

УДК 553.41(571.55)

АНТИИНСКОЕ РУДОПРОЯВЛЕНИЕ КАК ПРИМЕР РУДООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ, СВЯЗАННЫХ С ВОССТАНОВЛЕННЫМИ ИНТРУЗИЯМИ (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

Редин Юрий Олегович¹,
redin@igm.nsc.ru

Редина Анна Андреевна¹,
redina@igm.nsc.ru

Мокрушников Виктор Павлович¹,
viktorm@igm.nsc.ru

Дульцев Владислав Федорович¹,
dultsev@igm.nsc.ru

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

Актуальность: выяснение генетической связи рудной минерализации с позднеюрскими магматическими породами шахтаминского комплекса на примере Антиинского рудопроявления.

Цель: на основе петрографических, петрохимических, минералого-геохимических, изотопных и физико-химических исследований установить генезис Антиинского рудопроявления.

Объекты: Антиинское рудопроявление, а также несколько более мелких пунктов минерализации, локализованных в пределах одноименного массива шахтаминского комплекса.

Методы. Минеральный состав, текстурные, структурные особенности, взаимоотношение минеральных индивидов между собой изучались под оптическим микроскопом в отраженном и проходящем свете. Мономинеральные фракции сульфидов отбирались под бинокуляром из протолок и сульфидных концентратов. Химический состав сульфидных минералов и самородного золота анализировался в полированных шашках микрорентгеноспектральным методом на приборе JEOL JXA-8100, а также с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM) на приборе JSM-6510, снабженном энерго-дисперсионным спектрометром (EDS) фирмы OXFORD. Изотопный состав серы в сульфидных минералах определяли в Центре коллективного пользования научным оборудованием многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск). Погрешность в определении $\delta^{34}\text{S}_{\text{сдт}}$ (1 σ) 0,1 ‰. Флюидные включения были изучены в прозрачно-полированных пластинках методами крио-термометрии и Рамановской спектроскопии. Криотермометрические исследования выполнялись в микротермокамере THMSG-600 фирмы Linkam. Состав газовой фазы флюидных включений изучался методом Рамановской спектроскопии спектрометром Ramanog U-1000 и детектором Horiba DU420E-OE-323 фирмы Jobin Yvon, лазером Millennia Pro фирмы Spectra-Physics; Confocal Raman Microscope alpha 300R фирмы WITec. Анализ петрогенных компонентов (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MnO , MgO , CaO , P_2O_5 , Na_2O , K_2O , H_2O , ППП) в магматических породах был выполнен методом «мокрой химии» в химической группе ЦКП «Геодинамика и Геохронология» Института земной коры СО РАН (г. Иркутск).

Результаты. Антиинское рудопроявление расположено в Агинской тектонической зоне Восточного Забайкалья и приурочено к одноименному массиву шахтаминского комплекса. В работе современными методами изучен минеральный состав руд, выделены и охарактеризованы основные минеральные ассоциации. Приведены детальные данные по химическому составу самородного золота и сульфидных минералов, их изотопному составу. Установлено, что основной продуктивной минеральной ассоциацией является галенит-буланжеритовая с самородным золотом. Результаты исследования изотопного состава серы сульфидных минералов свидетельствуют о магматическом источнике серы рудных минералов. Проведенные петрографические и петрохимические исследования показали, что магматические породы Антиинского массива являются пералюминиевыми, магнезиальными, высококалиевыми, восстановленными гранитоидами. Полученные данные позволяют предположить, что магматические породы Антиинского массива наиболее близки к высококалиевому I-типу гранитоидов. Термобарогеохимические исследования флюидных включений кварцевых жил Антиинского рудопроявления и пунктов минерализации Au 48, 49 показали, что их формирование происходило в схожих физико-химических условиях. Образование ранней вкрапленной пирит-арсенопиритовой минерализации шло из восстановленных углекислотных среднетемпературных хлоридных растворов на глубине 8–10,5 км. Позднее рудоносный флюид эволюционировал: снизились содержание углекислоты и солёность флюида. Прожилково-вкрапленная галенит-буланжеритовая минерализация формировалась из восстановленных среднетемпературных слабосолёных растворов, вероятно, в условиях низких давлений. Полученные данные позволяют сделать вывод о принадлежности Антиинского рудопроявления к золоторудным месторождениям, связанным с восстановленными интрузиями («reduced intrusion-related gold deposit»).

Ключевые слова:

Золоторудные месторождения, связь с магматизмом, минеральный состав, условия формирования, Восточное Забайкалье.

Введение

Антиинское рудопроявление расположено в Агинской тектонической зоне Восточного Забайкалья и приурочено к одноименному массиву шах-

таминского комплекса. В металлогеническом отношении Агинская зона известна как область наиболее широкого в регионе развития редкометалльного оруденения. Пространственно и генетически

оруденение связано с многочисленными массивами кукульбейского (J_3) лейкогранитового комплекса. Наряду с массивами гранитов кукульбейского комплекса в Агинской зоне широко развиты небольшие интрузии шахтаминского (J_2 – J_3) комплекса габбро-диорит-монцодиорит-гранодиоритового состава [1]. Некоторые из них сопровождаются молибденовой, шеелитовой и золотой минерализацией. Одним из них является Антиинский массив, в приконтактовых частях которого установлена повышенная плотность золотой минерализации (рис. 1).

С магматическими породами шахтаминского комплекса многие исследователи связывают промышленное молибденовое, полиметаллическое, золото-полиметаллическое и золотое оруденение, а также проявления мышьяка, сурьмы и других металлов [2]. Наиболее крупные золоторудные и золотосодержащие комплексные месторождения, пространственно связанные с проявлением шахтаминского комплекса, сосредоточены в Аргунской тектонической зоне. К их числу относятся: Бугдинское (Mo-W (Au)-порфировое), Быстринское (Au-Cu-Fe-скарновое), Лугоканское (Au-Cu-скарновое), Култуминское (Au-Cu-Fe-скарновое) и др. Вместе с тем вопросы генетических соотношений магматизма и последующей золоторудной минерализации, несмотря на высокую степень геологической изученности региона, остаются до конца не решенными. В настоящее время в современной зарубежной литературе выделяется отдельный класс золоторудных месторождений – «intrusion-related gold system» (IRGS) (золоторудные месторождения, связанные с интрузиями). Месторождения «intrusion-related gold system» являются одним из важнейших источников золота [3]. Этот класс, в свою очередь, подразделяется на месторождения, связанные с «окисленными» (медно-порфировые) и «восстановленными» интрузиями [4–6]. На основе минералого-геохимических, петрографических, петрохимических, изотопных и физико-химических данных рассмотрен генезис Антиинского рудопроявления.

Геологическое строение

Общая характеристика геотектонической позиции. Территория Агинской зоны сложена преимущественно метаморфизованными песчано-сланцевыми породами протерозоя-палеозоя в ее восточной и пермотриаса в западной части. Согласно современному геодинамическому районированию Забайкалья, зона характеризовалась высокой тектонической активностью и представляет Ононский островодужный террейн, ограниченный с северо-запада и юго-востока ветвями Монголо-Охотской сутуры, в котором выделяются девонско-раннекарбоновые, позднепермско-раннетриасовые аккреционно-субдукционные клинья и поздне триасовый задуговый бассейн [2].

Вмещающие породы. Магматические породы Антиинского массива прорывают терригенные от-

ложения поздней перми (соктуйская свита) и нижней юры (сивачинская и государевская свита). Отложения соктуйской свиты (P_2sk) развиты в западной части массива и представлены песчаниками, туфопесчаниками, конгломератами, конгломерато-брекчиями, гравелитами, алевролитами, аргиллитами и туфами. Отложения нижней юры распространены в восточной части массива. Сивачинская свита (J_1sv) сложена преимущественно конгломератами, гравелитами с прослоями песчаников, алевролитов и аргиллитов. Государевская свита (J_1gs) представлена песчаниками, алевролитами, аргиллитами с прослоями конгломератов. В приконтактовых частях вмещающие породы претерпели изменения, которые выражаются в образовании биотитовых, кордиерит-биотитовых и андалузитовых роговиков. Ширина экзоконтактовых зон варьирует от десятков до сотен метров. Поздние гидротермально-метасоматические изменения выражены локальной березитизацией.

Структурно-тектонические особенности. Антиинский массив приурочен к тектоническому контакту пермских и юрских структур и представляет собой узкое трещинное тело с широко развитыми порфировыми фациями в эндоконтактах и апофизах. Самым крупным разрывным нарушением является Биликтуй-Антиинский листрический взброс, связанный с крупной надвиговой зоной, которая отделяет юрские складчатые структуры от докембрийских и палеозойских.

