

степени опасности самовозгорания углей в границах шахтного поля или месторождения путём при-

менения геоинформационных программных продуктов, например, семейства ArcGIS.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голынская Ф.А., Смирнова О.С., Никонов Р.А. Применение метода многомерной классификации по эталонным точкам для определения степени самовозгораемости углей на примере шахты «Распадская» Кузнецкого бассейна // Известия вузов. Геология и разведка. 2015. № 4. С. 15–21.
2. Быкадоров В.С., Гаврилин К.В., Озерский А.Ю. Канско-Ачинский угольный бассейн // Угольная база России. Т. III. М.: ООО «Геоинформ-центр», 2002. С. 32–173.
3. Рубанов Н.И., Кавицкий С.Л. Результаты детальной разведки Тайнинского участка Канского бурого угольного месторождения для местных топливных нужд. Абакан: КГУ (Красноярскгеология), ТКЗ № 445, 1994. 641 с.
4. Смирнова О.С., Голынская Ф.А. Статистические методы в прогнозировании самовозгорания углей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 1. С. 281–288.
5. Liu Lang, Zhou Fu-bao. A comprehensive hazard evaluation system for spontaneous combustion of coal in underground mining // International Journal of Coal Geology 2010. N 82. P. 27–36.

REFERENCES

1. Golynskaya F.A., Smirnova O.S., Nikonov R.A. Application of method of multidimensional classification reference points for determining the degree of smoochiest coals on the example of the Raspadskaya mine in the Kuzbass region. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* — [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration], 2015, no. 4, pp. 15–21. (In Russian).
2. Bykadorov V.S., Gavrilin K.V., Ozerskaya A.Yu. Kansk-Achinsk coal. *Coal base of Russia. Vol. III*. M., LLC «Geoinform-center» Publ., 2002, pp. 32–173. (In Russian).
3. Rubanov N.I., Kavitsky S.L. *The Results of detailed exploration Tirenского plot Kan lignite Deposit for local fuelwood needs*. Abakan: Krasnoyarsk region, KSU (Krasnoyarskgeologiya), TKZ Publ., 1994, no. 445, 641 p. (In Russian).
4. Smirnova O.S., Golynskaya F.A. Statistical methods in prediction of coal spontaneous combustion. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2016, no. 1, pp. 281–288 (In Russian).
5. Liu Lang, Zhou Fu-bao A comprehensive hazard evaluation system for spontaneous combustion of coal in underground mining. *International Journal of Coal Geology*, 2010, no 82, pp. 27–36. (In Russian).

УДК 553.4 (571.55)

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В РУДАХ НЕКОТОРЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

Б.Н. АБРАМОВ

ФБГУН «Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН»
16 а, Недорезова ул., г. Чита 672014, Забайкальский край, Россия
e-mail: b_abramov@mail.ru

Распределение редкоземельных элементов в рудах месторождений золота Восточного Забайкалья показало, что рудоносные магматические очаги залегали на разных глубинах. Наибольшей степенью дифференциации характеризовались рудоносные флюиды (Eu/Eu* 0,29–0,32; Rb/Sr 0,98–1,40), являющиеся источниками золотокварц-арсенопиритовых руд, в меньшей степени золотосульфидно-кварцевых руд (Eu/Eu* 0,53–0,72; Rb/Sr 0,10–0,54). Рудоносные флюиды, являющиеся источниками золотокварц-арсенопиритовых руд (Eu/Sm 0,08–0,14), функционировали на меньших глубинах, чем золотокварцевых и золотосульфидно-кварцевых руд (Eu/Sm 0,11–0,19). Образование золотокварц-арсенопиритовых руд происходило из рудоносных флюидов, в значительной степени обогащенных летучими компонентами, на что указывает наличие значимых тетрад-эффектов в распределении лантаноидов (T_{1-4} 0,80; 1,15; 1,16).

Ключевые слова: распределение лантаноидов; золоторудные месторождения; рудоносные флюиды; золотокварц-арсенопиритовые руды.

DOI:10.32454/0016-7762-2018-5-48-58

PECULIARITIES OF THE DISTRIBUTION OF RARE-EARTH ELEMENTS IN THE ORES OF SOME GOLD DEPOSITS OF EASTERN TRANSBAIKALIA

B. N. ABRAMOV

*Institute of natural resources, ecology and cryology SB RAS)
16 a, Nedorezova street, Chita 672014, Zabaikalsky Krai, Russian Federation
e-mail: b_abramov@mail.ru*

The distribution of rare-earth elements (REE) in ores of gold deposits of East Transbaikalia has shown that the ore-bearing magma chambers have different depths and degrees of differentiation. The greatest degree of differentiation was within the magmatic foci ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,29\text{--}0,32$; $\text{Rb}/\text{Sr} = 0,98\text{--}1,40$), which are the sources of gold-quartz-arsenopyrite ores, the magmatic sources of the gold-quartz and gold-sulfide-quartz ores ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,53\text{--}0,72$; Rb/Sr of 0,10 to 0,54) had lesser degree of differentiation. Magma chambers that are sources for the gold-quartz-arsenopyrite ores ($\text{Eu}/\text{Sm} = 0,08\text{--}0,14$), were at shallower depths than those for gold-quartz and gold-sulfide-quartz ores ($\text{Eu}/\text{Sm} = 0,11\text{--}0,19$). The formation of gold-quartz-arsenopyrite ores took place at the magma chambers, largely enriched in volatile components, it is indicated by the existence of a significant tetrad effects in REE patterns of (T1-4 = 0,80; 1,15; 1,16).

Keywords: distribution of the lanthanides; gold deposits; magma chambers; gold-quartz-arsenopyrite ore.

Редкоземельные элементы (РЗЭ) рассматриваются как геохимические индикаторы магматических процессов. По распределению РЗЭ, их соотношениям возможно судить о степени дифференциации рудоносных флюидов, их глубинах функционирования, условиях и источниках образования. По составу РЗЭ можно определить глубину зарождения гидротермальных растворов, судить о наличии флюидов в рудоносных магматических очагах. В Восточном Забайкалье широко развиты мезозойские золоторудные месторождения, характеризующиеся отличиями состава руд с разными концентрациями элементов-примесей. Объекты исследования — золоторудные месторождения Александровское, Карийское, Ключевское, Средне-Голготайское и Верхне-Алиинское.

Фактический материал собран в 1996—2016 гг. во время выполнения базовых научных проектов в Институте природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН.

Определение элементов-примесей в рудах выполнено РФА методом, редкоземельных элементов — ASP-AES методом в аналитическом центре Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ).

Краткая характеристика оруденения золоторудных месторождений

Мезозойские золоторудные месторождения Восточного Забайкалья были образованы в результате коллизии Сибирского и Монголо-Китайского континентов в течение средней—поздней юры [8, 10]. Большинство из них пространственно приурочено к Монголо-Охотской сuture (рис. 1). Основными источниками золота в этих месторождениях были глубокодифференцированные plutonic и вул-

кано-плутонические производные шошонит-латитовой и известково-щелочной магм [16].

