

## ГЕОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.4 (571.55)

### ПЕТРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОД, РЕДКИЕ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В РУДАХ АЛЕКСАНДРОВСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)



Б.Н. Абрамов<sup>1</sup>, Р.А. Бадмацыренова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия

<sup>2</sup> Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

Александровское золоторудное месторождение расположено в пределах Давенда-Ключевского рудного узла. Представлены данные петрогеохимического состава пород и руд Александровского месторождения, а также распределения в них редких и редкоземельных элементов. Петрогеохимические особенности интрузий амуджикано-шахтаминского комплекса ( $J_{2-3}$ ), являющиеся вероятными источниками оруденения, указывают на участие в их формировании глубинных мантийных составляющих. На это указывают повышенные концентрации калия, близость интрузивных образований амананского ( $J_{2-3}$ ) и амуджикано-шахтаминского комплексов по Sr/Y–Y соотношениям к адакитам, присутствие в магматических источниках граната ( $(\text{Tb}/\text{Yb})_n > 1,8$ ). По коэффициенту глиноземистости гранитоиды амуджикано-шахтаминского комплекса относятся к весьма высокоглиноземистым ( $aI' = 1,84\text{--}2,13$ ), дайки гранит-порфиоров – к высокоглиноземистым ( $aI' = 1,06\text{--}1,40$ ), дайки диоритовых порфириров – к умеренноглиноземистым образованиям ( $aI' = 0,74\text{--}0,98$ ). На диаграмме  $(\text{NaO} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{NaO} + \text{K}_2\text{O})$  гранитоиды амуджикано-шахтаминского комплекса соответствуют гранитам I типа. Это предполагает, что источниками гранитов амуджикано-шахтаминского комплекса были магматические очаги. Анализ индикаторных соотношений элементов в рудах Александровского месторождения свидетельствует о том, что преобладающая часть кварцево-сульфидных жил образована в окислительной обстановке ( $\text{U}/\text{Th} < 0,75$ ). При этом часть их образована в восстановительной обстановке. В преобладающей части в рудах  $\text{Co}/\text{Ni}$  составляет более 1,5, что указывает на участие магматического флюида в рудообразовании. Значения в рудах  $\text{Hf}/\text{Sm}$ ,  $\text{Nb}/\text{La}$  и  $\text{Th}/\text{La} < 1$  указывают на наличие в рудоносных флюидах хлора. Геохимические особенности состава руд свидетельствуют о том, что источниками оруденения были разноглубинные, в разной степени дифференцированные, магматические флюиды ( $\sum \text{PЗЭ} = 23,64\text{--}324,72$ ;  $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,79\text{--}1,09$ ;  $\text{Eu}/\text{Sm} = 0,15\text{--}0,32$  и  $(\text{La}/\text{Yb})_n = 0,15\text{--}0,32$ ,  $\text{Co}/\text{Ni} > 1,5$ ). Рудообразующие флюиды Александровского месторождения принадлежали к NaCl–H<sub>2</sub>O гидротермальной системе, обогащенной Cl относительно F ( $\text{Hf}/\text{Sm}$ ,  $\text{Nb}/\text{La}$  и  $\text{Th}/\text{La} < 1$ ). Значения U/Th отношений в рудах свидетельствуют о том, что преобладающая часть кварцево-сульфидных жил образована в окислительной обстановке ( $\text{U}/\text{Th} < 0,75$ ). Значения Y/No отношений в рудах соответствуют значениям флюидов гидротермальных систем Восточно-Тихоокеанского рифта и флюидов, образованных в результате регионального зеленокаменного метаморфизма вмещающих пород ( $\text{Y}/\text{No} = 6,97\text{--}38,4$ ). Впервые в рудах месторождения установлена редкоземельная минерализация, представленная монацитом, ксенотимом, апатитом, эпидотом, рабдофаном и черчитом.

**Ключевые слова:** Александровское месторождение, золото, редкоземельные элементы, рудоносные флюиды, Восточное Забайкалье.

### 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 [Смирнов, 1936]. Месторождение открыто в 1944 г. старателями. С 2013 г. оно обрабатывается ЗАО «Рудник Александровский». Защищенные запасы золота составляют около 24 т. Среднее содержание золота в рудах – 6,7 г/т, серебра – 2,2 г/т.

Изучение элементного состава пород и руд проведено в аналитических лабораториях Геологического института СО РАН (ЦКП, г. Улан-Удэ). Содержания элементов определены РФА методом (аналитик Жалсараев Б.Ж.). Измерения концентраций редкозе-

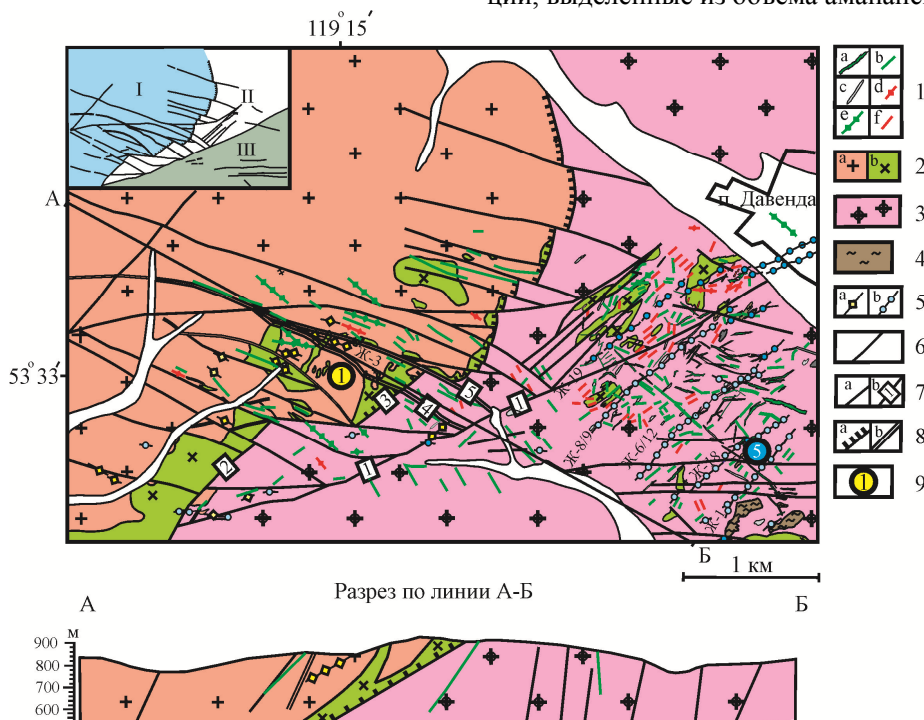
мельных элементов проведены ICP-AES методом (аналитики Казанцева Т.И., Цыренова А.А.). Данные силикатного анализа выполнены методом «мокрой химии». Изучение состава минералов производилось в ГИН СО РАН на растровом электронном микроскопе LEO-1430VP с энергодисперсионным спектрометром INCAEnergy350 (Oxford 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.

В процессе исследования месторождения недостаточно изученными являются петрогеохимические особенности состава пород и руд, а также распределения в них редкоземельных элементов. Решение данных задач позволит получить новые сведения об условиях формирования месторождения.

**Краткая характеристика геологического строения месторождения**

В геологическом строении месторождения принимают участие магматические интрузивные образования, относящиеся к нескольким разновозрастным формациям палеозойского и мезозойского возрастов. Стратифицированные образования позднерехейского возраста, представленные метаморфизованными породами, имеют весьма незначительное распространение (рис. 1).

В пределах месторождения развиты интрузивные образования олекминского (PZ<sub>1</sub>), бичурского (P<sub>2</sub>) и амуджикано-шахтаминского комплексов (J<sub>2-3</sub>). Олекминский комплекс (PZ<sub>1</sub>) представлен гнейсовидными порфиробластическими биотитовыми и биотит-амфиболовыми гранитами, гранодиоритами, а также их жильными образованиями – пегматитами, пегматоидными гранитами, аплитами и аплитовидными гранитами. Бичурский комплекс (P<sub>2</sub>) объединяет позднепалеозойские образования габбро-гранитной формации, выделенные из объема амананского комплекса.



**Рис. 1. Схема геологического строения района Александрово-Давендинского рудного узла**

Амуджикано-шахтаминский комплекс (J<sub>2-3</sub>): 1 – лампрофиров, кварцевые микродиориты: а) штоки кварцевых микродиоритов, б) дайки лампрофиров, с) штоки гранит-порфиров, d) дайки гранит-порфиров, e) дайки кварцевых микродиоритов, f) дайки диоритов, кварцевых диоритов; 2 – Бичурский комплекс (P<sub>2</sub>): а) средне-крупнозернистые биотит-роговообманковые граниты, б) кварцевые диориты; 3 – Олекминский интрузивный комплекс (PZ<sub>1</sub>): порфиробластовые граниты, гнейсовидные граниты; 4 – Олекминский комплекс (PZ<sub>1</sub>): кристаллические сланцы, амфиболиты; 5 – рудоносные жилы: а) золотоносные сульфидно-кварцевые жилы, б) кварцево-молибденитовые жилы; 6 – геологические границы; 7 – а) тектонические нарушения, б) названия тектонических нарушений: 1 – Северо-Давендинское, 2 – Пограничное, 3 – Пологое, 4 – Александровское, 5 – Главное; 8 – а) надвиги, б) рудоконтролирующие нарушения; 9 – месторождения: 1 – Александровское золоторудное, 2 – Давендинское молибденовое. Во вставке: I – Северо-Западный блок, II – Юго-Восточный блок, III – Давендинский блок

