСКОВ,
ОЦЕНКИ И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.411:553.08:550.9 (571.56+571.65)

Новые данные по золото-редкометалльному оруденению Центрально-Колымского золотоносного района: возраст, условия образования, состав, рудоконтролирующие факторы

New data on the reduced intrusion-related Au mineralization of Central Kolyma gold region: age, formation conditions, composition, ore-controlling factors

**Пачерский Н. В., Кряжев С. Г., Наумов Е. А.,
Десятова Д. Ю., Двуреченская С. С.,
Самойленко М. В.**

**Pachersky N. V., Kryazhev S. G., Naumov E. A.,
Desyatova D. Yu., Dvurechenskaya S. S.,
Samoilenko M. V.**

Представлены новые данные об условиях формирования и возрасте золото-редкометалльного оруденения Ветренской площади Центрально-Колымского района. Золото-редкометалльное оруденение преимущественно приурочено к участкам пересечения позднеюрских малых интрузивных тел системами трещин северо-восточного направления и представлено зонами маломощных кварцевых прожилков, которые сопровождаются околожильными серицит-кварцевыми метасоматитами. Главным рудным минералом является золотоносный арсенопирит (до 10 %), второстепенными – лёллингит, пирит, халькопирит, пирротин. Микроскопически видимое низкопробное самородное золото находится в парагенезисе с минералами висмута (висмутин, самородный висмут, теллуриды Bi и Au) в виде микровключений (1–10 мкм) в арсенопирите. Изохронный Re-Os возраст золотоносного арсенопирита составляет 137–117 млн лет, по времени формирования оруденение значительно оторвано от вмещающих гранитоидов (147–153 млн лет). По сравнению с золото-кварцевыми объектами золото-редкометалльные сформировались на меньших глубинах, а по сравнению с редкометалльными (W, Mo) – при меньших температурах.

Ключевые слова: Центрально-Колымский район, Ветренская площадь, золото, висмут, вольфрам, молибден, абсолютный возраст, Re-Os, флюидные включения, золото-редкометалльная формация, RIRGS.

New data are presented on the formation conditions and ages of the reduced intrusion-related Au mineralization of the Vetrenskaya area in the Central Kolyma region. The mineralization is predominantly confined to intersections of Late Jurassic minor intrusive bodies and NE-trending fracture systems and is represented by zones of thin quartz veinlets with sericite-quartz halos. The major ore mineral is gold-bearing arsenopyrite (up to 10%), while minor minerals are represented by lellingite, pyrite, chalcopyrite, and pyrrotite. Microscopic native gold of a low fineness is paragenetically associated with bismuth minerals (bismuthine, native bismuth, and tellurides of Bi and Au), forming microinclusions (1–10 μ) in the arsenopyrite. Isochronous Re-Os age of the gold-bearing arsenopyrite is 137–117 Ma, which suggests the mineralization was formed significantly later than the hosting granitoids (147–153 Ma). The reduced intrusion-related Au ore deposit was formed at shallower depths in comparison with orogenic Au deposits, and at lower temperatures in comparison with rare metal (W, Mo) ore deposits.

Keywords: Central Kolyma region, Vetrenskaya area, gold, bismuth, tungsten, molybdenum, absolute age, Re-Os, fluid inclusions, reduced intrusion-related Au ore formational type, RIRGS.

Для цитирования: Пачерский Н. В., Кряжев С. Г., Наумов Е. А., Десятова Д. Ю., Двуреченская С. С., Самойленко М. В. Новые данные по золото-редкометалльному оруденению Центрально-Колымского золотоносного района: возраст, условия образования, состав, рудоконтролирующие факторы. Руды и металлы. 2021. № 2. с. 68–90. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10011.

For citation: Pachersky N. V., Kryazhev S. G., Naumov E. A., Desyatova D. Yu., Dvurechenskaya S. S., Samoilenko M. V. New data on the reduced intrusion-related Au mineralization of Central Kolyma gold region: age, formation conditions, composition, ore-controlling factors. Ores and metals, 2021, № 2, pp. 68–90. DOI: 10.24411/0869-5997-2020-10011.



Золото-редкометалльный формационный тип оруденения – второй по распространённости в Центрально-Колымском золотоносном районе (ЦКР) Верхояно-Колымской минералогической провинции после золото-кварцевого. Оруденение золото-кварцевой формации имеет основное промышленное значение, главные объекты этого типа (Наталка, Павлик и др.) широко освещены в геологической литературе. Потенциал золото-редкометалльной формации до конца не ясен. В последние годы были оценены небольшие месторождения (Тэутэджак, Бутарное, Древний и др.), но условия формирования и закономерности локализации минерализации данного типа изучены всё ещё недостаточно. Новые материалы по золото-редкометалльному оруденению получены авторами при проведении ГДП-200 на Ветренской площади (листы Р-55-XXIV, Р-56-XIX, Магаданская область) ФГБУ «ЦНИГРИ» и ФГБУ «ВСЕГЕИ» (К. Н. Мазуркевич, 2020 г.).

Ветренская площадь расположена в 60 км к востоку от Наталкинского месторождения в юго-восточной части ЦКР (рис. 1) вблизи её границы с Охотско-Чукотским вулканоплутоновым поясом (ОЧВП). На площади известны среднее коренное месторождение золота Ветренское, непромышленные месторождения золота Экспедиционное и вольфрама Бохапчинское, многочисленные золото-кварцевые, золото-редкометалльные и редкометалльные (W, Mo) рудопроявления и пункты минерализации (рис. 2).

Геологическая позиция. Оруденение золото-редкометалльного типа представлено прожилками и прожилковыми зонами с золото-висмут-арсенопиритовой минерализацией преимущественно в малых интрузивных телах (штоках, крупных дайках) и в их экзоконтактах. Многочисленные пункты минерализации известны в Чалбыканской и Малтанской группах штоков басугуньинского комплекса гранит-гранодиоритового состава. В результате ГДП-200 выделено проявление золото-редкометалльной минерализации в одиночном штоке Хилтан того же комплекса; установлено присутствие золото-редкометалльной минерализации на непромышленном месторожде-

нии Экспедиционное, локализованном в крупной дайке диорит-порфиритов нера-бохапчинского комплекса. Отдельную немногочисленную группу представляют проявления золото-редкометалльной минерализации на контактах и внутри крупных гранитных массивов (Ярыга и Больших Порогов) сибердикского и колымского комплексов (см. рис. 2). Все указанные интрузивы близкого возраста и состава составляют региональный Главный Колымский батолитовый пояс, сформированный в позднеюрский этап коллизионного (орогенного) развития территории.

Составы рудовмещающих интрузивных пород Ветренской площади приведены на схематическом графике зависимости степени фракционирования (отношение Rb / Sr) от степени окисления (Fe_2O_3 / FeO) для интрузивных пород, связанных с минерализацией Cu-Au, W-Mo, Au-(Bi) и Sn [11] (рис. 3). Практически все фигуративные точки лежат в области «восстановленных» гранитоидов ильменитовой серии, с которыми связаны магматогенно-гидротермальные Au-(Bi) месторождения RIRGS-типа (Reduced Intrusion Related Gold Systems). Данный тип оруденения выделен зарубежными геологами более 20 лет назад [21]. В настоящее время термин получил широкое распространение в мире и активно используется российскими геологами [2, 22, 23]. С месторождениями типа RIRGS в Верхояно-Колымской провинции сопоставляется золото-редкометалльное оруденение, для которого характерны преобладание арсенопирита в составе сульфидов и присутствие минералов висмута в ассоциации с самородным золотом [3].

Структурно-вещественная характеристика. Золотоносные сульфидно-кварцевые и кварц-сульфидные прожилки рассекают граниты с различным шагом. Прожилки прямые, ровные, непротяжённые, мощностью от нитевидных до первых сантиметров. Контакты прожилков не тектонизированы. Группы субпараллельных прожилков образуют прожилковые зоны. Ширина зон первые метры, десятки метров. Редко они включают небольшие жилы мощностью до 0,5 м. По своим морфологическим особенностям близки по описанию к сис-

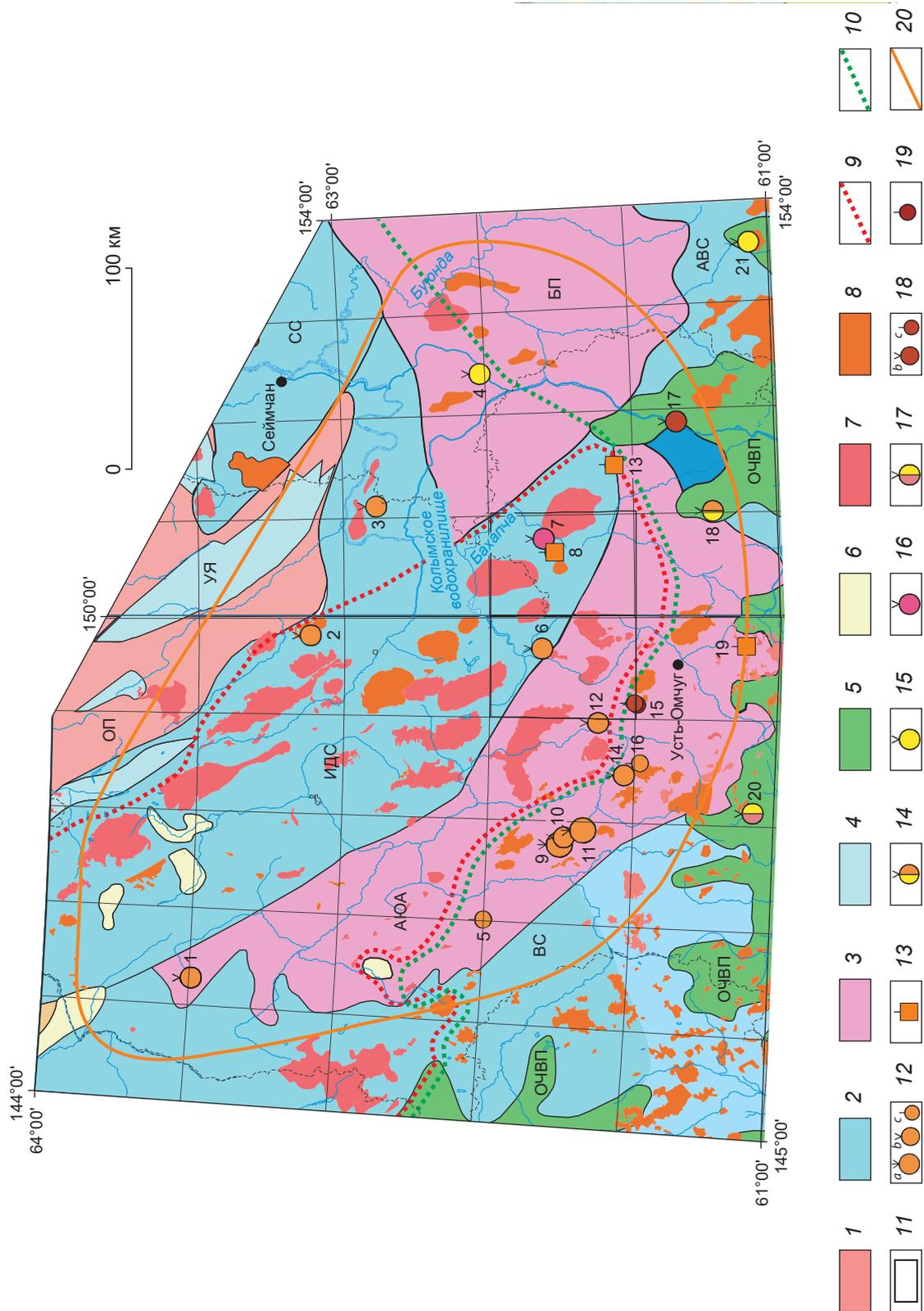


Рис. 1. Схема тектонического районирования и размещения месторождений полезных ископаемых, по материалам ГК-1000/3 листов P-55 [10] и P-56 [8] с добавлениями:

