

УДК 550.42 (571.55)

АЛЕКСАНДРОВСКОЕ ЗОЛОТОРУДНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ): ИСТОЧНИКИ ВЕЩЕСТВА ПОРОД И РУД

Абрамов Баир Намжилович¹,
b_abramov@mail.ru

Калинин Юрий Александрович^{2,3},
kalinin@igm.nsc.ru

Боровиков Андрей Александрович²,
borovik@igm.nsc.ru

Бадмацзыренова Роза Александровна⁴,
roza1977@mail.ru

Посохов Виктор Федорович⁴,
vitaf1@yandex.ru

¹ Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,
Россия, 672014, г. Чита, ул. Недорезова, 16а, а/я 1032.

² Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

³ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

⁴ Геологический институт СО РАН,
Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6.

Актуальность исследования состоит в необходимости расширения минеральной сырьевой базы России. Восточное Забайкалье является одним из старейших золотодобывающих регионов страны. Тем не менее даже в таком хорошо изученном регионе остро стоит вопрос о поисках и обнаружении новых рудных месторождений. Для успешного выполнения такой задачи необходимы данные детального изучения уже известных рудных месторождений, которые могут быть использованы для разработки научно обоснованных критериев поиска рудных месторождений и прогноза оруденения. К таким данным относятся определение источников рудоносных магматических расплавов, возраста и условий формирования золотого оруденения Александровского месторождения.

Целью исследования является доказательство участия в рудообразовании нескольких магматических очагов с разными характеристиками на основании результатов изучения особенностей распределения редкоземельных элементов в магматических породах и рудах, изотопного состава кислорода рудоносного кварца и серы сульфидов, а также выявление физико-химических условий формирования оруденения с помощью исследования флюидных включений в минералах.

Объектом исследования является Александровское золоторудное месторождение, расположенное в Восточном Забайкалье.

Методы. Для определения элементного состава пород использовался рентгенфлуоресцентный метод и стандартный химический анализ, концентрации редкоземельных элементов измерялись сорбционно-атомно-эмиссионным анализом с индуктивно-связанной плазмой (ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ). Изучение изотопного состава серы сульфидов, содержания Au и Ag, изотопного возраста ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) проведено в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск). Флюидные включения в кварце рудных жил изучены традиционными методами термобарогеохимии и методом КР-спектроскопии.

Результаты. Определен возраст ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) синрудного серицита ($162 \pm 2,3$ млн лет), соответствующий возрасту интрузий амуджикано-шахтаминского комплекса. Установлено, что вариации изотопного состава кислорода рудоносного кварца, изотопов серы сульфидов соответствуют флюиду магматической природы. Анализ распределения редких и редкоземельных элементов указывает на то, что источниками оруденения были разноглубинные, в разной степени дифференцированные магматические очаги, функционировавшие как в верхней, так и в нижней континентальной коре. По данным исследования флюидных включений в кварце рудных жил, кристаллизация минеральных парагенезисов руд месторождения происходила в интервале температур от 150 до 402 °С. Продуктивная минеральная ассоциация формировалась при температуре 402–360 °С. Установлено участие в процессе рудообразования рудообразующих флюидов, различающихся по солево-составу, что указывает на разные условия генерации и природу рудообразующих флюидов. Отличительной особенностью месторождения является образование руд за счет разноглубинных, в разной степени дифференцированных рудоносных магматических источников.

Ключевые слова:

Забайкалье, Александровское месторождение, золото, P3Э, изотопы кислорода и серы, флюидные включения.

Введение

Александровское золоторудное месторождение расположено в восточной части Забайкальского края, в пределах Давенда-Ключевского рудного узла, входящего в золото-молибденовый пояс, выделенный С.С. Смирновым [1]. Месторождение открыто в 1944 г. старателями. В последующем поисково-разведочные и тематические работы были проведены коллективами Ключевского рудоуправления, Восточной экспедиции Читинского геологического управления, Львовского государственного университета. Месторождение было разведано подземными горными выработками. С 2013 г. месторождение обрабатывается ЗАО «Рудник Александровский». Руды месторождения в среднем содержат Au 6,7 г/т и Ag 2,2 г/т. В дополнение к ранее проведенным исследованиям нами получены новые данные по датированию возраста образования месторождения, минералогическому составу руд и физико-химическим условиям их образования. Выявлены петрогеохимические особенности магматических пород рудоносного амуджиканово-шахтаминского комплекса, развитых в пределах рудного поля месторождения.

Методика исследования

Изучение элементного состава пород и руд проведено в аналитических лабораториях Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ) и Института геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск), а также в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск). Содержания элементов определены РФА методом (аналитик Б.Ж. Жалсараев). Измерения концентраций редкоземельных элементов проведены ICP-AES методом (аналитики Т.И. Казанцева, А.А. Цыренова). Содержания Au и Ag определены в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) атомно-абсорбционным методом (аналитик В.Н. Ильина). Определение изотопного состава кислорода проводилось в Геологическом институте СО РАН (г. Улан-Удэ) с использованием установки MIR 10-30 системы лазерного нагрева с лазером CO₂ мощностью 100 ватт и длиной волны 10,6 мкм в инфракрасной области, в присутствии реагента BrF₅ по методу [2]. Изучение состава минералов производилось в ГИН СО РАН на растровом электронном микроскопе LEO-1430VP с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350 (Oxford Instruments) при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда меньше 0,5 нА, размере зонда 0,1 мкм. В режиме анализа время набора спектров составило 50 с. Определение изотопного возраста серицитов проведено ⁴⁰Ar/³⁹Ar методом. Флюидные включения в кварце гидротермальных жил Александровского месторождения были исследованы методами крио-, термометрии (микротермокамера THMSG600 фирмы «Linkam» с диапазоном измерений –196 – +600°С (ИГМ СО РАН, Новосибирск). Изучение состава газовой фазы и определение отдельных твердых фаз включений проводилось методом КР-спектроскопии при помощи спектрометра Jobin Yvon Lab RAM

HR800 (ИГМ СО РАН, Новосибирск). Для идентификации отдельных дочерних фаз в многофазных включениях использовалась известная база КР-спектров RRUFF [3].

Краткая характеристика геологического строения Александровского золоторудного месторождения

Александровское месторождение находится в Могочинском рудном районе Восточного Забайкалья в пределах Давенда-Ключевского рудного узла. Район месторождения расположен на юго-западной окраине Алдано-Витимского щита, в той ее части, которая примыкает в Монголо-Охотскому глубинному разлому.

В 1944 г. на Александровском месторождении Г.С. Лесковым была открыта жила № 3, которая в 1944–1948 гг. была отработана на 25–30 м от дневной поверхности. В последующем на площади месторождения были проведены поисково-разведочные и тематические исследования, в результате которых были получены данные по структурной позиции, вещественному составу пород и руд, закономерностям локализации оруденения. При этом недостаточно изученными остались условия и время образования руд месторождения.

В пределах Александровского рудного поля развиты магматические образования, относящиеся к нескольким разновозрастным формациям палеозойского и мезозойского возрастов. Стратифицированные образования верхнеархейского возраста, представленные метаморфогенными породами, имеют весьма незначительное распространение (рис. 1).

Установлена следующая возрастная последовательность формирования геологических комплексов, развитых на территории Александровского рудного поля и сопредельных площадях. Олекминский комплекс (PZ₁): гнейсовидные порфиробластические биотитовые и биотит-амфиболовые граниты, гранодиориты, а также их жильные образования – пегматиты, пегматоидные граниты, аплиты, аплитовидные граниты. Бичурский комплекс (P₂) объединяет позднепалеозойские образования габбро-гранитной формации, выделенные из объема амананского комплекса.

Первая фаза Бичурского комплекса представлена биотитовыми, амфибол-биотитовыми, амфиболовыми кварцевыми диоритами, диоритами и габбро-диоритами, вторая фаза – биотитовыми гранитами, гранодиоритами, третья фаза – порфировидными гранитами, лейкогранитами, аплитами. Тематические исследования по расчленению геологических формаций Олекмо-Шилкинского междуречья, проведенные сотрудниками «Читагеология», показали, что абсолютный возраст (K-Ar метод) гранитоидов бичурского комплекса составляет 260–235 млн лет. В Джидинском рудном районе Бурятии с бичурским интрузивным комплексом связывается образование молибденового оруденения [5]. В Западно-Забайкальской части Селенгинского вулканно-плутонического комплекса с бичурским интрузивным комплексом также связано образование Кударинского порфирового медно-молибденового месторождения [6].

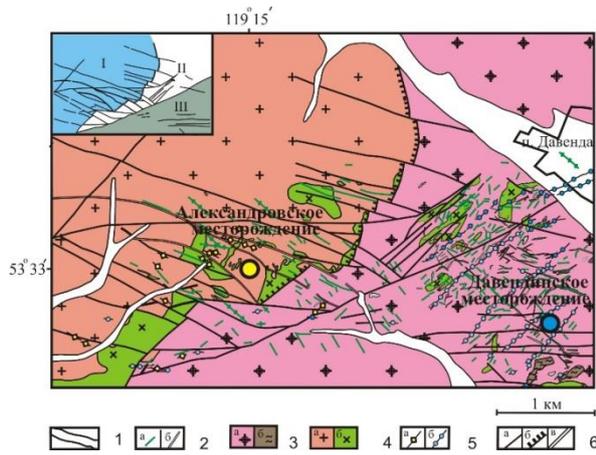


Рис. 1. Схема геологического строения района Александровского месторождения (по материалам А.В. Вареника [4], с дополнениями авторов): 1 – четвертичные отложения; 2 – Амуджикано-Шахтаминский комплекс J_{2-3} : а) лампрофиры, кварцевые диориты, б) гранит-порфиры, фельзиты (дайки); 3 – Бичурский комплекс P_2 : а) гранитоиды, б) кварцевые диориты; 4 – Палеозойские интрузивные и осадочные породы (Pz): а) гранитоиды, б) кристаллические сланцы; 5 – Сульфидно-кварцевые жилы: а) золоторудные, б) молибденовые; 6 – Тектонические нарушения: а) средне-крупномасштабные, б) надвиги, в) рудоконтролирующие. Во вставке показаны блоки: I – Северо-Давендинский, II – Юго-Восточный, III – Давендинский

Fig. 1. Schematic geological map of the Aleksandrovskoe deposit region: 1 – quaternary rocks; 2 – Amudzhikansky-Shakhtaminsky complex (J_{2-3}): а) lamprophyres, quartz diorites, б) granite-porphyrates, felsite (dykes); 3 – Bichursky complex (P_2): а) granitoids, б) quartz diorites; 4 – Paleozoic intrusive and sedimentary rocks (Pz): а) granitoids, б) crystalline schists; 5 – Sulphide-quartz veins: а) gold ore, б) molybdenum; 6 – Tectonic faults: а) large and medium scale, б) thrusts, в) ore-controlled faults. The inset shows blocks: I – North-Davendinsky, II – South-East, III – Davendinsky

Интрузивные образования амуджикано-шахтаминского комплекса на прилегающих к месторождению площадях представлены исключительно породами дайково-жильной серии. Дайки представлены гранит-порфирами, гранодиорит-порфирами, кварцевыми диоритовыми порфирами, гибридными порфирами, субщелочными лейкократовыми гранит-порфирами, ортоклазитами, плагиоклазовыми порфирами, диоритовыми порфирами, фельзитами и фельзит-порфирами, аплитами, микродиоритами, диабазами, лампрофирами различного состава (спесартиты, малхиты, грорудиты, эссекситы, спесартиты, одиниты, слюдяные лампрофиры). Средний возраст гранитоидов амуджикано-шахтаминского комплекса составляет 167–150 млн лет [7, 8]. Установлено, что с ранней группой даек – гранит-порфирами, гранодиорит-порфирами, на площади рудного узла связано молибденовое и медно-молибденовое оруденение, локализующееся в зонах калишпатизации, окварцевания,

серицитизации. С поздними дайками – гибридными порфирами, лампрофирами, грорудитами, связано золотое оруденение в зонах березитизации, листовитизации, турмалинизации, окварцевания.

На Ключевском золоторудном месторождении, расположенном в пределах Давенда-Ключевского рудного узла, образование золотого оруденения также парагенетически связано с заключительными этапами образования даек амуджикано-шахтаминского комплекса (лампрофиры, гибридные порфиры) [9]. Породы, вмещающие золоторудное оруденение и слагающие большую часть площади Александровского месторождения, представлены главным образом гранитами бичурского комплекса (P_2). Определяющее влияние на распределение золотого оруденения оказали узлы пересечения разломов северо-западного и северо-восточного простирания. К числу главных рудоконтролирующих структур относятся Главный и Александровский разломы. Основными рудовмещающими структурами являются сколовые трещины северо-западного простирания. Очень сильное влияние на локализацию оруденения оказал Пологий разлом. При пересечении его с крутопадающими жилами образуются прожилково-вкрапленные зоны, вытянутые в направлении линии их сопряжения. Вертикальный размах оруденения составляет около 200 м.

В пределах месторождения выделяются три геолого-структурных блока – Северо-Давендинский, Юго-Восточный и Давендинский (рис. 1). Северо-Западный блок сложен гранитоидами бичурского комплекса (P_2), Юго-Восточный блок является смежным между Северо-Давендинским и Давендинским блоками. С Северо-Давендинским блоком связана золото-пирит-кварцевая стадия минерализации, с Юго-Восточным – пирит-кварц-турмалиновая стадия, с Давендинским – молибденит-кварцевая стадия. Границы между блоками выделены по зонам тектонических нарушений, оказавшим влияние на распределение золотого оруденения (рис. 1).

В северо-восточном направлении от Давендинского месторождения к Александровскому последовательно сменяют друг друга молибденит-кварцевые, турмалин-кварцевые, пирит-кварцевые и полисульфидно-кварцевые типы оруденения. Такая последовательность размещения оруденения близка к зональности медно-порфировых месторождений [10]. Отличия проявляются в отсутствии ярко выраженного порфирового ядра с тонковкрапленной медно-молибденовой минерализацией и крайне низкими содержаниями серебра в рудах. Проявление такой рудной зональности можно объяснить функционированием единой долгоживущей рудно-магматической системы.

Рудоподводящей структурой является Северо-Давендинский разлом. Рудные тела представлены сульфидно-кварцевыми жилами и зонами прожилково-вкрапленной минерализации. Сульфидно-кварцевые жилы имеют незначительную мощность (3–5 см). Они сопровождаются зонами серицитизации, калишпатизации, реже окварцевания мощностью от первых сантиметров до 1,5 м. Морфология рудных жил сложная.

Часто пережимы жил как по простиранию, так и по падению чередуются с раздувами мощностью до 4 м.

На месторождении выделяются несколько рудных зон: Центральная, Восточная, Северо-Восточная, Ивачиха, Вершина Ороченка, отличающиеся особенностями минерального состава. Основные промышленные запасы золота сосредоточены в Центральной рудной зоне, где рудные тела выполняют северо-западную систему трещин. Протяженность рудных тел по простиранию достигает 170 м. Кварцевые, кварц-карбонатные жилы содержат вкрапленность, иногда гнездовые и полосовидные скопления сульфидов, количество которых достигает 15 %, в среднем составляя 5 %. Сульфиды представлены, главным образом, пиритом, реже халькопиритом, в меньшей степени галенитом, сфалеритом (рис. 2). Мощность зоны окисления на месторождении незначительная. Граница перехода окисленных руд к первичным

сульфидным рудам оставляет около 10–20 м, увеличиваясь в зонах тектонических нарушений до 100 м.

По данным визуального изучения штуфов руд и стенок горных выработок, на Александровском месторождении отмечается следующая последовательность образования минеральных ассоциаций: 1) молибденит-кварцевая; 2) кварц-турмалиновая; 3) висмутин-кварцевая; 4) пирит-кварцевая с золотом (продуктивная); 5) золото-кварц-полиметаллическая (продуктивная); 6) кварц-карбонатная (табл.1). Наиболее распространенным рудным минералом является пирит, менее развиты халькопирит, висмутин, тетраэдрит, борнит. Малораспространенные минералы представлены сфалеритом, галенитом, арсенопиритом, тетрадимитом, теллуровисмутином, золотом. К числу редких минералов относятся: самородное серебро, висмутин, пирротин, виттихенит, марказит, буланжерит, айкинит, гессит, магнетит, касситерит.

Таблица 1. Последовательность минералообразования и состав стадийных минеральных ассоциаций Александровского месторождения

Table 1. Sequence of mineral formation and composition of the staged mineral associations of the Alexandrovskoe gold deposit

Стадия рудообразования Ore formation stage	Минералы руд/Ore minerals			
	Главный Main	Второстепенные Minor	Малораспространенные Less minor	Редкие Rare
Молибденит-кварцевая Molybdenite-quartz	Пирит, кварц Pyrite, quartz	Молибденит Molybdenite	Висмутин Bismuthin	–
Кварц-турмалиновая Quartz-tourmaline	Пирит, кварц Pyrite, quartz	Халькопирит Chalcopyrit	–	–
Висмутин-кварцевая Bismuthine quartz	Пирит, кварц Pyrite, quartz	Висмутин Тетраэдрит Bismuthin Tetrahedrite	Магнетит Сульфовисмутит Халькопирит Молибденит Magnetite Sulfovismuthitis Chalcopyrite Molybdenite	Пирротин Марказит Ильменит Pyrrhotite Marcasite Ilmenite
Пирит-кварцевая (продуктивная) Pyrite-quartz (productive)	Пирит, кварц Pyrite, quartz	Халькопирит Chalcopyrit	Галенит Арсенопирит Халькопирит Борнит Galenite Arsenopyrite Chalcopyrite Bornite	Золото Серебро Аргентит Айкинит Пирротин Марказит Native gold Native silver Argentite Akinitis Pyrrhotite Marcasite
Золото-кварц-полиметаллическая (продуктивная) Gold-quartz-polymetallic (productive)	Пирит, кварц Pyrite, quartz	Халькопирит Сфалерит Chalcopyrit Sphalerite	Галенит Борнит Тетраэдрит Буланжерит Бурнонит Galena Bornite Tetrahedrite Boulangerite Bourmonite	Самородное золото Самородное серебро Халькозин Native gold Native silver Chalcocine
Пирит-кварц-карбонатная (РЗЭ) Pyrite-Quartz-Carbonate (REE)	Пирит Кварц Кальцит Pyrite Quartz Calcite	Халькопирит Флюорит Chalcopyrit Fluorite	–	Антимонит, Монацит Ксенотим, Апатит Рабдофан Черчит Antimonite Monazite Xenotim Apatite Rabdofan Churchite

Содержания сульфидов в рудах составляет 5–8 %. В рудах пирит-кварцевой, кварц-полиметаллической и кварц-карбонатной ассоциаций отмечается редкоземельная минерализация, представленная монацитом, ксенотимом, апатитом, рабдофаном и черчитом (рис. 2). Молибденит-кварцевая ассоциация на месторождении имеет незначительное распространение и представлена редкими прожилками мощностью до 1 см. Молибденит образует редкую неравномерную вкрапленность. Кварц-турмалиновая ассоциация проявлена слабо и развита преимущественно в Ивачихинской зоне. Характерными минералами этой ассоциации являются турмалин, пирит, халькопирит.

Халькопирит отмечается в небольшом количестве (до 1 %) в сростаниях с пиритом. Висмутин-кварцевая минеральная ассоциация присутствует главным образом в пределах Ивачихинской зоны. Минералы этой ассоциации образуют маломощные жилы и прожилки. Характерными рудными минералами Ви-Q ассоциации являются: пирит, висмутин, сульфовисмутит, молибденит. Пирит встречается в виде зерен неправильной формы, реже кубического габитуса и содер-

жит включения магнетита и халькопирита. Висмутин образует небольшие линзовидные скопления. Молибденит развит в виде изогнутых пластинок и ассоциирует с висмутином. По данным визуальных наблюдений в стенках горных выработок, висмутин-кварцевые жилы и прожилки сопровождаются серицитизацией, окварцеванием и калишпатизацией вмещающих пород.

Кварц-пиритовая ассоциация является наиболее распространенной на месторождении и сопряжена с интенсивной серицитизацией. В рудных жилах и прожилках данной ассоциации характерны повышенные содержания сульфидов и золота, а также широкий набор рудных минералов. Наиболее распространенным из них является пирит. Халькопирит встречается в виде мелких редких кристаллов в ассоциации с анкеритом. Основная масса золота наблюдается в ассоциации с пиритом, заполняя в нем микротрещины. Характерна также его ассоциация с халькопиритом, галенитом. Пробность золота изменяется от 850 до 970 ‰, в среднем составляя 929 ‰.

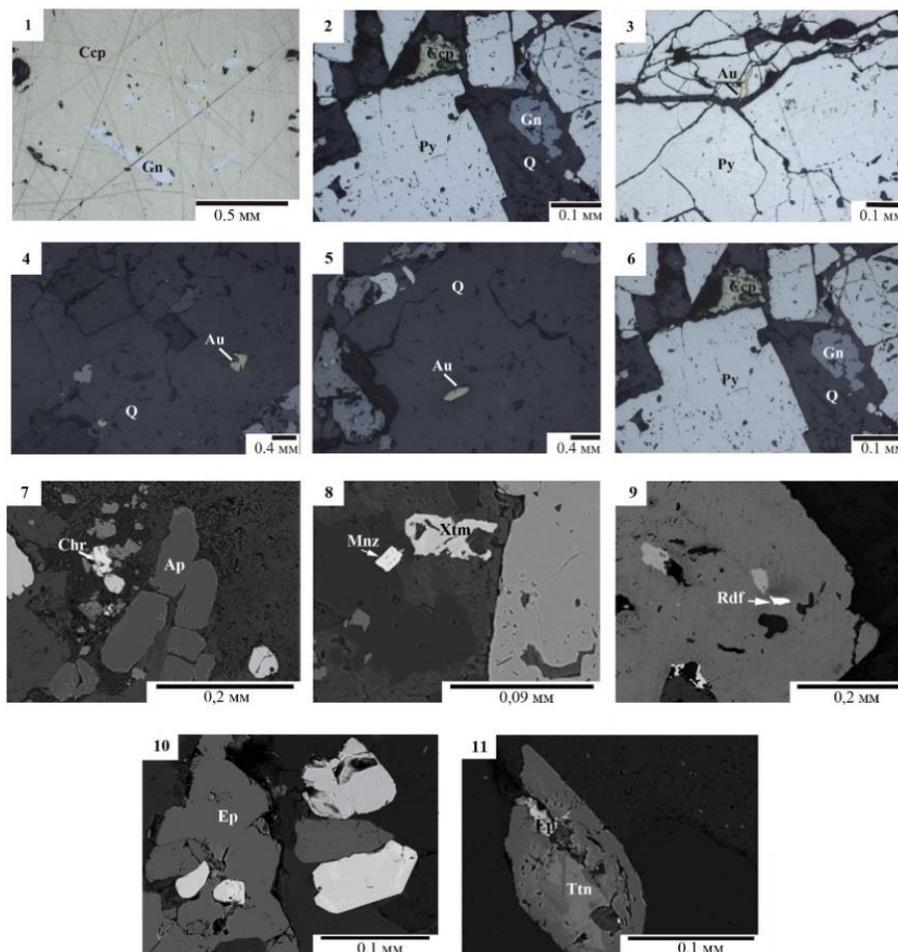


Рис. 2. Микрофотографии взаимоотношений минералов в рудах Александровского месторождения. Обозначения минералов: Gn – галенит, Py – пирит, Au – самородное золото, Q – кварц, Mnz – монацит, Chr – черчит, Ap – апатит, Xtm – ксенотим, Ep – энидот, Rdf – рабдофан, Tnt – титанит, Ccp – халькопирит

Fig. 2. Microphotographs showing the relationship of minerals in ores of the Aleksandrovskoe deposit. Mineral designations: Gn – galena, Py – pyrite, Au – native gold, Q – quartz, Mnz – monazite, Chr – grains, Ap – apatite, Xtm – xenotime, Ep – epidote, Rdf – rhabdophane, Tnt – titanite, Ccp – chalcopyrite

Золото-кварц-полиметаллическая ассоциация развита на флангах рудных жил. Наиболее распространенными рудными минералами этой ассоциации являются пирит, халькопирит, сфалерит, галенит. Менее распространены борнит, сульфосоли Pb и Cu, тетраэдрит, золото. Пирит образует вкрапленность в кварце. Халькопирит образует скопления, размером до 2 см, часто отмечается в виде эмульсионной вкрапленности в сфалерите и борните. Галенит отмечается в сростании со сфалеритом, а также заполняет микротрещины в пирите и халькопирите. Бурнит и буланжерит отмечаются в виде гнездообразных выделений в ассоциации с карбонатом. Золото отмечается в ассоциации с блеклой рудой, галенитом, сфалеритом. Изменения вблизи жильных образований выражены в карбонатизации и серицитизации.

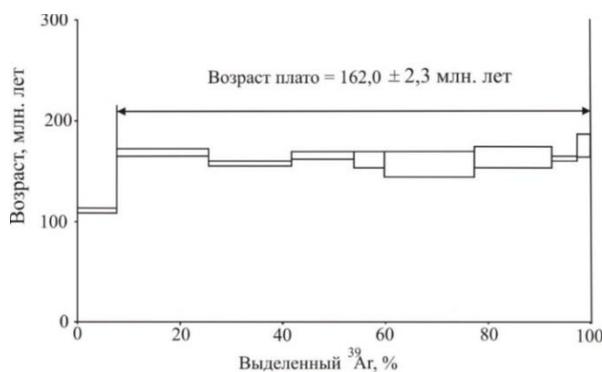


Рис. 3. Возраст серицитовых метасоматитов, установленный $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом

Fig. 3. Age of sericite metasomatites, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ method

Золото связано с пирит-кварцевой и золото-кварц-полиметаллической минеральными ассоциациями. Корреляционный анализ выявил тесную связь золота с Cu ($r=0,99$) и Ag ($r=0,78$). Метасоматические изменения, сопровождающие оруденение, представлены зонами серицитизации, калишпатизации, в меньшей степени – каолинизации и окварцевания. Возраст синрудного серицита, составляющий $162\pm 2,3$ млн лет (Ar/Ar метод), близок к возрасту интрузий амуджикано-шахтаминского комплекса (J_{2-3}) (рис. 3).

Петрогеохимическая характеристика пород и руд, время образования оруденения

Рассмотрим петрогеохимические характеристики интрузивных образований бичурского и амуджикано-шахтаминского комплексов, с которыми в Забайкалье связано формирование золотого и молибденового оруденения. Гранитоиды амуджикано-шахтаминского комплекса были опробованы восточнее (в 1,5 км) площади Александровского месторождения.

По коэффициенту глиноземистости гранитоиды бичурского и амуджикано-шахтаминского комплексов относятся к весьма высокоглиноземистым ($al'=1,84-2,23$), дайки гранит-порфиров – высокоглиноземистым ($al'=1,06-1,40$), дайки диоритовых порфиров – умеренно глиноземистым образованиям ($al'=0,74-0,98$). Петрогеохимические особенности кислых интрузий бичурского и амуджикано-шахтаминского комплексов характеризуются высокими концентрациями калия ($K_2O>3\%$), низкой железистостью ($FeO^*/FeO^*+MgO<0,6$), соответствующей магнезиальным гранитоидам (рис. 4).

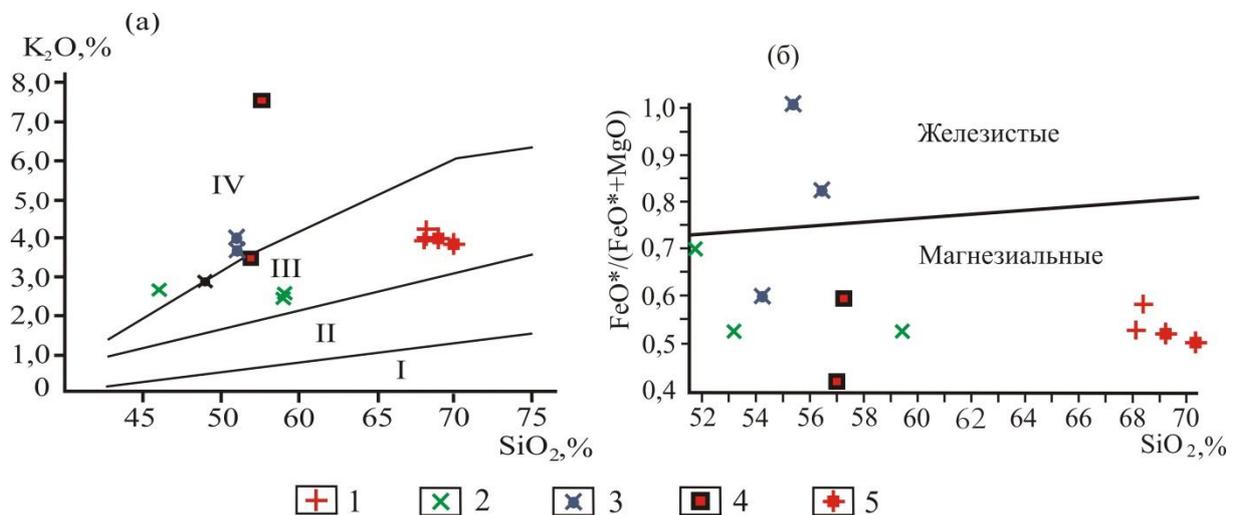


Рис. 4. Диаграммы K_2O-SiO_2 (а), $FeO^*/(FeO^*+MgO)-SiO_2$ (б) для интрузий Александровского месторождения. Бичурский комплекс (P_2): 1 – гранитоиды, 2 – кварцевые диориты; Амуджикано-Шахтаминский комплекс (дайки): 3 – микродиориты, 4 – гранит-порфиры, 5 – гранитоиды. а) Поля интрузивных серий на диаграмме: IV – шошонитовая, III – высококальциевая известково-щелочная, II – среднекальциевая известково-щелочная, I – островодужная; б) Поля железистых и магнезиальных гранитоидов [11]

Fig. 4. K_2O-SiO_2 (a) and $FeO^*/(FeO^*+MgO)-SiO_2$ (б) diagrams for intrusive rocks of the Aleksandrovskoe deposit. Bichursky complex (P_2): 1 – granitoids, 2 – quartz diorites; Amudzhikansky-Shakhtaminsky complex (dikes): 3 – micro-diorites, 4 – granite-porphyr, 5 – granitoids. a) Fields of intrusive series in the diagram: IV – shoshonite, III – high-potassium calc-alkaline, II – medium-potassium calc-alkaline, I – island-arc; б) Fields of ferruginous and magnesian granitoids [11]

Их образование связано с магмами, характеризующимися большой окисленностью. Интрузии бичурского и амуджикано-шахтаминского комплексов характеризуются повышенными значениями магнезиальности пород, указывающими на глубинные источники их формирования. На диаграммах SrY–Y, (La/Yb)_n–Yb_n интрузивные образования бичурского и амуджикано-шахтаминского комплексов соответствуют адакитам (рис. 5).

Образование адакитов связано с процессами плавления субдуцировавшей океанической литосферы, деляминации континентальной коры [12, 13]. Установлено, что в Забайкальском крае порфировые граниты шахтаминского комплекса (J₂₋₃), с которыми

связано молибденовое оруденение Шахтаминского месторождения, соответствуют К-адакитам [14]. С адакитами связано также крупное Быстринское Cu-Au-Fe месторождение [15]. Геохимические особенности адакитовых интрузий характеризуются следующими характеристиками: величина (La/Yb)_n не более 10; содержание Yb – менее 1,8 г/т; Y<18,0 г/т; Sr>300 г/т [12]. Содержания микроэлементов гранитоидов бичурского и амуджикано-шахтаминского комплекса имеют незначительные различия. В сравнении с другими интрузиями дайки амуджикано-шахтаминского комплекса характеризуются повышенными концентрациями (г/т) – Rb (220–282), Cu (19–214), Zn (35–55) и Mo (1,2–8,8).

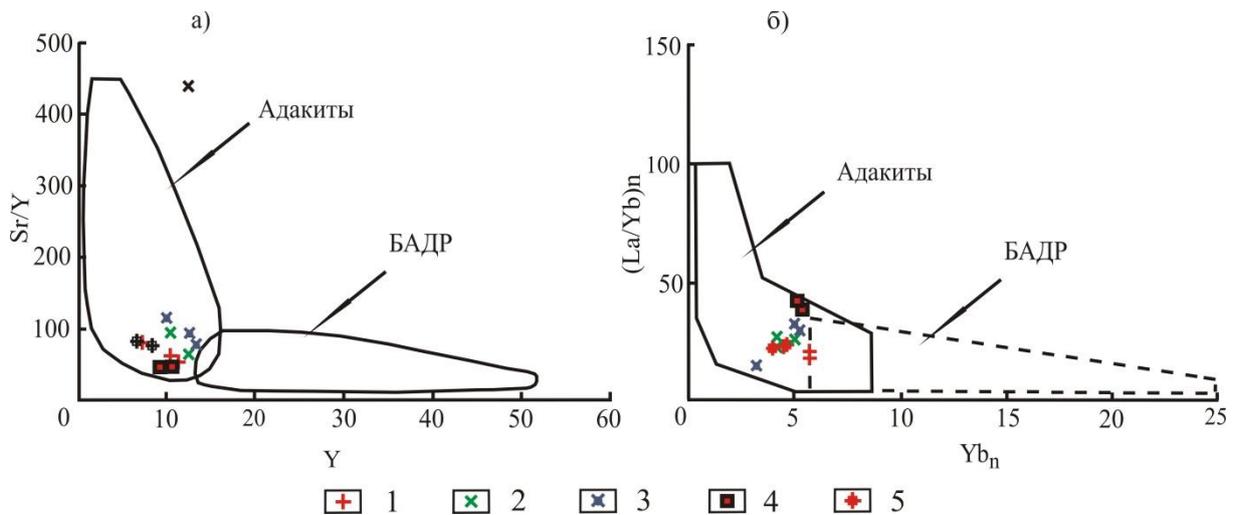


Рис. 5. Диаграммы Sr/Y–Y (а) и (La/Yb)_n–Yb_n (б) [2] для интрузивных образований Александровского месторождения. Условные обозначения – на рис. 4

Fig. 5. Sr/Y–Y (a) and (La/Yb)_n–Yb_n (b) diagrams [2] for the intrusive formations of the Aleksandrovskoe deposit. Conventional symbols as in Fig. 4

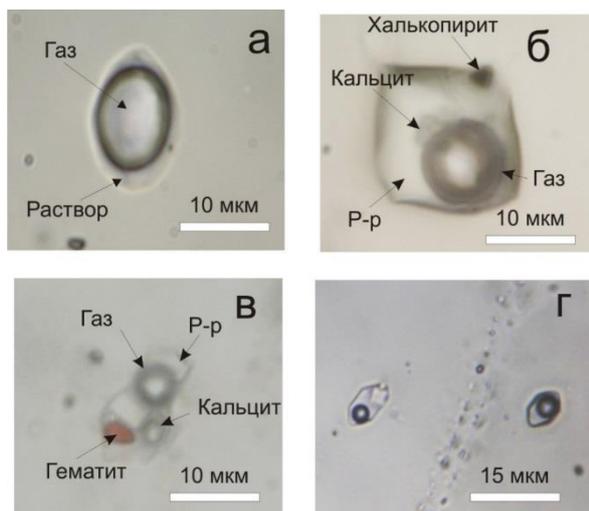


Рис. 6. Флюидные включения в кварце продуктивной минеральной ассоциации месторождения Александровское: газовое (а), двухфазное (б), многофазное с галитом и гематитом (в). Ассоциация трехфазных и двухфазных флюидных включений (г). Халькопирит и кальцит идентифицированы методом КР-спектроскопии. Водно-солевой раствор P–р

Fig. 6. Fluid inclusions in quartz of the productive mineral association of the Aleksandrovskoe deposit: vapor fluid inclusion (a), two-phase fluid inclusion (b), multi-phase fluid inclusion with halite and hematite (c). Association of multi-phase and two-phase fluid inclusions (d). Chalcopyrite and calcite were identified by Raman spectroscopy. Water-salt solution P–р

Исследование флюидных включений в кварце рудных жил

Большинство флюидных включений в кварце продуктивных пирит-кварцевых жил Александровского месторождения являются псевдотворичными и вторичными. Вторичные флюидные включения в кварце трассируют микротрещины, либо располагаются по

границам зерен кварца. Немногочисленные первичные флюидные включения располагаются обособлено от систем залеченных трещин, либо образуют «роевидные» скопления в кварце [16]. Флюидные включения по преобладающим фазам могут быть разделены на газовые, двухфазные и многофазные флюидные включения с галитом (рис. 6, а–в). Кроме преоблада-

ющих фаз, в составе включений присутствуют мелкие (1–3 мкм) прозрачные анизотропные и непрозрачные твердые фазы, среди которых визуальнo диагностируются красные чешуйки гематита. Наблюдается тесная пространственная ассоциация двухфазных и трехфазных флюидных включений, что предполагает происшедший синхронный захват во включения различных фракций гетерофазного флюида, типичного для процесса рудообразования на Cu-Mo порфировых месторождениях [17] (рис. 6, з). По данным КР-спектроскопии, состав газовой фазы флюидных включений представлен (в мольных %) CO_2 98–88,3 и N_2 11,7–2.

В составе растворов двух- и трехфазных флюидных включений методом КР-спектроскопии установлено присутствие $\text{B}(\text{HO})_3$, мелкие твердые фазы в которых представлены кальцитом, мусковитом и халькопиритом (рис. 7). По данным криометрии, установлены две генерации двухфазных включений, растворы которых различаются по температурам плавления эвтектики (табл. 2).

Двухфазные включения с низкой концентрацией солей от 8,9 до 2,6 мас. % в экв. NaCl в качестве главных солевых компонентов содержат CaCl_2 , NaCl и гомогенизируются при 123–195 °С. Характерной особенностью растворов этих включений является присутствие примеси LiCl, которая существенно понижает температуру плавления эвтектики до –78 – –77 °С [18]. Двухфазные включения с более высокой температурой гомогенизации от 402 до 165 °С содержат растворы средней концентрации (19,4–6,5 мас. % в NaCl экв), эвтектика которых плавится в интервале от –38 до –36 °С. Это позволяет предполагать присутствие в их составе, кроме преобладающего NaCl, примеси FeCl_3 и K_2CO_3 . В жильном кварце двухфазные флюидные включения средней концентрации обычно ассоциируют с трехфазными флюидными включениями (рис. 6, з). Трехфазные включения (33,9–33 мас. % в экв. NaCl) содержат в качестве главной твердой фазы галит и характеризуются преобладанием NaCl в составе. Плавление эвтектики растворов происходит в интервале

температуры от –42 до –41 °С и указывает на примесь FeCl_3 [18, 19]. Трехфазные включения гомогенизируются в интервале температур от 345 до 284 °С. Таким образом, формирование продуктивных пирит-кварцевых жил месторождения Александровское происходило в интервале температур от 356 до 123 °С, давление рудообразующих флюидов варьировало от 0,8 до 0,1 кбар [20]. Рудообразование происходило при участии гидротермальных флюидов высокой и средней концентрации, содержащих NaCl, FeCl_3 и KCl, а также гомогенных низкоконцентрированных флюидов, содержащих преимущественно CaCl_2 , NaCl и LiCl. Участие в рудообразовании гидротермальных флюидов, существенно различающихся по солевому составу и концентрации, может служить указанием на разные источники их генерации [21, 22].

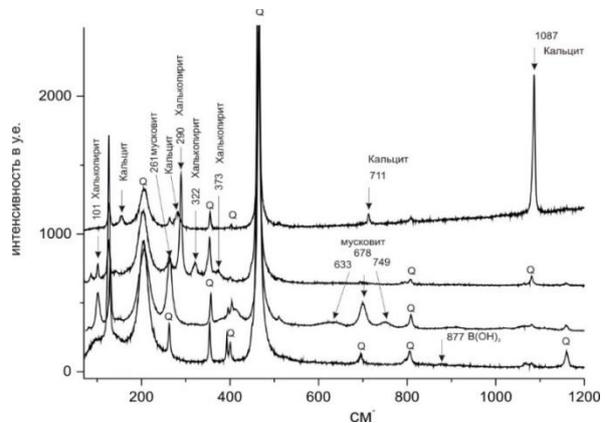


Рис. 7. КР-спектры мелких твердых фаз, обнаруженных внутри флюидных включений (рис. 6). Q – спектральные линии кварца. Стрелками указаны характеристические спектральные полосы идентифицированных минералов и приведена их частота (в см^{-1}).

Fig. 7. Raman spectra of small solid phases detected inside fluid inclusions (Fig. 6). Q – spectral bands of quartz, arrows indicate the characteristic spectral bands of the identified minerals and their frequency (in cm^{-1}).

Таблица 2. Результаты микротермометрического исследования флюидных включений в кварце рудных жил месторождения Александровское

Table 2. Results of microthermometric study of fluid inclusions in quartz of ore veins of the Aleksandrovskoe deposit

Образец Sample	Тип Type	$^{\circ}\text{C}$				Общая концентрация в мас. % экв. NaCl Salinity in NaCl eqv. wt. %
		$T_{\text{гом. газа}}/T_{\text{гв}}$	$T_{\text{эвт.}}/T_{\text{eu}}$	$T_{\text{пл. льда}}/T_{\text{mice}}$	$T_{\text{пл. NaCl}}/T_{\text{m NaCl}}$	
237	A1	185–175	–49	–4	–	6,3
234	–	175–160	–77(–55...–49)	–1,6	–	2,5
235	–	158–123	–55...–49	–4,2	–	6,7
280	–	195–180	–78 (–55...–49)	–3,3...–1,6	–	4,8–2,6
232	A2	243–235	–37	–4	–	6,4
237	–	402–334	–38...–37	–15,6–4,6	–	19,4–7,3
246	–	260–220	–37	–15...–14	–	18,6
234	–	340–345	–38	–5,8	–	8,9
280	–	170–165	–37,5	–5,3...–6	–	7,8
280	–	280–237	–38	–15...–16	–	19,4
280	–	387–375	–36	–3,2	–	5,2
237	Б	348–340	–42	–	217–220	33,5–33
280	–	356–345	–42	–	237–210	33,9–33,5

Примечания: Тип – тип флюидного включения по фазовому составу; $T_{\text{гом. газа}}$ – температура гомогенизации газовой фазы; $T_{\text{эвт.}}$ – температура плавления эвтектики; $T_{\text{пл. льда}}$ – температура плавления льда; $T_{\text{пл. NaCl}}$ – температура плавления галита.

Notes: Type – the fluid inclusion type of by phase filling; $T_{\text{гв}}$ – homogenization temperature of the gas phase; T_{eu} – melting temperature of the eutectic; $T_{\text{m ice}}$ – melting temperature of ice; $T_{\text{m NaCl}}$ – the melting temperature of halite.

Изотопный состав O, S, распределение PЗЭ в кварце рудных жил и обсуждение полученных результатов

Изучение показало, что в рудоносном кварце (кварц-пиритовая ассоциация) $\delta^{18}\text{O}$ варьирует от +6,0 до +13,9 ‰. Изотопный состав кислорода гидротермального флюида рассчитан в системе кварц–вода по уравнению $\delta^{18}\text{O}_{\text{кварц}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 3,34 (10^6/T^2) - 3,31$, где T – температура по Кельвину [23]. Рассчитанный изотопный состав $\delta^{18}\text{O}$ во флюиде в равновесии с кварцем продуктивного этапа, при температуре минералообразования 340–400 °С, меняется от 0,42 до +9,84 ‰. Большинство значений попадает в интервал от +5,5 до +9,0 ‰, соответствующий флюиду магматической природы (табл. 3)

Таблица 3. Изотопный состав кислорода кварца и равновесного с ним флюида при формировании Александровского месторождения.

Table 3. Isotope composition of quartz oxygen of ore veins of the Aleksandrovskoe deposit and isotopic oxygen composition of the fluid, which was in equilibrium with vein quartz

№ пробы Sample No.	Изотопный состав кислорода Isotopic composition of oxygen		
	Кварц $\delta^{18}\text{O}$, ‰ SMOW Quartz $\delta^{18}\text{O}$, ‰ SMOW	$\delta^{18}\text{OH}_2\text{O}$ флюида $\delta^{18}\text{OH}_2\text{O}$ of the fluid*	
Александровское месторождение Aleksandrovskoe deposit Кварцево-сульфидные жилы Quartz-sulphide veins			
		290 °С*	420 °С*
224	7,7	0,48	4,06
227	13,0	5,78	10,26
230	13,9	6,68	10,26
244	12,7	5,48	9,06
278	11,5	4,29	7,86
279	9,4	2,19	5,76
280	11,5	4,29	7,86
280-1	10,4	3,19	6,76
Кварц-турмалин-сульфидные жилы Quartz-tourmaline-sulphide veins			
		320 °С	430 °С
256	10,4	4,21	6,96
262	6,0	-0,19	2,56

Примечание: *Крайние значения интервала температуры гомогенизации флюидных включений в кварце.

Note: *Extreme values of the homogenization temperature range of fluid inclusions in quartz.

Некоторая часть значений $\delta^{18}\text{O}$ отвечает присутствию примеси метеорной воды (>6,0 ‰). Характерно, что рудоносный кварц с повышенными концентрациями золота образован в зоне вероятного смешения флюидов, соответствующих метеорным водам и магматическим флюидам (4,0–6,0 ‰). Так, рудоносный кварц с содержанием золота 82,0 и 881,0 г/т характеризуется значениями $\delta^{18}\text{OH}_2\text{O}$ флюида 4,38–5,34 ‰ и 5,38–6,4 ‰ соответственно (табл. 3). Величины $\delta^{34}\text{S}$ пирита из гидротермальных образований в целом изменяются от -1 до +0,9 ‰, в галените $\delta^{34}\text{S}$ составля-

ет +0,9 ‰. Значения $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ во флюиде, находящемся в равновесии с сульфидами в момент минералообразования, были рассчитаны по уравнениям фракционирования [24] $\Delta_{\text{пирит}}^{\text{H}_2\text{S}} = \delta^{34}\text{S}_{\text{пирит}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} = 0,4 (10^6/T^2)$, $\Delta_{\text{галенит}}^{\text{H}_2\text{S}} = \delta^{34}\text{S}_{\text{галенит}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} = -0,64 (10^6/T^2)$, где T – температура по Кельвину. Значения $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ пирита во флюиде варьирует от -0,13 до -2,39 ‰, что соответствует флюиду магматической природы (табл. 4).

Таблица 4. Изотопный состав серы пирита и расчетный состав серы во флюиде Александровского месторождения

Table 4. Isotope composition of pyrite sulfur and the calculated isotope composition of sulfur in the ore-forming fluid, which was in equilibrium with the pyrite of the Aleksandrovskoe deposit

№ пробы Sample no.	$\delta^{34}\text{S}$, ‰ CDT пирита $\delta^{34}\text{S}$, ‰ CDT pyrite	Температура полной гомогенизации флюидных включений (°С) Total homogenization temperature of fluid inclusions (°C)	$\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ ‰ во флюиде CDT $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ ‰ CDT in fluid
232	+1,2	243–235	-0,3 – -0,35
234	+0,9	340–350	-0,16 – -0,13
234	+2,4	340–350	+3,46 – +3,43
235	-0,6	158–123	+1,55 – +1,95
237	-1,3	402–334	+2,18 – -2,39
280	+0,3	387–345	+0,61 – -0,75

Распределение редкоземельных элементов (PЗЭ) показывает, что золотоносные сульфидно-кварцевые руды характеризуются разными значениями $\sum\text{PЗЭ}$, Eu/Eu^* , Eu/Sm и $(\text{La}/\text{Yb})_n$. Это указывает на их образование из разноглубинных, в разной степени дифференцированных магматических очагов (рис. 8). Разноглубинные рудоносные магматические источники характерны и для Любавинского месторождения. Источниками золотоносных руд были в основном глубинные, слабо дифференцированные магматические очаги [25]. На это указывает отсутствие (или слабое проявление) в рудах европейских аномалий ($\text{Eu}/\text{Eu}^* 0,79-1,09$). Часть рудоносных магматических очагов формировалось в верхней континентальной коре ($\text{Eu}/\text{Sm} < 0,2$), другая часть в нижней континентальной коре ($\text{Eu}/\text{Sm} > 0,2$) [26].

Распределение PЗЭ выявило тесную корреляцию суммы PЗЭ с повышенными концентрациями P_2O_5 (рис. 8). При этом руды с повышенными содержаниями P_2O_5 характеризуются в основном низкими концентрациями золота. Анализ флюидных включений рудоносного кварца указывают на то, что образование минералов редкоземельных элементов происходило при температурах 230–350 °С, что соответствуют среднетемпературному гидротермальному процессу. Известно, что отношения $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{pm}}$ отражают глубину формирования магматических очагов [26]. На диаграмме $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{pm}} - (\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{pm}}$ выделяются три области значений с разными концентрациями PЗЭ, отражающие глубины функционирования магматических очагов (рис. 8, а). Условно назовем их «верхний», приуроченный к верхней континентальной коре, «средний» и «нижний» – к нижней континентальной коре. Распределение элементов показывает увеличе-

ние концентраций элементов мантийного профиля – Ti, Al, Mg, P, V, Cr, Sr, РЗЭ – от «верхнего» уровня к «нижнему». Установлено, что типоморфные отношения микроэлементов отражают обстановки [27]. Так, если значения U/Th отношения меньше 0,75, это указывает на окислительную среду рудообразования, 0,75–1,25 – на нейтральную, >1,25 – на восстановительную [28]. Co/Ni значения в рудах 0,55–2,34 свидетельствуют об определенной доле магматического компонента в составе рудообразующего флюида. В гидротермальных флюидах, содержащих хлор, отношения Hf/Sm, Nd/La и Th/La в рудах, преимуще-

ственно, меньше единицы, а во флюидах, обогащенных фтором, больше единицы [29]. Типоморфные отношения элементов в рудах Александровского месторождения указывают на то, что руды «нижнего» рудоносного уровня образовались в восстановительной обстановке, «среднего» и «верхнего» – в окислительной обстановке рудообразования. Значения отношения Co/Ni свидетельствуют об участии магматического флюида в рудообразовании. Hf/Sm, Nd/La и Th/La значения в рудах меньше единицы, что косвенно свидетельствует об обогащенности рудоносных флюидов хлором.

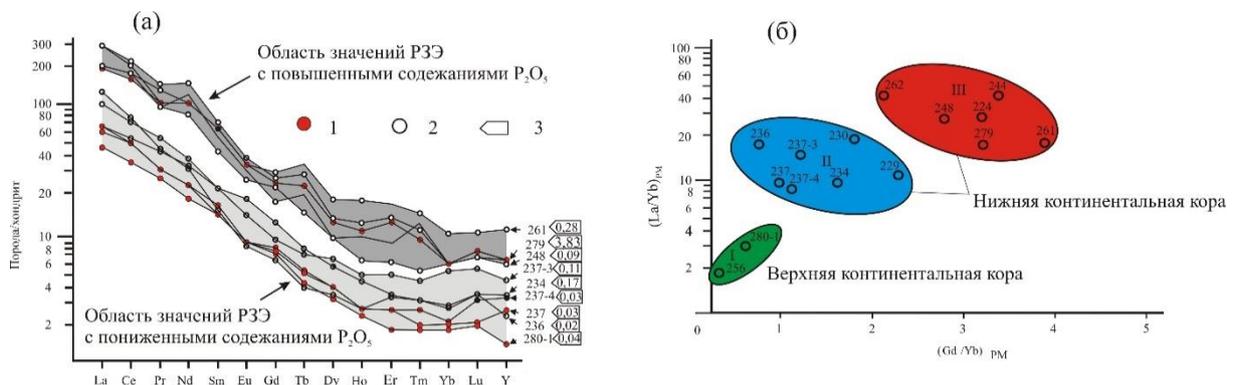


Рис. 8. Распределение редкоземельных элементов в рудах Александровского месторождения (а): 1 – пробы с содержанием Au > 1 г/т; 2 – пробы с содержанием Au < 1 г/т; 3 – номер пробы с содержанием P₂O₅ в %. Диаграмма (La/Yb)_{PM}–(Gd/Yb)_{PM} для тех же проб (б)

Fig. 8. Distribution of rare-earth elements in the ores of the Aleksandrovskoe deposit (a): 1– samples with Au content > 1 g/t; 2 – samples with a content of Au < 1 g/t; 3 – sample number and the content of P₂O₅ in %. The (La/Yb)_{PM}–(Gd/Yb)_{PM} diagram for the same samples (b)

Заключение

Таким образом, золотое оруденение Александровского месторождения имеет магматический источник. Это подтверждается данными изотопного состава кислорода в рудоносном кварце и серы сульфидов. Ar/Ar методом установлено, что возраст синрудного серицита соответствует возрасту интрузий амуджикано-шахтаминского комплекса, составляя 162±2,3 млн лет. По геохимическим особенностям эти интрузии соответствуют адакитам, что указывает на мантийные составляющие в их образовании. Они, вероятнее всего, и были источниками оруденения. Вариации изотопного состава кислорода рудоносных кварцев, изотопов серы сульфидов соответствуют флюиду магматической природы. Анализ выборки температур гомогенизации флюидных включений в кварце выявил средние значения – 150, 250 и 380 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Смирнов С.С. Схема металлогении Восточного Забайкалья // Проблемы советской геологии. – 1936. – Вып. 6. – № 10. – С. 846–864.
- Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1990. – V. 54. – P. 1353–1357.
- RRUFF. URL: <http://rruff.info/> (дата обращения 10.02.2020).
- Вареник А.В. Информационный отчет о промежуточных результатах поисков и оценки на флангах Александровского

Пирит продуктивной ассоциации кристаллизовался в интервале температур 402–360 °С. Результаты изучения флюидных минералов в жильном кварце выявляют существенное различие солевого состава рудообразующих флюидов, что в свою очередь указывает на разные условия генерации и природу рудообразующих флюидов. Анализ распределения редких и РЗЭ указывает на то, что источниками оруденения были разноглубинные в разной степени дифференцированные магматические флюиды, функционировавшие как в верхней, так и в нижней континентальной коре.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН и ИПРЭК СО РАН (проект IX.137.1.2 № госрегистрации АААА-А17-117011210077-2, финансирующая организация Министерство науки и высшего образования Российской Федерации) и РФФИ (грант 16-05-00353).

- золоторудного месторождения за 2010–2013 гг. ЗАО «Рудник Александровский» (ФГУ НПП «Росгеофонд», Забайкальский филиал ФБУ «ТФГИ по СФО, ЗАО «Рудник Александровский»), Забайкальский край, N-51-XXV. Поселок Давенда, 2014. – 129 с.
- Джидинский рудный район: строение, металлогения, геодинамика, перспективы развития / И.В. Гордиенко, Д.В. Гороховский, В.С. Ланцева, Р.А. Бадмацзыренова // Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. – 2017. – Т. 40. – № 1. – С. 9–31.

6. Игнатович В.И. Минерально-сырьевая база молибдена // Разведка и охрана недр. – 2007. – № 12. – С. 37–43.
7. Спиридонов А.М., Зорина Н.А., Китаев Н.А. Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья. – Новосибирск: Академ. Изд-во «Гео», 2006. – 291 с.
8. Возраст гранодиорит-порфиров и березитов Дарасунского золоторудного поля (Восточное Забайкалье, Россия) / И.В. Чернышев, В.Ю. Прокофьев, Н.С. Бортников, А.В. Чучаев, Ю.В. Гольцман, В.А. Лебедев, Ю.О. Ларионова, Л.Д. Зорина // Геология рудных месторождений. – 2014. – Т. 56. – № 1. – С. 3–18.
9. Абрамов Б.Н. Ключевское золоторудное месторождение: условия формирования, петрогеохимические особенности пород и руд (Восточное Забайкалье) // Доклады Академии Наук. – 2015. – Т. 464. – № 1. – С. 85–90.
10. Закономерности размещения и условия формирования Au-содержащих Cu-Mo-порфировых месторождений Северо-Востока России / А.В. Волков, В.Н. Егоров, Е.Е. Колова, И.Ю. Прокофьев, Н.Е. Савва, А.А. Сидоров, В.С. Шаповалов // Геология рудных месторождений. – 2006. – № 6 (48). – С. 512–539.
11. A geo-chemical 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.
12. Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids // Lithos. – 1999. – V. 46. – P. 411–429.
13. Ефремов С.В., Дриль С.И., Сандмирова Г.П. Образование гранитоидов с геохимической характеристикой в коллизионных орогенах на примере раннепалеозойских гранитоидов хребта Мунку-Сардык (Восточный Саян) // Геохимия. – 2016. – № 7. – С. 633–640.
14. Шахтаминская Мо-порфировая рудно-магматическая система: возраст, источники, генетические особенности / А.П. Берзина, А.Н. Берзина, О.В. Гимон, З.Ш. Крымский, А.Н. Ларионов, И.В. Николаева, П.А. Серов // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. – № 6. – С. 764–786.
15. Крупное Быстринское Cu-Au-Fe месторождение (Восточное Забайкалье) – первый пример в России ассоциированной с адakitитами скарново-порфировой рудообразующей системы / В.А. Коваленкер, С.С. Абрамов, Г.Д. Киселева, Т.Л. Крылова, Ю.И. Языкова, Н.С. Бортников // Доклады Академии Наук. – 2017. – Т. 468. – № 5. – С. 547–552.
16. Реддер Э. Флюидные включения в минералах. Т. 1. Природа включений и методы их исследования / под ред. Л.С. Бородина. – М.: Мир, 1987. – 557 с.
17. Ulrich T., Günther D. The evolution of a porphyry Cu-Au deposit, based on LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions: Bajodela Alumbraera, Argentina // Economic Geology. – 2001. – V. 96. – P. 1743–1774.
18. Борисенко А.С. Анализ солевого состава растворов газожидких включений в минералах методом криометрии // Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений. – М.: Недра, 1982. – С. 37–47.
19. Боровиков А.А., Гущина Л.В., Борисенко А.С. Определение хлоридов железа (II, III) и цинка в растворах флюидных включений при криометрических исследованиях // Геохимия. – 2002. – № 1. – С. 70–79.
20. Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions // Fluid Inclusions in Minerals. Methods and Applications / Eds. B. De Vivo, M.L. Frezzotti. – Bledsberg, VA: Virginia Tech. – P. 117–130.
21. Physicochemical models of formation of gold-silver mineralization at the Rogovik deposit (Northeastern Russia) / T.V. Zhuravkova, G.A. Palyanova, K.V. Chudnenko, R.G. Kravtsova, I.R. Prokopyev, A.S. Makshakov, A.S. Borisenko // Ore Geology Reviews. – 2017. – V. 91. – P. 1–20.
22. Состав и металлоносность рудообразующих флюидов Мо-W(Be) месторождения Калгутинское (Горный Алтай) / А.А. Боровиков, В.А. Говердовский, А.С. Борисенко, Н.В. Брянский, С.И. Шабалин // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 4. – С. 647–662.
23. Matsuhisa Y., Goldsmith J.R., Clouton R.N. Oxygen isotopic fractionation in the system quartz-albite-anorthite-water // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1979. – V. 43. – P. 1131–1140.
24. Ohmoto H., Goldhaber M.B. Sulphur and carbon isotopes // Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. – N.Y.: Wiley and Sons, 1997. – P. 517–612.
25. Абрамов Б.Н., Калинин Ю.А., Посохов В.Ф. Любавинское золоторудное месторождение (Восточное Забайкалье): петрогеохимия, источники пород и руд // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 3. – С. 134–144.
26. Винокуров С.Ф. Европейские аномалии в рудных месторождениях и их геохимическое значение // Доклады Академии Наук. – 1996. – Т. 346. – С. 792–795.
27. Hofman A., Feigenson M.D., Raczek I. Case studies on the origin of basalt: III. Petrogenesis of the Mauna Ulu, Kilauea, 1969–1971 // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1984. – V. 88. – P. 24–35.
28. Jones B., Manning D.A.C. Composition of geochemical indices used for the interpretation of paleoredox conditions in ancient mudstones // Chemical Geology. – 1994. – V. 111. – P. 111–129.
29. Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, Southeastern Guizhou Province, China / L. Kun, Y. Ruidong, C. Wenyong, L. Rui, T. Ping // Chinese Journal of Geochemistry. – 2014. – № 33. – P. 109–118.

Поступила 22.02.2020 г.

Информация об авторах

Абрамов Б.Н., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН.

Калинин Ю.А., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; доцент, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет.

Боровиков А.А., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Бадмацыренова Р.А., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Геологический институт СО РАН.

Посохов В.Ф., старший научный сотрудник, Геологический институт СО РАН.

UDC 550.42 (571.55)

ALEXANDROVSKOE GOLD DEPOSIT (EASTERN TRANSBAIKALIA): SOURCES OF ROCK AND ORE SUBSTANCE

Bair N. Abramov¹,
b_abramov@mail.ru

Yury A. Kalinin^{2,3},
kalinin@igm.nsc.ru

Andrey A. Borovikov²,
borovik@igm.nsc.ru

Roza A. Badmatsyrenova⁴,
roza1977@mail.ru

Viktor F. Posokhov⁴,
vitaf1@yandex.ru

¹ Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS,
PO Box 1032, 16a, Nedorezov street, Chita, 672014, Russia.

² Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
3, Academician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

³ Novosibirsk National Research State University,
2, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

⁴ Geological Institute SB RAS,
6, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russia.

The relevance of the study is in the need to expand the mineral resource base of Russia. Eastern Transbaikalia is one of the oldest gold mining regions of the country. Nevertheless, even in such a well-studied region, the issue of search and discovery of new ore deposits is acute. For the successful completion of such a task, the data are needed from a detailed study of already known ore deposits, which can be used to develop scientifically based criteria for search for ore deposits and mineralization forecast. Such data include determination of sources of ore-bearing magmatic melts, age and conditions for gold mineralization formation of the Alexandrovskoe gold deposit.

The aim of the study was to prove participation in formation of several magma chambers with different characteristics, using the results of studying the distribution of rare-earth elements in igneous rocks and ores, the isotopic composition of oxygen of ore-bearing quartz and sulfur sulfide, as well physicochemical conditions for formation of mineralization by studying fluid inclusions in minerals.

Objects of researches is igneous rocks and ores of the Alexandrovskoe gold deposit, located in the Eastern Transbaikalia.

Methods. To determine the elemental composition of the rocks, we used the X-ray fluorescence method and standard chemical analysis, the concentrations of rare-earth elements were measured using the method of sorption-atomic emission analysis with inductively coupled plasma (GIN SB RAS, Ulan-Ude). The study of isotopic composition of sulfur sulfides, Au and Ag contents, and isotopic age (⁴⁰Ar/³⁹Ar) was carried out at the multicomponent and isotopic research center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk). Fluid inclusions in quartz of ore veins were studied by traditional methods of thermobarogeochemistry and Raman spectroscopy.

Results. The age (⁴⁰Ar/³⁹Ar) of synrubic sericite ($162 \pm 2,3$ Ma) was determined, which corresponds to the age of intrusions of the Amujikan-Shakhtaminsky complex. It was established that variations in isotopic composition of oxygen in ore-bearing quartz and isotopes of sulfur sulfides correspond to a fluid of magmatic nature. An analysis of distribution of rare and rare earth elements indicates that the sources of mineralization were deep-seated, differentially differentiated magma chambers that functioned both in the upper and lower continental crust. According to the study of fluid inclusions in quartz of ore veins, crystallization of mineral paragenesis of ore deposits occurred in the temperature range from 150 to 402 °C. A productive mineral association was formed at 402–360 °C. The paper indicated the participation of ore-forming fluids that differ in salt composition in ore formation. This indicates different conditions for generation and nature of ore-forming fluids. A distinctive feature of the deposit is ore formation due to various depth different degrees differentiated ore-bearing magmatic sources.

Key words:

Transbaikalia, Aleksandrovskoe gold deposit, gold, REE, oxygen and sulfur isotopes, fluid inclusions.

The work was carried out on state assignment of IGM SB RAS and IPREK SB RAS (project IX.137.1.2 state registration number AAAA-A17-117011210077-2, funding organization Ministry of Science and Higher Education of Russia Federation) and the Russian Federal Property Fund (grant 16-05-00353).

REFERENCES

- Smirnov S.S. Skhema metallogenii Vostochnogo Zabaykalya [The metallogeny scheme of Eastern Transbaikalia]. *Problemy sovetskoy geologii*, 1936, vol. 6, no. 10, pp. 846–864.
- Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, vol. 54, pp. 1353–1357.
- RRUFF. Available at: <http://truff.info/> (accessed 10 February 2020).
- Varenik A.V. *Informatsionnyy otchet o promezhutochnykh rezultatakh poiskov i otsenki na flangakh Aleksandrovskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya za 2010–2013 gg.* ZAO «Rudnik Aleksandrovskiy» (FGU NPP «Rosgeofond», Zabaykalskiy filial FBU «TFGI po SFO, ZAO «Rudnik Aleksandrovskiy»), *Zabaykalskiy Kray, N-51-XXV* [Information report on the interim results of prospecting and assessment on the flanks of the Alexandrovsky gold ore deposit for 2010–2013. CJSC «Aleksandrov Mine» (Federal State Institution NPP «Rosgeofond», Trans-Baikal Branch of the Federal State Institution «TFGI in Siberian Federal District, CJSC «Aleksandrov Mine»), Trans-Baikal Territory, N-51-XXV] Davenda Village, 2014. 129 p.
- Gordienko I.V., Gorokhovskiy D.V., Lantseva V.S., Badmatyrenova R.A. The Dzida ore district: structure, metallogeny, geodynamics, development prospects. *Geology, Prospecting and Exploration of Mineral Deposits*, 2017, vol. 40, no. 1, pp. 9–31. In Rus.
- Ignatovich V.I. Mineral resources base of molybdenum. *Prospect and protection of mineral resources*, 2007, no. 12, pp. 37–43. In Rus.
- Spiridonov A.M., Zorina N.A., Kitayev N.A. *Zolotonosnye rudno-magmatische sistemy Zabaykalya* [Gold-bearing ore-magmatic systems of Transbaikalia]. Novosibirsk, Geo Publ., 2006. 291 p.
- Chernyshev I.V., Prokofev V.Y., Bortnikov N.S., Chugaev A.V., Goltzman Y.V., Lebedev V.A., Larionova Y.O., Zorina L.D. Age of granodiorite porphyry and beresite from the Darasun gold field, eastern Transbaikalia region, Russia. *Geology of Ore Deposits*, 2014, vol. 56, no. 1, pp. 1–14. In Rus.
- Abramov B.N. The Klyuchevskoe gold ore deposit (Eastern Transbaikalia): formation conditions and petrogeochemical features of rocks and ores. *Doklady Earth Sciences*, 2015, vol. 464, no. 1, pp. 85–90. In Rus.
- Volkov A.V., Sidorov A.A., Prokofev V.Yu., Savva N.E., Egorov V.N., Shapovalov V.S., Kolova E.E. Spatial distribution and formation conditions of Au-bearing porphyry Cu-Mo deposits in the Northeast of Russia. *Geology of Ore Deposits*, 2006, vol. 48, no. 6, pp. 512–539. In Rus.
- Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D. A geo-chemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, 2001, vol. 42, no. 11, pp. 2033–2048.
- Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 1999, vol. 46, pp. 411–429.
- Efremov S.V., Dril S.I., Sandimirova G.P. Formation of adakitic granitoids in the collisional orogens: evidence from the Early Paleozoic granitoids of the Munku-Sardyk Range, Eastern Sayan. *Geochemistry International*, 2016, vol. 54, no. 7, pp. 633–640. In Rus.
- Berzina A.P., Berzina A.N., Gimon V.O., Nikolaeva I.V., Krymskii R.S., Larionov A.N., Serov P.A. The Shaktama porphyry Mo ore-magmatic system (eastern Transbaikalia): age, sources, and genetic features. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 6, pp. 764–786. In Rus.
- Kovalenker V.A., Abramov S.S., Kiseleva G.D., Krylova T.L., 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, no. 5, pp. 547–552. In Rus.
- Redder E. *Flyuidnye vkluycheniya v mineralakh* [Fluid inclusions in minerals]. T. 1. Priroda vkluycheniy i metody ikh issledovaniya [The nature of inclusions and methods of their research]. Moscow, Mir Publ., 1987. 557 p.
- Ulrich T., Günther D. The evolution of a porphyry Cu-Au deposit, based on LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions: Bajo de la Alumbrera, Argentina. *Economic Geology*, 2001, vol. 96, pp. 1743–1774.
- Borisenko A.S. Analiz solevogo sostava rastvorov gazovozhidkikh vkluycheniy v mineralakh metodom kriometrii [Analysis of the salt composition of solutions of gas–liquid inclusions in minerals by the method of cryometry]. *Ispolzovanie metodov termobarogeokhimii pri poiskakh i izuchenii rudnykh mestorozhdeniy* [Use of methods of thermobarogeochemistry when searching for and studying ore deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1982. pp. 37–47.
- Borovikov A.A., Gushchina L.V., Borisenko A.S. Determination of iron (II, III) chlorides and zinc in solutions of fluid inclusions during cryometric studies. *Geochemistry International*, 2002, no. 1, pp. 70–79. In Rus.
- Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H₂O–NaCl fluid inclusions. *Fluid Inclusions in Minerals. Methods and Applications*. Blacksburg, VA, Virginia Tech, 1994. pp. 117–130.
- Zhuravkova T.V., Palyanova G.A., Chudnenko K.V., Kravtsova R.G., Prokofyev I.R., Makshakov A.S., Borisenko A.S. Physicochemical models of formation of gold–silver mineralization at the Rogovik deposit (Northeastern Russia). *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 91, pp. 1–20.
- Borovikov A.A., Borisenko A.S., Shabalin S.I., Goverdovskiy V.A., Bryanskiy N.V. Composition and metal contents of ore-forming fluids of the Kalguty Mo–W(Be) deposit (Gorny Altai). *Russian Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 4, pp. 647–662.
- Matsuhisa Y., Goldsmith J.R., Clouton R.N. Oxygen isotopic fractionation in the system quartz–albite–anortite–water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, vol. 43, pp. 1131–1140.
- Ohmoto H., Goldhaber M.B. Sulphur and carbon isotopes. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, John Wiley & Sons Publ., 1997. pp. 517–612.
- Abramov B.N., Kalinin Yu.A., Posokhov V.F. Lyubavin gold deposit (Eastern Transbaikalia): petrogeochemistry, sources of rocks and ores. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 3, pp. 134–144. In Rus.
- Vinokurov S.F. Europium's anomalies in ore deposits and their geochemical significance. *Doklady Earth Sciences*, 1996, vol. 364, no. 6, pp. 792–795. In Rus.
- Hofman A., Feigenson M.D., Raczek I. Case studies on the origin of basalt: III. Petrogenesis of the Mauna Ulu, Kilauea, 1969–1971. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1984, vol. 88, no. 1–2, pp. 24–35.
- Jones B., Manning D.A.C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology*, 1994, vol. 111, no. 1–4, pp. 111–129.
- Kun L., Ruidong Y., Wenyong C. Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, Southeastern Guizhou Province, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2014, vol. 32, no. 2, pp. 109–118.

Received: 20 February 2020.

Information about the authors

Bair N. Abramov, Dr. Sc., leading researcher, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS.

Yury A. Kalinin, Dr. Sc., chief researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; associate professor, Novosibirsk National Research State University.

Andrey A. Borovikov, Cand. Sc., senior researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Roza A. Badmatyrenova, Cand. Sc., researcher, Geological Institute SB RAS.

Viktor F. Posokhov, senior researcher, Geological Institute SB RAS.