Рудные тела в золоторудных месторождениях представлены в основном прожилково-вкрапленными и жильными зонами, в которых развиты преимущественно золотокварцевый и золотосульфидно-кварцевый типы руд. Содержание рудных минералов в золотокварцевых рудах составляет около 1%, в золотосульфидно-кварцевых рудах — 30%. В золотокварц-арсенопиритовых рудах к числу основных рудных минералов относятся арсенопирит и пирит, количество рудных минералов достигает 30%.

На месторождениях, как правило, выделяется несколько стадий рудообразования, в том числе продуктивные (кварц-сульфидная, кварц-полиметаллическая), с которыми связано основное золотое оруденение.

В однотипных рудах на золоторудных месторождениях отмечаются разные концентрации элементов, что отражает различные условия образования и специфику рудоносных растворов (табл. 1).

Александровское месторождение. Рудные тела представлены сульфидно-кварцевыми жилами и зонами прожилково-вкрапленной минерализации, развитыми преимущественно в гранитах бичурского комплекса (P_2). Здесь выделены следующие минеральные ассоциации в порядке их проявления: 1) молибденит-кварцевая; 2) кварц турмалиновая; 3) висмутин-кварцевая; 4) пирит-кварцевая с золотом; 5) золотокварц-полиметаллическая; 6) кварц-карбонатная. Наиболее распространенным рудным минералом является пирит, меньше распространены халькопирит, висмутин, тетраэдрит, борнит.

Карийское месторождение. Вмещающие породы представлены протерозойскими метаморфическими образованиями и интрузиями амананского комп-

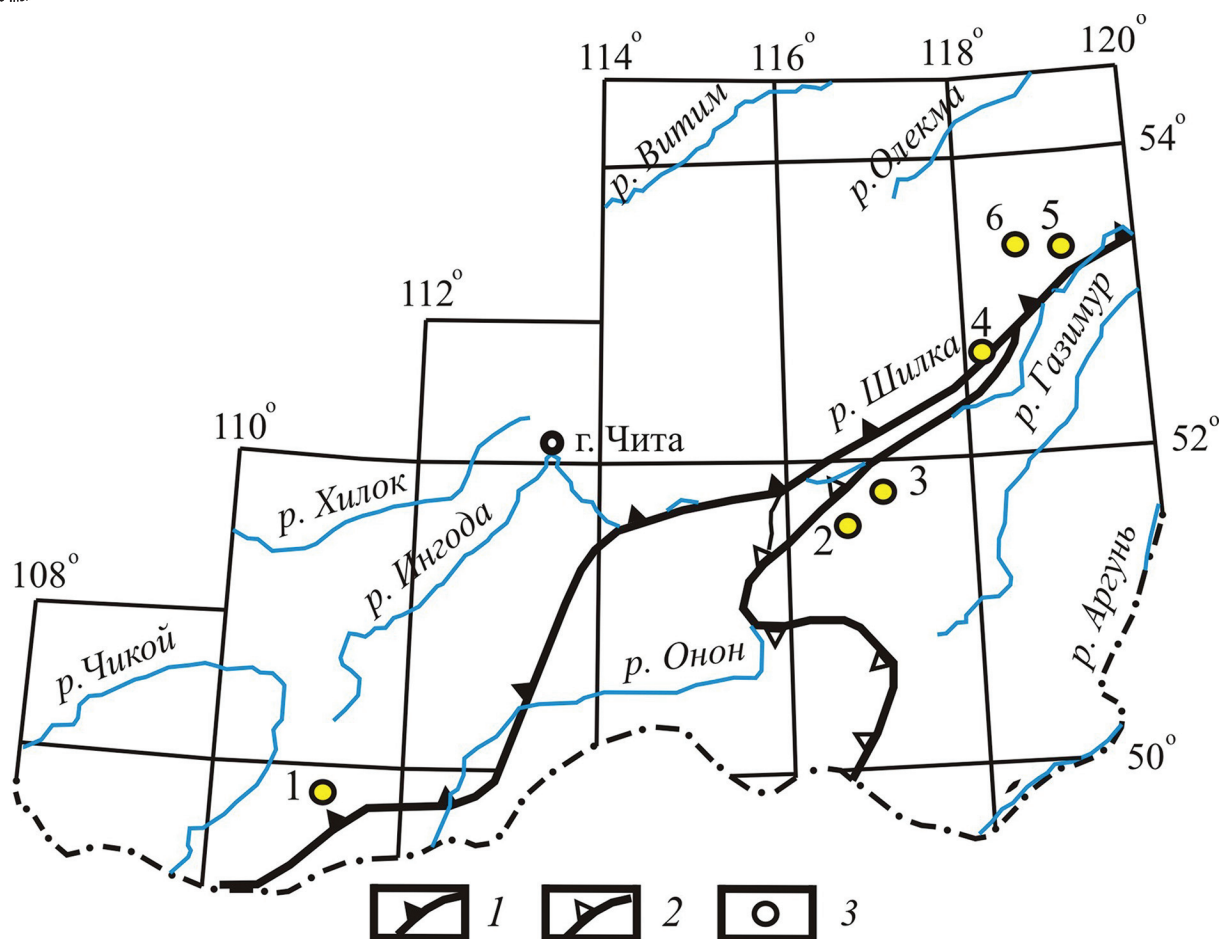


Рис. 1. Схема размещения мезозойских золоторудных месторождений Восточного Забайкалья: 1 — мезозойские золоторудные месторождения; Монголо-Охотская сutura: 2 — основная ветвь, 3 — Ононская ветвь

лекса (J_2). Всего на месторождении насчитывается 23 рудные зоны, имеющие северо-западное простирание. На месторождении выделяются следующие участки, отличающиеся составом основных рудных минералов: Амурская дайка, Новинка, Сульфидный, Дмитриевский. По данным [9], формирование золотого оруденения происходило в четыре стадии с образованием следующих продуктивных ассоциаций: I — кварц-пирит-турмалиновая; II — кварц-актинолит-магнетитовая; III — сульфидно-кварцевая; IV — полиметаллическая [9]. Последние две стадии распространены ограниченно. Наиболее продуктивной является кварц-актинолит-магнетитовая ассоциация. Установлено, что образование золотого оруденения на месторождении тесно связано с заключительными этапами формированием интрузий амуджикакано-шахтаминского комплекса (J_{2-3}), с дайковым комплексом — лампрофирами, гибридными порфирами, грорудитами. Исследования флюидных включений в грорудитах, по данным LA-ICP-MS, позволили выявить, что в составе флюидных включений присутствуют преимущественно Na и K, а также значимые концентрации As, Mo, Sb, Cs, W, Hg, указывающие на концентрацию элементов-спутников

золотого оруденения, подтверждающие генетическую связь оруденения с магматизмом [6].