Верхояно-Чукотская складчатая область (1 – Омүлөвское складчато-блоковое поднятие (ОП) Индигиро-Колымской складчатой системы); Яно-Колымская складчатая система (2 – синклинии: Верхнеиндигирский (ВС), Иньяли-Дебинский (ИДС), Сугойский (СС), Армано-Вилигинский (АВС)); 3 – цепь внутренних антиклинорий, поднятий (Аян-Юрхский антиклинорий (АЮА), Балыгычанское поднятие (БП)); 4 – позднеюрский Уяндино-Ясачинский вулканический пояс (УЯ); 5 – Охотско-Чукотский ранне-позднеоловой окраинно-континентальный вулканогенный пояс (ОЧВП); 6 – кайнозойские континентальные впадины Момского и Охотско-Анадырского рифтов; интрузивные комплексы: 7 – коллизионные позднеюрские-раннемеловые, 8 – ранне-позднеоловые плутонические; границы плутонических поясов: 9 – позднеюрского Главного Колымского, 10 – мелового Приохотского; 11 – Ветренская площадь; месторождения: 12 – золота (золото-кварцевой формации), здесь и далее *a* – крупное, *b* – среднее, *c* – малое (13 – золота, 19 – урана); редкометалльной формации), 14 – золота, серебра, 15 – серебра, 16 – вольфрама, 17 – сурьмы, серебра, 18 – олова, 19 – урана); 20 – Центральное-Колымский золотоносный район; основные месторождения и их номера на карте: 1 – Верхне-Хакчанское (Au), 2 – Штурмовское (Au), 3 – Утинское, 4 – Ветвистое (Ag), 5 – Дегдекан (Au), 6 – Ветренское (Au), 7 – Бохалчинское (W), 8 – Экспедиционное (Au), 9 – Наталка (Au), 10 – Омчакское (Au), 11 – Павлик (Au), 12 – Школьное (Au), 13 – Древнее (Au), 14 – Игуменовское (Au), 15 – Бутугычач (Sn, U), 16 – Родионовское (Au), 17 – Хета (Sn), 18 – Агаатовское (Au, Ag), 19 – Тэутэдзак (Au), 20 – Утро (Sb, Ag), 21 – Нявлена (Ag, Au)

Fig. 1. Schematic map showing the tectonic zoning and mineral deposit location (compiled using materials of GK-1000/3, sheets P-55 [10] and P-56 [8], with modifications):

Verkhoyansk-Chukotka fold area: 1 – Omulevsky folded-block uplift (ОП) of the Indigirka-Kolyma fold system; Yana-Kolyma fold system: 2 – synclines: Verkhneindigirsky (BC), Inyali-Debinsky (ИДС), Sugovsky (СС), Armano-Vilginsky (АВС); 3 – chain of internal anticlinoriums and uplifts: Ayan-Yuryakh anticlinorium (АЮА), Balygychan uplift (БП); 4 – Late Jurassic Uyandina-Yasachnaya volcanic belt (УЯ); 5 – Early-Late Cretaceous continental marginal Okhotsk-Chukotka volcanic belt (ОЧВП); 6 – Cenozoic continental basins of the Moma and Okhotsk-Anadyr rifts; intrusive complexes: 7 – collisional, Late Jurassic-Early Cretaceous; 8 – plutonic, Early-Late Cretaceous; boundaries of plutonic belts: 9 – Main Kolyma of the Late Jurassic, 10 – Priokhotsky of the Cretaceous; 11 – Vetreenskaya area; ore deposits: 12 – gold (orogenic type), 13 – gold (reduced intrusion-related Au type), 14 – gold and silver, 15 – silver, 16 – tungsten, 17 – antimony and silver, 18 – tin, 19 – uranium (*a* – large, *b* – medium, *c* – small); 20 – Central Kolyma gold-bearing region; the principal ore deposits and their numbers on the map: 1 – Verkhne-Hakchanskoe (Au), 2 – Shturmovskoe (Au), 3 – Utinskoe, 4 – Vetvistoe (Ag), 5 – Degdekan (Au), 6 – Vetreenskoe (Au), 7 – Bokhapchinskoe (W), 8 – Ekspeditsionnoe (Au), 9 – Natalka (Au), 10 – Omchakskoe (Au), 11 – Pavlik (Au), 12 – Shkol'noe (Au), 13 – Drevnee (Au), 14 – Igumenovskoe (Au), 15 – Butugychag (Sn, U), 16 – Rodionovskoe (Au), 17 – Kheta (Sn), 18 – Agatovskoe (Au, Ag), 19 – Teutedzhak (Au), 20 – Utro (Sb, Ag), and 21 – Nyavlenka (Ag, Au)

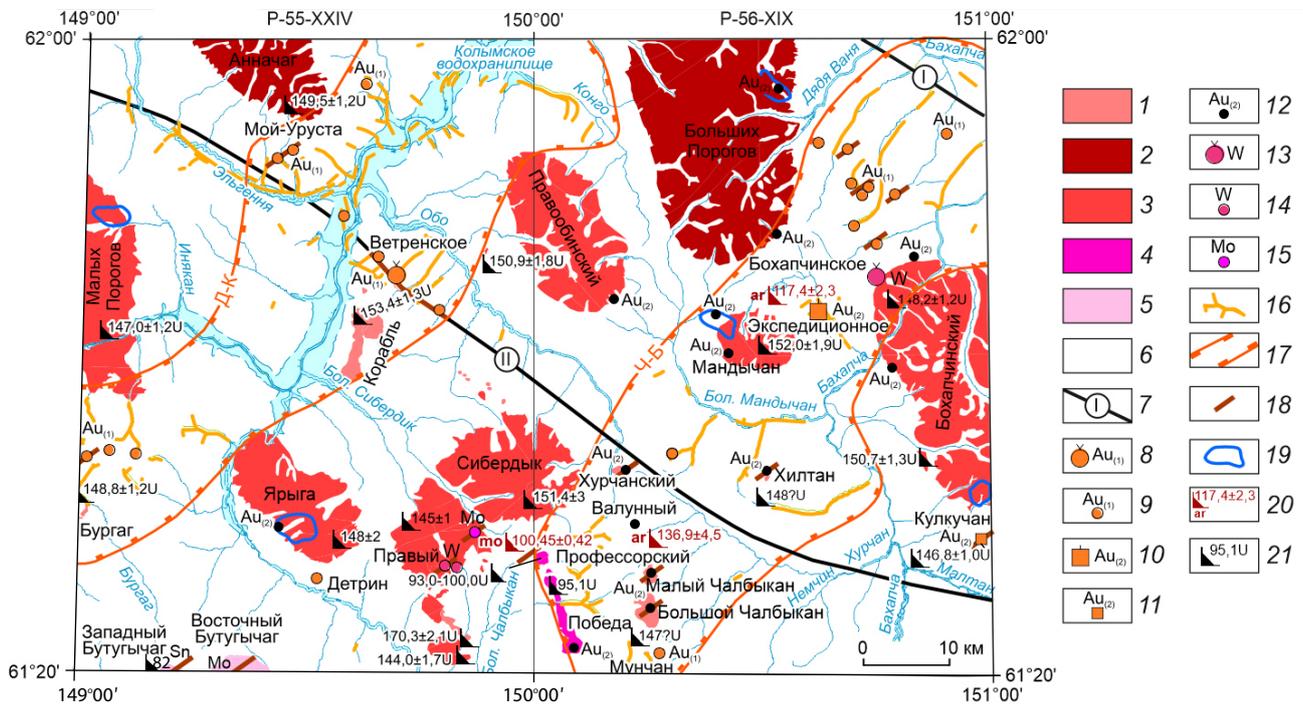


Рис. 2. Схема размещения золотого и редкометалльного оруденения с результатами ГДП-200 на Ветренской площади:

позднеюрские интрузивные комплексы: 1 – басугуньинский, 2 – колымский, 3 – сибердикский; позднемеловые интрузивные комплексы: 4 – иретьско-малкачанский, 5 – верхне-ямский; 6 – терригенно-осадочные породы поздней перми, триаса, нижней юры; 7 – региональные разломы: I – Умарский, II – Чай-Юрьинский; золото-кварцевая формация: 8 – среднее месторождение Ветренское, 9 – рудопоявления; золото-редкометалльная формация: 10 – непромышленное месторождение Экспедиционное, 11 – проявление Кулкучан, 12 – пункты минерализации; 13 – месторождение вольфрама Бохачинское; 14 – рудопоявления вольфрама; 15 – рудопоявления молибдена; 16 – россыпи золота; 17 – зоны максимальной продуктивности рудной и россыпной золотоносности (Д-К – Дусканынско-Колымская, Ч-Б – Чалбыкано-Бохачинская); 18 – направление рудных жил, прожилков, зон; 19 – вторичные геохимические аномалии золото-редкометалльного типа в пределах батолитов; пункты определения абсолютного возраста: 20 – изохронным Re-Os методом рудных минералов (ar – арсенопирит, мо – молибденит), 21 – U-Pb SHRIMP-методом интрузивных пород (с индексом «U» – результаты ГДП-200, без – данные прошлых лет [8, 10])

Fig. 2. Map of mineral resources with the results of additional geological study (GDP-200) at the Vetrenskaya area:

Late Jurassic intrusive complexes: 1 – Basuguninsky, 2 – Kolymsky, 3 – Siberdiksky; Late Cretaceous intrusive complexes: 4 – Iretsk-Malkachansky, 5 – Verkhne-Yamsky; 6 – Late Permian, Triassic, Lower Jurassic terrigenous sedimentary rocks; 7 – regional faults: I – Umarsky, II – Chai-Yuria; orogenic Au formational type: 8 – Vetrenskoe middle-sized ore deposit, and 9 – mineral occurrences; reduced intrusion-related Au ore formational type: 10 – Ekspeditsionnoe subeconomic ore deposit, 11 – Kulkuchan occurrence, and 12 – mineral occurrences; 13 – Bokhapchinskoe tungsten deposit; 14 – tungsten occurrences; 15 – molybdenum occurrences; 16 – gold placers; 17 – zones of the maximum productivity of lode and placer gold; 18 – orientation of ore veins, veinlets, and zones; 19 – secondary Au-Bi-As metal geochemical anomalies within batholiths; absolute dating locations: 20 – Re-Os isochron (ar – arsenopyrite, mo – molybdenite), 21 – U-Pb SHRIMP method of intrusive rocks (index U indicates the results of the geological additional study of regions (GDP-200), no index denotes previous data)

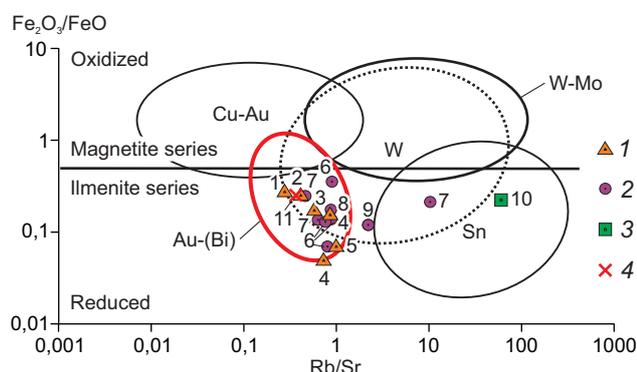


Рис. 3. Составы интрузивных пород на диаграмме $Fe_2O_3 / FeO - Rb / Sr$ [11]:

интрузивный комплекс, его возраст и название массива: 1 – басугунинский, J_3 (1 – Курум, 2 – Хилтан, 3 – Бургагинский, 4 – Большой Чалбыкан, 5 – Каприз); 2 – сибердикский, J_3 (6 – Сибердык, 7 – Малых Порогов, 8 – Ярыга, 9 – Бохапчинский); 3 – иретьско-малкачанский, K_1 (10 – Профессорский); 4 – верхне-ямский, K_2 (11 – Восточный Бутугычаг)

Fig. 3. $Fe_2O_3 / FeO - Rb / Sr$ diagram for intrusive rocks [11]:

intrusive complex, its age and name: 1 – Basuguninsky, J_3 (1 – Kurum, 2 – Khiltan, 3 – Burgaginsky, 4 – Bolshoi Chalbykan, 5 – Kapriz); 2 – Teberdinsky, J_3 (6 – Siberdyk, 7 – Malye Porogi, 8 – Yaryga, 9 – Bokhachinsky); 3 – Iretsk-Malkachansky, K_1 (10 – Professorskiy); 4 – Verkhne-Yamsky, K_2 (11 – Vostochny Butugychag)

темам прожилкования (послойные «sheeted», или листовидные) на месторождениях провинции Тинтина (Аляска) [15]. Характерна локализация золото-арсенопиритовых прожилков в системах тектонических трещин и зон дробления северо-восточного направления, секущих штоки или проходящих по их контактам.