Магматизм. В Антиинском массиве центральная и восточная части сложены граносиенитами и гранодиоритами с переходами до гранитов, а западная и северная – кварцевыми монцодиоритами и монцодиоритами, подобным породам соседнего Ноцуйского массива. Это давало основание считать оба массива выступами единого более крупного интрузива. Нами изучались магматические породы, отобранные в северной части (район Антиинского рудопроявления) и в юго-восточной части Антиинского массива (район пунктов минерализации Au 48, 49) (рис. 1). Петрографические исследования показали, что в северной части массива развиты кварцевые монцодиориты. Они имеют массивную текстуру и гипидиоморфную, монцонитовую структуру. Породы сложены кварцем, плагиоклазом, калиевым полевым шпатом, биотитом, роговой обманкой и клинопироксеном. Количество темноцветных минералов достигает 20–30 %. Плагиоклаз преобладает над калиевым полевым шпатом (насыщен пертитовыми вростками). Роговая обманка замещает клинопироксен. Содержание кварца около 5–8 %. В юго-восточной части массива породы более измененные и представлены кварцевыми монцодиоритами. Они имеют массивную (крупнозернистую) текстуру и гипидиоморфную, монцонитовую структуру. Породы сложены кварцем, плагиоклазом, калиевым полевым шпатом, биотитом, роговой обманкой и единичными реликтами клинопироксена. Акцессорные минералы представлены сфеном.

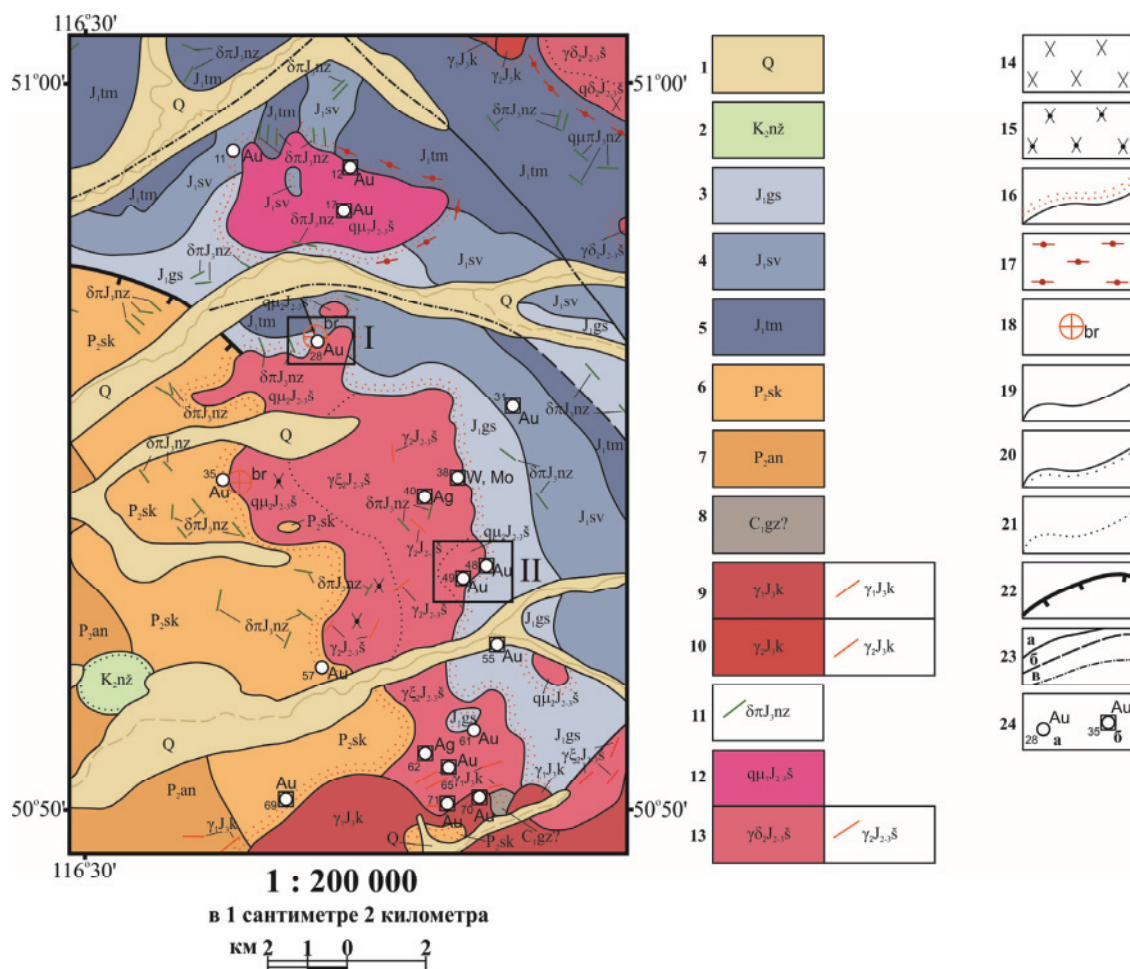


Рис. 1. Фрагмент геологической карты М-50-IX с дополнениями авторов: 1 – четвертичные отложения; 2 – ножийская свита: галечники и валунники; 3 – государственская свита: песчаники, алевролиты; 4 – сивачинская свита: конгломераты, гравелиты, прослои и пачки песчаников; 5 – тамегиинская свита: песчаники, алевролиты, аргиллиты; 6 – соктуйская свита: песчаники, туфопесчаники, конгломераты, конгломерато-брекчии, гравелиты, алевролиты; 7 – антиинская свита: песчаники, туфопесчаники, алевролиты, аргиллиты, конгломераты; 8 – газимурозаводская (?) свита: кварцево-сланцевые сланцы, мрамора; 9, 10 кукульбейский комплекс: 9 – граниты, лейкограниты; дайки гранитов; 10 – литионит-амазонит-альбитовые граниты; дайки гранитов; 11 – нерчинскозаводский комплекс: дайки диоритовых порфиров; кварцевых монцодиоритовых порфиров (qμπ); 12, 13 шахтаминский комплекс: 12 – кварцевые монцодиориты (qμ); 13 – гранодиориты (γδ), граносиениты (γξ), кварцевые монцодиориты (qμ), кварцевые диориты (qδ), дайки гранитов (γ); 14 – кварцевые диориты; 15 – кварцевые монцодиориты; 16 – контактовые рогики и ороговикованные породы, тектониты; 17 – динамометаморфизованные породы филлиты и эпидот-хлоритовые сланцы; 18 – внемасштабные тела: березиты; 19 – геологические границы между разновозрастными подразделениями и телами разного состава внутри них; 20 – несогласное залегание; 21 – несогласное залегание между фациально разными образованиями; 22 – структурные швы сложной кинематики с преобладанием листрических взбросов и надвигов; 23 – разломы второго порядка (а – установленные, б – предполагаемые, в – скрытые под вышележащими образованиями достоверные); 24 – (а) рудопроявления, (б) пункты минерализации. Черными прямоугольниками показаны объекты исследования: I – Антиинское рудопроявление (28); II – пункты минерализации Au 48, 49

Fig. 1. Fragment of the geological map M-50-IX with additions of the authors: 1 are the quaternary sediments; 2 is the nozisky formation: pebbles and boulders; 3 is the gosudarevsky formation: sandstones, siltstones; 4 is the sivashinsky formation: conglomerates, gravel, interlayers and bundles of sandstones; 5 is the tamenginsky formation: sandstones, siltstones, mudstones; 6 is the soktuisky formation: sandstones, conglomerates, conglomerate-breccias, gravelites, siltstones; 7 is the antiinsky formation: sandstones, tuff sandstones, siltstones, argillites, conglomerates; 8 is the gazimurozavodsky (?) formation: quartz-micaceous shales, marble; 9, 10 is the Kukulbeisky complex: 9 are the granites, leucogranites; dikes of granites; 10 are the lithionite-amazonite-albite granites; dikes of granites; 11 is the Nerchinskoyavodsky complex: dykes of diorite porphyrites; quartz monzodiorite porphyrites (qμπ); 12, 13 is the Shakhminsky complex: 12 are the quartz monzodiorites (qμ); 13 are the granodiorites (γδ), granosyenites (γξ), quartz monzodiorites (qμ), quartz diorites (qδ), dikes of granites (γ); 14 are the quartz diorites; 15 are the quartz monzodiorites; 16 are the hornfels, tectonites; 17 are the dynamo-metamorphized rocks, phyllites and epidote-chlorite schists; 18 are the out-of-scale bodies: berezites; 19 are the geological boundaries between different age divisions and bodies of different composition within them; 20 is the discordant bedding; 21 is the discordant bedding between facies of different formations; 22 are the structural seams of complex kinematics with predominance of lustratic ups and thrusts; 23 are the second-order faults (a – established, b – assumed, v – hidden under the overlying formations, reliable); 24 – (a) ore occurrences, (b) mineralization points. Black rectangles show the objects of research: I – Antiinsky ore occurrence (28); II – points of mineralization Au 48, 49