Ключевское месторождение. Основным рудным телом на месторождении является штокверк с отдельными жилами и прожилково-вкрапленной минерализацией. Штокверк сложен кварц-турмалиновыми, турмалин-пиритовыми жилами и прожилками, брекчиями вмещающих пород. Рудовмещающие породы представлены гранитами амананского (J_2) и амуджикано-шахтаминского комплекса (J_{2-3}).

Рудная минерализация месторождения образовалась в течении нескольких стадий: 1) молибденит-кварцевая с калишпатизацией; 2) сульфидно-кварц-турмалиновая с калишпатизацией; 3) кварц-турмалин-сульфидная с альбитизацией; 4) полиметаллическая; 5) карбонатная с халцедоном [2, 13].

Средне-Голготайское месторождение. На месторождении рудные тела представлены жилами золотокварцевого и золотосульфидно-кварцевого составов. В жилах золотокварцевого типа количество рудных минералов составляет 1—2%. Из рудных минералов наиболее распространены пирит и арсенопирит. В меньших количествах отмечены халькопирит, пирротин, молибденит, висмутин.



Средние содержания элементов-примесей в основных типах руд мезозойских золоторудных месторождений Восточного Забайкалья, г/т														Таблица 1	
Элементы	Au	Cu	Zn	As	Bi	Pb	Rb	Sr	Nb	Mo	Ag	Sn	Sb	Ba	Rb/Sr
Александровское месторождение															
Золото кварц-сульфидные руды (n = 14)															
x	4,94	117	186	170	27	262	91	594	4,3	31	12	47	80	447	0,15
s	17,0	131	322	478	58	843	46	690	2,6	43	24	57	92	622	
Карийское месторождение															
Золото кварц-сульфидные руды (n = 10)															
x	2,19	377	100	303	3877	106	164	335	4,3	15	9	34	39	170	0,49
s	3,06	303	108	347	4281	142	142	182	1,4	14	14	27	63	284	
Золото актинолит-магнетитовые руды (n = 8)															
x	37,1	65	2560	1352	83	26	26	45	81	31		10	33	201	0,58
s	45	22	3119	2773	116	71	18	18	64	12		9	22	177	
Золото кварц-арсенопиритовые руды (n = 6)															
x	8,6			140000	-	-	241	172	7	68	11		160	892	1,40
s	7,9			35590			88	73	3	44	8		74	671	
Ключевское месторождение															
Золото кварц-сульфидные руды (n = 6)															
x	1,1	253	60	605	55	23	38	521	4	28	3	22	70	150	0,10
s	1,6	222	17	358	7	23	74	75	2	24	0,2	22	61	348	
Средне-Голготайское месторождение															
Золото кварц-сульфидные руды (n = 6)															
x	0,71	215	94	223	352	487	109	200	8	442	3	36	225	144	0,54
s	0,62	71	29	301	346	463	151	88	3	960	2	57	219	257	
Золото кварцевые руды (n = 6)															
x	0,92		132	35143	1793	200		70	13	86	4	30	335		
s	0,64		152	58766	2606	111		50	11	116	3	34	405		
Верхне-Алиинское месторождение															
Золото кварц-арсенопиритовые руды (n = 13)															
x	33,2	5250	144	132000	1823	3843	98	100	16	8	80	36	240	69	0,98
s	46,7	4453	59	17352	894	2822	74	73	7	7	43	22	164	126	
Любавинское месторождение															
Золото кварц-сульфидные руды (n = 8)															
x		190	135	11330		119	46	123	4		2	6	28	230	0,37
s			56	11437		136	43	149	2			4	22	162	

Примечание. x – среднее арифметическое, s – стандартное отклонение, n – число анализов. Содержания золота определены атомно-абсорбционным методом в аналитической лаборатории ЛИИМС (г. Чита), содержания остальных элементов – рентгенфлуоресцентным методом в аналитической лаборатории Геологического института СО РАН, г. Улан-Удэ; аналитик Б.Ж. Жалсараев. При расчете средних концентраций элементов учитывались данные только продуктивных стадий рудообразования.

Таблица 2
Содержание редкоземельных элементов в кварцево-сульфидных рудах золоторудных месторождений Восточного Забайкалья, г/т