Наиболее типичным признаком золото-редкометалльной минерализации является развитие вкрапленного, прожилкового, агрегатно-гнездового арсенопирита (рис. 4). В отдельных участках прожилков его количество составляет до 50 % и более, до образования мономинеральных прожилковидных выделений по плоскостям трещин. В меньшем количестве развиты пирит, лёллингит, пирротин, халькопирит,

шеелит, редко – молибденит. Прожилки сопровождаются маломощными (до первых сантиметров) оторочками метасоматитов серицит-кварцевого состава с вкрапленностью метакристаллов пирита и арсенопирита и спорадически проявленной карбонатизацией (кальцит, анкерит).

Рудные образования характеризуются в целом невысокой золотоносностью (0,1–3,0 г/т). В отличие от золото-кварцевого формационного типа, часто, наряду с золотом, фиксируются повышенные до 10–50 г/т и более содержания серебра, отсутствуют экстремально высокие содержания золота. Повышенные (до 15 г/т) содержания золота по штучному опробованию, как правило, связаны с обогащением проб арсенопиритом. Участки развития сульфидно-кварцевого прожилкования в штоках сопровождаются интенсивными вторичными геохимическими аномалиями Au-As-Bi-W с высокой корреляцией этих элементов. Нередки крупные ореолы золота с содержанием > 0,1 г/т. В ручьях развиты шлиховые ореолы золота и шеелита.

В результате минералого-петрографических исследований установлен однотипный вещественный состав рудной минерализации и сопутствующих околорудных метасоматитов на всех изученных проявлениях.

Золотоносность руд определяется проявлением интенсивной гнездово-вкрапленной лёллингит-арсенопиритовой минерализации с тонкодисперсной (< 10 мкм) вкрапленностью минералов висмута (висмутин, самородный висмут и др.) и низкопробного самородного золота (электрума) (рис. 5). Рудная минерализация представлена двумя последовательно сформированными продуктивными ассоциациями.

Ранняя пирит-арсенопиритовая минерализация входит в состав околорудных метасоматитов. Пирит образует метакристаллы размером 0,5–1,0 мм. Ромбовидные кристаллы арсенопирита-1 имеют меньшие размеры (от 0,25 до 0,5 мм), иногда содержат включения халькопирита. Арсенопирит-2, характерной особенностью которого является отсутствие кристаллографических форм, образует мономинеральные прожилки и крупные (до 1 см) выделения



Рис. 4. Арсенопирит (ar) гнездово-вкрапленный в кварце (q) на месторождении Экспедиционное

Fig. 4. Nested-disseminated arsenopyrite (ar) in quartz (q) at the Ekspeditsionnoye deposit

неправильной формы в жильном и прожилковом кварце. Возможно, арсенопирит-1 и арсенопирит-2 отлагались близодновременно в различных зонах метасоматической колонки при разной степени пресыщения растворов рудообразующими компонентами. В ассоциации с арсенопиритом-2 закономерно встречается лёллингит. Золотоносность руд зависит от содержания в них арсенопирита-2, которое варьирует от 1 до 10 %.

Поздняя продуктивная ассоциация – индикаторная для данного типа оруденения – представлена минералами висмута в парагенезисе с самородным золотом (см. рис. 5). Характер наблюдаемых взаимоотношений свидетельствует о более позднем отложении золото-редкометалльной минерализации по отношению к арсенопириту-2: чаще всего она приурочена к интерстициям в катаклазированных агрегатах этого минерала.

Среди висмутовых минералов по оптическим свойствам уверенно диагностируются висмутин и самородный висмут. Присутствуют также теллуриды золота, теллуриды и сульфотеллуриды висмута. В большинстве случаев размеры их выделений, как и самородного золота, составляют 1–10 мкм. Весьма вероятно, что значительное количество золота и его спут-

ников находится в арсенопирите в виде субмикроскопической примеси. Судя по насыщенности цвета в аншлифах, самородное золото имеет низкую пробность (электрум, 500–700 ‰).

Околорудная метасоматическая зональность на всех изученных проявлениях практически идентична (рис. 6).

Вмещающие гранодиориты во внешней зоне изменений хлоритизированы и окварцованы, структура пород гипидиоморфнозернистая порфириовидного облика. Вкрапленники представлены таблитчатыми кристаллами альбитизированного, карбонатизированного и серицитизированного плагиоклаза. В промежуточной зоне темноцветные минералы полностью замещены хлоритом, плагиоклаз вкрапленников полностью альбитизирован, карбонатизирован и интенсивно серицитизирован. Отмечается анкерит. Интерстиционное пространство выполнено кварцем в виде ксеноморфных отдельных зёрен или мелких агрегатов, часто с тонкорассеянной вкрапленностью сульфидов и тонкими чешуйками хлорита. Сульфиды представлены арсенопиритом-1, пиритом, пирротинном, халькопиритом. Как правило, пирротин и халькопирит образуют мелкие выделения, приуроченные к полностью замещённым тёмноцветным минералам. Арсенопирит и пирит

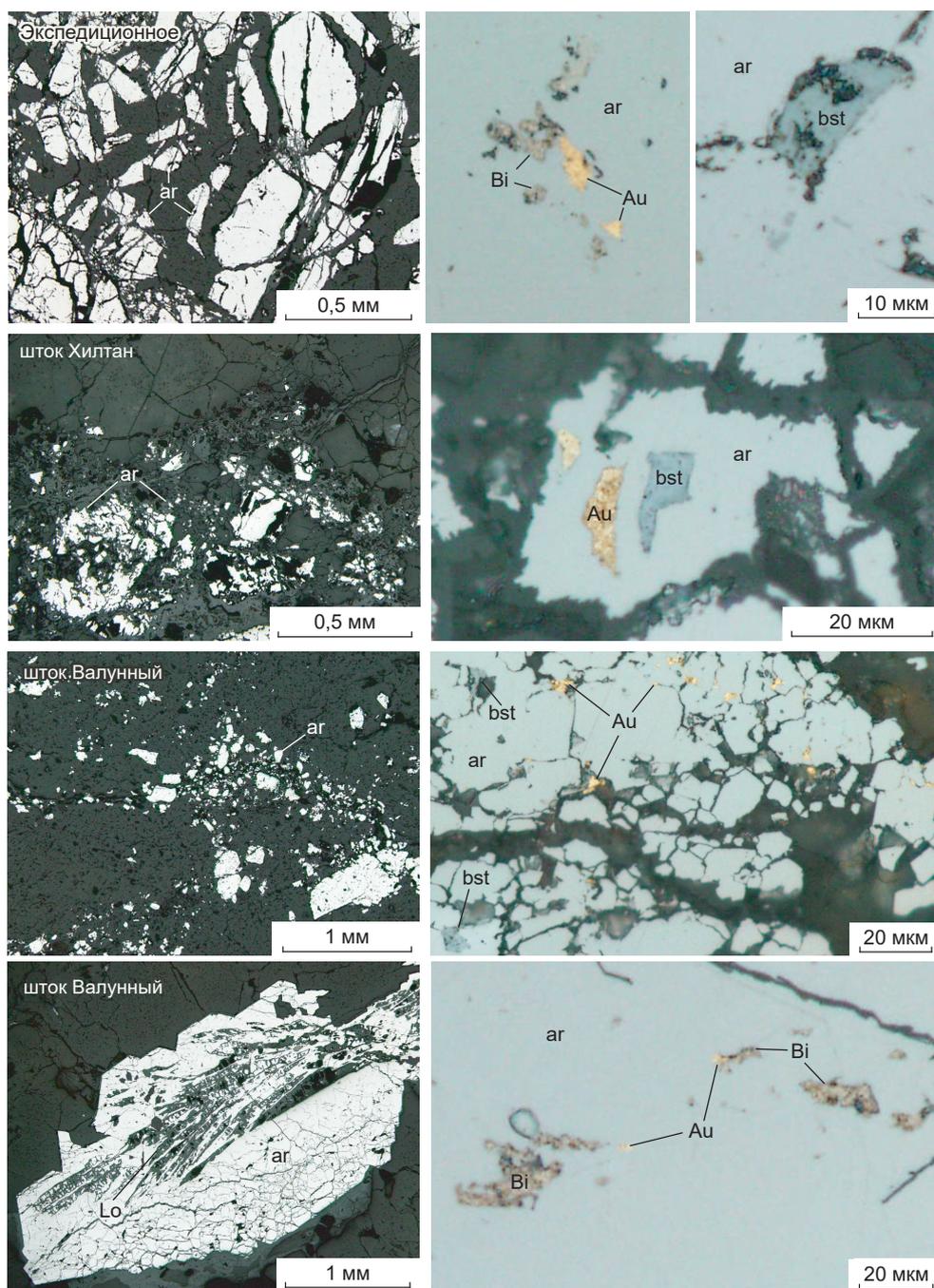


Рис. 5. Золото-редкометалльная минерализация (фото шлифов):

минералы: ar – арсенопирит, Lo – лёллингит, bst – висмутин, Bi – самородный висмут, Au – самородное золото

Fig. 5. Au-Bi mineralization (reflected light photos of polished sections):

minerals: ar – arsenopyrite, Lo – loellingite, bst – bismuthine, Bi – native bismuth, Au – native gold

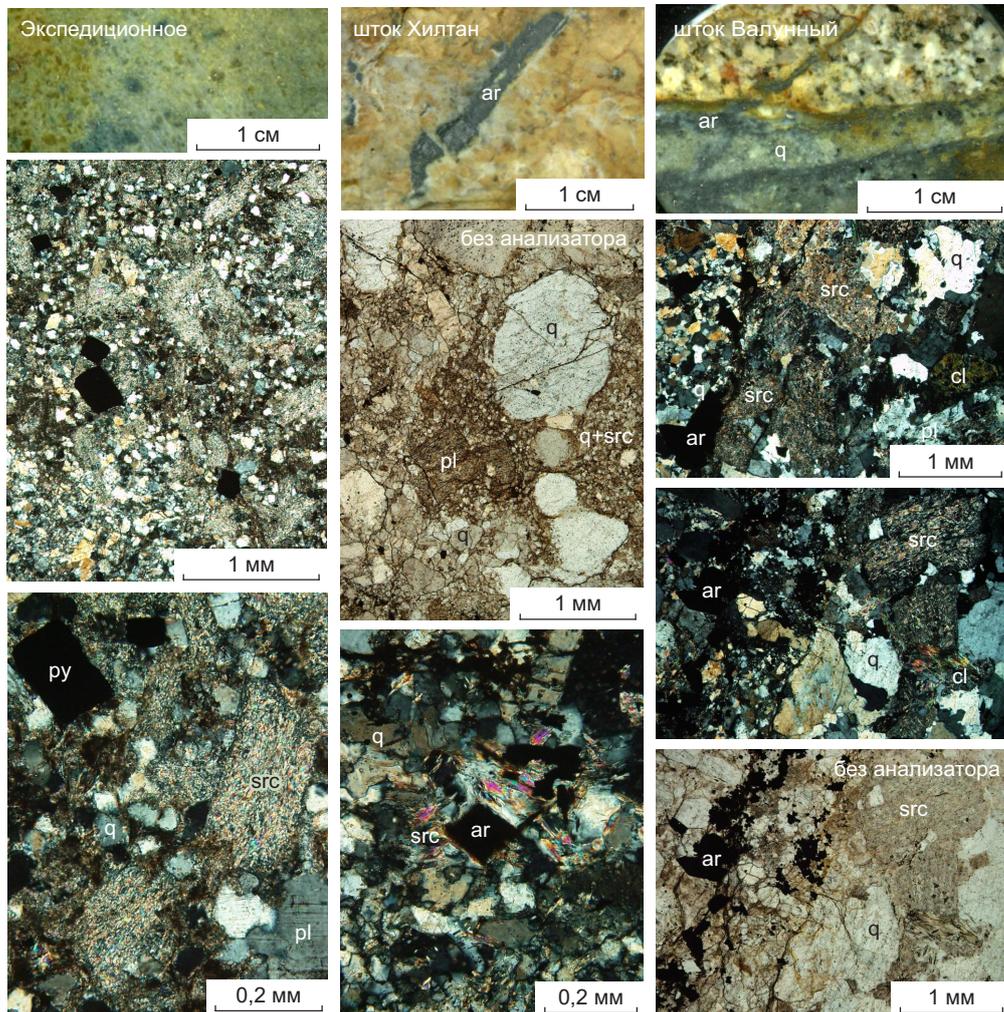


Рис. 6. Березиты, вмещающие золото-редкометалльную минерализацию (фото образцов и прозрачных шлифов):