Петрогенные элементы. Содержания петрогенных элементов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты определения содержания порообразующих элементов в образцах магматических пород шахтаминского комплекса методом силикатного анализа

Table 1. Results of determination of rock-forming elements in samples of igneous rocks of the Shakhtama complex, by the method of silicate analysis

Компонент Component	1						2	
SiO ₂	60,16	59,73	59,63	59,91	60,33	60,71	61,28	
TiO ₂	0,90	0,90	0,88	0,88	0,90	0,89	0,76	
Al ₂ O ₃	14,56	14,77	14,68	14,89	14,64	14,69	14,71	
Fe ₂ O ₃	1,56	1,58	1,53	1,51	1,54	1,76	1,75	
FeO	3,61	3,56	3,61	3,60	3,61	3,09	3,16	
MnO	0,08	0,09	0,07	0,07	0,07	0,08	0,07	
MgO	5,10	5,07	5,15	5,04	5,11	4,69	4,63	
CaO	4,80	4,90	4,93	4,77	4,80	4,68	4,68	
Na ₂ O	3,86	3,90	3,88	3,84	3,91	3,79	3,77	
K ₂ O	3,76	3,71	3,74	3,74	3,78	3,50	3,49	
P ₂ O ₅	0,38	0,39	0,38	0,39	0,38	0,37	0,36	
H ₂ O ⁺	0,15	0,12	0,14	0,15	0,15	0,21	0,19	
ППП/LOI	1,08	1,11	1,08	1,11	1,10	1,22	1,22	
Сумма/Total	100,00	99,83	99,71	99,89	100,33	99,68	100,06	

Примечание: 1 – кварцевые монцодиориты, развитые в северной части Антиинского массива (район Антиинского рудопроявления); 2 – кварцевые монцодиориты, развитые в юго-восточной части Антиинского массива (район пунктов минерализации Au 48, 49).

Notes: 1 are the quartz monzodiorites developed in the northern part of the Antiinsky massif (the area of the Antiinsky ore occurrence); 2 are the quartz monzodiorites developed in the southeastern part of the Antiinsky massif (points of mineralization Au 48, 49).

Интервалы содержания SiO₂ в породах составляют от 59,73 до 60,33 мас. % для первых и от 60,71 до 61,28 мас. % для вторых. Магматические породы характеризуются повышенной суммой щелочей (K₂O+Na₂O) – от 7,58 до 7,69 мас. % для первых и от 7,26 до 7,29 мас. % для вторых. Содержание K₂O составляет от 3,71 до 3,78 мас. % для первых и от 3,49 до 3,5 мас. % для вторых (рис. 2, а). Магматические породы относятся к пералюминиевым образованиям: диапазоны ASI (Al₂O₃/(CaO–1,67P₂O₅+Na₂O+K₂O)) составляют для первых от 1,23 до 1,27 и для вторых от 1,29 до 1,30. По щелочно-известковистому индексу (MALI) магматические породы относятся к известково-щелочным (рис. 2, б). По железистости (Fe*) они попадают в область магнезиальных гранитоидов (рис. 2, в). Для разделения магматических пород на магнетитовую и ильменитовую серию была использована диаграмма, предложенная S. Ishihara и B.W. Chappell [7] (рис. 2, г). Отношение Fe₂O₃/FeO для первых составляет 0,4, тогда как для вторых – 0,6. Все изученные породы характеризуются повышенными содержаниями CaO (от 4,68 до 4,93 мас. %), Na₂O (от 3,77 до 3,91 мас. %).

Структурно-морфологические особенности рудных тел. На Антиинском рудопроявлении руд-

ные тела представлены серией кварцевых жил мощностью от 0,1 до 9 м и протяженностью от 50 до 200 м. В пределах Антиинского массива известны и другие рудопроявления и пункты минерализации Au, Ag, Mo, W, где рудные тела также представлены маломощными кварцевыми жилами, реже зонами березитизации.

Минеральный состав и последовательность формирования руд

Руды Антиинского рудопроявления характеризуются небольшим разнообразием минерального состава. К числу главных рудообразующих минералов относятся: пирит, галенит, буланжерит, к второстепенным – арсенопирит, к редким – гессит, эмпрессит, бенлеонардит и самородное золото. Структура руд мелко- и крупнозернистая, текстура вкрапленная, прожилково-вкрапленная и гнездово-вкрапленная. Количество рудных минералов не превышает 5 %. Нерудные минералы представлены главным образом кварцем, в меньшей степени серицитом. В отличие от руд Антиинского рудопроявления кварцевые жилы с сульфидной минерализацией, расположенные в южной части массива (пункты минерализации Au 48, 49), сложены теми же сульфидными минералами, только в меньшем процентом соотношении – количество рудных минералов редко превышает 1 %.

Типоморфные особенности минералов руд

Пирит является одним из наиболее ранних сульфидных минералов и образует редкую вкрапленность и прожилки в кварце. Он представлен хорошо ограненными кристаллами кубического, реже пентагон-додекаэдрического габитуса. В сростаниях с пиритом установлен арсенопирит. Кристаллы пирита часто катаклазированы, а межзерновое пространство и трещины залечиваются более поздними сульфидами (буланжеритом и галенитом) (рис. 3, а), здесь же установлены единичные зерна самородного золота (рис. 3, б). Микрорентгеноспектральным анализом (19 определений) в пирите установлена постоянная примесь мышьяка до 0,81 мас. %, крайнее редко отмечается Ni до 0,27 мас. %. Другие элементы примеси, такие как кобальт и сурьма, ниже предела обнаружения.

Арсенопирит встречается в небольшом количестве и образует редкую вкрапленность в кварце. Он представлен изометричными, призматическими кристаллами с ромбовидным сечением.

Галенит представлен одиночными кристаллами, скоплениями зерен неправильной формы. Он образует вкрапленность и микропрожилки в кварце. В сростаниях с галенитом установлено самородное золото. В виде включений в галените обнаружены: гессит, эмпрессит, бенлеонардит, буланжерит и самородное золото. Микрорентгеноспектральным анализом (38 определений) в галените установлены постоянные примеси висмута до 1,27 мас. %, серебра до 0,83 мас. %, сурьмы до 0,33 мас. %, крайнее редко отмечается теллур до