**Fig. 1. Schematic geological structure of the area Alexandrovo-Davendinsky ore cluster**

Amudzhikano-Shakhtaminsky complex (J<sub>2-3</sub>): 1 – lamprophyres, quartz microdiorites: a) quartz microdiorite stocks, b) lamprophyre dikes, c) granite-porphyr stock, d) granite-porphyr dikes, e) quartz microdiorite dykes, f) dykes diorites, quartz diorites; 2 – Bichura complex (P<sub>2</sub>): a) medium-grained biotite-hornblende granites b) quartz diorites; 3 – The Olekmin complex (PZ<sub>1</sub>): schists, amphibolites; 4 – The Olekmin complex (PZ<sub>1</sub>): schists, amphibolites; 5 – ore-bearing veins: a) gold-bearing sulfide-quartz veins, b) quartz-molybdenite veins; 6 – geological boundaries; 7 – a) tectonic faults, b) the names of tectonic faults: 1 – Northern Davenda, 2 – Pogranchnoe, 3 – Pologoe, 4 – Aleksadrovsky, 5 – Glavnoe; 8 – a) overthrusts, b) ore-hosting faults; 9 – deposits: 1 – Alexandrovsky gold deposit, 2 – Davendinsky molybdenum deposit. In the inset: I – Northwest block, II – Southeast block, III – Davendinsky block

Первая фаза представлена биотитовыми, амфибол-биотитовыми, амфиболовыми кварцевыми диоритами, диоритами и габбро-диоритами, вторая фаза – биотитовыми гранитами, гранодиоритами, третья фаза – порфиroidными гранитами, лейкогранитами, аплитами. Тематические исследования по расчленению геологи-

ческих формаций Олекмо-Шилкинского междуречья, проведенные сотрудниками «Читагеология», показали, что абсолютный возраст (К-Аг метод) гранитоидов бичурского комплекса составляет 260–235 млн лет. Породы, вмещающие золоторудное оруденение, представлены главным образом гранитами бичурского

комплекса. Породы данного комплекса слагают большую часть площади Александровского месторождения.

Амуджикано-шахтаминский комплекс ( $J_{2-3}$ ) на месторождении представлен исключительно породами дайково-жильной серии – гранит-порфирами, гранодиорит-порфирами, кварцевыми диоритовыми порфиритами, гибридными порфирами, субщелочными лейкократовыми гранит-порфирами, ортоклазитами, плагиоклазовыми порфиритами, диоритовыми порфиритами, фельзитами и фельзит-порфирами, микродиоритами, диабазами, лампрофирами различного состава. Средний возраст гранитоидов амуджикано-шахтаминского комплекса составляет 167–150 млн лет [Спиридонов и др., 2006]. Установлено, что с ранней группой даек – гранит-порфирами, гранодиорит-порфирами – на площади Давенда-Ключевского рудного узла связано молибденовое и медно-молибденовое оруденение, локализующееся в зонах калишпатизации, окварцевания, серицитизации. С поздними дайками – гибридными порфирами, лампрофирами, грорудитами – связано золотооруденение в зонах березитизации, лиственитизации, турмалинизации, окварцевания. На Ключевском золоторудном месторождении, являющемся составной частью Давенда-Ключевского рудного узла, образование золотого оруденения также парагенетически связано с заключительными этапами образования даек амуджикано-шахтаминского комплекса (лампрофирами, гибридными порфирами) [Абрамов, 2015].

#### Петрогеохимические особенности пород, вмещающих оруденение

В Восточном Забайкалье формирование золотого оруденения связывается с мезозойскими магматическими образованиями [Спиридонов и др., 2006]. Поэтому рассмотрим петрогеохимические особенности интрузий амуджикано-шахтаминского комплекса, развитых в районе месторождения. По коэффициенту глиноземистости гранитоиды амуджикано-шахтаминского комплекса относятся к весьма высокоглиноземистым ( $al' = 1,84-2,13$ ), дайки гранит-порфиров – к высокоглиноземистым ( $al' = 1,06-1,40$ ), дайки диоритовых порфиритов – к умеренноглиноземистым образованиям ( $al' = 0,74-0,98$ ) (табл.1). Петрогеохимические особенности кислых интрузий амуджикано-шахтаминского комплекса характеризуются высокими концентрациями калия (рис. 2, *a*). На диаграмме  $(NaO + K_2O)/Al_2O_3$  мол. –  $Al_2O_3/(CaO + NaO + K_2O)$  мол. гранитоиды амуджикано-шахтаминского комплекса соответствуют гранитам I типа. Это предполагает, что источниками гранитов амуджикано-шахтаминского комплекса были магматические очаги (рис. 2, *b*).

Анализ индикаторных соотношений  $(Tb/Yb)_n$ , используемых в качестве индикатора глубин магмообразования, указывает на разноглубинные источники магм мезозойских интрузивных образований Итатинского месторождения. Известно, что значения

$(Tb/Yb)_n > 1,8$  отмечаются в магмах с присутствием граната, ниже 1,8 – в магмах равновесных со шпинелью [Wang et al., 2002]. На диаграмме Sr/Y–Y интрузии бичурского и амуджикано-шахтаминского комплексов соответствуют адакитам (рис. 2, *c*, табл. 1). Однако на диаграмме Ca–Na–K мезозойские интрузивные образования амуджикано-шахтаминского комплекса, развитые в районе месторождения (граниты, кварцевые диориты, дайки лампрофиров), группируются в области известково-щелочного тренда, что указывает на несоответствие их адакитам (рис. 2, *d*). Образование интрузий известково-щелочной серии связывают с дифференциацией исходной магмы основного состава до магм кислого состава при субдукционных процессах. Содержания микроэлементов гранитоидов бичурского и амуджикано-шахтаминского комплексов имеют незначительные различия. В сравнении с другими интрузиями породы дайки амуджикано-шахтаминского комплекса характеризуются повышенными концентрациями (г/т) – Rb (220–282), Cu (19–214), Zn (35–55) и Mo (1,2–8,8) (см. табл. 1). Повышенные концентрации калия, близость интрузивных образований амананского и амуджикано-шахтаминского комплексов по Sr/Y–Y соотношениям к адакитам, присутствие в магматических источниках граната ( $(Tb/Yb)_n > 1,8$ ) указывают на участие в их формировании глубинных мантийных составляющих.

#### Условия локализации и вещественный состав руд

Основное влияние на распределение золотого оруденения оказали узлы пересечения разломов северо-западного и северо-восточного простирания. К числу основных 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 круто падающими жилами образуются прожилково-вкрапленные зоны, вытянутые в направлении линии их сопряжения. Вертикальный размах оруденения составляет около 200 м.

На месторождения выделяется несколько рудных участков (Центральный, Восточный, Северо-Восточный, Ивачиха, Вершина Ороченка), отличающихся особенностями минерального состава. Основные промышленные запасы золота сосредоточены на Центральном участке, расположенном между Главным и Александровским разломами. 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.

Таблица 1

Содержания петрогенных компонентов (%) и редких элементов (г/т)  
в магматических образованиях Александровского месторождения

Table 1

Contents of petrogenic elements (%) and rare elements (ppm) in magmatic formations of the Alexandrovsky deposit

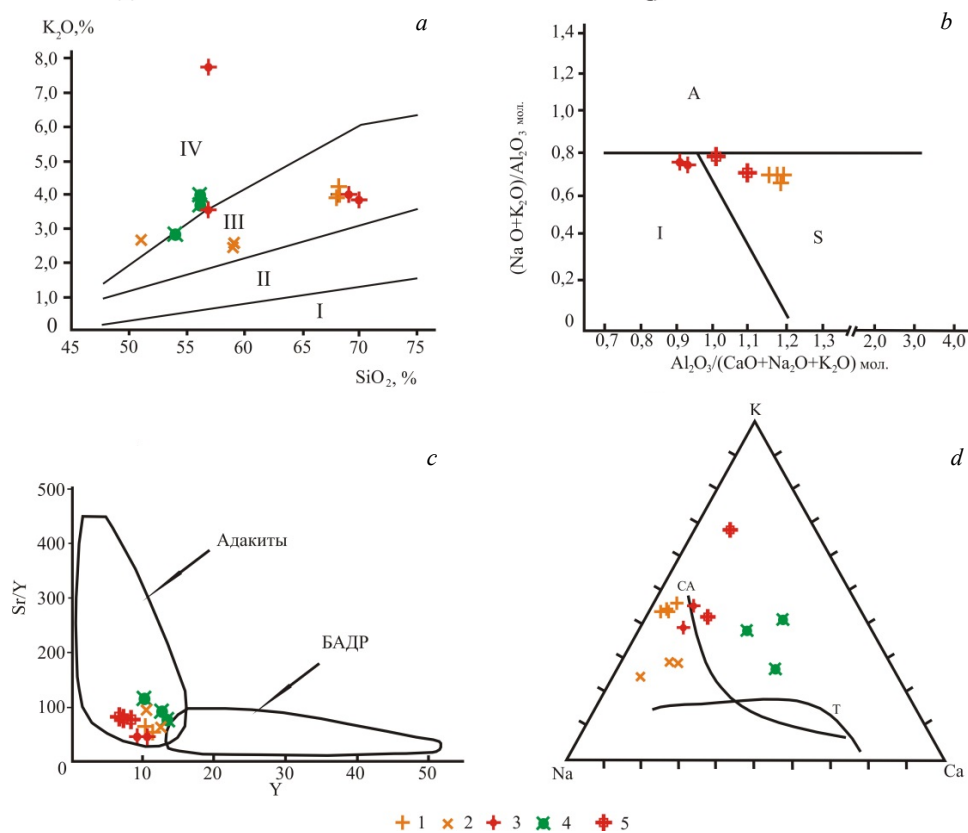
Образец	214	215	216	221	222	223	252	255	258	270	271	273	281	281-1
SiO <sub>2</sub>	68,30	68,10	68,10	58,70	53,10	51,10	55,40	56,40	54,20	69,10	70,80	70,70	57,70	56,90
TiO <sub>2</sub>	0,40	0,41	0,43	1,33	1,42	1,83	1,14	1,10	0,84	0,40	0,26	0,29	0,87	1,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,90	15,90	16,10	15,40	16,00	17,50	16,30	16,30	16,50	15,30	14,60	14,50	14,50	16,50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,48	1,47	1,26	2,57	3,23	3,53	4,20	4,35	3,30	1,38	1,27	1,31	5,76	3,48
FeO	1,04	1,07	1,18	3,70	4,63	4,22	4,26	3,26	4,44	1,11	1,04	1,15	0,96	0,89
MnO	0,05	0,05	0,05	0,11	0,08	0,07	0,05	0,08	0,10	0,04	0,04	0,04	0,04	0,02
CaO	0,68	0,69	0,73	2,96	3,07	3,05	4,30	3,28	5,22	0,64	1,00	1,09	1,49	1,17
MgO	1,88	1,88	1,95	5,23	4,20	4,61	3,10	3,49	5,45	1,78	1,80	2,07	3,41	3,28
Na <sub>2</sub> O	4,75	4,75	4,85	4,19	3,73	4,62	4,50	3,80	3,83	4,60	4,16	4,62	3,99	2,87
K <sub>2</sub> O	3,99	4,15	3,96	2,46	2,56	2,70	3,37	3,95	2,94	4,01	3,88	3,13	3,51	7,70
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,14	0,14	0,15	0,43	0,36	0,59	0,34	0,36	9,16	0,13	0,10	0,10	0,38	0,42
ппп	0,74	0,76	0,79	2,39	6,89	5,85	2,41	2,92	2,59	1,04	0,78	0,87	7,05	5,08
Сумма	99,35	99,37	99,55	99,47	99,31	99,67	99,37	99,29	99,57	99,53	99,63	99,77	99,66	99,32
F	0,05	0,05	0,06	0,17	0,21	0,23	0,30	0,23	0,12	0,05	0,07	0,02	0,06	0,06
Cr	—	—	—	55	90	55	95	56	174	—	25	32	2,4	5,1
V	22	21	25	111	131	144	126	110	156	22	25	25	63	59
Co	9,1	12	11	19	18	15	12	13	15	10,7	10,2	11,3	50	42
Ni	2,9	4,8	4,5	34	46	35	38	29	54	4,9	13,6	15,5	11	8,2
Cu	4,3	5,8	6,3	22	35	27	19	214	113	6,6	9,8	7,4	121	32
Zn	47	48	45	86	62	70	35	52	54	38	35	36	55	36
As	6,1	—	—	—	11	12	16	—	39	2,8	5,7	15	10	9,2
Pb	22	23	22	20	15	18	15	30	37	18	32	32	32	26
W	172	147	194	78	39	22	46	71	31	235	162	192	71	65
Ga	21	21	22	23	22	28	22	22	21	20	17	20	12	11,8
Rb	64	74	69	57	82	138	221	221	231	68	92	80	220	282
Zr	199	193	215	148	160	160	207	236	72	206	95	100	200	257
Hf	3,9	7,0	1,8	5,8	6,8	4,9	7,7	5,1	3,9	2,6	5,9	5,1	2,3	7,7
Nb	7,2	7,8	9,5	8,4	6,4	8,7	5,6	5,4	2,5	7,2	6,1	7,9	11	10,6
Mo	—	—	—	—	—	0,9	1,2	8,8	1,2	—	—	—	—	2
Cs	—	—	—	—	13	21	34	22	71	91	—	20	19	11
Sn	—	2,4	—	12,3	—	—	12,6	15	—	2,9	16,3	—	—	—
Sb	—	2,0	3,8	—	8,8	—	2,6	3,2	21	68	—	—	25	23
Ba	1483	1547	1612	1480	1147	504	4241	1400	698	1443	879	652	1584	2156
Ta	4,2	1,5	2,9	4,4	2,9	—	—	—	3,6	—	—	1,9	1,7	—
Th	5,7	7,5	4,9	5,7	3,0	5,2	6,6	3,8	1,2	8	16	13,6	8,3	5,3
U	—	—	—	4,7	—	—	1,8	1,6	1,0	—	—	1,1	3,9	5,3
La	40,0	45,1	42,5	35,1	26,1	40,8	41,5	44,1	12,8	45,9	23,6	28,6	54,8	54,9
Ce	81,2	88,7	88,3	69,6	55,2	80,4	79,0	84,4	24,1	91,9	43,9	47,5	118,0	120,0
Pr	7,63	8,93	8,64	8,15	6,88	9,81	8,54	7,86	2,73	8,97	3,52	4,13	11,2	11,5
Nd	35,0	36,9	38,1	40,1	38,1	62,6	44,7	46,2	17,4	42,8	17,8	19,8	55,4	67,8
Sm	5,44	5,74	5,89	6,97	6,65	9,03	6,73	6,99	2,80	6,02	2,48	2,79	8,42	9,36
Eu	1,03	1,08	1,14	1,75	1,63	2,09	1,56	1,66	0,91	1,13	0,58	0,69	1,40	1,54
Gd	2,78	3,18	3,14	4,70	4,80	7,93	4,61	4,71	2,26	3,33	1,43	1,68	3,81	5,01
Tb	0,28	0,31	0,15	0,46	0,47	0,52	0,48	0,45	0,20	0,24	0,44	0,13	0,44	0,44
Ta	4,2	1,5	2,9	4,4	2,9	—	—	—	3,6	—	—	1,9	1,7	—
Th	5,7	7,5	4,9	5,7	3,0	5,2	6,6	3,8	1,2	8	16	13,6	8,3	5,3
U	—	—	—	4,7	—	—	1,8	1,6	1,0	—	—	1,1	3,9	5,3
La	40,0	45,1	42,5	35,1	26,1	40,8	41,5	44,1	12,8	45,9	23,6	28,6	54,8	54,9
Ce	81,2	88,7	88,3	69,6	55,2	80,4	79,0	84,4	24,1	91,9	43,9	47,5	118,0	120,0
Pr	7,63	8,93	8,64	8,15	6,88	9,81	8,54	7,86	2,73	8,97	3,52	4,13	11,2	11,5
Nd	35,0	36,9	38,1	40,1	38,1	62,6	44,7	46,2	17,4	42,8	17,8	19,8	55,4	67,8
Sm	5,44	5,74	5,89	6,97	6,65	9,03	6,73	6,99	2,80	6,02	2,48	2,79	8,42	9,36
Eu	1,03	1,08	1,14	1,75	1,63	2,09	1,56	1,66	0,91	1,13	0,58	0,69	1,40	1,54
Gd	2,78	3,18	3,14	4,70	4,80	7,93	4,61	4,71	2,26	3,33	1,43	1,68	3,81	5,01
Tb	0,28	0,31	0,15	0,46	0,47	0,52	0,48	0,45	0,20	0,24	0,44	0,13	0,44	0,44
Dy	1,86	2,18	2,15	2,65	2,39	2,98	2,50	2,67	1,48	2,05	1,00	1,27	2,22	2,57
Ho	0,33	0,43	0,39	0,41	0,40	0,33	0,40	0,43	0,24	0,38	0,23	0,26	0,43	0,41
Er	0,88	1,19	1,16	1,36	1,26	2,27	1,50	1,43	0,81	1,21	0,60	0,83	1,26	1,64
Tm	0,03	0,15	0,15	0,14	0,05	0,21	0,15	0,06	0,04	0,08	0,01	0,06	0,10	0,12
Yb	0,79	0,99	0,90	0,86	0,72	0,72	0,88	0,86	0,57	0,85	0,69	0,80	0,87	0,91
Lu	0,11	0,17	0,15	0,14	0,13	0,15	0,16	0,14	0,10	0,15	0,13	0,15	0,14	0,15

Окончание табл. 1

Образец	214	215	216	221	222	223	252	255	258	270	271	273	281	281-1
Y	8,10	11,3	10,5	12,6	10,6	12,7	12,2	13,5	7,84	10,4	6,37	7,61	9,16	10,6
$\Sigma$ TR	185,5	206,3	203,3	185,0	155,4	232,5	204,9	215,5	74,28	215,4	102,8	116,3	267,65	286,9
(La/Yb) <sub>n</sub>	35,12	31,63	32,79	28,31	25,18	39,37	32,70	35,57	15,59	37,47	23,72	24,84	43,68	41,88
(Tb/Yb) <sub>n</sub>	1,62	1,44	0,76	2,45	3,00	3,32	2,51	2,40	1,61	1,30	2,93	0,11	2,33	2,22
Eu/Eu*	0,81	0,77	0,81	0,93	0,88	0,75	0,86	0,88	1,10	0,77	0,94	0,97	0,76	0,69
Eu/Sm	0,19	0,19	0,19	0,25	0,24	0,23	0,23	0,24	0,32	0,19	0,23	0,25	0,17	0,16
Mg#	0,59	0,60	0,60	0,61	0,50	0,53	0,41	0,47	0,57	0,59	0,61	0,62	0,51	0,60
ASI	1,19	1,16	1,18	1,34	1,09	1,09	0,86	0,99	0,87	1,18	1,13	1,12	1,10	1,07
al'	2,23	2,20	2,16	0,77	0,84	0,89	0,98	0,98	0,74	2,17	2,13	1,84	1,06	1,40

*Примечание.* Пробы: бичурский комплекс (P2): 214, 215, 216, 270 – гранитоиды; 221, 222, 223 – кварцевые диориты; амуджикано-шахтаминский комплекс (J2-3): 252, 255, 258 – дайки микродиоритов; 271, 273 – гранитоиды; 281, 281-1 – дайки гранит-порфира, al' =  $Al_2O_3 / (FeO + Fe_2O_3 + MgO)$ , Mg# =  $MgO / (MgO + FeO + 0,85Fe_2O_3)$  в молекулярных количествах, ASI =  $Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O + CaO)$  в молекулярных количествах. Прочерк – нет данных.

*Note.* Samples: Bichura complex (P2): 214, 215, 216, 270 – granitoids; 221, 222, 223 – quartz diorites; Amudzhikano-Shakhtaminsky complex (J2-3): 252, 255, 258 – dikes of microdiorites; 271, 273 – granitoids; 281, 281-1 – granite-porphyre dikes, al' =  $Al_2O_3 / (FeO + Fe_2O_3 + MgO)$ , Mg # =  $MgO / (MgO + FeO + 0.85Fe_2O_3)$  in molecular quantities, ASI =  $Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O + CaO)$  in molecular quantities. Dash – there is no data available.



**Рис. 2. Диаграммы:** а)  $K_2O-SiO_2$  [Peccerillo, Taylor, 1976]; б)  $(Na_2O + K_2O) / Al_2O_3 - Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$  мол. [Maeda, 1990]; в)  $Sr/Y-Y$  [Defant et al., 1992]; д)  $Na-K-Ca$  [Kovalev et al., 2019] интрузий Александровского месторождения

а) поля интрузивных серий на диаграмме: IV – шощонитовая, III – высококальциевая известково-щелочная, II – среднекальциевая известково-щелочная, I – островодужная толеитовая; б) типы гранитов: I-тип, S-тип, A-тип; в) БАДР – БАДР – породы базальт-андезит-дацит-риолитовых ассоциаций островных дуг и активных континентальных окраин; д) СА – известково-щелочной тренд дифференциации интрузий, Т – трондьемитовый тренд интрузий. Бичурский комплекс: 1 – гранодиориты, 2 – кварцевые диориты; амуджикано-шахтаминский комплекс: 3 – граниты, 4 – микродиориты, 5 – гранит-порфиры

**Fig. 2. Diagrams:** а)  $K_2O-SiO_2$  [Peccerillo, Taylor, 1976]; б)  $(Na_2O + K_2O) / Al_2O_3 - Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$  mol. [Maeda, 1990]; в)  $Sr/Y-Y$  [Defant et al., 1992]; д)  $Na-K-Ca$  [Kovalev et al., 2019] intrusions of the Alexandrovsky deposit

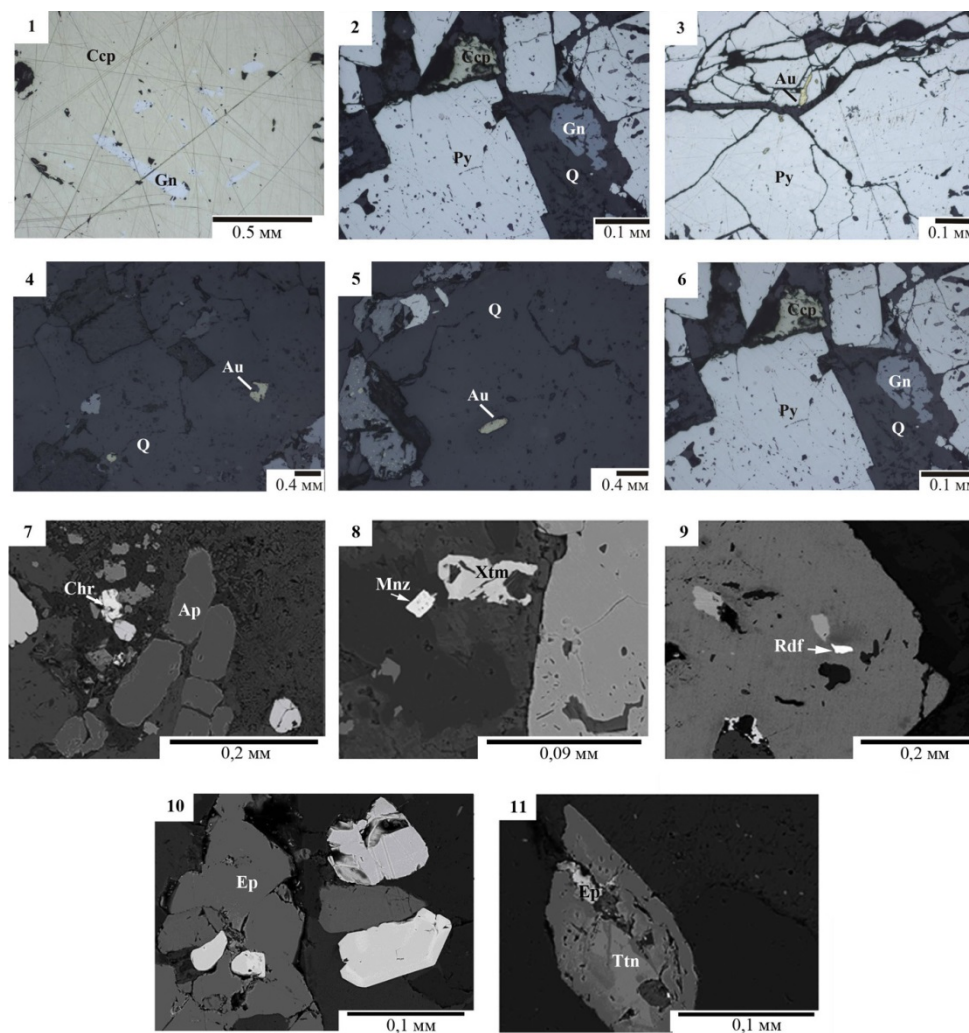
а) the fields of the intrusive groups in the diagram: IV – shoshonite, III – high potassium calc-alkaline, II – medium potassium calc-alkaline, I – island-arc tholeiitic; б) types of granites: I-type, S-type, A-type; в) BADR – BADR – rocks of basalt-andesite-dacite-rhyolite associations of island arcs and active continental margins; д) CA – calc-alkaline trend of intrusions differentiation, T – trondhjemite trend of intrusions. Bichura complex: 1 – granodiorites, 2 – quartz diorites; Amujikan-Shakhtamin complex: 3 – granites, 4 – microdiorites, 5 – granite-porphyre

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 Александровском месторождении выделены следующие минеральные ассоциации в порядке их проявления: 1) молибденит-кварцевая; 2) кварц-турмалиновая; 3) висмутин-кварцевая; 4) пирит-кварцевая с золотом; 5) золото-кварц-полиметаллическая; 6) кварц-карбонатная. Наиболее распространенным рудным минералом является пирит,

менее развиты халькопирит, висмутин, тетраэдрит, борнит. Малораспространенные минералы представлены сфалеритом, галенитом, арсенопиритом, тетрадимитом, теллуrowисмутином, золотом. К числу редких минералов относятся: самородное серебро, висмутин, пирротин, виттихенит, марказит, буланжерит, айкинит, гессит, магнетит, касситерит. В рудах месторождения присутствует редкоземельная минерализация, представленная монацитом, ксенотимом, апатитом, эпидотом, рабдофаном и черчитом. Содержание сульфидов в рудах составляет 5–8% (рис. 3, табл. 2, 3).

Молибденит-кварцевая ассоциация на месторождении имеет незначительное распространение и представлена редкими прожилками мощностью до 1 см. Молибденит образует редкую неравномерную вкрапленность.



**Рис. 3. Взаимоотношения рудных минералов Александровского месторождения**

1 – включения галенита в халькопирите; 2 – выделения пирита, халькопирита, галенита; 3 – золото заполняет микротрещинки в пирите; 4, 5 – включения золота в кварце; 6 – выделения пирита, галенита, халькопирита. Минералы, содержащие редкоземельные элементы: 7 – зерна черчита, апатита, 8 – выделения монацита; 9 – зерна рабдофана, 10 – зерна ксенотима, 11 – выделения титанита, эпидота

**Fig. 3. The relationship of ore minerals of the Alexandrovskiy deposit**

1 – inclusion of galena in chalcopyrite; 2 – allocation of pyrite, chalcopyrite, galena; 3 – gold performs microcracks in pyrite; 4, 5 – inclusions of gold in quartz; 6 – allocation of pyrite, galena, chalcopyrite. Minerals containing rare earth elements: 7 – grains of churchite, apatite, 8 – monazite precipitation; 9 – grains of rhabdophane, 10 – grains of xenotime, 11 – allocation of titanite, epidote

Таблица 2

**Содержание петрогенных компонентов (%) и элементного состава (г/т)  
в сульфидно-кварцевых жилах Александровского месторождения**

Table 2

**Content of petrogenic elements (%) and elemental composition (ppm) in sulfide-quartz veins of the Alexandrovsky deposit**

Компоненты	224	229	230	232	234	236	237	237-1	237-2	237-3	237-4	244	248	254	256	257
SiO <sub>2</sub> ,%	63,2	35,8	63,2	52,2	58,0	79,8	77,2	12,2	52,5	67,0	13,5	60,7	49,0	55,6	73,8	68,1
TiO <sub>2</sub>	0,63	0,37	0,48	0,67	0,68	0,15	0,10	0,26	0,12	0,35	0,44	1,11	0,68	0,15	0,10	0,63
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,9	9,4	14,9	23,4	15,2	14,7	7,9	9,2	2,9	16,6	5,6	18,0	22,7	7,09	14,4	16,15
MgO	1,5	7,1	1,1	1,6	0,5	—	1,0	3,7	4,4	0,7	—	3,4	1,5	—	1,1	4,1
CaO	3,75	20,0	5,65	1,18	2,15	0,12	4,12	14,14	7,90	0,55	2,60	4,29	0,66	0,18	0,49	0,96
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,13	10,2	5,01	8,35	9,69	2,27	3,34	32,6	13,2	4,45	34,5	5,27	9,61	15,4	3,79	9,22
MnO	0,109	0,157	0,06	0,08	0,061	0,01	0,05	0,347	0,127	0,02	0,037	0,058	0,05	0,01	0,02	0,05
K <sub>2</sub> O	2,35	1,77	1,95	6,27	3,83	3,00	1,52	1,89	0,48	5,20	0,99	5,14	6,40	4,05	7,30	1,5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,408	0,064	0,16	0,124	0,178	0,02	0,03	0,017	0,029	0,113	0,078	0,367	0,09	0,04	0,02	0,24
U, ppm	—	1,6	1,6	27,0	1,1	1,6	—	—	4	—	—	4,2	19,4	—	1,1	—
Th	3,2	—	—	7,4	1,7	3,6	3	0,9	3,7	3	1,2	8,9	6,3	—	7,2	3
Co	11	15	11	17	21	12	12	42	60	21	296	20	27	31	8	12
Ni	8	12	11	4,3	31	3	4	29	25	6	77	30	7	10,4	4	29
Rb	51	71	84	192	121	111	52	86	29	171	39	194	204	149	248	58
Sr	840	531	277	507	151	103	321	193	109	183	143	2700	379	90	228	510
Zr	273	59	88	284	86	135	41	38	17	128	96	264	294	63	30	163
Hf	8,4	2	3,8	9,1	—	7,4	1,8	2	—	1,8	9,8	5,1	10	8,6	2,0	6,4
Nb	9,6	4,5	3,0	9,5	4,7	8,8	1,7	—	—	5,1	5,4	8,1	12	0,6	1,4	7,4
La	68,2	19,9	31,8	—	16,8	29,4	11,5	—	—	24,7	14,7	72,8	49,6	—	3,23	—
Ce	138,0	41,9	62,8	—	34,1	49,2	23,0	—	—	45,0	32,1	136,0	103	—	4,22	—
Pr	12,8	4,94	7,47	—	4,12	4,35	2,56	—	—	5,18	3,0	12,7	9,36	—	0,95	—
Nd	59,0	19,25	35,1	—	16,1	14,6	8,46	—	—	17,4	10,9	63,1	37,5	—	4,50	—
Sm	10,3	4,60	6,22	—	3,32	2,29	2,02	—	—	3,21	2,31	10,7	6,69	—	1,62	—
Eu	2,08	1,23	1,07	—	1,00	0,50	0,52	—	—	0,77	0,55	2,27	1,54	—	0,24	—
Gd	5,01	3,60	2,77	—	2,48	1,30	1,53	—	—	1,93	1,65	5,41	4,29	—	0,28	—
Tb	0,58	0,54	0,41	—	0,3	0,15	0,19	—	—	0,26	0,20	1,07	0,50	—	0,34	—
Tb	0,58	0,54	0,41	—	0,3	0,15	0,19	—	—	0,26	0,20	1,07	0,50	—	0,34	—
Dy	3,15	2,82	1,38	—	1,48	0,89	1,0	—	—	1,64	1,04	3,18	2,49	—	0,57	—
Ho	0,63	0,48	0,32	—	0,25	0,15	0,15	—	—	0,28	0,20	0,66	0,35	—	0,23	—
Er	1,90	0,96	1,06	—	0,60	0,55	0,44	—	—	0,85	0,45	2,13	0,99	—	0,86	—
Tm	0,24	0,11	0,14	—	0,08	0,08	0,05	—	—	0,12	0,07	0,30	0,14	—	0,16	—
Yb	1,28	0,81	0,41	—	0,50	0,48	0,36	—	—	0,88	0,36	0,93	0,93	—	0,91	—
Lu	0,21	0,13	0,09	—	0,09	0,09	0,06	—	—	0,14	0,08	0,17	0,17	—	0,19	—
Y	15,0	16,4	5,43	—	7,07	5,25	5,76	—	—	9,61	7,62	13,3	12,7	—	5,34	—
U/Th	—	—	—	3,64	0,65	0,44	—	—	1,08	—	—	0,47	3,08	—	0,15	—
Co/Ni	1,37	1,25	1,00	3,95	0,68	4,00	3,00	1,45	2,40	3,50	3,84	0,67	3,86	2,98	2,00	0,41
Zr/Hf	32,5	29,5	23,16	31,21	—	18,24	22,78	19	—	71,11	9,80	51,76	29,4	7,32	15,0	25,47
Nb/La	0,14	0,23	0,09	—	0,28	0,30	0,15	—	—	0,21	0,37	0,11	0,24	—	0,43	—
Y/Ho	23,81	34,17	16,97	—	28,28	35,00	38,40	—	—	34,32	38,10	20,15	36,3	—	23,22	—
ΣTR	312,3	118,2	156,5	—	88,59	109,4	57,8	—	—	112,2	75,47	324,72	231	—	23,64	—
(La/Yb) <sub>n</sub>	36,97	17,1	53,8	—	23,32	42,5	22,1	—	—	19,5	28,3	54,32	37,0	—	2,46	—
Eu/Eu*	0,88	0,92	0,79	—	1,06	0,88	0,90	—	—	0,94	0,86	0,91	0,88	—	1,09	—
Eu/Sm	0,20	0,27	0,17	—	0,39	0,22	0,26	—	—	0,24	0,24	0,21	0,23	—	0,15	—
Rb/Sr	0,06	0,13	0,30	0,38	0,80	1,08	0,16	0,45	0,27	0,93	0,27	0,07	0,54	1,65	1,09	0,11
(La/Yb) <sub>ppm</sub>	38,2	11,1	17,8	—	9,4	16,4	9,3	—	—	13,8	8,2	40,7	27,8	—	1,80	—
(Gd/Yb) <sub>ppm</sub>	3,2	2,3	1,8	—	1,6	0,8	1,0	—	—	1,2	1,1	3,5	2,8	—	0,18	—

*Примечание.* Александровское месторождение. Кварцевые жилы с включениями пирита: (224, 232, 234, 236, 237, 237-3, 244, 279, 281, 282); пирита, арсенопирита, галенита (237-1), пирита, халькопирита (237-4, 277, 280-1); пирита, сфалерита (260); молибденита (254). Кварц-турмалиновые жилы с включениями пирита: (248, 257, 261, 262, 264).

*Note.* Alexandrovsky deposit. Quartz veins with inclusions of pyrite: (224, 232, 234, 236, 237, 237-3, 244, 279, 281, 282); pyrite, arsenopyrite, galena (237-1), pyrite, chalcopyrite (237-4, 277, 280-1); pyrite, sphalerite (260); molybdenite (254). Quartz-tourmaline veins with inclusions of pyrite: (248, 257, 261, 262, 264).

Кварц-турмалиновая ассоциация проявлена слабо и развита главным образом на Ивачихинском участке. Характерными минералами этой ассоциации являются турмалин, пирит, халькопирит. Пирит образует идиоморфные кристаллы. Халькопирит отмечается в небольшом количестве (до 1%) в сростании с пиритом.

Висмутин-кварцевая минеральная ассоциация отмечается главным образом в пределах Ивачихинского участка. Минералы этой ассоциации образуют мало-мощные жилы и прожилки. Характерными рудными минералами этой ассоциации являются: пирит, висмутин, сульфовисмутит, молибденит. Пирит встре-

чается в виде зерен неправильной формы, реже кубического габитуса, и содержит включения магнетита и халькопирита. Висмутин образует небольшие линзовидные скопления. Молибденит развит в виде изогнутых пластинок и ассоциирует с висмутином. Висмутин-кварцевые жилы и прожилки сопровождаются серитизацией, окварцеванием и калишпатизацией вмещающих пород.

Кварц-пиритовая ассоциация является наиболее распространенной на месторождении. 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 сростании с пиритом. Галенит отмечается в виде мелких редких кристаллов в ассоциации с анкеритом. Основная масса золота наблюдается в

ассоциации с пиритом, залечивая в нем микротрещинки. Характерно также его ассоциация с халькопиритом, галенитом. Пробность золота изменяется от 850 до 922‰ (табл. 3).

Золото-кварц-полиметаллическая ассоциация развита на флангах рудных жил. Наиболее распространенными рудными минералами этой ассоциации являются пирит, халькопирит, сфалерит, галенит.

Менее распространены борнит, сульфосоли свинца и меди, 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 залечивает микротрещинки в пирите и халькопирите. Бурнотит и буланжерит отмечаются в виде гнездовых выделений в ассоциации с карбонатом.

Таблица 3

Химические составы рудных минералов Александровского месторождения

Table 3

Chemical compositions of ore minerals of the Alexandrovsky deposit

Образец	Минерал	Fe	Cu	Zn	Pb	Bi	Te	As	Au	Ag	S	Сумма
280	Золото	–	–	–	–	–	–	–	85,50	13,88	–	99,38
280	–//–	–	–	–	–	–	–	–	86,01	12,81	–	98,82
280	–//–	–	–	–	–	–	–	–	92,82	8,11	–	103,26
280	–//–	–	–	–	–	–	–	–	92,26	6,36	–	98,62
284	–//–	–	–	–	–	–	–	–	90,12	6,61	–	96,72
284	–//–	–	–	–	–	–	–	–	92,45	7,46	–	100,73
277	Пирит	46,42	–	–	–	–	–	2,3	–	–	51,36	100,08
280	–//–	47,36	–	–	–	–	–	–	–	–	52,39	99,75
284	–//–	47,78	–	–	–	–	–	–	–	–	52,42	100,2
277	Халькопирит	30,93	35,17	–	–	–	–	–	–	–	34,52	100,61
280	–//–	31,37	34,89	–	–	–	–	–	–	–	33,96	100,22
284	–//–	31,16	34,73	–	–	–	–	–	–	–	33,82	99,71
277	Тетрадимит	–	–	–	–	58,84	35,36	–	–	–	5	99,21
280	–//–	0,84	–	–	–	59,09	36,99	–	–	–	4,81	101,74
284	–//–	–	–	–	–	58,01	35,31	–	–	–	4,93	98,25
280	Галенит	–	–	–	86,99	–	–	–	–	–	12,29	99,28
284	–//–	–	–	–	79,46	–	–	–	–	–	10,9	90,36
284	–//–	–	–	–	87,47	–	–	–	–	–	12,43	99,9
277	Айкинит	–	–	–	37,94	33,29	–	–	–	–	15,05	96,72
277	–//–	0,75	–	–	34,62	36,77	–	–	–	–	14,89	95,83
280	Сфалерит	6,24	–	59,67	–	–	–	–	–	–	32,55	98,46
284	–//–	6,14	–	58,58	–	–	–	–	–	–	33,15	97,86
284	–//–	7,79	–	59,61	–	–	–	–	–	–	32,95	100,35

Золото отмечается в ассоциации с блеклой рудой, галенитом, сфалеритом. Изменения вблизи жильных образований выражены в карбонатизации и серицитизации.

Золото связано с пирит-кварцевой и золото-кварц-полиметаллической минеральными ассоциациями. Пробность золота колеблется от 855 до 928‰, в среднем составляя 898‰. Наиболее типичны крючковатые, серповидные, овальные формы выделения золота. Часто золото приурочено к зонам роста пирита вплоть до образования псевдоморфоз, отмечается в микротрещинках пирита (см. табл. 2).

Гидротермальные изменения вмещающих пород в околожильной части зависят от состава минеральных ассоциаций, представленных в жилах. Метасо-

матические изменения представлены в основном серицитизацией, калишпатизацией, в меньшей степени – каолинизацией, окварцеванием. Мощность оторочек измененных пород составляет 1–3 см, реже 10–15 см.

### Обсуждение результатов исследования

Условия формирования рудной минерализации оцениваются по индикаторным соотношениям элементов. Так, для оценки глубин формирования рудных магматических очагов используются Eu/Sm отношения в трактовке С.В. Винокурова [Винокуров, 1996]. Eu/Sm < 0,2 соответствует магматическим очагам, образованным в верхней континентальной коре,



$Eu/Sm > 0,2$  – сформированным в нижней континентальной коре. Косвенно о глубинности функционирования магматических очагов можно судить по значениям европиевого минимума: чем меньше значения  $Eu/Eu^*$ , тем более был дифференцирован магматический очаг. Значения  $Eu/Eu^* > 1,0$  указывают на то, что магматический очаг был недифференцирован и, соответственно, имел глубинный источник. Установлено, что если значения  $U/Th < 0,75$ , это указывает на окислительную среду рудообразования,  $0,75-1,25$  – на нейтральную,  $> 1,25$  – на восстановительную [Jones, Manning, 1994]. Совокупность этих данных характеризует уровни зарождения рудоносных магматических очагов. Установлено, что в рудах значение  $Co/Ni$  более 1,5 указывает на участие магматического флюида [Kun et al., 2014]. В рудах в гидротермальных флюидах, содержащих хлор, значения  $Hf/Sm$ ,  $Nb/La$  и  $Th/La$ , преимущественно меньше единицы, а во флюидах, обогащенных фтором, – больше единицы [Oreskes, Einaudi, 1990; Kun et al., 2014]. Значения  $Y/No$  отношений позволяет судить об источниках лантаноидов во флюидах [Baum, 1996].

Анализ индикаторных соотношений элементов в рудах Александровского месторождения свидетельствует о том, что преобладающая часть кварц-сульфидных жил образована в окислительной обстановке ( $U/Th < 0,75$ ). При этом часть их образована в восстановительной обстановке. В преобладающей части в рудах  $Co/Ni$  составляет более 1,5, что указывает на участие магматического флюида в рудообразовании. Значения в рудах  $Hf/Sm$ ,  $Nb/La$  и  $Th/La < 1$  указывает на наличие в рудоносных флюидах хлора.

Преобладающие значения  $Y/No$  отношений золоторудных месторождений в пределах 22–32 соответствуют значениям флюидов гидротермальных систем Восточно-Тихоокеанского рифта [Вау, Dulski, 1995] и флюидов, образованных в результате регионального зеленокаменного метаморфизма вмещающих пород [Вау, 1991; Monecke et al., 2002].

Рассмотрение распределения  $(Tb/Yb)_n$  в интрузивных образованиях района Александровского месторождения свидетельствует о разноглубинных магматических источниках интрузивных образований [Wang et al., 2002]. При этом в породах кислого состава значения  $(Tb/Yb)_n$  варьируют от 0,11 до 2,21. Источники магматических пород дайкового комплекса (микродиориты, кварцевые диориты) располагались на больших глубинах. На это указывают данные  $(Tb/Yb)_n = 1,61-3,37$ .

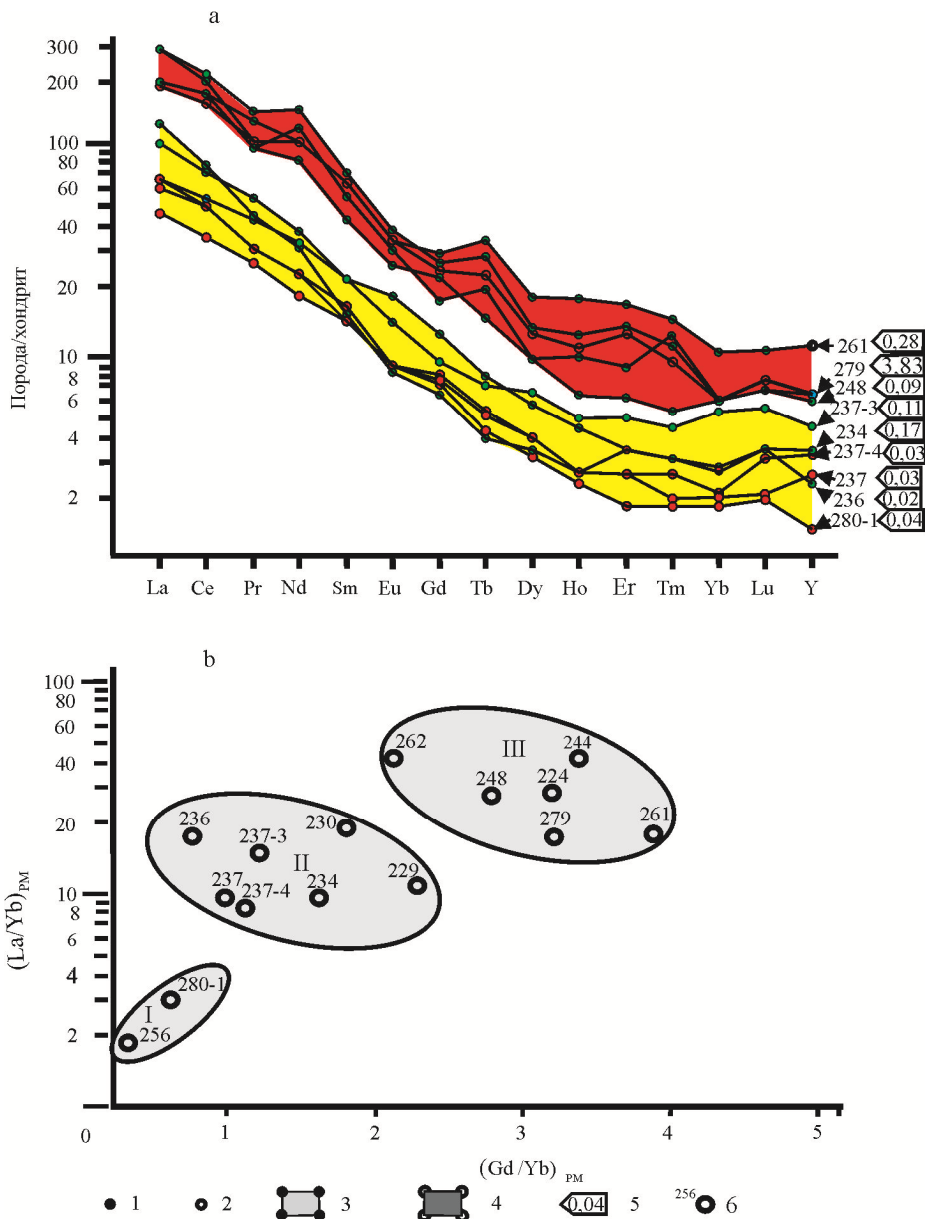
Золотоносные сульфидно-кварцевые руды разной продуктивности различаются содержанием  $P3Э$ , а также отношениями  $Eu/Eu^*$ ,  $Eu/Sm$ ,  $(La/Yb)_n$ ,  $(La/Yb)_{pm-}$   $(Gd/Yb)_{pm}$ . Распределение  $P3Э$  выявило тесную корреляцию суммы  $P3Э$  с повышенными концентрациями  $P_2O_5$  (рис. 4). При этом руды с повышенными содержаниями  $P_2O_5$  характеризуются в основном низкими концентрациями золота. Источниками этих руд были, вероятнее всего, высокощелоч-

ные мантийные флюиды с повышенными концентрациями  $Ti$ ,  $Mg$ ,  $P$ ,  $V$ ,  $Cr$ , внедрившиеся по зонам глубинных нарушений в верхние горизонты земной коры (см. табл. 2). Установлено, что во флюидах основного состава увеличение щелочности ведет к уменьшению концентраций золота [Сафонов и др., 2007]. По данным  $(La/Yb)_{pm-}$   $(Gd/Yb)_{pm}$  соотношений сульфидно-кварцевые руды образованы из разноглубинных магматических источников (см. рис. 4, b) [Hofman et al., 1984].

Отсутствие сильно выраженных  $Eu$  аномалий ( $Eu/Eu^* = 0,79-1,09$ ) на спайдер-диаграммах руд указывает на участие в их формировании вещества из разноглубинных слабо дифференцированных магматических очагов (см. табл. 2, рис. 4). По данным распределения  $(La/Yb)_{pm-}$   $(Gd/Yb)_{pm}$ , [Hofman et al., 1984] и  $Eu/Sm$  предполагается наличие трех таких магматических очагов (см. рис. 4, b) (Винокуров, 1996). При этом наиболее глубинные магматические очаги могли быть расположены в нижней континентальной коре ( $Eu/Sm > 0,2$ ), малоглубинный – в верхней континентальной коре ( $Eu/Sm < 0,2$ ) [Винокуров, 1996]. Образование многочисленных близких по возрасту разноглубинных рудоносных магматических очагов характерно для развития рудо-магматических систем, возникающих при мантийно-коровом взаимодействии [Сафонов и др., 2007]. В Восточном Забайкалье эти процессы выразились в пространственной и временной совмещенности золотого оруденения и малых интрузий кислого, среднего и основного состава, которая типична для золоторудных и золотоносных месторождений региона.

Распределение редкоземельных элементов ( $P3Э$ ) показывает, что золотоносные сульфидно-кварцевые руды характеризуются разными значениями  $\sum P3Э$ ,  $Eu/Eu^*$ ,  $Eu/Sm$  и  $(La/Yb)_n$ . Это свидетельствует об их образовании из разноглубинных, в разной степени дифференцированных магматических очагов (см. табл. 3, рис. 4). Источниками золотоносных руд были в основном глубинные слабо дифференцированные магматические очаги. На это указывает отсутствие (или слабое проявление) в рудах европиевых аномалий ( $Eu/Eu^* = 0,79-1,09$ ). Часть рудоносных магматических очагов формировалась в верхней континентальной коре ( $Eu/Sm < 0,2$ ), другая часть – в нижней континентальной коре ( $Eu/Sm > 0,2$ ).

Распределение  $P3Э$  выявило тесную корреляцию суммы  $P3Э$  с повышенными концентрациями пятиоксида фосфора (см. рис. 4, a). При этом руды с повышенными содержаниями  $P_2O_5$  характеризуются в основном низкими концентрациями и золота. Минералогические исследования выявили следующие минералы, содержащие  $P3Э$ : монацит, ксенотим, апатит, эпидот, рабдофан, черчит. Характерной особенностью рудной минерализации Александровского месторождения является наличие редкоземельной минерализации в составе продуктивных рудных ассоциаций.



**Рис. 4. Редкоземельные спектры (а) и положение фигуративных точек состава пород и руд (б) на дискриминационной диаграмме  $(Gd/Yb)_{PM}-(La/Yb)_{PM}$  Александровского месторождения**

1 – пробы с содержанием золота > 1г/г; 2 – пробы с содержанием золота < 1 г/г; 3 – область значений РЗЭ с пониженными содержаниями  $P_2O_5$ ; 4 – область значений РЗЭ с повышенными содержаниями  $P_2O_5$ ; 5 – содержания  $P_2O_5$  в пробах (%), 6 – номера проб

**Fig. 4. Rare-earth elements spectra (a) and the position of figurative points of rock composition and ores (b) in the discrimination diagram  $(Gd/Yb)_{PM}-(La/Yb)_{PM}$  of the Alexandrovsky deposit**

1 – samples with gold content > 1ppm; 2 – sample with gold content < 1 ppm; 3 – REE range with low  $P_2O_5$  contents; 4 – REE range with a high  $P_2O_5$  contents; 5 –  $P_2O_5$  contents in samples (percent), 6 – number of samples

Редкоземельная минерализация, участвующая в гидротермальном процессе, установлена в рудах Дарасунского [Чернова и др., 2009] и Березитового [Роголина и др., 2013] золоторудных месторождений, а также в рудах золоторудных месторождений Калбинской металлогенической зоны Восточного Казахстана [Ананьев, 2012]. Характерной особенностью золотоносных руд Александровского месторождения являются повышенные концентрации  $P_2O_5$ , наличие включений апатита, рабдофана. Эти данные

указывают на то, что вероятными источниками данных типов руд могли являться щелочные интрузивные образования, характеризующиеся повышенными концентрациями РЗЭ [Макагонов, 2016]. Аналогичная по составу Александровской редкоземельная минерализация установлена в щелочных дайках Балбукского комплекса (Южный Урал). Широкое распространение в них минералов РЗЭ позволяет рассматривать породы Балбукского комплекса в качестве первичных источников РЗЭ [Макагонов, 2016].

### Заключение

Геохимические особенности интрузивных образований амуджикано-шахтаминского комплекса, являющиеся наиболее вероятными источниками золотого оруденения, свидетельствуют о разноглубинных магматических источниках интрузивных образований. При этом в породах кислого состава значения  $(\text{Tb}/\text{Yb})_n$  варьируют от 0,11 до 2,21. Источники магам пород дайкового комплекса (микродиориты, кварцевые диориты) располагались на больших глубинах. На это указывают данные  $(\text{Tb}/\text{Yb})_n - 1,61-3,37$ . Анализ индикаторных соотношений элементов в рудах Александровского месторождения свиде-

тельствуют о том, что преобладающая часть кварц-сульфидных жил образована в окислительной обстановке ( $\text{U}/\text{Th} < 0,75$ ). При этом часть их образована в восстановительной обстановке ( $\text{U}/\text{Th} > 0,75$ ). Характерной особенностью минерального состава гидротермальных руд является наличие в продуктивных рудных ассоциациях редкоземельной минерализации. Особенности распределения редкоземельных элементов в рудах указывают на то, что образование происходило за счет разноглубинных, в разной степени дифференцированных магматических источников. Впервые в рудах Александровского месторождения установлено наличие редкоземельных минералов – ксенотима, рабдофана и черчита.

### ЛИТЕРАТУРА

- 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.
- Ананьев Ю.С.** Редкоземельные элементы в метасоматитах и рудах золоторудных месторождений Западной Калбы // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321, № 1. С. 56–62.
- Винокуров С.Ф.** Европиевые аномалии в рудных месторождениях и их геохимическое значение // Доклады Академии наук. 1996. Т. 346. С. 792–795.
- Ковалев К.Р., Калинин Ю.А., Туркина О.М., Гимон В.О., Абрамов. Б.Н.** Култуминское золото-медно-железо-скарновое месторождение (Восточное Забайкалье, Россия): петрогеохимические особенности магматизма и процессы рудообразования // Геология и геофизика. 2019. Т. 60, № 6. С. 749–771.
- Макагонов Е.П., Котляров В.А.** Редкоземельная минерализация в щелочных и субщелочных породах Балбукского комплекса (Южный Урал) // Минералогия. 2016. № 2. С. 34–43.
- Роголина Л.И., Воропаева Е.Н., Пономарчук В.А.** Редкоземельные минералы в рудах Березитового золото-полиметаллического месторождения (Верхнее Приамурье) // Успехи современного естествознания. 2013. № 11. С. 117–120.
- Сафонов Ю.Г., Горбунов Г.И., Пэк А.А., Волков А.В., Злобина Т.М., Кравченко Г.Г., Малиновский Е.П.** Состояние и перспективы развития учения о структурах рудных полей и месторождений // Геология рудных месторождений. 2007. Т. 49, № 5. С. 386–420.
- Смирнов С.С.** Схема металлогении Восточного Забайкалья // Проблемы советской геологии. 1936. Вып. 6, № 10. С. 846–864.
- Спиридонов А.М., Зорина Н.А., Китаев Н.А.** Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья. Новосибирск: Гео, 2006. 291 с.
- Чернова А.Д., Зорина Л.Д., Горбачева С.А., Прокофьев В.Ю.** Геохимические особенности лантаноидов в карбонатах золоторудных жил месторождения Дарасун (Восточное Забайкалье, Россия) // Металлогения древних и современных океанов. 2009. Т. 15. С. 131–134.
- Bau M.** Rare earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the europium // Chemical Geology. 1991. V. 93. P. 219–230. DOI: 10.1016/0009-2541(91)90115-8
- Bau M., Dulski P.** Comparative study of yttrium and rare-earth element behavior's in fluorine-rich hydrothermal fluids // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1995. V. 119. P. 213–223. DOI: 10.1007/BF00307282
- Baum M.** Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho<sub>6</sub>Zr/Hf, and lanthanides tetrad effect // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1996. V. 123. P. 323–333.
- Defant M.J., Jackson T.E., Drummond M.S., De Boer J.Z., Bellon H., Feigenson M.D., Maury R.C., Stewart R.H.** The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa Rica: an overview // Journal of the Geological Society. 1992. V. 149 (4). P. 569–579. DOI: 10.1144/gsjgs.149.4.0569
- 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. DOI: 10.1007/BF00371409
- Jones B., Manning D.C.** Composition of geochemical indices used for the interpretation of paleoredox conditions in ancient mudstones // Chemical Geology. 1994. V. 111. P. 111–129.
- Kun L., Ruidong Y., Wenyong C., Rui L., Ping T.** Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, southeastern Guizhou Province // Chinese Journal of Geochemistry. 2014. V. 33. P. 109–118. DOI: 10.1007/s11631-013-0624-4
- Maeda J.** Opening of the Kuril Basin deduced from the magmatic history of Central Hokkaido, northern Japan // Tectonophysics. 1990. № 174. P. 235–255. DOI: 10.1016/0040-1951(90)90324-2
- Monecke T., Kempe U., Gotze J.** Genetic significance of the trace element in metamorphic and hydrothermal quartz: a reconnaissance study // Earth and Planetary Science Letters. 2002. V. 202. P. 709–724. DOI: 10.1016/S0012-821X(02)00795-1
- Oreskes N., Einaudi M.T.** Origin of rare-earth element enriched hematite breccias at the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit, Roxby Downs, South Australia // Economic Geology. 1990. V. 85. P. 1–28. DOI: 10.2113/gsecongeo.85.1.1
- 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. P. 63–81. DOI: 10.1007/BF00384745
- Wang K., Plank T., Walker J.D., Smith E.L.** A mantle melting profile across the Basin and Range, SWUSA // Journal of Geophysical Research. 2002. V. 107, № B1. DOI: 10.1029/2001JB000209

**Авторы:**

**Абрамов Баир Намжилевич**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория геохимии и рудогенеза, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия.

E-mail: b\_abramov@mail.ru

**Бадмацыренова Роза Александровна**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, лаборатория геодинамики, Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия.

E-mail: roza1977@mail.ru

*Geosphere Research*, 2020, 1, 6–18. DOI: 10.17223/25421379/14/1

**B.N. Abramov<sup>1</sup>, R.A. Badmatsyrenova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia*

<sup>2</sup> *Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia*

**PETROGEOCHEMICAL FEATURES OF ROCKS, RARE AND RARE EARTH ELEMENTS ORES OF THE ALEKSANDROVSKY GOLD DEPOSIT (EASTERN TRANSBAIKALIA)**

The Aleksandrovsky gold deposit is located on the Davenda-Klyuchevsky ore cluster. In this study we present data of the geochemical composition of rocks and ore deposits of the Alexandrovsky deposit, as well as distribution of rare and rare-earth elements within it. Petrogeochemical characteristics of the Amudzhikano-Shakhtaminsky complex (J<sub>2-3</sub>) intrusions, which could be possible sources of mineralization, indicate that it took part in their formation of deep mantle components. This is indicated by the potassium increased concentrations, the proximity to intrusive formations of the Amanan (J<sub>2-3</sub>) and Amudzhikano-Shakhtaminsky complexes by Sr/Y - Y ratios to adakites, the presence of [(Tb/Yb)<sub>n</sub> > 1,8] garnet in magmatic sources. By coefficient of alumina content, it is very high (al= 1,84–2,13) for granitoids of Amudzhikano-Shakhtaminsky complexes, it is high (al= 1,06–1,40) for dykes of granite porphyry, it is moderate (al= 0,74–0,98) for diorite porphyry dikes. In the diagram (NaO + K<sub>2</sub>O) / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / (CaO + NaO + K<sub>2</sub>O) granitoids of the Amudzhikano-Shakhtaminsky complex correspond to type I granites. This suggests that the sources of Amudzhikano-Shakhtaminsky complex granites were magma chambers. An analysis of the indicator ratios of elements in ores of the Aleksandrovsky deposit indicates that the predominant part of quartz-sulfide veins is formed in an oxidizing environment (U/Th < 0,75). At the same time some part of them formed in a reducing environment. The predominant part of the ores Co/Ni is more than 1,5, indicating that the magma fluid involved in mineralization. Values Hf/Sm, Nb/La and Th/La<sub>1</sub> in ore indicates the presence of chlorine in ore-bearing fluids. Geochemical features of ore composition suggests that the sources of mineralization were midwater, to varying degrees differentiated magmatic fluids ( $\Sigma_{REE} = 23,64-324,72$ , Eu/Eu\* = 0,79–1,09, Eu/Sm = 0,15–0,32, and (La/Yb)<sub>n</sub> = 0,15–0,32, Co/Ni > 1,5). The ore-forming fluids of the Aleksandrovsky deposit belonged to NaCl-H<sub>2</sub>O hydrothermal system enriched in Cl relative to F (Hf/Sm, Nb/La and Th/La < 1). The values of U/Th ratios in the ores indicate that the majority of quartz-sulfide veins formed in an oxidizing atmosphere (U/Th < 0,75). The values of Y/Ho ratios in ores correspond to the values of fluids of hydrothermal systems of the East Pacific rift and fluids, formed by the Greenstone regional metamorphic host rocks (Y/Ho – 6,97–38,4). Rare earth mineralization represented by monazite, xenotime, apatite, epidote, rhabdophan and churchite has been established in the deposit ores.

**Keywords:** *Aleksandrovsky deposit, gold, rare-earth elements, ore-bearing fluids, Eastern Transbaikalia.*

**REFERENCES**

- Abramov B.N. The Klyuchevskoe gold ore deposit (Eastern Transbaikalia): Formation conditions and petrogeochemical features of rocks and ores // *Doklady Earth Sciences*. 2015. V. 464. № 1. pp. 85–90. In Russian.
- Ananyev Yu.S. *Redkozemel'nyye elementy v metasomatitakh i rudakh zolotorudnykh mestorozhdeniy Zapadnoy Kalby* [Rare earth elements in metasomatites and ores of gold ore deposits in Western Kalba] // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2012. V. 321. № 1. pp. 56–62. In Russian
- Vinokurov S.F. Europium anomalies in the ore deposits and their geochemical significance // *Doklady Earth Sciences*. 1996. V. 346. № 1. pp. 792–795. In Russian
- Kovalev K.R., Kalinin Yu.A., Turkina O.M., Gimon V.O., Abramov B.N. Kultuminskoe gold-copper-iron-skarn deposit (Eastern Transbaikalia, Russia): Petrogeochemical features of magmatism and ore-forming processes // *Russian Geology and Geophysics*. 2019. V. 60. №6. pp. 749–771. In Russian. DOI: 10.15372/RGG2019078
- Makagonov E.P., Kotlyarov V.A. Rare earth minerals in alkaline and subalkaline rocks of the Balbuk complex (South Urals) // *Mineralogy*. 2016. № 2. pp. 34–43. In Russian
- Rogulina L.I., Voropaeva E.N., Ponomarchuk V.A. Rare earth minerals in ore of Berezitovoye gold-polymetal deposit (Upper Priamuruy) // *Advances in current natural sciences*. 2013. № 11. pp. 117–120. In Russian
- Safonov Yu.G., Gorbunov G.I., Pehk A.A., Volkov A.V., Zlobina T.M., Kravchenko G.G., Malinovskiy E.P. Structure of ore fields and deposits: Current status and outlook for further development // *Geology of Ore Deposits*. 2007. V. 49. № 6. pp. 386–420. In Russian
- Smirnov S.S. *Skhema metallogenii Vostochnogo Zabaykalya* [Metallogeny scheme of East Transbaikalia] // *Problemy sovetskoy geologii*. 1936. V. 6. № 10. pp. 846–864. In Russian
- Spiridonov A.M., Zorina L.D., Kitaev N.A. *Zolotonosnye rudno-magmatische sistemy Zabajkalya* [Gold-bearing ore-magmatic systems of Transbaikalia]. Novosibirsk: Academic publishing house Geo, 2006. 291 p. In Russian.
- Chernova A.D., Zorina L.D., Gorbacheva S.A., Prokofiev V.Yu. *Geokhimicheskiye osobennosti lantanoidov v karbonatakh zolotorudnykh zil mestorozhdeniya Darasun (Vostochnoye Zabaykal'ye, Rossiya)* [Geochemical Geochemical features of lanthanides in

the carbonates of gold ore residential deposits of Darasun (East Transbaikalia, Russia)] // *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov*. 2009. V. 15. pp. 131–134. In Russian

Bau M. Rare earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the europium // *Chemical Geology*. 1991. V. 93. pp. 219–230. DOI: 10.1016/0009-2541(91)90115-8

Bau M., Dulski P. Comparative study of yttrium and rare-earth element behavior's in fluorine-rich hydrothermal fluids // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1995. V. 119. pp. 213–223. DOI: 10.1007/BF00307282

Baum M. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho<sub>6</sub>Zr/Hf, and lanthanides tetrad effect // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1996. V. 123. pp. 323–333.

Defant M.J., Jackson T.E., Drummond M.S., De Boer J.Z., Bellon H., Feigenson M.D., Maury R.C., Stewart R.H. The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa Rica: an overview // *Journal of the Geological Society*. 1992. 149 (4). pp. 569–579. DOI: 10.1144/gsjgs.149.4.0569

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*. V. 88. pp. 24–35. DOI: 10.1007/BF00371409

Jones B., Manning D.C. Composition of geochemical indices used for the interpretation of paleoredox conditions in ancient mudstones // *Chemical Geology*. 1994. V. 111. pp. 111–129.

Kun L., Ruidong Y., Wenyong C., Rui L., Ping T. Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, southeastern Guizhou Province // *Chinese Journal of Geochemistry*. 2014. V. 33. pp. 109–118. DOI: 10.1007/s11631-013-0624-4

Maeda J. Opening of the Kuril Basin deduced from the magmatic history of Central Hokkaido, northern Japan. // *Tectonophysics*. 1990. № 174. pp. 235–255. DOI: 10.1016/0040-1951(90)90324-2

Monecke T., Kempe U., Gotze J. Genetic significance of the trace element in metamorphic and hydrothermal quartz: a reconnaissance study // *Earth and Planetary Science Letters*. 2002. V. 202. pp. 709–724. DOI: 10.1016/S0012-821X(02)00795-1

Oreskes N., Einaudi M.T. Origin of rare-earth element enriched hematite breccias at the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit, Roxby Downs, South Australia // *Economic Geology*. 1990. V. 85. pp. 1–28. DOI: 10.2113/gsecongeo.85.1.1

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. pp. 63–81. DOI: 10.1007/BF00384745

Wang K., Plank T., Walker J.D., Smith E.L. A mantle melting profile across the Basin and Range, SWUSA // *Journal of Geophysical Research*. 2002. V. 107. № B1. DOI: 10.1029/2001JB000209

#### Author's:

**Abramov Bair N.**, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Laboratory of geochemistry and ore genesis, Institute of natural resources, ecology and cryology SB RAS, Chita, Russia.

E-mail: b\_abramov@mail.ru

**Badmatsyrenova Roza A.**, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, Laboratory of Geodynamics, Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia.

E-mail: roza1977@mail.ru