минералы: q – кварц, pl – плагиоклаз, cl – хлорит, src – серицит, ar – арсенопирит, py – пирит

Fig. 6. Beresites hosting Au-Bi mineralization (photos of hand samples and thin sections):

minerals: q – quartz, pl – plagioclase, cl – chlorite, src – sericite, ar – arsenopyrite, py – pyrite

присутствуют в виде редких хорошо сформированных метакристаллов. Во внутренней зоне изменений увеличивается количество кварца (до 40–60 %) и серицита (30–40 %). Структура породы становится аллотриоморфнозернистой. Метасоматиты состоят из мелкозернистого агрегата серицит-кварцевого состава, в котором наблюдаются редкие скопления ре-

ликтового хлорита и таблитчатые кристаллы серицитизированного альбита. В этой зоне располагаются кварцевые прожилки мощностью до 5 см, несущие золото-редкометалльную минерализацию (арсенопирит-2, минералы висмута, самородное золото). Мощность метасоматических ореолов сопоставима с мощностью кварцевых прожилков (первые сантиметры).



Околорудные метасоматические изменения, сопровождающие золотоносную минерализацию, соответствуют низкотемпературным околожильным кислотным метасоматитам серицит-(анкерит-пирит)-кварцевого состава. В отечественной литературе подобные метасоматиты относятся к березитам и березитизированным породам [5].

Условия образования. Для определения физико-химических условий минералообразования изучены флюидные включения в жильном кварце проявлений золото-редкометалльной минерализации на месторождении Экспедиционное, в штоках Хилтанский и Валунный, а также в кварце золото-кварцевых и редкометалльных (W, Mo) проявлений Ветренской площади. Их исследование позволит сравнить закономерности эволюции рудообразующих флюидных систем, продуктивных на тот или иной тип оруденения.

Образцы жильного кварца для термобарогеохимических исследований отобраны сотрудниками ЦНИГРИ. В большинстве образцов обнаружены флюидные включения, размеры которых дали возможность выполнить цикл необходимых микротермометрических измерений (рис. 7). Результаты анализов представлены в табл. 1.

Микротермометрические анализы индивидуальных включений проводились в прозрачно-полированных пластинках с использованием криотермокамеры УМТК+ конструкции ЦНИГРИ, позволяющей выполнять охлаждение и нагревание препаратов от -180 до $+650$ °С с измерением температур фазовых переходов во включениях посредством хромель-алюмелевой термопары. Камеру калибровали при температурах тройной точки чистой CO_2 ($-56,6$ °С), температурах плавления льда в стандартных растворах NaCl (от -18 до -1 °С), температурах плавления AgNO_3 (210 °С) и K_2CrO_7 (398 °С).

Установлено, что золото-редкометалльная минерализация сформирована в интервале температур от 340 до 285 °С, который согласуется с наблюдаемым низкотемпературным характером околорудных изменений и присутствием в рудах самородного висмута (темпера-

тура плавления 270 °С). Давление при рудообразовании составляло $0,5$ – $0,3$ кбар, что в условиях литостатического градиента соответствует глубинам 2 – 1 км, гидростатического – 5 – 3 км. В рудоносных растворах содержится значительное количество метана (отношение $\text{CO}_2 / \text{CH}_4$ варьирует от 3 до $0,7$), что может свидетельствовать о поступлении золотоносных растворов из глубинных очагов восстановленной магмы. На восстановительные условия рудоотложения указывает также наличие ассоциации арсенопирита с пирротинном и лёллингитом.

По физико-химическим параметрам формирования изученные золото-редкометалльные проявления Ветренской площади могут быть сопоставлены с малоглубинными среднетемпературными Au-Vi месторождениями Яно-Колымской провинции [22].

Золото-кварцевый тип представлен убогосульфидными кварцевыми жилами и прожилками в углеродисто-терригенных породах. Околорудные изменения выражены слабо и преимущественно заключаются в карбонатизации, серицитизации и окварцевании. Продуктивные ассоциации – арсенопирит-пиритовая и халькопирит-галенитовая с относительно крупным ($0,1$ – 1 мм) высокопробным самородным золотом.

Исследования флюидных включений показали, что золото-кварцевая минерализация сформирована в интервале температур 300 ± 20 °С и давлений $1,3$ – $1,4$ кбар при участии разбавленных (1 – 2 мас. % NaCl-экв.) существенно углекислотных растворов (отношение $\text{CO}_2 / \text{CH}_4$ значительно превышает 10). Рудообразование протекало на глубинах свыше 5 км от палеоповерхности (давление $1,3$ – $1,4$ кбар). Таким образом, по структурно-вещественным и термобарогеохимическим признакам золото-кварцевая минерализация Ветренской площади в полной мере соответствует оруденению так называемого орогенного типа [14, 18]. Предполагается, что в Яно-Колымском поясе подобные объекты имеют плутоногенно-метаморфогенное происхождение [4].

Редкометалльный тип оруденения включает проявления шеелитовой, вольфрамито-

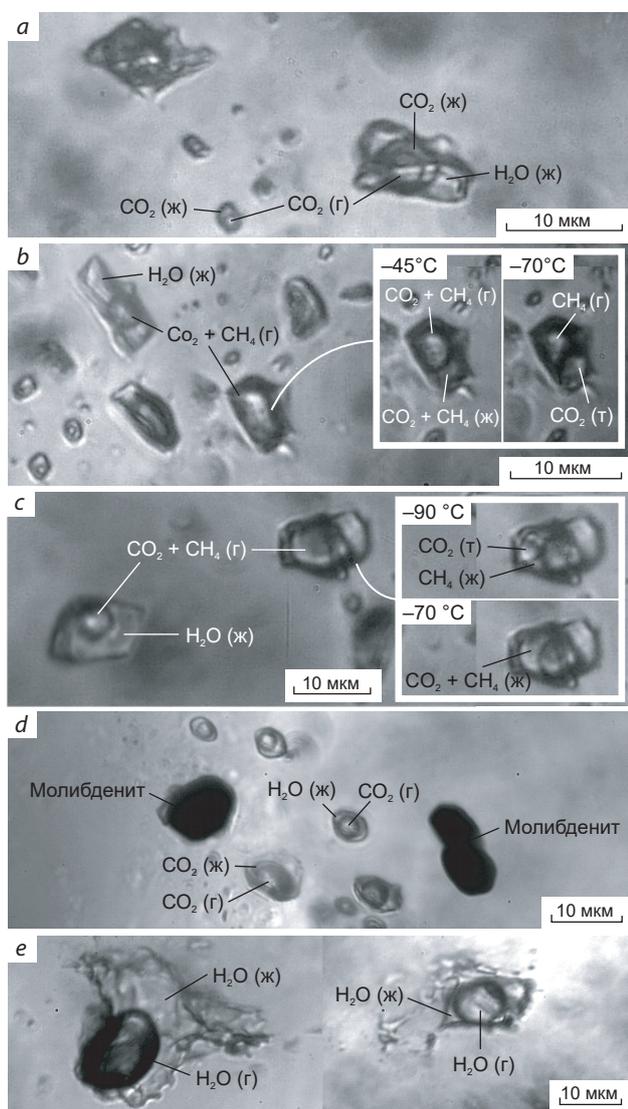


Рис. 7. Ассоциации флюидных включений в кварце месторождений и рудопоявлений различных типов:

типы минерализации: *a* – золото-кварцевый (Мой-Уруста), *b* – золото-редкометалльный (Валунный), *c* – шеелит-кварцевый (Сибердык), *d* – молибденит-кварцевый (Профессорский), *e* – кварц грейзенов (Профессорский); фазы: CO₂ – углекислота твёрдая (т), жидкая (ж), газообразная (г), CH₄ – метан жидкий и газообразный, H₂O – водно-солевой раствор (ж) и пар (г)

Fig. 7. Associations of fluid inclusions in quartz from the ore deposits and mineral occurrences of various types:

mineralization types: *a* – orogenic Au (Moy-Urusta), *b* – reduced intrusion-related Au (Valunny), *c* – scheelite-quartz (Siberdik), *d* – molybdenite-quartz (Professorsky), *e* – greisen quartz (Professorsky); phases: CO₂ – carbon dioxide: solid (т), liquid (ж), gaseous (г), CH₄ – methane liquid (ж) and gaseous (г), H₂O – water-salt solution (ж) and vapor (г)

вой и молибденитовой минерализации в кварцевых прожилках, локализованных в грейзенизированных гранитах. Сопряжённая с грейзенами молибденит-кварцевая минерализация изучена в штоке Профессорский. В жильном кварце здесь выявлены флюидные включения двух генераций. Включения ранней генерации первичны по отношению к кварцу, а их состав и свойства полностью соответствуют условиям грейзенизации [1]. Минералообразующие водно-солевые растворы во включениях имеют характерную концентрацию (10 мас. % NaCl-экв.) и были захвачены при температуре 450 ± 5 °C. Включения второй генерации со-

провожают выделения молибденита и характеризуют условия его кристаллизации. У них более низкая температура (380 ± 10 °C); присутствует газообразная углекислота с примесью метана ($CO_2 / CH_4 > 10$). Обе генерации образованы при относительно низком давлении (400 бар), которое в условиях литостатического градиента отвечает глубинам порядка 1,5 км.

Молибденит-кварцевые прожилки в штоке Каприз (Кулчучанское рудопоявление) характеризуются близкими *PT*-условиями формирования (380 °C, 550 бар) при существенно метановом составе рудоносных флюидов ($CO_2 / CH_4 = 0,25$).