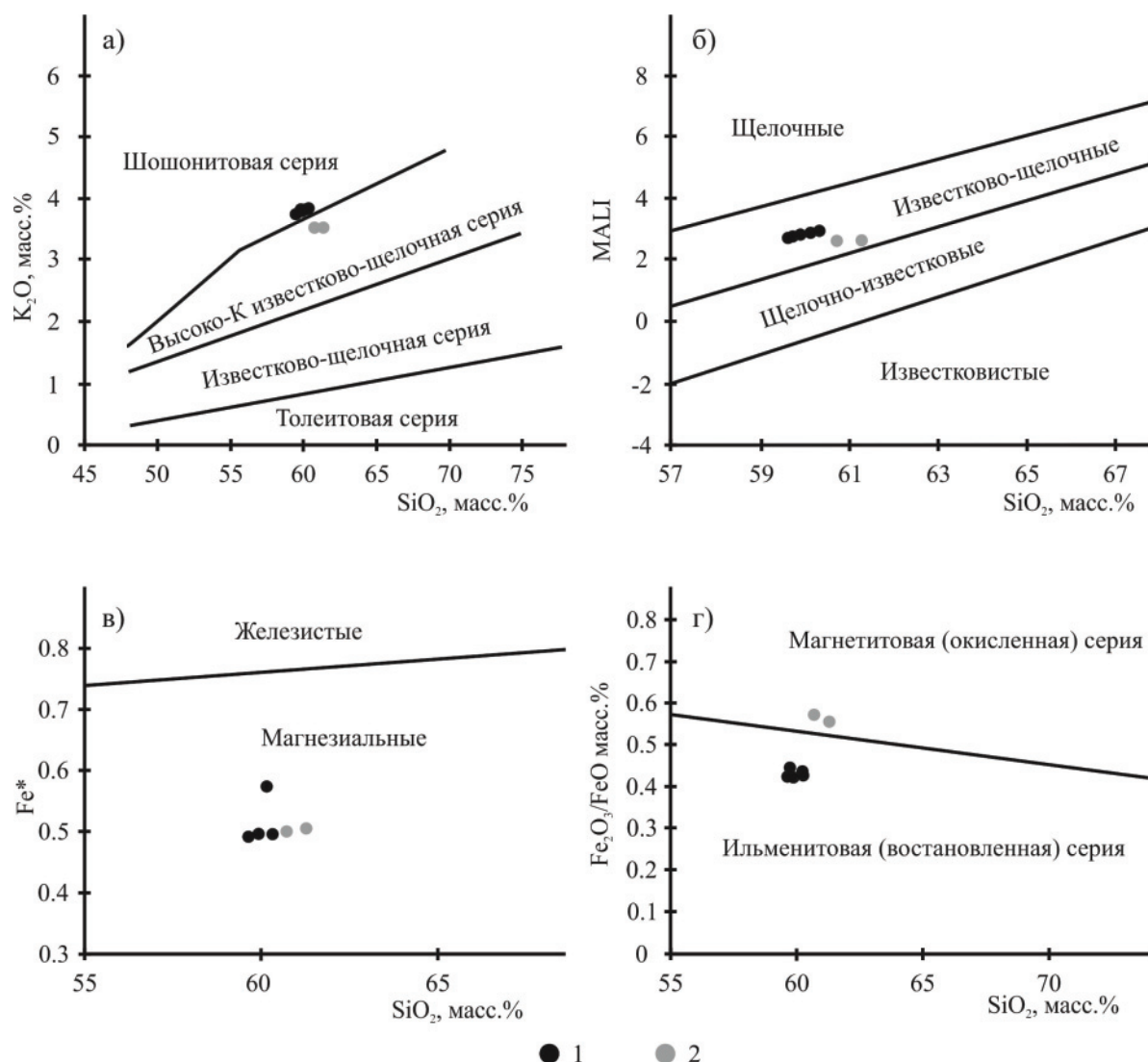


Рис. 2. Дискриминационные диаграммы: а) SiO_2 - K_2O [8]; б) SiO_2 -MALI ($(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ - CaO) [9]; в) SiO_2 - Fe^* ($\text{Fe}^*=\text{FeO}_i/(\text{FeO}_i+\text{MgO})$) [9]; г) SiO_2 - $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ [7]; 1 – кварцевые монцодиориты, развитые в северной части Антиинского массива (район Антиинского рудопроявления); 2 – кварцевые монцодиориты, развитые в юго-восточной части Антиинского массива (район пунктов минерализации Au 48, 49)

Fig. 2. Discrimination diagrams: а) SiO_2 - K_2O [8]; б) SiO_2 -MALI ($(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ - CaO) [9]; в) SiO_2 - Fe^* ($\text{Fe}^*=\text{FeO}_i/(\text{FeO}_i+\text{MgO})$) [9]; г) SiO_2 - $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ [7]; 1 are the quartz monzodiorites developed in the northern part of the Antiinsky massif (the area of the Antiinsky ore occurrence); 2 are the quartz monzodiorites developed in the southeastern part of the Antiinsky massif (points of mineralization Au 48, 49)

0,17 масс. % и селен до 0,11 масс. %. Другие элементы примеси, такие как германий, галлий, медь, индий, ниже предела обнаружения.

Буланжерит обнаружен в виде микропрожилков, гнезд и вкрапленности в кварце и представлен тонкопризматическими кристаллами (игольчатыми) и ксеноморфными выделениями (рис. 3, в). Он часто по краям замещает галенит и является наиболее поздним сульфидным минералом. В виде включений в нем отмечается самородное золото. Микрорентгеноспектральным анализом (36 определений) в буланжерите установлены постоянные примеси висмута до 1,09 мас. %, мышьяка до 0,94 мас. %, реже серебра до 0,23 мас. %, крайне

редко отмечается ртуть до 0,19 мас. %. Другие элементы примеси, такие как марганец, железо, медь, теллур, цинк, кобальт, кадмий, никель, ниже предела обнаружения.

Гессит, эмпрессит и бенлеонардит установлены в виде округлых, удлиненных выделений в галените (рис. 3, г, д).

Самородное золото обнаружено в виде включений в буланжерите, галените, в трещинах и межзерновом пространстве пирита, а также в основной массе породы. Пробность самородного золота варьирует (по данным SEM) от 680 до 860 ‰, из примесей установлено только серебро. Более высокопробное (940 ‰) самородное золото характерно

для кварцевых жил с сульфидной минерализацией, расположенных в южной части Антиинского массива (район пунктов минерализации Au 48, 49).

Гипергенная минерализация. В приповерхностных условиях за счет окисления галенита образуется *англезит*. Буланжерит замещается *биндгеймитом* ($Pb_2Sb_2O_7$). При окислении пирита образуются *гидроокислы железа*. К гипергенным минералам нами также отнесен *ютенбогардит* ($AuAg_3S_2$), который образует каймы вокруг самородного золота (рис. 3, е).

Последовательность формирования руд

Результаты изучения структурно-текстурных взаимоотношений минералов в рудах месторождения позволили выделить в минералообразующем процессе две стадии минералообразования: пирит-арсенопиритовую и галенит-буланжеритовую с самородным золотом.

Результаты исследования изотопного состава серы сульфидных минералов приведены в табл. 2. Узкий диапазон колебаний вариации величин $\delta^{34}S$ (от 1,2 до 4,4 ‰) свидетельствует о гомогенном источнике серы. Небольшое утяжеление изотопного состава серы относительно ювенильной указывает на ее магматический источник [10, 11].

Таблица 2. Результаты исследования изотопного состава серы сульфидных минералов Антиинского рудопроявления

Table 2. Results of the study of sulfur isotopic composition of sulfide minerals of the Antiinsky ore occurrence

Минерал/Mineral	$\delta^{34}S$, ‰
Пирит/Pyrite	4,4
Галенит/Galena	3,9
	4,0
Буланжерит/Boulangerite	1,2
	3,6

Результаты исследования флюидных включений

Для термобарогеохимических исследований были отобраны образцы кварцевых жил Антиинского рудопроявления и пунктов минерализации Au 48, 49 (рис. 1). В образцах выделяются вкрапленная пирит-арсенопиритовая и прожилково-вкрапленная галенит-буланжеритовая минерализация. При проведении оптических наблюдений в прозрачно-полированных пластинках кварца можно выделить следующие типы флюидных

включений по фазовому составу: 1) газовой-жидкие углекислотные (различаются газовой фазой, жидкая углекислота и раствор) VLC (рис. 4, а, б); 2) многофазные (содержат газовую, жидкую и твердую фазы) VLS (рис. 4, в, г); 3) газовой-жидкие водные VL (рис. 4, д, е). Для изучения выбирались первичные и псевдотеричные ФВ (классификация проводилась на основании критериев, изложенных в [12]). Первичные ФВ имеют изометричную форму или форму негативных кристаллов, их размеры варьируют в диапазоне 7–25 мкм. Они встречаются в виде индивидуальных включений или небольших групп. Псевдотеричные ФВ характеризуются изометричной или неправильной формой, имеют размеры 4–18 мкм и трассируют залеченные трещины кристаллов кварца. Исследования ФВ проводились методами спектроскопии комбинационного рассеяния и криотермометрии, результаты которых приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты криотермометрии и спектроскопии комбинационного рассеяния ФВ в кварце Антиинского рудопроявления и пунктов минерализации Au 48, 49