Номера проб	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	?TR	LanYbn	EuEu*	EuSm
Александровское месторождение																			
224	68,2	138	12,8	59,0	10,3	2,08	5,01	0,58	3,16	0,63	1,90	0,24	1,28	0,21	15,0	318,4	36,9	0,88	0,20
230	31,8	62,8	7,47	35,1	6,22	1,07	2,77	<1	1,36	<0,5	1,06	<0,3	0,41	<0,15	5,47	155,5	53,9	0,79	0,17
244	72,8	136	12,7	63,1	10,7	2,27	5,41	1,07	3,18	0,66	2,13	0,3	0,93	0,17	13,3	324,7	54,3	0,91	0,21
256	3,23	4,22	0,95	4,50	1,62	0,24	<2	0,34	0,57	0,23	0,86	0,16	0,91	0,19	5,34	23,64	2,5		0,15
261	46,9	91,3	10,7	47,9	9,59	1,99	5,96	1,28	4,3	0,93	2,58	0,34	1,71	0,27	24,1	249,5	19,1	0,80	0,21
262	74,3	129	9,94	51,0	8,67	1,75	3,22	<1	2,46	0,55	1,44	0,31	1,0	0,18	10,5	294,2	51,6	1,0	0,20
279	46,4	92,6	10,2	49,8	9,53	1,98	4,97	<1	3,05	0,64	2,04	<0,3	1,02	0,19	13,5	235,9	31,6	0,88	
Карийское месторождение																			
584-5	2,37	4,0	0,85	2,35	0,43	0,15	0,69	<1	0,58	0,16	0,44	0,13	0,25	0,08	2,9	15,38	6,6	0,84	0,35
579-2	19,8	41,6	5,3	23,6	5,22	2,45	4,75	0,77	4,0	0,80	2,0	0,32	1,85	0,22	21,1	133,78	7,41	1,50	0,47
579-3	30,8	60,0	7,5	33,7	8,0	2,0	7,6	1,22	6,2	1,16	3,0	0,46	2,87	0,37	34,2	199,10	7,45	0,78	0,25
579-6	11,8		<3	10,5	1,8	0,32	<2	<1	<2	<0,5	<1	<0,3	0,80	<0,15	6,4	52,82	10,2		0,18
579-9	13,9	23,7	<3	11,3	2,3	0,37	<2	<1	1,9	<0,5	2,0	<0,3	2,0	<0,15	12,0	69,47	4,82		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Средне-Голгоутское месторождение																			
517	14,0	24,2	<3	11,1	2,2	0,25	<2	<1	<2	<0,5	<1	<0,3	0,45	<0,15	4,8	57,0	21,6		0,11
518	4,8	<4	<3	2,0	<1	0,11	<2	<1	<2	<0,5	<1	<0,3	0,34	<0,15	3,8	10,71	9,7		
519	18,3	34,0	4,0	18,4	3,54	0,70	2,45	<1	<2	<0,5	1,0	<0,3	0,80	0,13	9,2	91,52	15,9	0,73	0,20
529	6,1	4,7	<3	3,0	<1	0,12	<2	<1	<2	<0,5	<1	<0,2	0,34	<0,15	3,7	17,97	12,4		
Любавинское месторождение																			
862	9,4	19,5	<2	7,7	1,6	0,30	1,2	<0,5	1,2	<0,5	0,80	<0,3	0,70	<0,15	6,2	48,6	9,33	0,66	0,19
863	7,8	16,7	<2	6,7	1,5	0,25	1,1	<0,5	1,2	<0,5	0,78	<0,3	0,62	<0,15	6,4	43,05	8,7	0,59	0,17
781	8,0	15,9	2,6	7,5	1,1	0,36	1,5	<1	1,3	0,09	0,75	0,20	0,61	0,09	6,0	46,00	9,1	0,86	0,33
791	12,2	26,0	3,4	11,3	1,86	0,58	2,48	<1	2,1	<0,5	1,15	0,29	1,09	0,16	11,4	74,01	7,77	0,83	0,31
Верхне-Алиинское месторождение																			
681-2	16,5	31,8	3,3	13,0	2,4	0,23	2,3	<2	1,55	<0,5	0,88	<0,3	0,69	<0,15	8,8	81,45	16,6	0,30	0,10
681-4	25,7	45,9	5,0	18,7	3,3	0,26	1,85	<2	<1	<0,5	<0,5	<0,3	0,15	<0,15	2,4	103,11	119	0,32	0,08
689	6,0	11,7	<2	4,35	0,88	0,09	<1	<2	<1	<0,5	<0,5	<0,3	0,21	<0,15	2,6	25,62	19,9		0,10
689-1	10,0	21,3	2,2	8,8	2,0	0,28	4,1	1,0	7,0	1,5	4,5	0,6	3,8	0,60	51,0	118,69	1,8	0,30	0,14
Ключевское месторождение																			
533-2	8,2	17,6	<2	8,4	2,3	0,50	2,1	<0,5	2,3	0,52	1,50	<0,3	1,13	0,15	13,1	57,8	5,3	0,69	0,22
538	31,5	530	39	136	18,6	1,95	7,9	<1	3,9	0,78	1,5	<0,3	1,15	0,19	14,6	1071	190	0,49	0,10
539	<3	6,44	<3	3,3	<1	0,17	<2	<1	<2	<0,5	<1	<0,3	0,76	<0,15	8,8	19,47			
540-1	<3	4,2	<3	2,7	<1	<0,1	<2	<1	<2	<0,5	<1	<0,3	0,34	<0,15	3,8	11,04			

Вмещающими породами являются граниты ундинского (C_1) и амуджикано-шахтаминского (J_{2-3}) комплексов [1].

Верхне-Алиинское месторождение. На месторождении выделены Западная, Восточная и Широкая рудные зоны. Рудные тела в них представлены золотосульфидно-кварцевыми жилами и прожилково-вкрапленными зонами. Основные рудные минералы — арсенопирит, пирит и пирротин. Менее распространены халькопирит, галенит, сфалерит, блеклая руда, марказит, антимонит. Вмещающие породы представлены монцонитами амуджикано-шахтаминского комплекса (J_{2-3}) [3].

Любавинское месторождение. Рудные тела представлены рудоносными кварцевыми жилами. По составу руды относятся к малосульфидному золото-кварцевому типу. Количество сульфидов в жилах составляет 2—3% с резким преобладанием арсенопирита и пирита. На месторождении выделены следующие типы минерализации: полевошпат-кварцевая, золотомалосульфидная (продуктивная), полиметаллическая, антимонитовая [12].

Установлено, что изотопный состав кислорода во флюиде в равновесии с кварцем рудоносных жил продуктивного этапа (260—205°C) меняется от 2,69 до 10,26‰. При этом большинство рассчитанных значений попадает в интервал $+5,5 \div +9,5$ ‰, что соответствует водному флюиду магматической природы [19]. Магматический источник рудоносных флюидов также подтверждается данными по изотопии серы сульфидов. Флюиды, отлагавшие сульфиды, характеризуются значениями $\delta^{34}S$, ‰ от $-0,56$ до $+6,44$. Изотопный состав серы во флюиде магматического источника составляет 0—5‰ [20]. Отсюда следует, что сера сульфидов Любавинского месторождения имеет магматический источник [4].

В Восточном Забайкалье установлена связь золотого и молибденового оруденений с интрузиями амуджикано-шахтаминского комплекса, преимущественно с его заключительной дайковой серией (J_{2-3}) [16]. Установлено, что кристаллизация поздних дифференциатов данного комплекса, сопровождалась накоплением Au, Ag, Pb и As [7]. Рудоносные флюиды, обогащенные хлором, в результате взаимодействия с остаточным расплавом, обогащенным золотом, приводили к формированию золоторудных месторождений [16].

Для оценки степени дифференциации магматических очагов рудоносных флюидов были рассчитаны Rb/Sr и Eu/Eu* отношения в отличных по составу золотоносных рудах из разных месторождений [7]. $Eu/Eu^* = Eu_n / [Sm_n \times Gd_n]^{1/2}$ [11].

Значения степени дифференциации руд в гидротермальной системе с большой степенью вероятности отражает состав рудоносных флюидов, которые в свою очередь соответствуют составу рудоносных магматических очагов. Между рудоформи-

рующими магматическими очагами и гидротермальными системами существуют значительные пространственные, временные, термодинамические, гидродинамические и геохимические различия, соотношения и далеко не прямые связи. Однако будем исходить из того, что состав руд в гидротермальной системе соответствует составу рудоносных флюидов. Полученные нами данные указывают на различную степень дифференциации золоторудных рудоносных флюидов (табл. 1, 2).

Наибольшей степенью дифференциации характеризуются рудоносные флюиды золотоарсенопиритовых руд, в меньшей степени — золото-кварцевых и золотосульфидно-кварцевых руд. В золотоарсенопиритовых рудах Rb/Sr отношения варьируют от 0,98 до 1,40. Для данного типа руд характерен отчетливый европиевый минимум ($Eu/Eu^* 0,30—0,86$). В золото-кварцевых и золотосульфидно-кварцевых рудах Rb/Sr отношения составляют 0,10—0,54; отношения $Eu/Eu^* 0,49—1,50$ (табл. 2). В актинолит-магнетитовых рудах Карийского месторождения отношение Rb/Sr составляет 0,58.

Для оценки глубин формирования рудоносных магматических очагов использовались Eu/Sm отношения в трактовке С.Ф. Винокурова [5]. Расчёты показали, что рудоносные флюиды золото-кварц-арсенопиритовых руд ($Eu/Sm 0,08—0,33$) относительно флюидов золото-кварцевых и золотосульфидно-кварцевых руд ($Eu/Sm 0,11—0,40$) возникли на меньших глубинах. Образование золотоносных руд мезозойских золоторудных месторождений происходило в верхней континентальной коре.

Особенности распределения РЗЭ в рудах золоторудных месторождений

Распределение РЗЭ в одинаковых по составу рудах разных месторождений существенно отличаются (рис. 2). Так, на Александровском месторождении сумма $\Sigma РЗЭ$ в пробе 224 из кварцево-сульфидной жилы составляет 318, 4 г/т, в пробе 256—23,63 г/т (табл. 2). Известно, что чистый кварц характеризуется очень низкими концентрациями РЗЭ, на уровне содержаний в хондрите [15]. Основные концентрации РЗЭ связаны с карбонатными и другими составляющими рудных жил (рис. 3).

Для концентраций элементов-примесей в одинаковых по составу рудах разных месторождений отмечены как сходство, так и отличия (табл. 1). Так, кварцарсенопиритовые руды Карийского и Верхне-Алиинского месторождений обладают близкими концентрациями As, но отличаются содержаниями Cu и Pb (табл. 1). Отличия в элементном составе золото-кварцевых и золотосульфидно-кварцевых руд от золото-кварц-арсенопиритовых руд выражены в разных концентрациях типоморфных элементов — Rb и Sr. Повышенными содержаниями Sr характеризуются золото-кварцевые и золото-

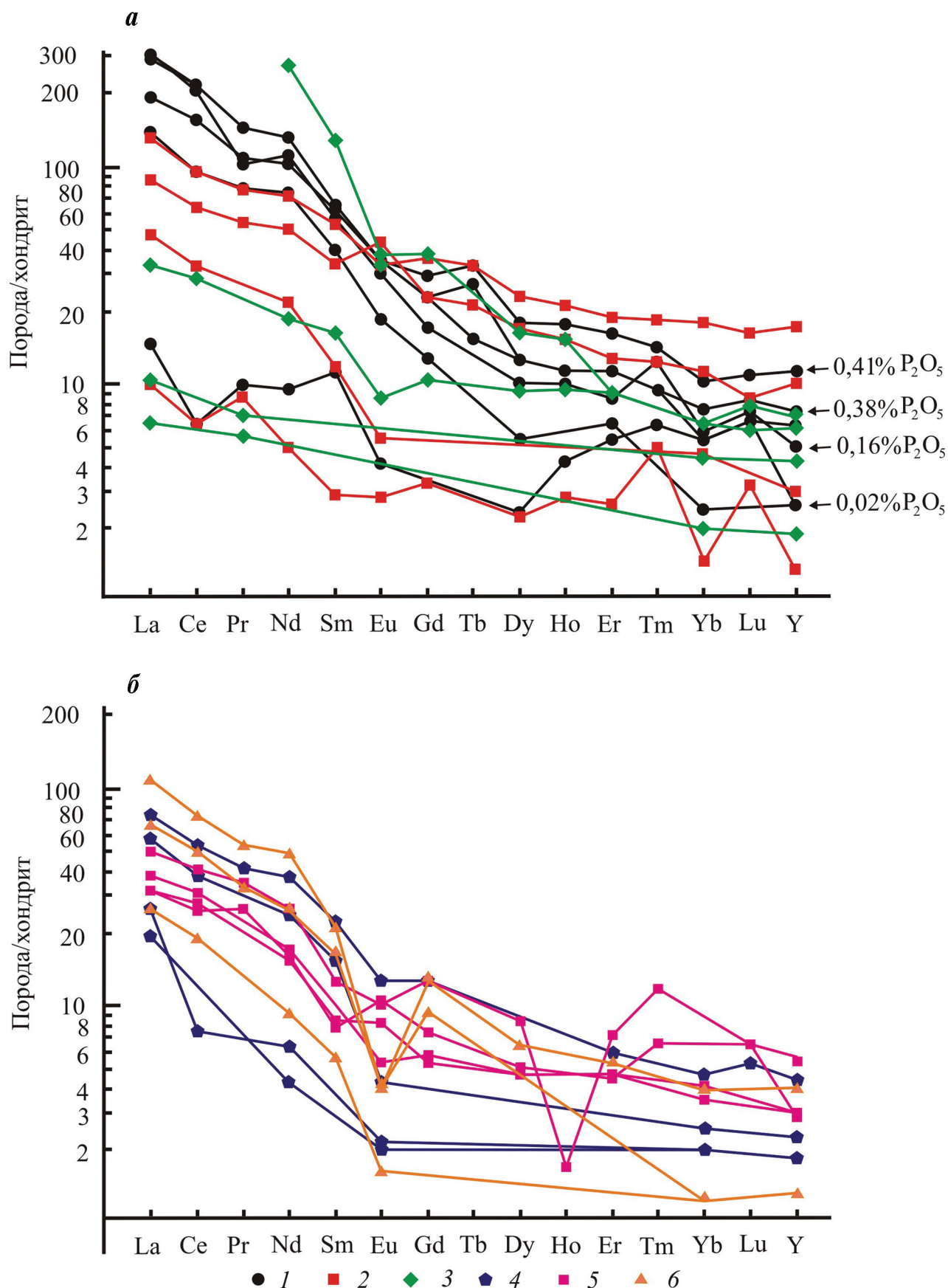


Рис. 2. Распределение редкоземельных элементов в рудах месторождений золота Восточного Забайкалья: сульфидно-кварцевые руды месторождений: а – 1 – Александровского, 2 – Карицкого, 3 – Ключевского; б – 4 – Средне-Голгоутайского, 5 – Любавинского, 6 – Верхне-Алиинского. Содержания P_2O_5 определены РФА методом

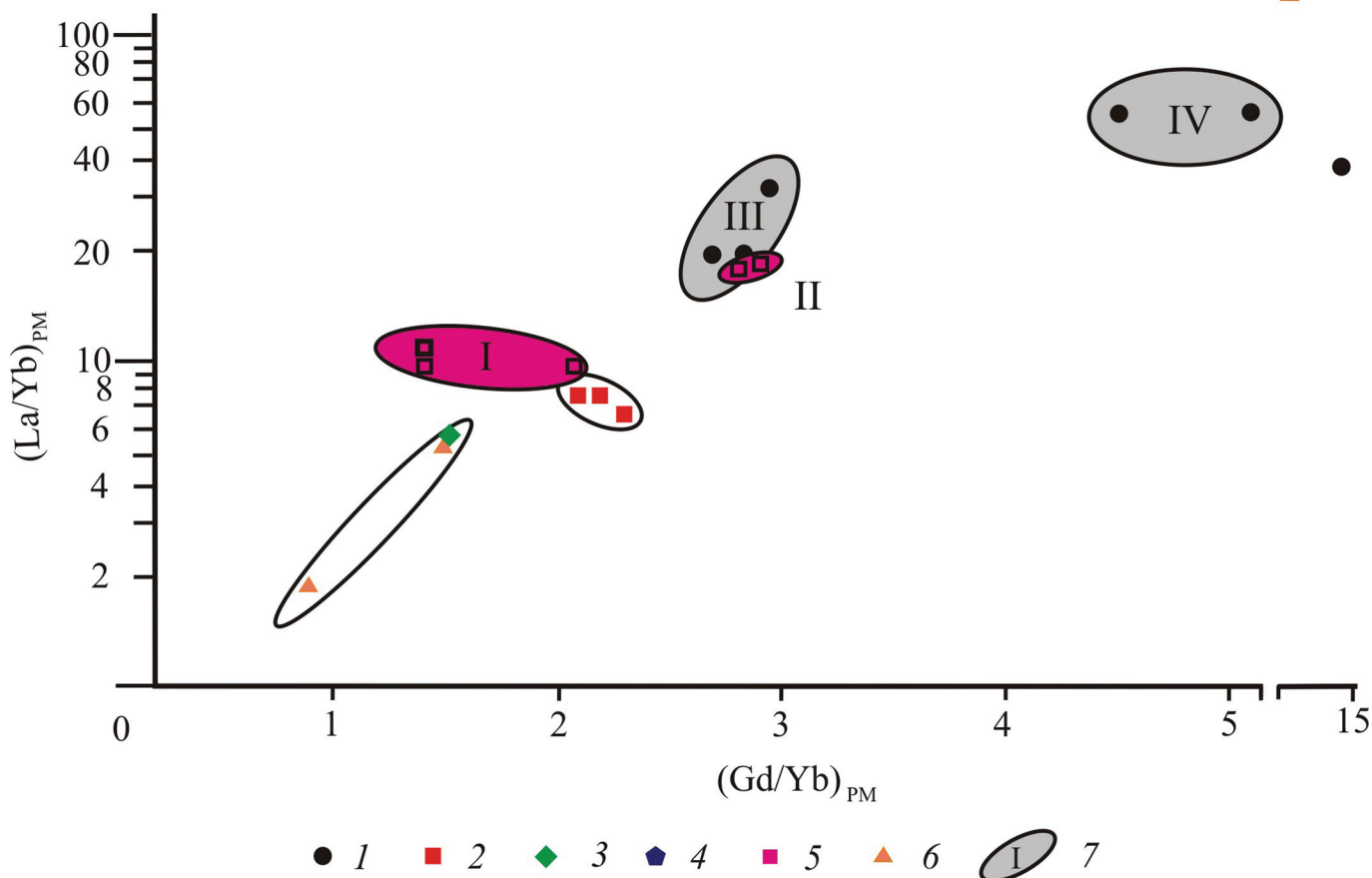


Рис. 3. Диаграмма $(La/Yb)_{PM} - (Gd/Yb)_{PM}$ руд месторождений золота Восточного Забайкалья: кварцево-сульфидные руды месторождений: 1 – Александровского, 2 – Карийского, 3 – Ключевского, 4 – Средне-Голготайского, 5 – Любавинского, 6 – Верхне-Алиинского; 7 – поля развития руд с разными геохимическими характеристиками (I – руды, образованные из недифференцированных магматических очагов, II – руды, образованные из дифференцированных магматических очагов)

сульфидно-кварцевые руды, Rb — золотокварц-арсенопиритовые руды (табл. 1).

Анализ отношений типоморфных элементов свидетельствует, что магматические очаги разных типов руд имели разную степень дифференциации и функционировали на разных глубинах. Так, на Карийском месторождении по соотношениям Rb и Sr наиболее дифференцированными были магматические очаги золотокварц-арсенопиритовых руд (Rb/Sr 1,40), менее — золотоактинолит-магнетитовых (Rb/Sr 0,58) и золотокварц-сульфидных руд (Rb/Sr 0,49).

Наличие в рудных полях золоторудных месторождений разных по составу и близких по возрасту интрузивных образований свидетельствует о функционировании разноуровневых, в разной степени дифференцированных магматических очагов, являющихся источниками рудоносных флюидов. Выявлено, что на Средне-Голготайском месторождении золотокварцевые и золотосульфидно-кварцевые руды образованы из разных магматических очагов [1].

В рудных полях золоторудных месторождений широко развиты дайки и штоки основного, среднего и кислого состава амуджикано-шахтаминского комплекса. Это указывает на функциони-

рование разноглубинных в различной степени дифференцированных магматических очагов. Характерно, что разная степень дифференциации и глубины формирования рудоносных магматических очагов различающихся типов руд характерны для всех мезозойских золоторудных месторождений Восточного Забайкалья. На диаграмме $(La/Yb)_{PM} - (Gd/Yb)_{PM}$ на Александровском и Карийском месторождениях четко выделяется по две группы рудоносных магматических очагов, которым свойственны разные глубины и степень дифференциации (рис. 3). Магматические очаги, функционировавшие на меньших глубинах, в сравнении с магматическими очагами больших глубин, характеризуются повышенными концентрациями легких РЗЭ (табл. 2).

Изучение спектров тетрад-эффектов (ТЭФ) лантаноидов является важной частью познания процессов рудообразования. Они возникают в случае образования комплексных соединений РЗЭ [18]. При этом нарушается плавная линия нормированного спектра лантаноидов с образованием отдельных изгибов (тетрад). Выявлено, что эти спектры образуются при наличии во флюидах, обогащенных летучими компонентами, а также при измене-

Таблица 3

Тетрад-эффекты в спектрах лантаноидов в рудах золоторудных месторождений Восточного Забайкалья

Номера проб	Минеральный состав	T_1	T_3	T_4	T_{1-4}
Александровское месторождение					
229	Кварц, пирит	1,01	1,04	0,93	0,99
234	Кварц, пирит, арсенопирит, сфалерит	0,99	0,93	0,83	0,91
236	Кварц, пирит	0,97	0,90	0,90	0,92
237	Кварц, пирит, арсенопирит	1,07	0,99	0,80	0,95
237-3	Кварц, пирит, арсенопирит	1,01	0,99	0,92	0,97
237-4	Кварц, пирит, арсенопирит	1,07	0,88	0,82	0,92
248	Кварц, турмалин, пирит	0,99	1,0	0,74	0,90
260	Кварц, пирит	1,05	0,92	0,93	0,96
280-1	Кварц, пирит	1,03	0,52	0,93	0,80
Карийское месторождение					
584-5	Кварц, актинолит, магнетит	1,08		0,94	1,0
579-2	Кварц, турмалин, пирит	0,95	0,99	1,06	0,99
579-3	Кварц, турмалин, пирит	0,91	1,02	1,13	1,01
579-6	Кварц, турмалин, пирит				
579-9	Кварц, турмалин, пирит				
Сртдне-Голготайское месторождение					
517	Кварц, пирит, сфалерит				
518	Кварц, пирит, сфалерит				
519	Кварц, пирит, сфалерит	0,98			
529	Кварц, пирит, сфалерит				
Любавинское месторождение					
862	Кварц, арсенопирит, пирит				
863	Кварц, арсенопирит, пирит				
781	Кварц, арсенопирит	1,15		1,31	1,15
791	Кварц, арсенопирит	1,23		1,27	1,16
Верхне-Алиинское месторождение					
681-2	Кварц, арсенопирит	0,94			
681-4	Кварц, арсенопирит	0,93			
689	Кварц, пирит, пирротин				
689-1	Кварц, пирит, пирротин	0,97	1,15		1,03

Примечание. Красным цветом выделены пробы с тетрад-эффектами в спектрах лантаноидов.

нии кислотности-щелочности среды. Наличие данных спектров ТЭФ РЗЭ чётко прослеживается для заключительных стадий дифференциации редко-металльных интрузий [14, 17].

Образование спектров ТЭФ РЗЭ обусловлено их способностью к созданию комплексных соединений в водной среде, что приводит к нарушению плавной линии спектра с разделением на четыре группы (тетрады): La-Nd, Sm-Gd, Gd-Ho и Er-Lu [14, 17]. Величина рассматриваемых спектров рассчитывается по отклонению концентраций середины тетрады относительно краевых значений. $TE_1 = \sqrt{X_2/X_1^{2/3} \times X_4^{1/3} \times X_3/X_1^{1/3} \times X_4^{2/3}}$ [14, 17]. Спектры ТЭФ рассчитываются для первой, третьей и четвертой тетрад. Значения РЗЭ нормированы к хондриту.

$$TE_1 = \sqrt{\frac{Ce}{La^{2/3} \times Nd^{1/3}} \times \frac{Pr}{La^{1/3} \times Nd^{2/3}}};$$

$$TE_3 = \sqrt{\frac{Tb}{Gd^{2/3} \times Ho^{1/3}} \times \frac{Dy}{Gd^{1/3} \times Ho^{2/3}}};$$

$$TE_4 = \sqrt{\frac{Tm}{Er^{2/3} \times Lu^{1/3}} \times \frac{Yb}{Er^{1/3} \times Lu^{2/3}}};$$

Суммарное их значение рассчитывается по формуле $TE_{1-4} = \sqrt[3]{TE_1 TE_3 TE_4}$, [14, 17]. Спектры ТЭФ принимаются значимыми если $TE_1 > 1,1$ (M тип), $TE_1 < 0,9$ (W тип) [14]. Установлено, что появление спектров ТЭФ в редкометаллических гранитах является следствием процессов фторидно-силикатной жидкостной несмешиваемости в магме. Наличие ТЭФ в магматических расплавах свидетельствует о при-

сутствии флюидной фазы, содержащей летучие компоненты, воду и фтор [17]. Образование спектров также связано и с изменением кислотности-щелочности среды [17].

Сравнительный анализ распределения РЗЭ в различных типах руд золоторудных месторождений показывает, что руды кварц-арсенопиритового состава, в отличие от остальных типов руд, характеризуются наличием ТЭФ в спектрах распределения лантаноидов (T_{1-4} 0,80; 1,15; 116) (табл. 3). Это можно объяснить повышенными концентрациями летучих компонентов в рудоносных магматических очагах.

Заключение

Таким образом, различные типы руд мезозойских золоторудных месторождений Восточного Забайкалья были образованы из разноглубинных и в различной степени дифференцированных магма-

тических очагов. Наибольшей степенью дифференциации характеризовались рудоносные флюиды (Eu/Eu^* 0,29—0,32; Rb/Sr 0,98—1,40), являющиеся источниками золотокварц-арсенопиритовых руд, в меньшей степени золотокварцевых и золотосульфидно-кварцевых руд (Eu/Eu^* 0,53—0,72; Rb/Sr 0,10—0,54). Рудоносные флюиды, золотокварц-арсенопиритовых руд (Eu/Sm 0,08—0,14) функционировали на меньших глубинах, чем рудоносные флюиды золотокварцевых и золотосульфидно-кварцевых руд (Eu/Sm 0,11—0,19). Образование золотокварц-арсенопиритовых руд происходило из рудоносных флюидов, в значительной степени обогащенных летучими компонентами, на это указывает наличие значимых тетрад-эффектов в распределении лантаноидов (T_{1-4} — 0,80; 1,15; 116).

Работа выполнена по проекту IX.137.1.2 (№ государственной регистрации АААА-А17-117011210077-2) при частичной поддержке гранта РФФИ (грант 16-05-00353).

ЛИТЕРАТУРА

- Абрамов Б.Н. Условия формирования, минералогическо-геохимические особенности пород и руд Средне-Голготайского золоторудного месторождения (Восточное Забайкалье) // Известия вузов. Геология и разведка. 2012. № 3. С. 79—82.
- Абрамов Б.Н. Ключевское золоторудное месторождение: условия формирования, петрогеохимические особенности пород и руд (Восточное Забайкалье) // Докл. РАН. 2015. Т. 464. № 1. С. 85—90.
- Абрамов Б.Н. Верхне-Алиинское золоторудное месторождение: условия формирования, петрогеохимические особенности пород и руд (Мунгинский рудный узел, Восточное Забайкалье) // Литосфера. 2016. № 4. С. 92—101.
- 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.
- Винокуров С.Ф. Европиевые аномалии в рудных месторождениях и их геохимическое значение // Докл. РАН. 1996. Т. 346. С. 792—795.
- Волкова М.Г., Спиридонов А.М., Боровиков А.А. и др. Шелочные жильные породы Карийского рудного узла: состав рудообразующих флюидов и условия образования по (по результатам изучения флюидных включений) // Geodynamics & Tectonophysics. 2016. Т. 7. № 4. С. 679—690.
- Гаврикова С.Н. Гранитообразование в активизированных щитах (на примере южной окраины Сибирской платформы). Дис. ... докт. геол.-мин. наук. М.: ГЕОИИ АН СССР, 1985. 260 с.
- Гордиенко И.В., Кузьмин М.И. Геодинамика и металлогения Монголо-Забайкальского региона // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 11. С. 1545—1562.
- Жмодик С.М., Росляков Н.А., Спиридонов А.М., Козаченко И.В. // Золотопорфировое оруденение Карийского рудного узла как новый тип оруденения в Восточном Забайкалье // Докл. РАН. 209. Т. 426. № 6. С. 791—796.
- Зорин Ю.А., Беличенко В.Г., Рутштейн И.Г. и др. Геодинамика западной части Монголо-Охотского пояса и тектоническая позиция рудных проявлений золота в Забайкалье // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 11. С. 104—112.
- Интерпретация геохимических данных: Учебное пособие / Под ред. Е.В. Склярова. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 288 с.
- Китаев Н.А. Геология, геохимия и генетические особенности формирования золотых руд Любавинского рудного поля // Геология и геофизика. 1977. № 3. С. 46—55.
- Криволюцкая Н.А. Парагенетические ассоциации минералов и условия образования руд Ключевского месторождения золота (Восточное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений. 1997. № 4. С. 344—361.
- Перетяжко И.С., Савина Е.А. Тетрад-эффекты гранитоидных пород — следствие процессов жидкостной несемеси в богатых фтором силикатных расплавах // Докл. РАН. 2010. Т. 433. № 4. С. 524—529.
- Светова Е.Н., Светов С.А., Данилевская Л.А. Редкие и редкоземельные элементы в кварце как индикаторы условий минералообразования // Труды Карельского научного центра РАН. 2012. № 3. С. 137—144.
- Спиридонов А.М., Зорина Н.А., Китаев Н.А. Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья. Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2006. 291 с.
- Ясыгина Т.А., Рассказов С.В. Редкоземельные элементы с тетрад-эффектом: проявление в палеозойских гранитоидах Окинской зоны Восточного Саяна // Геохимия. 2008. № 8. С. 877—889.
- Irber W. The lanthanide tetrad effect and correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites // Geochim Cosmochim Acta. 1999. V. 63. № (3/4). P. 489—508.
- Ridley J.R., Diamond L.W. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models // Gold in 2000. SEG Reviews. 2000. V. 13. P. 141—162.
- Yang Q., Santosh M., Shen J., Li Sh. Juvenile vs. recycled crust in NE China: Zircon U—Pb geochronology, Hf isotope and an integrated model for Mesozoic gold mineralization in the Jiaodong Peninsula // Gondwana Res. 2014. V. 25. P. 1445—1468.

REFERENCES

- Abramov B.N. Formation conditions, mineral and geochemical characteristics of rocks and ores of Sredne-Golgotaisk gold deposit (Eastern Transbaikalia). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* — [Proceedings of higher educational establishments. *Geology and Exploration*], 2012, no 3, pp. 79—82. (In Russian).
- Abramov B.N. The Klyuchevskoe gold ore deposit (Eastern Transbaikalia): Formation conditions and petrogeochemical features of rocks and ores. *Doklady Earth Sci.*, 2015, vol. 464, no 1, pp. 85—90. (In Russian).
- Abramov B.N. Verkhne-Aliinsky gold deposit: Conditions of formation, petrogeochemical features of rocks and ores (Munginsk

- ore cluster, Eastern Transbaikalia. *Litosfera*. 2016, no 4, pp. 92–101. (In Russian).
4. Abramov B.N., Kalinin YU.A., Posohov V.F. Lubavinsky gold deposit (Eastern Transbaikalia): petrogeochemistry, sources of rocks and ore. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018, V. 329, no 3, pp. 134–144. (In Russian).
5. Vinokurov S.F. Europium anomalies in the ore deposits and their geochemical significance. *Doklady Earth Sci.* 1996, vol. 346, no.1, <https://elibrary.ru/contents.asp?id=34186892&selid=24960875>, pp. 792–795. (In Russian).
6. Volkova M.G., Spiridonov A.M., Borovikov A.A. i dr. Alkaline vein rocks of the Kara ore node: the composition of ore-forming solutions and conditions of their formation (based on the study of fluid inclusions). *Geodynamics & Tectonophysics*. 2016, V. 7, no 4, pp. 679–690. (In Russian).
7. Gavrikova S.N. Granitoobrazovanie v aktivizirovannyh shchitah (na primere yuzhnoj okrainy Sibirskoy platformy). Dissertatsiya d.g.-m.n. M., GESHCHKHI AN SSSR, 1985, 260 p.
8. Gordienko I.V., Kuz'min M.I. Geodynamics and Metallogeny of the Mongolian-Transbaikalian Region. *Geology and Geophysics*. 1999, vol. 40, no 11, pp. 1545–1562. (In Russian).
9. Zhmodik S.M., Rosljakov N.A., Spiridonov A.M., Kozachenko I.V. Gold-porphyric mineralization of the Kara ore knot in eastern Transbaikalia as a new type of auriferous mineralization in East Siberia. *Doklady Earth Sci.* 2009, vol. 427, no. 1, pp. 809–813. (In Russian).
10. Zorin Ju.A., Belichenko V.G., Rutshtejn I.G. i dr. Geo-dynamics of the western part of the Mongol-Okhotsk belt and the tectonic position of ore occurrences of gold in Transbaikalia. *Russian Geology and Geophysics*. 1998, vol. 39, no 11. pp. 104–112. (In Russian).
11. *The interpretation of geochemical data: a Training manual*. Ed. E.V. Skljárova. M., Intermet Inzhiniring Publ., 2001, 288 p. (In Russian).
12. Kitaev N.A. Geology, geochemistry and genetic features of the formation of gold ores of the Lyubavinsky ore field. *Russian Geology and Geophysics*. 1977, no 3, pp. 46–55. (In Russian).
13. Krivoluckaja N.A. Paragenetic associations of minerals and ore formation conditions of Klyuchevsky gold deposit (Eastern Transbaikalia, Russia). *Geology of ore Deposits*. 1997, no 4, pp. 344–361. (In Russian).
14. Peretjzhko I.S., Savina E.A. Tetrad — effects of granitoid rocks — a consequence of the processes of liquid incompressibility in fluorine-rich silicate melts. *Doklady Earth Sci.* 2010, vol. 433, no 4, pp. 524–529. (In Russian).
15. Svetova E.N., Svetov S.A., Danilevskaja L.A. Rare and rare-earth elements in quartz as indicators of mineral formation conditions. *Transactions of Karelian Research centre of Russian Academy of Science*. 2012, vol. 3, pp. 137–144. (In Russian).
16. Spiridonov A.M., Zorina N.A., Kitaev N.A. *Gold-Bearing ore-magmatic systems of Transbaikalia*. Academic publishing house «Geo». Novosibirsk. Publ., 2006, 291 p. (In Russian).
17. Jasygina T.A., Rasskazov S.V. Tetrad effect in rare earth element distribution patterns: Evidence from the Paleozoic granitoids of the Oka zone, Eastern Sayan. *Geochimistry International*. 2008, vol. 46, no.8, pp. 814–825. (In Russian).
18. Irber W. The lanthanide tetrad effect and correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochim Cosmochim Acta*. 1999, V. 63, no (3/4), pp. 489–508.
19. Ridley J. R., Diamond L. W. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models. *Gold in 2000. — SEG Reviews*. 2000, V. 13, pp. 141–162.
20. Yang Q., Santosh M., Shen J., Li Sh. Juvenile vs. recycled crust in NE China: Zircon U–Pb geochronology, Hf isotope and an integrated model for Mesozoic gold mineralization in the Jiaodong Peninsula. *Gondwana Res*. 2014, V. 25, pp. 1445–1468.