Табл. 1. Параметры флюидных включений в кварце рудопроявлений Ветренской площади

Table 1. Parameters of fluid inclusions in quartz from the ore occurrences of the Vetrenskaya area

| Месторождения, рудопроявления | Температуры фазовых переходов, °С | | | | | Расчётные параметры | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|----------|----------------|--------------|-----------|--------------------------------|-------------------|-----------|
| | Тип ФВ | $T_{гр}$ | $T_{пл\ CO_2}$ | $T_{гом\ C}$ | $T_{гом}$ | $H_2O : CO_2 : CH_4$, моль. % | NaCl, мас. %-экв. | P , бар |
| <i>Золото-кварцевые</i> | | | | | | | | |
| Мой-Уруста | LC | 9,2 | -56,6 | 24,0 (ж) | 310–320 | 82 : 18 : 0 | 1,7 | 1300 |
| | C | – | -56,6 | 23,2 (ж) | – | 15 : 85 : 0 | – | |
| Мунчан | LC | 6,5 | -56,7 | 23,6 (ж) | 290–300 | 88 : 12 : 0 | 6,6 | 1300 |
| Ветренское | LC | 9,0 | -58,7 | 10,4 (ж) | 280–290 | 80 : 19 : 1 | 2,0 | 1400 |
| | C | – | -58,9 | 8,0 (ж) | – | 25 : 70 : 5 | – | |
| <i>Золото-редкометалльные</i> | | | | | | | | |
| Шток Хилтан | LC | 10,5 | – | – | 295–305 | 96 : 3 : 1 | – | 300 |
| | C | – | -59,5 | -1 (г) | – | 60 : 30 : 10 | – | |
| Экспедиционное | LC | 11,8 | – | – | 285–315 | 94 : 3 : 3 | – | 350 |
| | C | – | -61,8 | -15 (г) | – | 54 : 23 : 23 | – | |
| Шток Валунный | LC | 11,2 | – | – | 330–340 | 90 : 4 : 6 | – | 500 |
| | C | – | -65,0 | -30 (г) | – | 25 : 30 : 45 | – | |
| <i>Молибденит-кварцевые</i> | | | | | | | | |
| Шток Профессорский | L | -6,6* | – | – | 445–455 | 100 : 0 : 0 | 10,0 | 400 |
| | LC | 8,7 | -57,5 | 21,1 (г) | 370–390 | 91,5 : 8 : 0,5 | 2,7 | 400 |
| Кулкучан | LC | 9,4 | -69,0 | -63 (г) | 375–385 | 90 : 2 : 8 | > 4,5 | 550 |
| <i>Шеелит-кварцевые</i> | | | | | | | | |
| Правый (массив Сибердык) | LC | 15,5 | – | – | 350–400 | 90 : 2 : 8 | – | 750 |
| | C | – | -71,7 | -62,8 (ж) | – | 25 : 15 : 60 | – | |
| <i>Вольфрамит-кварцевые</i> | | | | | | | | |
| Бохапчинское | LC | 9,7 | -57,5 | 13,0 (ж) | 315–330 | 74 : 25 : 1 | 1,0 | 1600 |
| | C | – | -58,0 | 2,8 (ж) | – | 13 : 84 : 3 | – | |

Примечание. Типы флюидных включений (ФВ): LC – углекислотно-водные, C – углекислотные, L – водные; измеренные температуры: $T_{гр}$ – плавления газогидрата (* – плавления льда), $T_{пл\ CO_2}$ – плавления углекислоты, $T_{гом\ C}$ – гомогенизации углекислоты в газовую (г) или жидкую (ж) фазу, $T_{гом}$ – полной гомогенизации включения путём растворения газов в воде. Расчётные параметры: $H_2O : CO_2 : CH_4$ – мольные доли (%) флюидных компонентов во включениях, оцененные по плотности газов и степени наполнения, NaCl – концентрация солей в водном растворе, определённая по $T_{гр}$; P – давление, оценённое по плотности существенно углекислотных включений и температуре гомогенизации водно-углекислотных включений, а также по растворимости CO_2 в растворе NaCl при $T_{гом}$ [7]. В каждой группе проанализировано не менее пяти индивидуальных включений.

Шеелит-кварцевая минерализация изучена на рудопроявлении Правое в эндоконтакте Сибердыкского массива гранитов. Процессы грейзенизации в породах массива протекали в условиях относительно низких температур (350–400 °С) и повышенных давлений (около 750 бар), что соответствует глубинам не ме-

нее 3 км от палеоповерхности. При этом минералообразующие растворы имели восстановленный характер с существенным преобладанием метана над углекислотой ($CO_2 / CH_4 = 0,25$).

Для вольфрамит-кварцевой жилы, залегающей в типичных мусковитовых грейзенах на

месторождении Бохапчинское, определены условия кристаллизации крупнокристаллического вольфрамита, которые соответствуют температурам 315–330 °С и давлению 1,6 кбар. В отличие от проявления вольфрама шеелитового типа Сибердыкского массива, основным газовым компонентом флюидов здесь является углекислота (отношение $\text{CO}_2 / \text{CH}_4$ значительно превышает 10).

По физико-химическим условиям формирования все изученные рудные объекты отчетливо разделяются на три группы (рис. 8). Объекты первой группы были сформированы при температурах 330–280 °С в условиях высокого давления (1,3–1,6 кбар), что фиксируется по наличию во флюидных включениях фазы жидкой углекислоты. В группу входят проявления золото-кварцевого типа в углеродисто-терригенных породах и вольфрамит-кварцевые жилы в грейзенах месторождения Бохапчинское.

Вторая группа объединяет проявления золото-редкометалльного (штоки Валунный и Хилтанский, Экспедиционное месторождение и др.) и редкометалльного оруденения (шеелитовая минерализация Сибердыкского массива, молибденитовая минерализация Кулкучанского рудопроявления). Данные объекты сформированы при относительно низких давлениях (золото-редкометалльные – 0,5–0,3 кбар, $T = 340\text{--}285$ °С, редкометалльные – 0,75–0,55 кбар, $T = 400\text{--}350$ °С) при участии восстановленных флюидов, что фиксируется по присутствию во флюидных включениях фазы газообразного метана.

Выявленное существенное различие *PT*-условий формирования объектов золото-редкометалльного и редкометалльного типов может рассматриваться как элемент термобарогеохимической зональности единой рудно-магматической системы. Согласно существующим представлениям [6], в верхней части подобных систем происходит преимущественное накопление золото-мышьяковистых (в данном случае золото-редкометалльных) руд.

К третьей группе относится проявление молибденитовой минерализации в грейзенизированных гранитах штока Профессорский. Кварц грейзенов кристаллизовался при тем-

пературе 450 ± 5 °С и давлении 0,4 кбар из водно-солевых растворов при отсутствии углеродсодержащих газов. Отложение молибденита происходило после снижения температуры до 380 °С из окисленных растворов, на что указывает наличие во включениях фазы газообразной углекислоты.

Значительная разница давлений минералообразующих флюидов позволяет предполагать, что рудные объекты выделенных групп сформированы на разных глубинах от палеоповерхности (от 5–6 до 2–3 км) и, таким образом, принадлежат к разным этапам (эпохам) рудообразования. При этом наблюдаемые различия состава рудоносных растворов (вариации отношений $\text{CO}_2 : \text{CH}_4 : \text{H}_2\text{O}$) могли быть обусловлены особенностями состава их источников – глубинных флюидно-магматических очагов.

Возраст оруденения. Традиционно в качестве рудогенерирующего для золото-редкометалльного оруденения в регионе рассматривается позднеюрский этап магматизма, так как большинство проявлений этого типа локализовано в малых интрузиях (штоки, дайки, небольшие массивы) гранитов и гранодиоритов позднеюрского возраста (см. рис. 2).

Изотопно-геохронологические характеристики интрузивных комплексов в пределах Ветренской площади и в целом в Магаданской области изучены достаточно полно. Получены также единичные оценки возраста рудных образований на основе Ar-Ar определения возраста слюд из околорудных метасоматитов. В частности, для Ветренского месторождения получена датировка 125 млн лет, для Школьного – 135,2 млн лет [13, 17]. Однако Ar-Ar метод является косвенным, поскольку синхронность образования слюд и рудных минералов не всегда однозначна.

С целью определения возраста оруденения и установления его связей с геологическими событиями и магматизмом, в 2020 г. в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ проведены изотопно-геохронологические исследования изохронным Re-Os методом [16], который признан наиболее достоверным при датировании сульфидных руд [20].

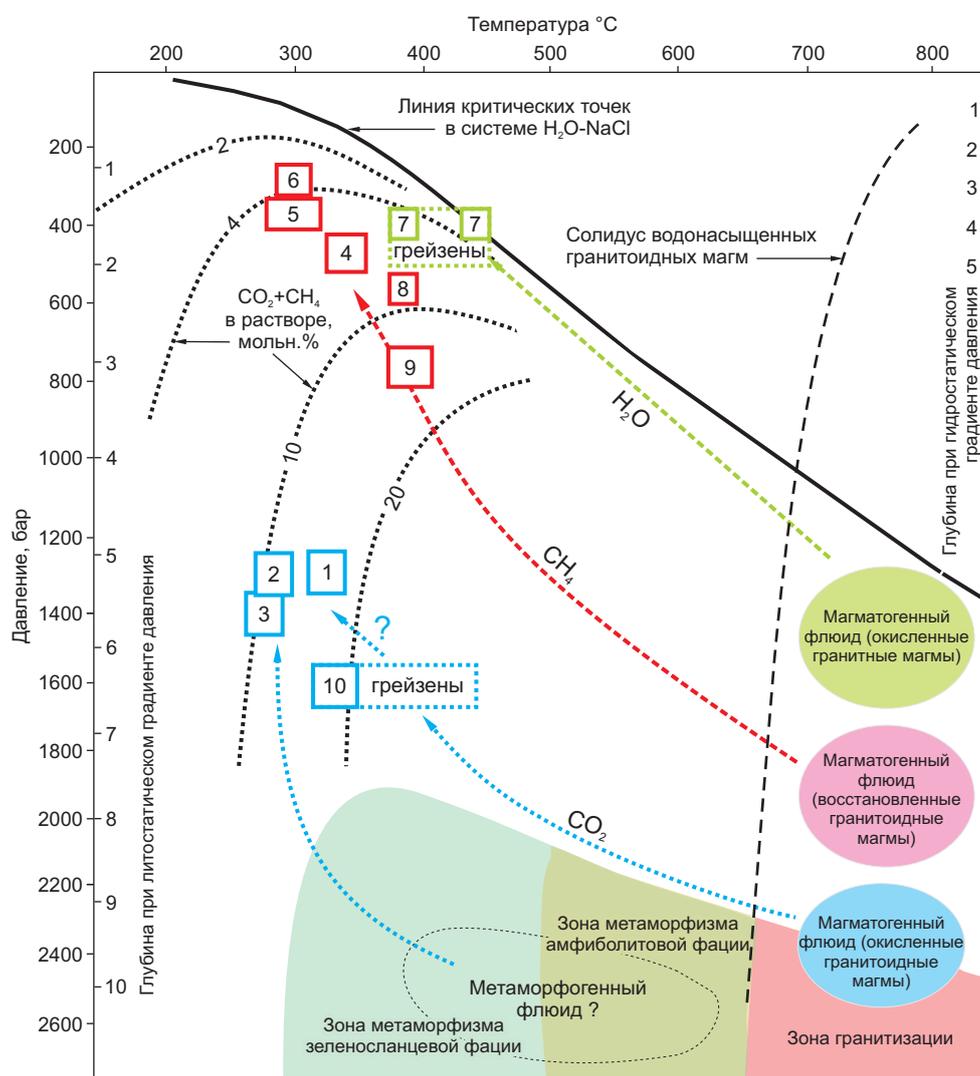


Рис. 8. *PT*-условия формирования рудной минерализации Ветренской площади:

линии и поля на диаграмме, по [19]; показаны вероятные тренды эволюции рудообразующих флюидов; типы минерализации (участки, месторождения): золото-кварцевый (1 – Мой-Уруста, 2 – Мунчан, 3 – Ветренское), золото-редкометалльный (4 – Валунный, 5 – Экспедиционное, 6 – Хилтан), молибденит-кварцевый (7 – Профессорский, 8 – Кулкучан), шеелит-кварцевый (9 – Правый), вольфрамит-кварцевый (10 – Бохапчинское)

Fig. 8. *PT* conditions of the ore mineral formation at the Vetrenskaya area:

lines and fields in the diagram, after [19]; probable trends of evolution of the ore-forming fluids are shown; mineralization types (mineralized zones, ore deposits): orogenic Au (1 – Moy-Urusta, 2 – Munchan, 3 – Vetrenskoe), reduced intrusion-related Au (4 – Valunnyi, 5 – Ekspeditsionnoe, 6 – Khiltan), molybdenite-quartz (7 – Professorsky, 8 – Kulkuchan), scheelite-quartz (9 – Pravyi), and wolframite-quartz (10 – Bokhapchinskoe)

Поскольку арсенопирит-2 – главный минерал-концентратор золота в рудах золото-редкометалльного типа, его изотопный возраст наиболее близок к времени рудообразования. Для геохронологических исследований отобраны четыре пробы арсенопирита-2 из проявления штока Валунный и пять проб из проявления Экспедиционное. В сравнительном плане проанализирован также молибденит из редкометалльного проявления штока Профессорский (шесть проб).

Выделение и очистку Re и Os для изотопного анализа выполняли по общепринятой методике [12]. Изотопный состав осмия измерен на твёрдофазном мультиколлекторном масс-спектрометре Triton на ионном счётчике в динамическом режиме в отрицательных ионах. Для коррекции на масс-фракционирование использовано отношение $^{192}\text{Os} / ^{188}\text{Os} = 3,092016$. Значение внутреннего стандарта $^{187}\text{Os} / ^{188}\text{Os} = 0,11997 \pm 0,00001$. Для измерения изотопного состава Re использован масс-спектрометр с индуктивно-связанной плазмой Element-2. Полученные результаты представлены в таблице 2.

По результатам Re-Os изохронного датирования возраст арсенопирита из руд месторождения Экспедиционное составил $117,6 \pm 2,3$ млн лет, арсенопирита из золотоносных арсенопирит-кварцевых прожилков в гранодиоритах штока Валунный – $137,1 \pm 4,5$ млн лет, молибденита из кварц-молибденитовых прожилков в гранитах штока Профессорский – $100,6 \pm 0,4$ млн лет (рис. 9).

Изотопный состав серы датированных арсенопиритов определён в ЦНИГРИ. Серу сульфидов переводили в SO_2 посредством реакции с CuO при 760°C в вакууме с последующими криогенной очисткой газа и анализом изотопного состава серы на масс-спектрометре МИ-1201. Результаты пересчитаны по отношению к метеоритному стандарту CDT. В качестве эталонов использовали лабораторный стандартный образец ЦНИГРИ «Пирит Гайского месторождения» с $\delta^{34}\text{S} = +0,7\text{‰}$ и стандартный образец сфалерита NBS 123 с $\delta^{34}\text{S} = +17,3\text{‰}$. Точность измерений составляет $\pm 0,2\text{‰}$. Образец 2195-4 (Валунный) показал значение $\delta^{34}\text{S} =$

$-7,2\text{‰}$, в образце 2350-9 (Экспедиционное) $\delta^{34}\text{S} = -4,9\text{‰}$.

Рудовмещающий шток Валунный не датирован, но для соседнего штока Большой Чалбыкан аналогичного состава того же басугуньинского комплекса возраст 147 млн лет определён U-Pb методом по циркону (ЦИИ ВСЕГЕИ). Крупная рудовмещающая дайка диорит-порфиров на месторождении Экспедиционное не имеет датировок. По геологическому положению и составу её можно отнести к нера-бохалчинскому или к басугуньинскому комплексу с возрастом порядка 150 млн лет. Полученные датировки арсенопирита свидетельствуют о более молодом возрасте рудной минерализации. Разрыв между возрастными арсенопиритов и вмещающих интрузивных пород в случае с рудами месторождения Экспедиционное очень значителен и составляет ~ 40 млн лет, в штоке Валунный он меньше – ~ 10 млн лет.

Полученный интервал возрастов арсенопирита (137–117 млн лет) соответствует времени формирования серицита из околорудных метасоматитов на ряде золоторудных (в том числе золото-редкометалльных) объектов Яно-Колымского пояса [9].

По результатам литохимического опробования донных отложений и почв ЦНИГРИ установлены комплексные золото-редкометалльные (Au-As-Bi-W-Sn) аномалии на гранитах массива Ярыга сибердикского комплекса (J_3) в верховьях руч. Крутой (рис. 10). Концентрация золота в пробах почв достигает $0,9$ г/т. Наложение вторичных геохимических аномалий золото-редкометалльной ассоциации на крупные интрузивные массивы сибердикского и колымского комплексов также свидетельствует о постбатолитовом возрасте золото-редкометалльного оруденения.

Важной особенностью, установленной в результате работ, является ведущее значение в контроле размещения проявлений золото-редкометалльной минерализации системы тектонических трещин, разрывов, зон дробления северо-восточного направления. Северо-восточное направление прожилковых зон отмечено в пределах штоков Чалбыканской и Малтанской групп, в штоке Хилтан и в рудовмещаю-



Табл. 2. Результаты изотопного Re-Os анализа сульфидов

Table 2. Results of Re-Os isotopic analysis of sulfides

| Номера образцов | Содержание | | $^{187}\text{Re} / ^{188}\text{Os}$ | Погрешность $\pm 2\sigma$, % | $^{187}\text{Os} / ^{188}\text{Os}$ | Погрешность $\pm 2\sigma$, % | Изохронный возраст, млн лет |
|-------------------------------------|------------|---------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| | Re, ppm | Os, ppb | | | | | |
| <i>Арсенопирит (Валунный)</i> | | | | | | | |
| 2198-1a-1 | 0,213 | 0,036 | 29,87 | 1,338 | 0,452 | 0,54679 | 137,1 \pm 4,5 |
| 2195-4-2 | 0,229 | 0,029 | 40,14 | 0,034 | 0,832 | 0,56951 | |
| 2195-2-3 | 0,504 | 0,026 | 100,60 | 0,546 | 1,170 | 0,70756 | |
| 2198-1-5 | 0,710 | 0,035 | 103,44 | 0,381 | 0,855 | 0,71502 | |
| <i>Арсенопирит (Экспедиционное)</i> | | | | | | | |
| 2350-9-1 | 0,297 | 0,030 | 50,89 | 0,221 | 0,697 | 0,62430 | 117,6 \pm 2,3 |
| 2350-9-2 | 0,397 | 0,035 | 57,79 | 0,241 | 1,241 | 0,63831 | |
| 2350-9-3 | 0,879 | 0,031 | 148,50 | 0,417 | 0,577 | 0,81958 | |
| 2350-9-4 | 0,459 | 0,046 | 50,67 | 0,478 | 0,677 | 0,62488 | |
| 2350-9-5 | 1,023 | 0,028 | 193,09 | 0,104 | 0,632 | 0,90034 | |
| <i>Молибденит (Профессорский)</i> | | | | | | | |
| 6059 | 20,1 | 36,8 | 6394 | 0,089 | 0,420 | 11,20 | 100,6 \pm 0,4 |
| 6060 | 51,0 | 70,3 | 15389 | 0,199 | 0,813 | 26,39 | |
| 6061 | 10,5 | 29,3 | 2894 | 0,067 | 0,489 | 5,340 | |
| 6062 | 60,7 | 83,4 | 15549 | 0,080 | 0,697 | 26,64 | |
| 6063 | 17,1 | 31,0 | 6608 | 0,169 | 0,264 | 11,56 | |
| 6064 | 48,4 | 154 | 2356 | 0,129 | 0,576 | 4,471 | |

щей дайке на месторождении Экспедиционное (см. рис. 2). При этом главное рудоконтролирующее направление для золото-кварцевого оруденения в регионе – северо-западное (месторождения Ветренское, Наталка, Павлик и др.).

Северо-восточное направление имеют зоны максимальной продуктивности россыпной золотоносности (см. рис. 2), которая наиболее объективно отражает площади развития золоторудной минерализации в коренных породах.

Широкое площадное развитие и выдержанность направления данных структур позволяют выделить региональную рудоконтролирующую систему северо-восточной рассеянной трещиноватости. Эта система является рудоносной не только для золото-редкометалльного типа минерализации, но и контролирует размещение широкого спектра других полезных ископаемых в рассматриваемом районе.

В поздне меловом гранитном массиве Западный Бутугычаг северо-восточные разрывы являются рудовмещающими для оловянного

и уранового оруденения (Бутугычагское месторождение), в массиве Восточный Бутугычаг вмещают молибденит-кварцевые жилы, в позднеюрском Сибердыкском массиве контролируют кварц-шеелитовые (проявление руч. Правый) и кварц-молибденитовые прожилки и жилы (проявление Семёновский), в районе поздне мелового штока Профессорский – молибденовую, урановую, серебряную минерализацию. Вольфрамоворудное месторождение Бохапчинское представлено линейным штоком восточного простирания (см. рис. 2).

Северо-восточные зоны имеют значительные протяжённость и ширину, нечёткие границы, слабо выраженные в геологических и геофизических полях. «Вспышки» оруденения наблюдаются только в пределах наложения зон на интрузивные тела различного размера (массивы, штоки, дайки) и, в подчинённом количестве, на роговики и песчаники (месторождение Экспедиционное) в экзоконтактах этих тел.

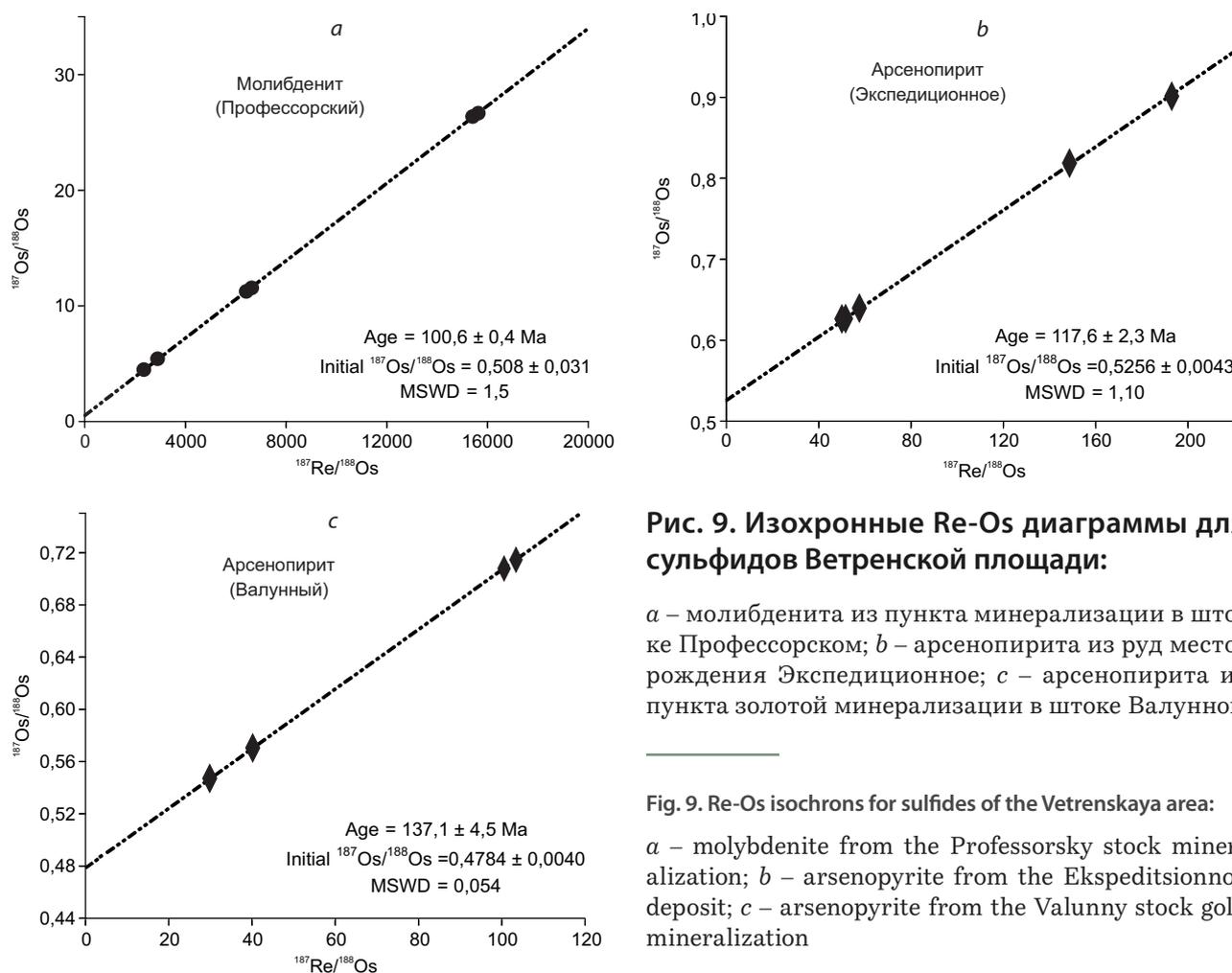


Рис. 9. Изохронные Re-Os диаграммы для сульфидов Ветренской площади:

a – молибдена из пункта минерализации в штоке Профессорском; *b* – арсенопирита из руд месторождения Экспедиционное; *c* – арсенопирита из пункта золотой минерализации в штоке Валунном

Fig. 9. Re-Os isochrons for sulfides of the Vetrenskaya area:

a – molybdenite from the Professorsky stock mineralization; *b* – arsenopyrite from the Ekspeditsionnoe deposit; *c* – arsenopyrite from the Valunnyy stock gold mineralization

В монотонных толщах преимущественно алевролитового состава такая система не выражена.

Однотипные морфологические особенности, серебро-золото-редкометалльная рудная специализация, развитие на большой площади показывают, что изучаемая система рудоносных трещин могла приоткрыться и стать проницаемой для рудоносных растворов в обособленный этап функционирования регионального поля напряжений, сопряжённого с определённым рудно-тектоническим этапом. Они могут интерпретироваться как региональная система трещин отрыва, механизм образования которой до конца не ясен. Возможно, она возникла при продольном растяжении (в направлении северо-запад – юго-восток) и изгибе при подъёме территории относительно зо-

ны будущего ОЧВП. В этом случае находят объяснение рассеянный характер трещиноватости, её мало- и безамплитудность, приуроченность к крупным поверхностям раздела (боковые зоны магматогенных валов) и преимущественное развитие в более компетентных породах (гранитах, песчаниках).

Подъём территории подтверждается различной глубиной формирования золото-кварцевого оруденения (син- или постбатолитового), оцениваемой в 5–6 км, и золото-редкометалльной минерализации (2–3 км), при том, что в современном положении они находятся на одном гипсометрическом уровне. Интересно также отметить, что более ранняя золото-редкометалльная минерализация штока Валунный (137 млн лет), по сравнению с проявлениями

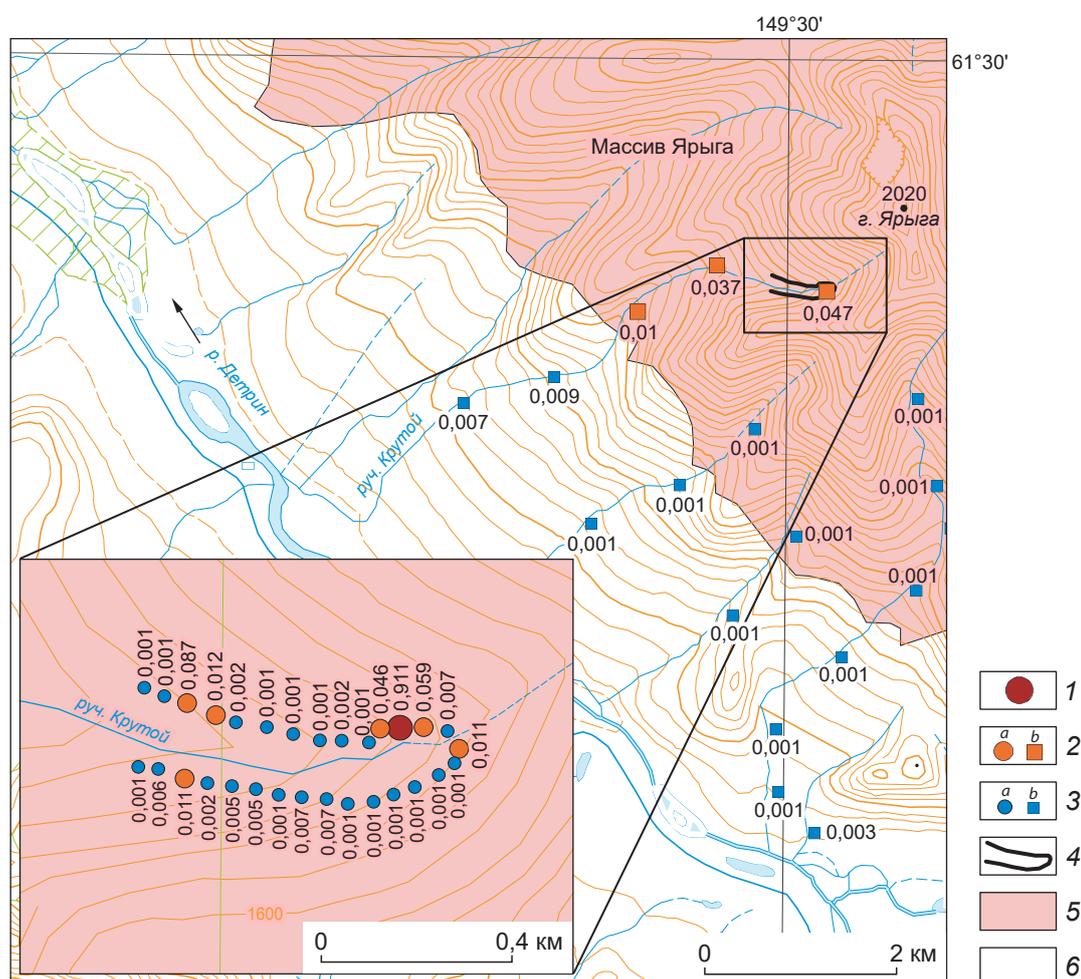


Рис. 10. Литохимические аномалии золота в донных отложениях и почвах в пределах гранитного массива Ярыга:

концентрация золота, г/т: 1 – >0,1, 2 – 0,01–0,1, 3 – 0,001–0,01 (*a* – в почвах, *b* – в донных отложениях); 4 – профиль оборотовочного литохимического опробования почв; 5 – граниты сибердикского комплекса, J_3 ; 6 – роговики и терригенно-осадочные породы триаса

Fig. 10. Lithochemical gold anomalies in the bottom sediments and soils within the Yaryga granite massif:

gold concentration, g/t: 1 – >0.1, 2 – 0.01–0.1, 3 – 0.001–0.01 (*a* – in soils, *b* – in bottom sediments); 4 – profile of lithochemical soil sampling; 5 – granites of the Siberdiksky complex, J_3 ; 6 – Triassic hornfels and terrigenous-sedimentary rocks

штока Хилтан, и месторождения Экспедиционное (117 млн лет) характеризуется относительно повышенными температурами, давлением и отношением CH_4 / CO_2 при рудообразовании (см. табл. 1).

Таким образом, система рудоконтролирующих северо-восточных нарушений имеет пеструю металлогеническую специализацию переходного типа (включая золото-редкометалльную) и наложена на интрузивы Главного Ко-

лымского батолитового пояса в переходной зоне к ОЧВП. Это подтверждается данными датирования рудных минералов, показывающих значительный отрыв между временем их образования и рудовмещающих позднеюрских штоков, наложением геохимических золото-редкометалльных аномалий на крупные гранитные массивы (см. рис. 2, 10) и малоглубинным характером золото-редкометалльного оруденения. По всем вышеперечисленным данным время формирования золото-редкометалльной минерализации в пределах листа Р-56-ХІХ может быть отнесено к меловому этапу тектоно-магматической активизации Верхояно-Колымской складчатой области [9].

В заключение приведем основные выводы.

1. Оруденение золото-редкометалльной формации, распространённое на Ветренской площади Центрально-Колымского золотоносного района, преимущественно приурочено к участкам пересечения малых интрузивных тел басугуньинского комплекса системами трещин северо-восточного направления.

2. Золото-редкометалльное оруденение представлено зонами маломощных кварцевых прожилков, которые сопровождаются около-

жилковыми серицит-кварцевыми метасоматитами. Главные рудные минералы – золотоносный арсенопирит, количество которого в рудах достигает 10 %, второстепенные – лёллингит, пирит, халькопирит, пирротин. Микроскопически видимое низкопробное самородное золото находится в тесном парагенезисе с минералами висмута (висмутин, самородный висмут, теллуриды Вi и Au) в виде микровключений (1–10 мкм) в арсенопирите.

3. Изохронный Re-Os возраст золотоносного арсенопирита составляет 137–117 млн лет. По времени формирования золото-редкометалльная минерализация значительно оторвана от вмещающих гранитоидов (около 150 млн лет).

4. Золото-редкометалльная минерализация Ветренской площади была сформирована в интервале температур от 340 до 290 °С и давлений от 0,5 до 0,3 кбар при участии восстановленных углекислотно-метановых флюидов (CO₂ / CH₄ от 0,7 до 3). По составу рудообразующих флюидов и по *PT*-параметрам она существенно отличается от золотокварцевого оруденения (как менее глубинная) и от редкометалльного (W, Mo) оруденения (как более низкотемпературная).

Список литературы

1. Бортников Н. С., Аранович Л. Я., Кряжев С. Г., Смирнов С. З., Гоневчук В. Г., Семеняк Б. И., Дубинина Е. О., Гореликова Н. В., Соколова Е. Н. Баджальская оловоносная магматогенно-флюидная система (Дальний Восток, Россия): переход от кристаллизации гранитов к гидротермальному отложению руд // Геология рудных месторождений. – 2019. – Т. 61, № 3. – С. 3–31.
2. Волков А. В., Сидоров А. А. Прогнозно-поисковая модель месторождений золота, связанных с интрузивами гранитоидов арктической зоны России // Арктика: экология и экономика. – 2018. – № 3 (31). – С. 84–99. – DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-84-99.
3. Гамянин Г. Н. Минералого-генетические аспекты золотого оруденения Верхояно-Колымских мезозойд. – М. : ГЕОС, 2001. – 221 с.
4. Горячев Н. А. Происхождение золото-кварцевых жильных поясов Северной Пацифики. – Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 2003. – 143 с.
5. Жариков В. А., Русинов В. Л., Маракушев А. А., Зарайский Г. П., Омеляненко Б. И., Перцев Н. Н., Расс И. Т., Андреева О. В., Абрамов С. С., Подлеский К. В. Метасоматизм и метасоматические породы. – М. : Научный мир, 1998. – 492 с.
6. Кряжев С. Г. Гидродинамическая модель золотоносных флюидных систем в углеродисто-терригенных толщах (на примере месторождений Енисейского кряжа) // Цветные металлы и минералы – 2019 : сборник докладов Одиннадцатого международного конгресса. – 2019. – С. 670–676.
7. Кряжев С. Г. Современные проблемы теории и практики термобарогеохимии // Руды и металлы. – 2010. – № 2. – С. 38–45.



8. Кузнецов В. М., Жигалов С. В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Р-56 (Сеймчан). – СПб., 2008.
9. 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. – Т. 59, № 10. – С. 1542–1563.
10. Шпикерман В. И., Васькин А. Ф., Желебогло О. В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Р-55 (Сусуман). – СПб., 2016.
11. Baker T., Pollard P. J., Mustard R., Mark G., Graham J. L. A comparison of granite-related tin, tungsten, and gold-bismuth deposits: implications for exploration // Society of Economic Geologists Newsletter. – 2005. – № 61. – P. 5–17.
12. Birck J. L., Barman M. R., Campas F. Re-Os isotopic measurements at the femtomole level in natural samples // Geostandards Letters. – 1997. – V. 20, № 1. – P. 19–27.
13. Goryachev N. A., Pirajano F. Gold deposits and gold metallogeny of Far East Russia // Ore Geology Reviews. – 2014. – № 59. – P. 123–151.
14. Groves D. I., Goldfarb R. J., Gebre-Mariam M., Hagemann S. G., Robert F. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationships to other deposit types // Ore Geology Reviews. – 1998. – № 13. – P. 7–27.
15. Hart C. J. R., Goldfarb R. J. Distinguishing intrusion-related from orogenic gold systems // Proceedings of the 2005 New Zealand Minerals Conference (Auckland, 13–16 November, 2005). – P. 125–133.
16. Luck J. M., Allegre C. J. The study of molybdenites through the ^{187}Re - ^{187}Os chronometer // Earth and Planetary Science Letters. – 1982. – V. 61. – P. 291–296.
17. Newberry R. J., Layer P. W., Gans P. B., Goncharov V. I., Goryachev N. A., Voroshin S. V. Preliminary chronology analysis of Mesozoic magmatism, tectonics and ore mineralization on North-East Russia according $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and trace elements data on igneous and ore rocks // Gold Mineralization and Granitoid Magmatism of North Pacific: Proceedings of the All-Russia Meeting (Magadan, 4–6 September, 1999). – Magadan: NEISRI FEB RAS, 1999. – P. 181–205.
18. Ridley J. R., Diamond L. W. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models // Reviews in Economic Geology. – 2000. – V. 13. – P. 141–162.
19. Soloviev S. G., Kryazhev S. G., Dvurechenskaya S. S., Trushin S. I. The large Bakyrchik orogenic gold deposit, eastern Kazakhstan: Geology, mineralization, fluid inclusion, and stable isotope characteristics // Ore Geology Reviews. – 2020. – V. 127. – P. 1–28.
20. Stein H. J., Morgan J. W., Markey R. J., Hannah J. L. An introduction to Re-Os: What's in it for the mineral industry? // Society of Economic Geologists Newsletter. – 1998. – № 32. – P. 8–15.
21. Thompson J. F. H., Sillitoe R. H., Baker T., Lang J. R., Mortensen J. K. Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces // Mineralium Deposita. – 1999. – V. 34. – P. 197–217.
22. Vikent'eva O. V., Prokofiev V. Y., Gamyagin G. N., Bortnikov N. S., Goryachev N. A. Intrusion-related gold-bismuth deposits of North-East Russia: PTX parameters and sources of hydrothermal fluids // Ore Geology Reviews. – 2018. – № 102. – P. 240–259.
23. Zaitsev A. I., Fridovsky V. Yu., Kudrin M. V. Granitoids of the Ergelyakh Intrusion-Related Gold-Bismuth Deposit (Kular-Nera Slate Belt, Northeast Russia): Petrology, physicochemical parameters of formation, and ore potential // Minerals. – 2019. – № 9, 297. – DOI: 10.3390/min9050297.

References

1. Bortnikov N. S., Aranovich L. Ya., Kryazhev S. G., Smirnov S. Z., Gonevchuk V. G., Semenyak B. I., Dubinina E. O., Gorelikova N. V., Sokolova E. N. Badzhal'skaya olovonosnaya magmatogenno-flyuidnaya sistema (Dal'nii Vostok, Rossiya): perekhod ot kristallizatsii granitov k gidrotermal'nomu otlozheniyu rud [Bajal Tin Magmato-Fluid System (Far East, Russia): Transition from crystallization of granites to hydrothermal deposition of ores], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits],

- 2019, V. 61, No 3, pp. 3–31. (In Russ.).
2. Volkov A. V., Sidorov A. A. Prognozno-poiskovaya model' mestorozhdenii zolota, svyazannykh s intruzivami granitoidov arkticheskoi zony Rossii [Forecast search model of gold deposits associated with the intruded granitoids of the Arctic zone of Russia], *Arktika: ekologiya i ekonomika [Arctic: Ecology and Economics]*, 2018, No 3 (31), pp. 84–99, DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-84-99. (In Russ.).
 3. Gamyanin G. N. Mineralogo-geneticheskie aspekty zolotogo orudneniya Verkhoyano-Kolymykh mezo-zoid [Mineralogical and genetic aspects of gold mineralization of the Verkhoyansk-Kolyma Mesozoids], Moscow, GEOS Publ., 2001, 221 p.
 4. Goryachev N. A. Proiskhozhdenie zoloto-kvartsevykh zhil'nykh pojasov Severnoi Patsifiki [The origin of gold-quartz residential belts of the Northern Pacific], Magadan, SVKNII DVO RAN Publ., 2003, 143 p.
 5. Zharikov V. A., Rusinov V. L., Marakushev A. A., Zairaiskii G. P., Omel'yanenko B. I., Pertsev N. N., Rass I. T., Andreeva O. V., Abramov S. S., Podlesskii K. V. Metasomatizm i metasomaticheskie porody [Metasomatism and metasomatic rocks], Moscow, Nauchnyi mir Publ., 1998, 492 p.
 6. Kryazhev S. G. Gidrodinamicheskaya model' zolotonosnykh flyuidnykh sistem v uglerodisto-terrigennykh tolshchakh (na primere mestorozhdenii Eniseiskogo kryazha) [Hydrodynamic model of gold-bearing fluid systems in carbon-terrigenous strata (on the example of the Yenisei ridge deposits)], *Tsvetnye metally i mineraly – 2019 : sbornik dokladov Odinnadtsatogo mezhdunarodnogo kongressa [Nonferrous metals and minerals – 2019: Collection of reports of the eleventh International Congress]*, 2019, pp. 670–676.
 7. Kryazhev S. G. Sovremennye problemy teorii i praktiki termobarogeokhimi [Modern problems of theory and practice of thermobarogeochemistry], *Rudy i metally [Ores and Metals]*, 2010, No 2, pp. 38–45. (In Russ.).
 8. Kuznetsov V. M., Zhigalov S. V. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Verkhoyano-Kolymyanskaya. List R-56 (Seimchan) [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1,000,000 (third generation). Verkhoyansk-Kolymyanskaya series. Sheet R-56 (Seimchan)], St. Petersburg, 2008.
 9. Prokop'ev A. V., Borisenko A. S., Gamyanin G. N., Fridovskii V. Yu., Kondrat'eva L. A., Anisimova G. S., Trunilina V. A., Vasyukova E. A., Ivanov A. I., Travin A. V., Koroleva O. V., Vasil'ev D. A., Ponomarchuk A. V. Vozrastnye rubezhi i geodinamicheskie obstanovki formirovaniya mestorozhdenii i magmaticheskikh obrazovaniy Verkhoyano-Kolymyanskoi skladchatoi oblasti [Age ranges and geodynamic settings for the formation of deposits and magmatic formations of the Verkhoyansk-Kolyma fold region], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2018, V. 59, No 10, pp. 1542–1563. (In Russ.).
 10. Shpikerman V. I., Vas'kin A. F., Zheleboglo O. V. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Verkhoyano-Kolymyanskaya. List R-55 (Susuman) [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1,000,000 (third generation). Verkhoyansk-Kolymyanskaya series. Sheet P-55 (Susuman)], St. Petersburg, 2016.
 11. Baker T., Pollard P. J., Mustard R., Mark G., Graham J. L. A comparison of granite-related tin, tungsten, and gold-bismuth deposits: implications for exploration, *Society of Economic Geologists Newsletter*, 2005, No 61, pp. 5–17.
 12. Birck J. L., Barman M. R., Campas F. Re-Os isotopic measurements at the femtomole level in natural samples, *Geostandards Letters*, 1997, V. 20, No 1, pp. 19–27.
 13. Goryachev N. A., Pirajano F. Gold deposits and gold metallogeny of Far East Russia, *Ore Geology Reviews*, 2014, No 59, pp. 123–151.
 14. Groves D. I., Goldfarb R. J., Gebre-Mariam M., Hagemann S. G., Robert F. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationships to other deposit types, *Ore Geology Reviews*, 1998, No 13, pp. 7–27.
 15. Hart C. J. R., Goldfarb R. J. Distinguishing intrusion-related from orogenic gold systems, *Proceedings of the 2005 New Zealand Minerals Conference (Auckland, 13–16 November, 2005)*, pp. 125–133.
 16. Luck J. M., Allegre C. J. The study of molybdenites through the ¹⁸⁷Re-¹⁸⁷Os chronometer, *Earth and Planetary Science Letters*, 1982, V. 61, pp. 291–296.
 17. Newberry R. J., Laver P. W., Gans P. B., Goncharov V. I., Goryachev N. A., Voroshin S. V. Preliminary chronology analysis of Mesozoic magmatism, tectonics and ore mineralization on North-East Russia according ⁴⁰Ar/³⁹Ar and trace elements data on igneous and ore rocks, *Gold Mineralization and Granitoid Magmatism of North Pacific: Proceedings of the All-Russia Meeting (Magadan, 4–6 September, 1999)*,



- Magadan, NEISRI FEB RAS Publ., 1999, pp. 181–205. (In Russ.).
18. Ridley J. R., Diamond L. W. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models, *Reviews in Economic Geology*, 2000, V. 13, pp. 141–162.
19. Soloviev S. G., Kryazhev S. G., Dvurechenskaya S. S., Trushin S. I. The large Bakyrchik orogenic gold deposit, eastern Kazakhstan: Geology, mineralization, fluid inclusion, and stable isotope characteristics, *Ore Geology Reviews*, 2020, V. 127, pp. 1–28.
20. Stein H. J., Morgan J. W., Markey R. J., Hannah J. L. An introduction to Re-Os: What's in it for the mineral industry?, *Society of Economic Geologists Newsletter*, 1998, No 32, pp. 8–15.
21. Thompson J. F. H., Sillitoe R. H., Baker T., Lang J. R., Mortensen J. K. Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces, *Mineralium Deposita*, 1999, V. 34, pp. 197–217.
22. Vikent'eva O. V., Prokofiev V. Y., Gamyarin G. N., Bortnikov N. S., Goryachev N. A. Intrusion-related gold-bismuth deposits of North-East Russia: PTX parameters and sources of hydrothermal fluids, *Ore Geology Reviews*, 2018, No 102, pp. 240–259
23. Zaitsev A. I., Fridovsky V. Yu., Kudrin M. V. Granitoids of the Ergelyakh Intrusion-Related Gold-Bismuth Deposit (Kular-Nera Slate Belt, Northeast Russia): Petrology, physicochemical parameters of formation, and ore potential, *Minerals*, 2019, No 9, 297, DOI: 10.3390/min9050297.

Авторы

Пачерский Николай Викторович

старший научный сотрудник¹
pachersky@tsnigri.ru

Кряжев Сергей Гаврилович

доктор геолого-минералогических наук
заведующий отделом минералогии и изотопной геохимии¹
kryazhev@tsnigri.ru

Наумов Евгений Анатольевич

кандидат геолого-минералогических наук
заместитель генерального директора по научной работе¹
naumov@tsnigri.ru

Десятова Дарья Юрьевна

научный сотрудник²
avilova@tsnigri.ru

Двуреченская Светлана Степановна

кандидат геолого-минералогических наук
ведущий научный сотрудник¹
dvurechenskaya@tsnigri.ru

Самойленко Максим Викторович

ведущий инженер¹
samoilenko@tsnigri.ru

¹ ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва

² ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А. П. Карпинского», г. Санкт-Петербург

Authors

Pachersky Nikolay Viktorovich

Senior researcher¹
pachersky@tsnigri.ru

Kryazhev Sergey Gavrilovich

PhD
Head of department of mineralogy and isotope geochemistry¹
kryazhev@tsnigri.ru

Naumov Evgeniy Anatolievich

PhD
Deputy General Director for Research¹
naumov@tsnigri.ru

Desyatova Daria Yurievna

Researcher²
avilova@tsnigri.ru

Dvurechenskaya Svetlana Stepanovna

PhD
Leading researcher¹
dvurechenskaya@tsnigri.ru

Samoilenko Maxim Victorovich

Leading engineer¹
samoilenko@tsnigri.ru

¹ FSBI Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow, Russia

² FSBI Russian Geological Research Institute, Saint Petersburg, Russia