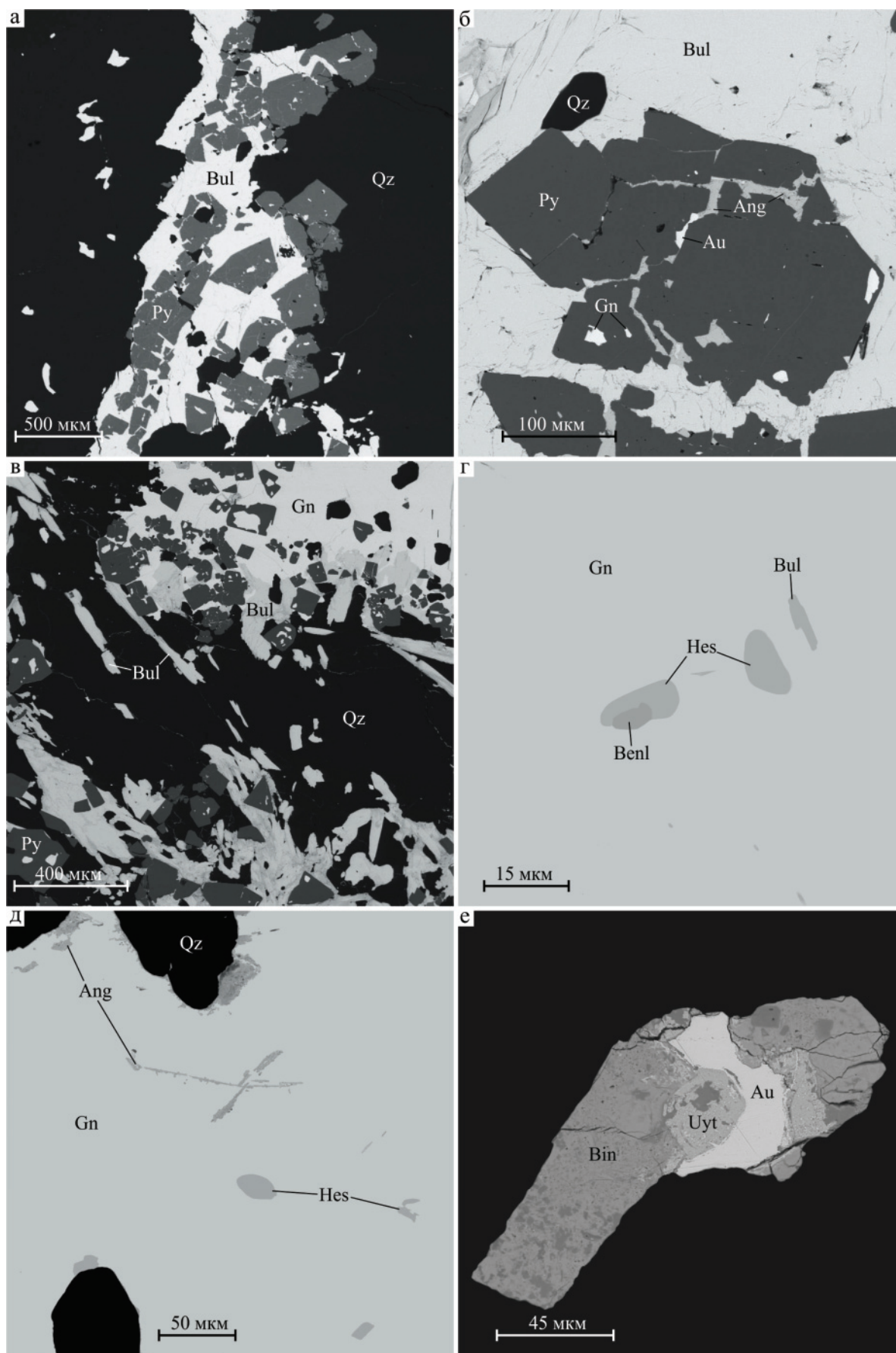
Table 3. Results of cryothermometry and Raman spectroscopy of fluid inclusions (FI) in quartz of Antiinsky ore occurrence and points of mineralization Au 48, 49

Объекты исследования Object of study	Вид ФВ/FI class	Тип ФВ/FI type	$T_{\text{гом.}}$ $T_{\text{hom.}}$, °C	$T_{\text{гом. CO}_2}$ $T_{\text{hom. CO}_2}$, °C	Соленость, мас. % NaCl-экв. Salinity, wt. % NaCl-eq.	Состав газовой фазы Gaseous phase composition
Антиинское Antiinsky	П	VLC	280–340	25–30	н.о.	$CO_2 + N_2 \pm H_2S \pm CH_4$
	П	VLS	310–340	н.о.	н.о.	$CO_2 + N_2 \pm H_2S \pm CH_4$
	ПВ	VL	270–320	н.о.	4,9–6,4	$CO_2 \pm N_2 \pm CH_4$
Пункты минерализации Au 48, 49 Points of Au 48, 49 mineralization	П	VLC	310–330	30–31	н.о.	$CO_2 \pm N_2 \pm CH_4$
	П	VLS	320–340	н.о.	36–38	$CO_2 \pm N_2 \pm CH_4$
	ПВ	VL	270–330	н.о.	4,9	$CO_2 \pm N_2 \pm CH_4$

Антиинское рудопроявление. В составе газовой фазы первичных ФВ VLC (рис. 4, а) присутствует углекислота, иногда есть примесь азота, сероводорода и метана. Для таких включений установлены тем-

Рис. 3. Минеральный состав руд Антиинского рудопроявления: а) буланжерит цементирует кристаллы пирита; б) самородное золото, развитое по трещинам в пирите; в) буланжерит замещает по краям агрегаты галенита; г) включения бенлеонардита, гессита и буланжерита в галените; д) включение гессита в галените; е) самородное золото в биндгеймите. Примечание: Py – пирит; Gn – галенит; Bul – буланжерит; Hes – гессит; Benl – бенлеонардит; Au – самородное золото; Ang – англезит; Bin – биндгеймит; Uyt – ютенбогардит; Qz – кварц

Fig. 3. Mineral composition of Antiinsky ore occurrence: а) boulangerite cements pyrite crystals; б) native gold developed along cracks in pyrite; в) boulangerite replaces the aggregates of galena at the edges; г) inclusions of benleonardite, hessite and boulangerite in galena; д) inclusion of hessite in galena; е) native gold in bindheimite. Notes: Py – pyrite; Gn – galena; Bul – boulangerite; Hes – hessite; Benl – benleonardite; Au – native gold; Ang – anglesite; Bin – bindheimite; Uyt – yutenbogaardite; Qz – quartz



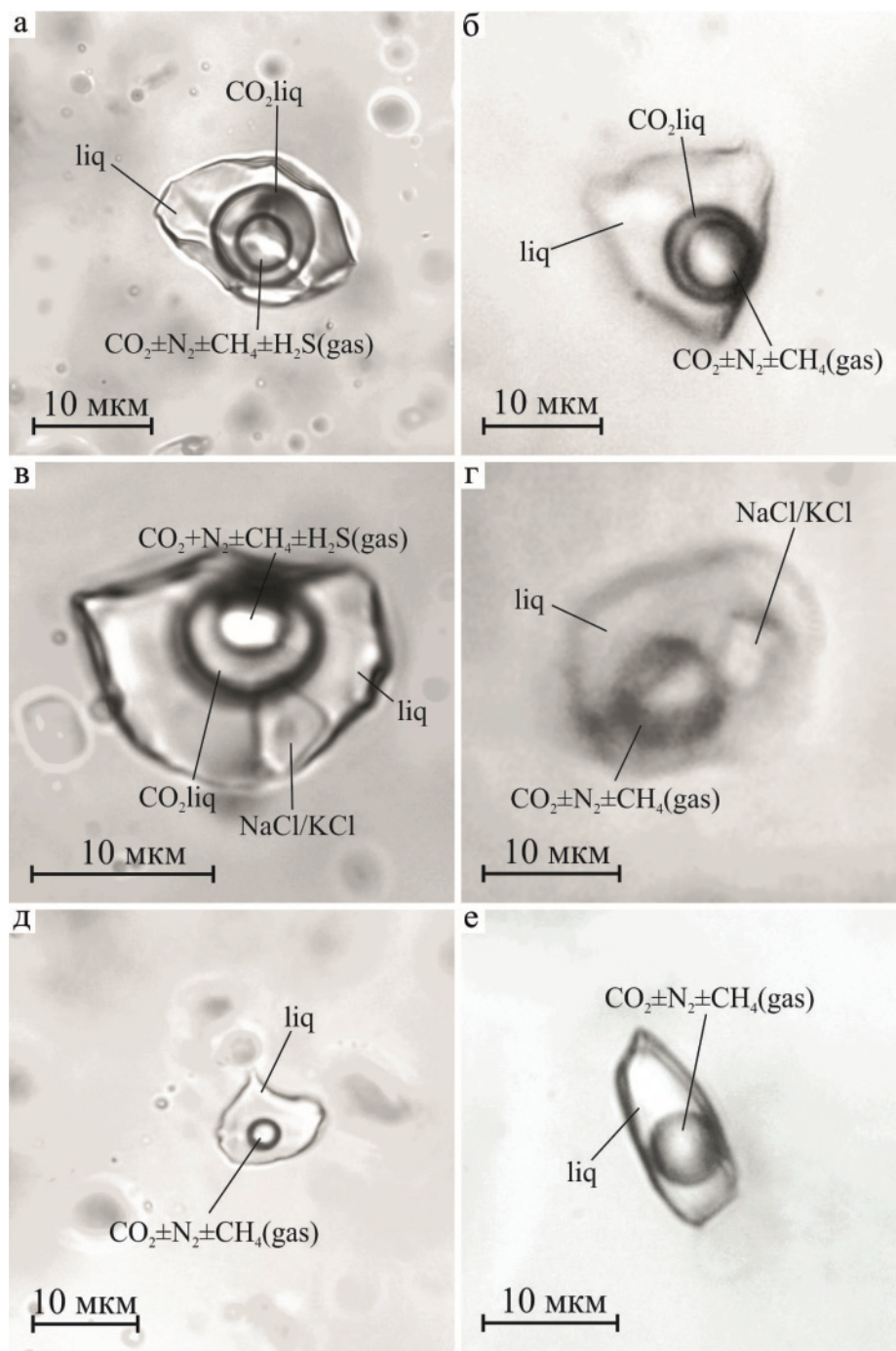


Рис. 4. Флюидные включения в кварце Антиинского рудопроявления (а, в, д) и пунктов минерализации Au 48, 49 (б, г, е)

Fig. 4. Fluid inclusions in quartz of Antiinsky ore occurrence (a, v, d) and points of Au 48, 49 mineralization (б, г, е)

пературы гомогенизации CO_2 ($T_{\text{гом. CO}_2}$) (в жидкость) 25–30 °C и температуры полной гомогенизации ($T_{\text{гом.}}$) (в жидкость) 280–340 °C. По полученным температурам рассчитана плотность CO_2 0,6–0,7 г/см³ и давление 2–2,7 кбар. В первичных ФВ VLS (рис. 4, в) газовая фаза представлена смесью углекислоты и азота ($\pm\text{CH}_4\pm\text{H}_2\text{S}$). Кроме солевого раствора во включениях присутствует жидкая углекислота. Минеральная фаза по оптическим наблюдениям светлоокрашенная изотропная кубической морфологии,

вероятно, является хлоридом. ФВ VLS гомогенизируются в интервале температур 310–340 °C. Состав газовой фазы псевдотричных ФВ VL (рис. 4, д) $\text{CO}_2\pm\text{N}_2\pm\text{H}_2$. Температуры гомогенизации (в жидкость) ложатся в интервал от 270 до 320 °C. По данным криометрии температуры плавления льда –4...–3 °C, соленость соответственно 4,9–6,4 мас. % NaCl-экв.

Пункты минерализации Au 48, 49. Первичные ФВ VLC (рис. 4, б) в газовой фазе содержат углекис-

слоту, примесь азота и метана. Температуры гомогенизации CO_2 (в жидкость) 30–31 °С, полная гомогенизация (в жидкость) включений происходит в интервале температур 310–330 °С. Рассчитанная плотность углекислоты 0,5–0,6 г/см³, давление 2–2,5 кбар. Первичные ФВ VLS (рис. 4, з) содержат газообразную CO_2 , с примесью азота и метана. Твердая фаза, скорее всего, представлена хлоридом (светлоокрашенная, изотропная, кубический кристалл). Температуры гомогенизации от 320 до 340 °С. Газовая фаза псевдотричных ФВ VL (рис. 4, е) представлена углекислотой, с примесью азота и метана. ФВ такого типа гомогенизируются (в жидкость) при температурах 270–300 °С. Получены температуры плавления льда около –3 °С и соленость ≈4,9 мас. % NaCl-экв.

Обсуждение результатов

В ходе проведенных исследований по Антиинскому рудопроявлению, а также по некоторым пунктам минерализации Au, расположенным в пределах одноименного массива, были получены данные, позволяющие предположить их генетическую близость с типовыми месторождениями класса «IRGS». Одним из главных факторов, влияющих на размещение и специфику золоторудной минерализации для золоторудных месторождений класса «IRGS», является различие в химическом составе магмы и степени ее окисления [13]. Полученные данные о петрохимическом составе магматических пород Антиинского массива, а именно низкие отношения $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ (<0,5) для кварцевых монцодиоритов (отобранных в районе Антиинского рудопроявления), позволяют отнести их к ильменитовой (восстановленной) серии. Несколько завышенное отношение $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ (0,6), установленное для кварцевых монцодиоритов из юго-восточной части массива, на наш взгляд объясняется тем, что магматические породы сильнее затронуты экзогенными процессами. В таком случае Fe^{2+} , входящее в состав таких минералов, как биотит, роговая обманка и клинопироксен, в поверхностных условиях будет окисляться и переходить в Fe^{3+} , а также будет снижаться содержание K_2O , что мы и наблюдаем для этих пород в сравнении с кварцевыми монцодиоритами, развитыми в северной части массива (отобранными из канав). Магматические породы Антиинского массива характеризуются высокими содержаниями CaO (от 4,68 до 4,93 мас. %), Na_2O (от 3,77 до 3,91 мас. %) и являются пералюминиевыми, магнезиальными, высококалиевыми гранитоидами. Полученные данные позволяют предположить, что магматические породы Антиинского массива наиболее близки к высококалиевому I-типу гранитоидов. С восстановленными гранитоидами в современной зарубежной литературе связывают формирование двух типов золоторудных месторождений: «reduced porphyry copper-gold deposit» (RPCG) (золото-медно-порфировые месторождения, связанные с восстановленными интрузия-

ми) [14] и «reduced intrusion-related gold deposit» (RIRGD) (золоторудные месторождения, связанные с восстановленными интрузиями). Немаловажной чертой для золоторудных месторождений «RPCG» и «RIRGD» является минеральный состав и геохимический профиль руд. В целом в пределах Антиинского массива установлены различные по своим масштабам рудопроявления и пункты минерализации следующих металлов: Au, Ag, W, Mo, а также отмечаются повышенные содержания Pb, Sb, As, Bi. Проведенные нами исследования минерального состава Антиинского рудопроявления и пунктов минерализации Au 48, 49 показали, что основными рудными минералами для них являются: пирит, арсенопирит, галенит и буланжерит. Детальные исследования минерального состава позволяют наметить геохимический профиль руд: Au, Ag, As, Pb, Sb. Такой геохимический профиль руд, а также морфология рудных тел (преимущественно жильная) характерны для дистальных золоторудных месторождений «RIRGD» [15, 16].

Термобарогеохимические исследования ФВ кварцевых жил Антиинского рудопроявления и пунктов минерализации Au 48, 49 показали, что их формирование происходило в схожих физико-химических условиях. Образование ранней вкрапленной пирит-арсенопиритовой минерализации шло из восстановленных углекислотных среднетемпературных хлоридных растворов на глубине 8–10,5 км. Позднее рудоносный флюид эволюционировал: снизились содержание углекислоты и солености флюида. Прожилково-вкрапленная галенит-буланжеритовая минерализация формировалась из восстановленных среднетемпературных слабосоленых растворов, вероятно, в условиях низких давлений. Полученные данные об условиях формирования руд – высокие температуры начала рудообразующего процесса, наличие хлоридных растворов, снижение солености от ранних к поздним ассоциациям, широкое распространение диоксида углерода в газовой фазе, а также наличие газов «восстановителей» азота, метана, сероводорода, являются характерными чертами для золоторудных месторождений «RIRGD» [17–19]. Локализация рудных тел в пределах массива, проявления процессов березитизации, а также данные об изотопном составе сульфидных минералов в совокупности с термобарогеохимическими исследованиями позволяют предположить не только пространственную, но и генетическую связь рудной минерализации с магматическими породами Антиинского массива. Пространственно-генетическая связь рудной минерализации и магматических пород шахтаминского комплекса установлена для многих других месторождений в пределах Восточного Забайкалья [20–23]. Полученные данные позволяют сделать вывод о принадлежности Антиинского рудопроявления к золоторудным месторождениям, связанным с восстановленными интрузиями «RIRGD».

Выводы

1. Проведенные исследования показали, что Антиинское рудопроявление относится к золото-рудным месторождениям, связанным с восстановленными интрузиями «RIRGD».
2. Рудные тела представлены главным образом кварцевыми жилами с пиритом, галенитом, буланжеритом и арсенопиритом. Впервые для рудопроявления установлены следующие сульфидные минералы: гессит, эмпрессит и бенлеонардит. Выделяется две стадии минералообразования: пирит-арсенопиритовая и галенит-буланжеритовая с самородным золотом.
3. Изотопный состав серы сульфидных минералов свидетельствует о гомогенном (магматическом) источнике серы рудных минералов.
4. Магматические породы Антиинского массива представлены кварцевыми монцодиоритами и

являются пералюминиевыми, магнезиальными, высококалийными, восстановленными гранитоидами (I-типа).

5. Формирование ранней вкрапленной пирит-арсенопиритовой минерализации шло из восстановленных углекислотных среднетемпературных хлоридных растворов на глубине 8–10,5 км. В процессе эволюции рудоносного флюида снижалось содержание углекислоты и соленость. Поздняя прожилково-вкрапленная галенит-буланжеритовая минерализация (с самородным золотом) формировалась из восстановленных среднетемпературных слабосоленых растворов, вероятно, в условиях низких давлений.

Работа выполнена в рамках Государственного задания, проект № 0330–2016–0001, а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16–35–00253.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kozlov V.D. Trace-element composition and origin of granitoids from the Shakhtama complex and Kukul'bei rare-metal complex (Aga zone, Transbaikalia) // Russian Geology and Geophysics. – 2011. – V. 52. – Iss. 5. – P. 526–536.
2. Спиридонов А.М., Зорина Л.Д., Китаев Н.А. Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья. – Новосибирск: Академическое изд-во «ГЕО», 2006. – 291 с.
3. Pirajno F. Hydrothermal processes and mineral systems. – London: Springer, 2009. – 1250 p.
4. Hart C.J.R. Reduced intrusion-related gold systems // Mineral Deposits of Canada: a synthesis of major deposit types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication. – 2007. – V. 5. – P. 95–112.
5. Sillitoe R.H. Gold-rich porphyry copper deposits: Geological model and exploration implications // Mineral Deposit Modeling, Geological Association of Canada. – 1993. – Special Paper 40. – P. 465–478.
6. Sillitoe R.H., Thompson J.F.H. Intrusion-related vein gold deposits: types, tectono-magmatic settings and difficulties of distinction from orogenic gold deposits // Resource Geology. – 1998. – V. 48. – P. 237–250.
7. Ishihara S., Chappell B.W. Petrochemistry of I-type magnetite-series granitoids of the northern Chile, Highland Valley, southern B.C. Canada, Erdenet mine, Mongolia, Dexing mine, China, Medet mine, Bulgaria, and Ani mine, Japan // Bulletin of the Geological Survey of Japan. – 2010. – V. 61 (11/12). – P. 383–415.
8. Peccerillo A., Taylor S.R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1976. – V. 58. – № 1. – P. 63–81.
9. A geochemical classification for granitic rocks / B.R. Frost, C.G. Barnes, W.J. Collins, R.J. Arculus, D.J. Ellis, C.D. Frost // Journal of Petrology. – 2001. – V. 42. – № 11. – P. 2033–2048.
10. Hoefs J. Stable isotope geochemistry. – Berlin: Springer, 2015. – 389 p.
11. Seal II R.R. Sulfur isotope geochemistry of sulfide minerals // Reviews in Mineralogy. and Geochemistry. – 2006. – V. 61. – № 1. – P. 633–677.
12. Roedder E. Fluid inclusions: Reviews in Mineralogy. – Washington: Mineralogical Society of America, 1984. – 644 p.
13. Hart C.J.R., Baker T., Burke M. New exploration concepts for country-rock-hosted, intrusion-related gold systems: Tintina gold belt in Yukon // The Tintina gold belt: concepts, exploration

and discoveries. British Columbia and Yukon Chamber of Mines. – 2000. – Special V. 2. – P. 145–172.

14. Rowins S.M. Reduced porphyry copper-gold deposits: a newly recognized style of gold mineralization // Geological Society of America Abstracts with Program. – 1999. – V. 31. – № 7. – A 92.
15. Baker T., Lang J.R. Geochemistry of hydrothermal fluids associated with intrusion-hosted gold mineralization, Yukon Territory // Mineral Deposits: processes to processing: Proc. of the Fifth Biennial SGA Meeting and Tenth Quadrennial IAGOD Symposium. – London, 1999. – P. 17–20.
16. Newberry R.J. Mineral deposits and associated Mesozoic and Tertiary igneous rocks within the Interior Alaska and adjacent Yukon portions of the «Tintina gold belt»: a progress report // The Tintina gold belt: concepts, exploration and discoveries. British Columbia and Yukon Chamber of Mines. – 2000. – Special V. 2. – P. 59–88.
17. Baker T., Lang J.R. Fluid inclusion characteristics of intrusion-related gold mineralization, Tombstone-Tungsten magmatic belt, Yukon Territory, Canada // Mineralium Deposita. – 2001. – V. 36. – P. 563–582.
18. An exploration model for intrusion-related gold systems / J.R. Lang, T. Baker, C.J.R. Hart, J.K. Mortensen // Society of Economic Geologists. – 2000. – Newsletter 40. – P. 1–15.
19. Plutonic-related gold deposits of interior Alaska / D. McCoy, R.J. Newberry, P. Lauer, J.J. DiMarchi, A. Bakke, J.S. Masterman, D.L. Minehane // Economic Geology. – 1997. – Monograph 9. – P. 191–241.
20. The large Bystrinskoe Cu-Au-Fe deposit (eastern trans-Baikal region): Russia's first example of a skarn-porphyry ore-forming system related to adakite / V.A. Kovalenker, S.S. Abramov, G.D. Kiseleva, T.I. Krylova, Y.I. Yazykova, N.S. Bortnikov // Doklady Earth Sciences. – 2016. – V. 468. – Iss. 2. – P. 566–570.
21. Redin Yu.O., Dultsev V.F., Nevolko P.A. Gold-bismuth mineralization of the Lugokan ore field (Eastern Transbaikalia): age, mineral composition and relationship with magmatism // Ore Geology Review. – 2015. – V. 70. – P. 228–240.
22. New data on the age of gold mineralization of the Lugokan ore cluster (Eastern Transbaikalia) / Yu.O. Redin, V.F. Dultsev, P.A. Nevolko, A.V. Ponomarchuk // Doklady Earth Sciences. – 2016. – V. 469. – Iss. 2. – P. 851–854.
23. The Zhireken porphyry Mo ore-magmatic system (Eastern Transbaikalia): U-Pb age, sources, and geodynamic setting / A.P. Berzina, A.N. Berzina, V.O. Gimon, V.Y. Kiseleva, S.V. Palesskii, T.B. Bayanova, R.S. Krymskii, E.N. Lepekhina // Russian Geology and Geophysics. – 2015. – V. 5. – № 3. – P. 446–465.

Поступила 18.12.2017 г.

Информация об авторах

Редин Ю.О., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Редина А.А., младший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Мокрушников В.П., инженер Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Дульцев В.Ф., младший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

UDC 553.41(571.55)

ANTIISKY ORE OCCURRENCE AS AN EXAMPLE OF ORE-FORMING SYSTEMS RELATED TO REDUCED INTRUSIONS (EASTERN TRANSBAIKALIA)

Yury O. Redin¹,
redin@igm.nsc.ru

Anna A. Redina¹,
redina@igm.nsc.ru

Victor P. Mokrushnikov¹,
viktorm@igm.nsc.ru

Vladislav F. Dultsev¹,
dultsev@igm.nsc.ru

¹ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS,
3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

Relevance: to reveal the genetic relationship of ore mineralization with late Jurassic magmatic rocks of the Shakhtama complex for Antiisky ore occurrence as example.

The aim of the research is to determine the genesis of the Antiisky ore occurrence relying on petrographic, petrochemical, mineralogical-geochemical, isotopic and physicochemical studies.

Objects: Antiisky ore occurrence, as well as some smaller mineralization sites localized within the massif of the same name in the Shakhtama complex.

Methods. Mineral composition, texture, structural features, inter-relations between individual minerals were studied with an optical microscope in the reflected and transmitted light. Monomineral fractions of sulfides were collected under a binocular from crushed samples and sulfide concentrates. Chemical composition of sulfide minerals and native gold was analyzed in polished discs using the X-ray spectral method with a JEOL JXA-8100 instrument, as well as by means of scanning electron microscopy (SEM) with a JSM-6510 instrument equipped with an energy-dispersive spectrometer (EDS) of OXFORD company. The isotope composition of sulfur in sulfide minerals was determined in the Center for Multielement and Isotope studies, SB RAS (Novosibirsk). The error of $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ determination (1σ) was 0,1 ‰. Fluid inclusions were studied in transparent polished plates by means of cryothermometry and Raman spectroscopy. Cryothermometric studies were carried out in a THMSG-600 micro thermochamber of Linkam company. The composition of the gas phase of fluid inclusions was studied by means of Raman spectroscopy using a Ramanor U-1000 spectrometer and a Horiba DU420E-OE-323 detector of Jobin Yvon company, Millennia Pro laser of Spectra-Physics company; Confocal Raman Microscope alpha 300R of WITec company. Analysis of petrogenic components (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MnO , MgO , CaO , P_2O_5 , Na_2O , K_2O , H_2O , LOI) in magmatic rocks was carried out by the method of silicate analysis in the Chemical Group of the Center for Geodynamics and Geochronology at the Institute of Earth Crust, SB RAS (Irkutsk).

Results. The Antiisky ore occurrence is situated in the Aginsky tectonic zone of Eastern Transbaikalia and is related to the massif of the same name in the Shakhtama complex. The authors have studied the mineral composition of ores using the modern methods, revealed and characterized the major mineral associations. The paper introduces the detailed data on chemical composition of native gold, sulfide minerals and their isotope composition. It is established that the major productive mineral association is galena-boulangerite with native gold. The results of the studies of sulfur isotope composition of sulfide minerals provide the evidence of the magmatic source of sulfur in ore minerals. The petrographic and petrochemical studies showed that the magmatic rocks of the Antiisky massif are peraluminous, magnesian, high-potassium reduced granitoids. The obtained data allow us to assume that the magmatic rocks of the Antiisky massif are the closest ones to high-potassium I-type of granitoids. The fluid inclusion studies of vein quartz from the Antiisky ore occurrence and the points of mineralization Au 48, 49 showed that their formation took place under similar physicochemical conditions. The formation of early impregnated pyrite-arsenopyrite mineralization proceeded from reduced carbon-dioxide medium-temperature chloride solutions at a depth of 8–10,5 km. Later on, the ore-bearing fluid evolved: the concentration of carbon dioxide and the salinity of the fluid decreased. The veinlet-impregnated galena-boulangerite mineralization was formed from reduced medium-temperature light-salted solutions, probably under the low-pressure conditions. The data obtained allow us to conclude that the Antiisky ore occurrence is a reduced intrusion-related gold deposit.

Key words:

Gold ore deposits, relationship with magmatism, mineral composition, formation conditions, Eastern Transbaikalia.

This study was conducted under the state assignment projects of IGM SB RAS (№ 0330–2016–0001), and was funded by RFBR according to the research project No. 16–35–00253.

REFERENCES

1. Kozlov V.D. Trace-element composition and origin of granitoids from the Shakhtama complex and Kukul'bei rare-metal complex (Aga zone, Transbaikalia). *Russian Geology and Geophysics*, 2011, vol. 52, Iss. 5, pp. 526–536.
2. Spiridonov A.M., Zorina L.D., Kitaev N.V. *Zolotonosnye rudno-magmatische sistemy Zabaykalya* [Gold-bearing Ore-magmatic Systems of Transbaikalia]. Novosibirsk, Academic publishing house «GEO», 2006. 291 p.
3. Pirajno F. *Hydrothermal processes and mineral systems*. London, Springer, 2009. 1250 p.

4. Hart C.J.R. Reduced intrusion-related gold systems. Mineral Deposits of Canada: a synthesis of Major deposit types, district metallogeny, the Evolution of geological provinces, and exploration methods: *Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication*, 2007, vol. 5, pp. 95–112.
5. Sillitoe R.H. Gold-rich porphyry copper deposits: Geological model and exploration implications. *Mineral Deposit Modeling, Geological Association of Canada*, 1993, Special Paper 40, pp. 465–478.
6. Sillitoe R.H., Thompson J.F.H. Intrusion-related vein gold deposits: types, tectono-magmatic settings and difficulties of distinction from orogenic gold deposits. *Resource Geology*, 1998, vol. 48, pp. 237–250.
7. Ishihara S., Chappell B.W. Petrochemistry of I-type magnetite-series granitoids of the northern Chile, Highland Valley, southern B.C. Canada, Erdenet mine, Mongolia, Dexing mine, China, Medet mine, Bulgaria, and Ani mine, Japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 2010, vol. 61 (11/12), pp. 383–415.
8. Peccerillo A., Taylor S.R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, vol. 58, no. 1, pp. 63–81.
9. Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, 2001, vol. 42, no. 11, pp. 2033–2048.
10. Hoefs J. *Stable isotope geochemistry*. Berlin, Springer, 2015. 389 p.
11. Seal II R.R. Sulfur isotope geochemistry of sulfide minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, vol. 61, no. 1, pp. 633–677.
12. Roedder E. *Fluid inclusions: Reviews in Mineralogy*. Washington, Mineralogical Society of America, 1984. 644 p.
13. Hart C.J.R., Baker T., Burke M. New exploration concepts for country-rock-hosted, intrusion-related gold systems: Tintina gold belt in Yukon. The Tintina gold belt: concepts, exploration and discoveries. *British Columbia and Yukon Chamber of Mines*, 2000, sp. vol. 2, pp. 145–172.
14. Rowins S.M. Reduced porphyry copper-gold deposits: a newly recognized style of gold mineralization. *Geological Society of America Abstracts with Program*, 1999, vol. 31, no. 7, A 92.
15. Baker T., Lang J.R. Geochemistry of hydrothermal fluids associated with intrusion-hosted gold mineralization, Yukon Territory. *Mineral Deposits: processes to processing. Proceedings of the Fifth Biennial SGA Meeting and Tenth Quadrennial IA GOD Symposium*. London, 1999. pp. 17–20.
16. Newberry R.J. Mineral deposits and associated Mesozoic and Tertiary igneous rocks within the Interior Alaska and adjacent Yukon portions of the «Tintina gold belt»: a progress report. The Tintina gold belt: concepts, exploration and discoveries. *British Columbia and Yukon Chamber of Mines*, 2000, sp. vol. 2, pp. 59–88.
17. Baker T., Lang J.R. Fluid inclusion characteristics of intrusion-related gold mineralization, Tombstone-Tungsten magmatic belt, Yukon Territory, Canada. *Mineralium Deposita*, 2001, vol. 36, pp. 563–582.
18. Lang J.R., Baker T., Hart C.J.R., Mortensen J.K. An exploration model for intrusion-related gold systems. *Society of Economic Geologists*, 2000, Newsletter 40, pp. 1–15.
19. McCoy D., Newberry R.J., Layer P., DiMarchi J.J., Bakke A., Masterman J.S., Minehane D.L. Plutonic-related gold deposits of interior Alaska. *Economic Geology*, 1997, Monograph 9, pp. 191–241.
20. Kovalenker V.A., Abramov S.S., Kiseleva G.D., Krylova T.I., Yazykova Y.I., Bortnikov N.S. The large Bystrinskoe Cu-Au-Fe deposit (eastern trans-Baikal region): Russia's first example of a skarn-porphyry ore-forming system related to adakite. *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 468, Iss. 2, pp. 566–570.
21. Redin Yu.O., Dultsev V.F., Nevolko P.A. Gold-bismuth mineralization of the Lugokan ore field (Eastern Transbaikalia): Age, mineral composition and relationship with magmatism. *Ore Geology Review*, 2015, vol. 70, pp. 228–240.
22. Redin Yu.O., Dultsev V.F., Nevolko P.A., Ponomarchuk A.V. New data on the age of gold mineralization of the Lugokan ore cluster (Eastern Transbaikalia). *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 469, Iss. 2, pp. 851–854.
23. Berzina A.P., Berzina A.N., Gimon V.O., Kiseleva V.Y., Paleskii S.V., Bayanova T.B., Krymskii R.S., Lepekhina E.N. The Zhireken porphyry Mo ore-magmatic system (Eastern Transbaikalia): U-Pb age, sources, and geodynamic setting. *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 5, no. 3, pp. 446–465.

Received: 18 December 2017.

Information about the authors

Yury O. Redin, Cand. Sc., researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS.

Anna A. Redina, junior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS.

Victor P. Mokrushnikov, engineer, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS.

Vladislav F. Dultsev, junior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS.