

Петрология гранитоидов юго-восточных районов хр. Полоусного (Верхояно-Колымская орогенная область)

В.А. Трунилина, С.П. Роев, А.И. Зайцев

*Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия
v.a.trunilina@diamond.ysn.ru*

Аннотация. Рассматривается специфика составов меловых гранитоидов юго-восточных отрогов хр. Полоусного, локализованных в зоне сочленения Полоусного, Селенняхского и Туостахского антиклинориев, характеризующейся широким развитием долгоживущих тектонических нарушений. Показано, что в меловое время данная территория была ареной интенсивного проявления гранитоидного магматизма – надсубдукционного раннеорогенного М-типа, позднеорогенного активной континентальной окраины I-типа, посторогенного или рифтогенного А-типа. Установлено, что все гранитоиды геохимически специализированы на As и Ag и в большинстве своем также на Au, а условия их кристаллизации были благоприятны для формирования золото-редкометалльного и/или серебромышьякового оруденения. Общность геохимической специализации гранитоидов, высокие концентрации в них Th, U, HREE, Cr, V, Co указывают на наличие постоянно действовавшего здесь в меловую эпоху внешнего (глубинного) источника, обусловившего поступление дополнительного тепла и флюидов, по всей вероятности, связанных с подъемом щелочно-основных диапиров.

Ключевые слова: гранитоиды, магмогенерация, геохимическая специализация, рудопроявления, золото, серебро.

Благодарности. Исследование выполнено по плану НИР ИГАБМ СО РАН (проект 0381-2016-0001).

DOI 10.31242/2618-9712-2018-25-3-53-70

Petrology of granitoids of South-Eastern regions of Polousnyi range (Verkhoyansk-Kolyma orogenic region)

V.A. Trunilina, S.P. Roev, A.I. Zaitsev

*Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russia
v.a.trunilina@diamond.ysn.ru*

Abstract. The article deals with specificity of compositions of Cretaceous granitoids of South-Eastern spurs of the Polousnyi range, localized in the zone of joint (articulation) of the Polousnyi, Selennyakh and Tuostakh anticlinorium, characterized by a wide development of long-lived tectonic disorders. It is shown that in the Cretaceous time this territory was a scene of intensive manifestation of granitoid magmatism – supersubduction of early orogenic M-type, late orogenic active continental margin of I-type, post-orogenic or riftogenic A-type. It is established that all granitoids are geochemically specialized in As and Ag, and in the majority also in Au, and conditions of their crystallization were favorable for formation of gold-rare-metal and/or silver-arsenic mineralization. Generality of the geochemical specialization of granitoids, high concentrations of Th, U, HREE, Cr, V and Co in them indicate the presence of an external (deep) source constantly acting here in the Cretaceous era, contributing to the provision of further heat and fluids, in all probability, associated with the rise of alkaline-basic diapirs.

Key words: granitoids, magmagenation, geochemical specialization, ore-bearing, gold, silver.

Acknowledgments. The study was carried out according to the plan of research and development work of Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS (project 0381-2016-0001).

Введение

Проблема происхождения и рудоносности гранитоидов до сих пор не имеет однозначного решения. Ранее большинство исследователей рассматривало их как коровые образования с генерацией материнских расплавов в метасадочных породах верхней коры. Но к настоящему времени среди них различают производные мантийных, коровых и корово-мантийных расплавов, при этом полигенность представляется необходимым условием формирования высокопродуктивных рудно-магматических систем [2, 17]. Детальное изучение магматических образований северных и центральных районов хр. Полоусного позволило выделить среди них гранитоиды латитового ряда, наиболее перспективные в отношении комплексного оруденения [16]. Оставались крайне слабо изученными гранитоидные массивы юго-восточных отрогов хр. Полоусного. Целью проведенных исследований являлось выявление петрологических и геохимических особенностей этих гранитоидов для определения их прогнозной металлоносности.

В процессе исследований были проведены полевые работы с опробованием всех разновидностей магматических пород. В лабораториях ИГАБМ СО РАН были выполнены полный силикатный (аналитик Д.А. Кулагина) и количественный спектральный (З.В. Хохрякова) анализы гранитоидов, определение составов породообразующих и акцессорных минералов на микроанализаторе «Самбах-Микро» (С.П. Роев). В таблицах приведены наиболее представительные из них, на диаграммы вынесены все имеющиеся данные. В Институте геохимии СО РАН проведено определение содержаний элементов-примесей (в том числе редкоземельных элементов) методом ИСП-МС (О.В. Зарубина).

Геологическое строение района

Рассматриваемый район расположен в юго-восточных отрогах хр. Полоусного, в узле сочленения Полоусного, Селенняхского и Туостакского антиклинорий (рис. 1). В его геологическом строении принимают участие интенсивно дислоцированные терригенно-карбонатные и вулканогенно-кремнистые породы ордовика, силура, девона и карбона; терригенные и вулканогенно-осадочные породы позднего триаса и юры; позднемеловые–палеогеновые вулканиды пестрого состава; кайнозойские отложения. Положение района в зоне сочленения различных тектонических структур обусловило сложный характер складчатых и разрывных дис-

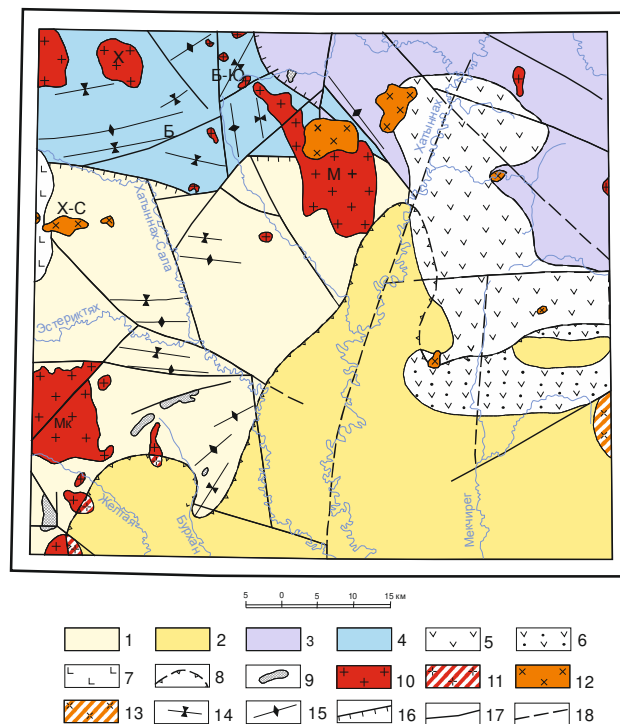


Рис. 1. Схема тектонического строения юго-восточных отрогов хр. Полоусного [11]:

1–3 – палеозойский структурный ярус: 1 – Селенняхский антиклинорий, 2 – он же, под покровом кайнозойских отложений, 3 – Полоусный антиклинорий; 4–6 – раннемезозойский структурный ярус: 4 – Туостакский антиклинорий, 5 – Хатыннхский вулканогенный прогиб, 6 – он же, под покровом кайнозойских отложений; 7 – позднемезозойский структурный ярус – Джакхтардахская вулканогенная впадина; 8 – кайнозойский структурный ярус – Абыйская впадина; 9–13 – интрузивные образования: 9 – палеозойские ультраосновные и основные, 10 – раннемезозойские гранитоидные, 11 – они же, не вскрытые, 12 – позднемезозойские щелочные и субщелочные, 13 – они же, не вскрытые; 14–15 – оси складок: 14 – синклиналей, 15 – антиклиналей; 16–17 – разрывные нарушения: 16 – надвиги, 17 – сбросы и сбрососдвиги установленные и 18 – предполагаемые. Массивы: Б-Ю – Буор-Юряхский, Х – Холодный, Мк – Мокринский, Х-С – Хара-Сисский, Б – Берендей

Fig. 1. Scheme of tectonic structure of south-eastern spurs of Polousnyi range [11]:

1–3 – Paleozoic structural stage: 1 – Selennyakh anticlinorium, 2 – the same under cover of Cenozoic sediments, 3 – Polousnyi anticlinorium; 4–6 – Early Mesozoic structural stage: 4 – Tuostakh anticlinorium, 5 – Khatynnakh volcanic trough, 6 – the same under cover of Cenozoic sediments; 7 – Late Mesozoic structural stage – Dzhakhtardakh volcanogenic depression; 8 – Cenozoic structural stage – Abyy depression; 9–13 – intrusive formations: 9 – Paleozoic ultrabasic and basic, 10 – Early Mesozoic granitoid, 11 – the same unopened, 12 – Late Mesozoic alkaline and subalkaline, 13 – the same unopened; 14–15 – axes of folds: 14 – synclines, 15 – anticlines; 16–17 – fractures: 16 – overthrusts, 17 – faults and strike-slip faults established and 18 assumed. Massifs: Б-Ю – Buor-Yuryakh, Х – Kholodny, Мк – Mokrinsky, Х-С – Khara-Sissy, Б – Berendey

локаций. Заложение наиболее крупных разломов относится к триасу, а интенсивные подвижки по ним происходили и в мелу, как до внедрения гранитоидных интрузий, так и после него [11]. В пределах территории широко развиты интрузивные образования: девонские и каменноугольные ультраосновные и основные; раннемеловые – основные, средние и кислые; позднемеловые–палеогеновые кислые, субщелочные и щелочные. Объектами нашего изучения являлись раннемеловые гранитоиды, с которыми, по данным геолого-поисковых работ, ассоциируют рудопоявления: Au, Cu, Pb, Zn, W, приуроченные к апикальным зонам массивов и к минерализованным зонам дробления в их экзоконтактах.

Петрография и минералогия гранитоидов

Наиболее ранние проявления мелового магматизма представлены небольшими штоками габбро и диоритов, изученных нами на примере Буор-Юрхского массива, локализованного среди раннесреднеюрских терригенных отложений Селенняхского антиклинория. Массив представлен двумя небольшими выходами, объединенными общим ореолом контактового метаморфизма. Западный выход (около 1 км²) сложен кварцевыми диоритами с отклонениями в эндоконтактах к габбро-диоритам и прорван дайками гранодиоритов и плагиогранитов, слагающими также восточный выход массива (0,5 км²). Изотопный Rb-Sr возраст диоритов 155±5 млн. лет. Диориты гетерозернистые и порфириовидные с выделениями плагиоклаза и амфибола в преимущественно субофитовой, участками в призматически-зернистой основной массе. Плагиоклаз порфириовидных выделений – андезин-лабрадор с рекуррентной зональностью (67→37 % an) и с корродированными ядрами лабрадор-битовнита (76 % an). В его центральных зонах встречены мелкие включения субкальциевого магнезиоавгита и кальциевого магнезиального пижонита с железистостью (f) = 38,4–46 % и расчетными параметрами кристаллизации: P = 1,7–1,2 ГПа, T = 1145–1057 °C (табл. 1). Плагиоклаз основной массы – зональный андезин и олигоклаз (40→24 % an). Вкрапленники амфибола представлены керсутитом и паргаситом (f = 50,5–53,3 %, P = 0,8–0,9 ГПа, T = 991–981 °C) (табл. 2). Они содержат мелкие включения апатита, ксенотима, рудного минерала и, как правило, замещены мелкозернистыми псевдоморфозами каннилоита или ферроактинолита. В основной массе среди хлорит-актинолитовых скоплений отмечаются редкие реликты магнезиально-железистой роговой обманки (f = 55,3–55,8 %).

Со снижением температуры амфибол замещается Fe-Mg-биотитом (P = 0,92–0,83 ГПа и T = 774–757 °C), содержащим включения рудного минерала, апатита, циркона и микровключения радиоактивного минерала. Он сопоставим по составу с биотитами мантийно-коровых магнетитовых ассоциаций (табл. 3, рис. 2, а, б) и кристаллизовался в условиях высокой активности кислорода, воды и хлора, соответствующих таковым золотоносных рудно-магматических систем [20]. Крупные чешуйки постмагматического Fe-биотита (f = 64,8–67,2 %, T = 708–718 °C, P = 0,8–0,98 ГПа), наложенные на псевдоморфозы актинолита по амфиболу, образуются уже при невысокой активности кислорода и более низкой активности хлора и воды, но при несколько большем ее содержании (4–5,5 %) (рис. 2, в). По низким значениям OH/F в минимальном составе отвечает биотитам шошонитовых серий гранитоидов.

В акцессорной фракции установлены Cl-apatит (до 1,88 % Cl), магнетит, ильменит, пирротин, арсенопирит, пирит, зональный циркон с повышенным содержанием иттрия (до 0,36 %) и значениями ZrO₂/HfO₂ от 60 до 168 при преобладающих – 70–90, характерных для высокотемпературных цирконов основных пород [8].

Гранодиориты и плагиограниты восточного выхода массива гетерозернистые, порфириовидные, с мелкозернистой гипидиоморфной основной массой. Плагиоклаз – андезин с четко отделенной краевой зоной (37→20 % an). Содержит мелкие включения лабрадора (55–61 % an) в сростании с магнезиально-железистым субкальциевым авгитом. Амфибол в мелких шлирах и субпризматических выделениях полностью замещен магнезиально-железистым актинолитом (f = 47,5–49,1 %). Содержит включения циркона, ксенотима, апатита, рудного минерала. Замещается богатым галогенами Fe-биотитом (f = 50,6–63 %) со стабильно низкими величинами OH/F в минимальном составе, соответствующими таковым в биотитах гранитоидов шошонитовой серии. Биотит образуется при 738–662 °C и 0,7–1 ГПа в условиях низкой активности фтора и высокой или повышенной хлора и воды, с ростом содержания последней от 4 до 6–6,5 % в процессе кристаллизации. По условиям становления отличается от биотитов продуктивных золотоносных систем только несколько меньшей активностью кислорода. Неравномерно хлоритизирован. Несет те же включения акцессориев, что и амфибол. Калишпат (менее 10 %) присутствует только в основной массе. Заметно альбитизирован и интенсивно пелитизирован. Среди акцессориев определены F- и OH-apatиты, зональный циркон (ZrO₂/HfO₂ = 62–75), магнетит,

Составы пироксенов гранитоидов (вес. %)
Compositions of pyroxenes of granitoids (wt %)

№ обр.	Порода	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	f., %	T, °C	P, ГПа	Минерал
Буор-Юряхский массив																	
O155/3	Диорит	52,06	0,05	0,67	0,08	Не обн.	16,81	0,42	15,1	12,02	Не обн.	0,17	97,45	38,4	1145	1,2	Субкальциевый магнезиоавгит
		51,99	0,26	1,47	0,08	«	18,7	0,59	15,08	8,79	0,02	0,26	99,38	41	1119	1,6	Пижонит
		53,71	0,37	2,03	0,01	«	18,93	0,2	12,45	9,12	0,34	0,13	97,45	46	1057	1,4	«
P2386/1	"	51,34	0,66	2,2	0,08	«	17,31	0,17	15,35	9,59	0,29	0,3	97,38	38,8	1128	1,7	Субкальциевый магнезиоавгит
		54,55	0,42	1,91	0,08	«	16,53	0,3	13,2	10,39	0,35	0,15	97,91	41,3	1075	1,5	«
O157/1	Плаггио-гранит	58,05	0,17	1,02	0,01	«	13,88	0,4	14,43	11,52	0,29	0,11	99,88	35,1	1085	1,3	«
		54,02	0,15	1,73	Не обн.	«	19,08	0,23	12,08	11,05	0,02	0,22	98,98	47	1064	1,1	«
Массив Холодный																	
O153/6	Гранит	50,89	0,14	0,93	«	«	33,25	1,52	9,49	1,22	0,09	Не обн.	97,74	66,3	943	1,6	Ферросилит

Примечание. Анализы выполнены С.П. Роевым в ИГАБМ СО РАН на рентгеновском микроанализаторе «Camebax-Micro». T – температура и P – давление при кристаллизации минерала, расчеты по [32].

Notes. The analyses were carried out by S.P. Roev at the Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS on the «Camebax-Micro» X-ray microanalyzer. T is the temperature and P is the pressure during the crystallization of the mineral, the calculations are according to [32].

Составы амфиболов гранитоидов (вес. %)
Compositions of amphiboles of granitoids (wt %)

№ обр.	Порода	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	F	H ₂ O	Сумма	f, %	T, °C	P, ГПа	Минерал
O155/3	Диорит Буор-Юряхского массива	42,16	3,92	14,03	0,78	10,82	0,06	11,27	11,57	2,12	0,91	0,08	0,29	2,03	100,04	50,5	991	0,9	Паргасит
		42,69	5,11	13,31	Не обн.	12,34	0,02	10,66	11,6	1,9	0,98			2,05	100,66	53,3	981	0,8	Керсутит
O153/6	Гранит массива Холодный	45,99	0,75	4,43	2,65	21,29	0,97	7,8	9,74	1,26	0,61	0,2	0,28	1,71	97,68	75,2			Fe-роговая обманка
		49,11	0,26	3,08	1,96	20,66	0,94	8,63	10,12	0,76	0,35	0,12	0,39	1,72	98,1	72,2			«
		49,97	0,26	2,37	1,21	28,85	2,26	8,13	4,25	0,55	0,22	0,13	0,08	1,87	100,15	78,6			Грюнерит
O174/3	Гранит массива р. Желтая	48,13	0,63	4,19	2,19	17,02	0,42	12,95	10,95	0,56	0,5	0,17	0,09	1,91	99,71	45,4			Mg-роговая обманка
		49,46	0,64	4,11	1,68	17,3	0,42	11,2	10,06	0,72	0,41	0,18	0,15	1,97	98,3	48,5			«

Примечание. Анализы выполнены С.П. Роевым в ИГАБМ СО РАН на рентгеновском микроанализаторе «Camebax-Micro». T – температура и P – давление при кристаллизации минерала, расчеты по [31].

Notes. The analyses were carried out by S.P. Roev at the Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS on the «Camebax-Micro» X-ray microanalyzer. T is the temperature and P is the pressure during the crystallization of the mineral, the calculations are according to [31].

Состав биотитов гранитоидов (вес. %)
Composition of biotites of granitoids (wt%)

№ обр.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	F	H ₂ O	Сумма	f, %	Т, °С	Р, ГПа	log f				Минерал
																		O ₂	H ₂ O	HCl	Hf	
Буор-Юряхский массив																						
О155/3 диорит	38,41	4,91	12,83	2,20	16,85	0,01	12,45	0,06	0,10	8,29	0,33	0,51	2,11	99,06	45,9	757	0,083	-13,2	3,29	3,69	-0,16	Fe-биотит
	37,88	5,55	12,85	2,12	16,35	0,06	11,73	0,05	0,12	7,54	0,39	0,33	3,08	98,05	46,6	770	0,083	-15,5	2,74	3,08	-0,61	"
	37,30	4,40	13,94	2,59	22,72	0,22	7,63	0,06	0,01	8,58	0,49	0,73	2,08	100,75	64,8	718	0,098	-16	2,76	2,42	-0,53	"
	37,27	4,21	12,91	3,19	22,65	0,18	6,99	0,03	0,01	2,24	0,49	0,45	2,84	99,46	67,2	710	0,08	-16,2	2,97	2,4	-0,69	"
О157/4 гранодиорит	37,39	4,78	13,06	2,58	22,16	0,05	8,06	0,02	0,04	8,84	0,88	0,45	1,62	99,93	63	731	0,086	-15,9	2,92	3	-0,86	"
	37,87	2,93	12,28	3,88	22,14	0,07	8,69	0,10	0,01	8,74	1,14	0,40	2,46	100,71	62,3	662	0,074	-16,7	3,2	3,13	-0,55	"
О157/1 плаггиогранит	35,99	5,69	13,12	1,98	18,45	0,08	9,77	0,07	0,01	8,01	0,41	0,55	3,62	97,75	53,8	769	0,101	-15	2,51	2,48	-1,08	"
	37,81	4,51	12,69	2,58	17,77	0,08	11,00	0,09	0,01	8,02	0,54	0,41	3,29	98,8	50,6	738	0,077	-14,2	3,12	3,28	-0,63	"
Массив Холодный																						
О153/6 гранит	36,98	4,99	13,34	2,64	23,16	0,23	7,11	0,02	0,02	8,40	0,43	0,79	2,14	100,28	66,8	734	0,095	-16,2	2,78	2,34	-0,48	Fe-биотит
	37,35	4,98	13,01	3,00	22,98	0,30	7,00	0,01	0,07	7,88	0,51	0,98	2,49	100,56	67,3	734	0,080	-16,2	2,89	2,44	-0,34	"
	35,48	3,09	12,59	3,81	22,63	0,01	6,00	0,01	0,17	9,15	0,5	1,69	3,68	98,81	70,9	671	0,062	-16,8	2,96	2,00	-0,29	"
Р2382/1 лейкогранит	33,83	2,50	14,31	3,78	26,02	0,39	4,69	0,11	0,02	9,33	1,02	0,33	3,63	99,96	77,9	632	0,153	-17,1	2,45	1,64	-1,42	Лепидомелан
	34,4	4,11	13,55	3,2	27,22	0,16	4,48	0,05	0,01	9,72	0,84	0,96	1,87	100,65	79	707	0,135	-17,2	2,42	1,98	-0,62	"
	35,30	2,96	14,83	2,99	26,73	0,24	4,08	0,01	0,01	10,0	1,01	0,63	2,08	100,87	80,2	653	0,165	-17,3	2,21	1,76	-1,04	"
Мокринский массив																						
Р2392/6 гранит	36,28	3,95	13,96	2,62	23,89	0,55	6,11	0,02	0,01	9,16	0,47	0,54	3,06	100,62	70,7	701	0,105	-16,6	2,63	1,88	-0,92	Fe-биотит
	36,10	3,07	13,71	3,07	23,23	0,55	5,68	0,10	0,01	9,13	0,44	0,97	3,96	100,02	72,0	666	0,108	-16,9	2,60	1,59	-0,86	"
	35,31	4,63	13,06	3,02	24,87	0,55	5,47	0,09	0,07	8,88	0,44	0,77	3,17	100,33	73,9	725	0,117	-16,9	2,63	1,81	-0,78	Лепидомелан
	35,38	3,32	13,31	4,13	25,57	0,48	5,72	0,01	0,01	8,03	0,37	0,96	3,39	100,88	74,2	674	0,123	-17	2,85	1,69	-0,60	"
Граниты бассейна р. Желтая																						
О174/3 гранит	35,68	3,64	13,89	2,85	19,1	0,15	9,91	0,11	0,01	8,21	0,67	0,44	4,36	99,03	55,1	708	0,123	-15,0	2,52	2,49	-1,29	Fe-биотит
	36,32	3,91	12,89	2,81	19,58	0,33	8,51	0,01	0,23	9,07	0,62	0,40	3,81	98,49	59,3	712	0,089	-15,6	3,00	2,59	-1,49	"
О178/3 лейкогранит	34,88	4,90	12,02	3,51	27,17	0,30	3,52	0,04	0,13	9,34	0,55	1,83	2,22	100,41	82,9	734	0,089	-17,6	2,21	1,76	-0,49	Лепидомелан
	36,39	2,70	13,64	3,21	26,15	1,48	3,31	He обн.	He обн.	8,98	0,17	1,63	4,01	101,67	84,9	647	1,350	-17,7	2,62	0,79	-0,55	"

Примечание. Анализы выполнены в ИГАБМ СО РАН на микроанализаторе «Самбах-Микро» С.П. Роевым. Определение температуры Т – по [22], давления Р – [26], log f O₂ – [14], log f H₂O, log f HCl, log f Hf – по [30].

Notes. The analyses were carried out at the Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS on the «Самбах-Микро» X-ray microanalyzer by S.P. Roev. The determination of the temperature T is according to [22]; the pressure P is according to [26]; log f O₂ – [14]; log f H₂O, log f HCl and log f Hf – [30].

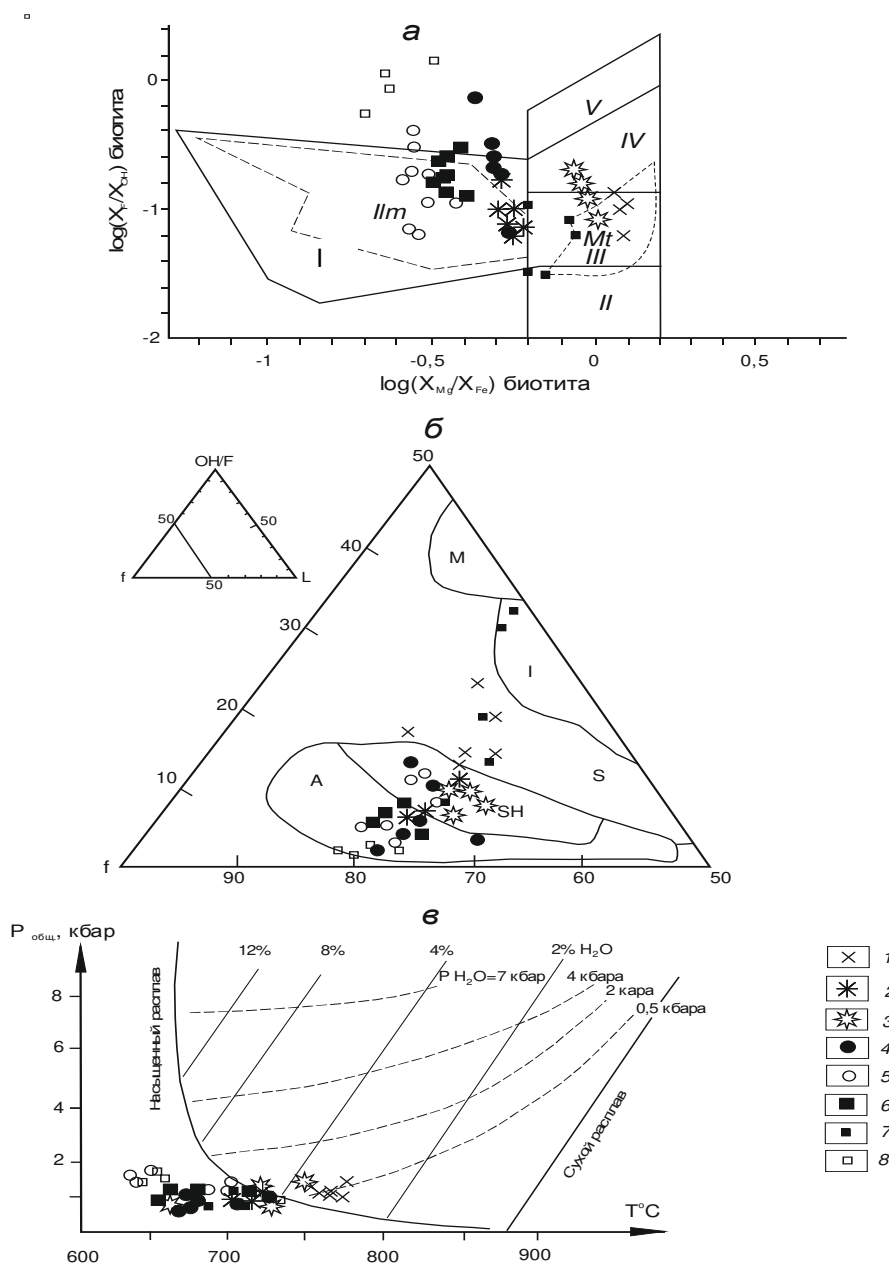


Рис. 2. Параметры составов биотитов гранитоидов:

Биотиты: 1 – магматический и 2 – постмагматический диоритов Буор-Юряхского массива; 3 – гранодиоритов того же массива; 4 – гранитов и 5 – лейкогранитов массива Холодный; 6 – гранитов Мокринского массива; 7 – гранитов и 8 – лейкогранитов бассейна р. Желтая:

а – соотношения фтористости и магнизиальности биотитов. Поля составов биотитов гранитоидов – производных расплавов [18]: I – образованных путем контаминации и ассимиляции субморских метаосадков, II – первичных океанических, III – корово-мантийных, IV – мантийно-коровых, V – коровых анатектических; б – соотношения фтористости (ОН/Ф), глиноземистости (L) и железистости (f) биотитов. Поля диаграммы – биотиты стандартных типов гранитоидов [3]: I – мантийно-коровые островных дуг, M – мантийные, S – коровые и мантийно-коровые коллизионных обстановок, SH – постколлизионные шошонитовые, A – анорогенных обстановок; в – P–T-диаграмма системы гранит– вода при независимых P_{общ.} и PH₂O [19]

Fig. 2 Parameters of granitoid biotite compositions:

Biotites: 1 – magmatic and 2 – postmagmatic diorites of Buor-Yuryakh massif; 3 – granodiorites of the same massif; 4 – granites and 5 – leucogranites of Kholodny massif; 6 – granites of Mokrinsky massif; 7 – granites and 8 – leucogranites of basin of river Zheltaya:

a – ratios of fluorine and magnesium contents of biotites. Fields of compositions of biotites of granitoids – derivatives of melts [18]: I – formed by contamination and assimilation of subsea metasediments, II – primary oceanic, III – crust-mantle, IV – mantle-crustal, V – crustal anatectic; б – ratios of fluorine content (OH/F), alumina (L) and iron content (f) of biotites. Fields of diagram are biotites of standard types of granitoids [3]: I – island arc mantle-crustal, M – mantle, S – collision setting crustal and mantle-crustal, SH – post-collision shoshonitic, A – anorogenic settings; в – P–T diagram of granite–water system with independent P_{total} and PH₂O [19]

ильменит, пирротин, арсенопирит. Как и диориты, породы содержат ксенолиты биотитизированных роговиков, гнезда кальцит-хлоритового и хлоритового состава.

Амфиболсодержащие биотитовые граниты слагают Холодный и Мокринский массивы и мелкие выходы в бассейне р. Желтая. Массив Холодный площадью около 40 км² интродуцирует терригенные отложения позднего триаса – ранней юры в пределах Туостакского антиклинория (рис. 1) и представляет собой шток с крутопадающими под вмещающие породы контактами. Изотопный Rb-Sr возраст пород 143±10 млн. лет. Преобладающие в его составе граниты в эндоконтактах сменяются гранодиоритами. Мокринский массив площадью 90 км² локализован в пределах Селенянского антиклинория среди терригенно-карбонатных отложений ордовика. Контакты его преимущественно пологие (менее 30°), с падением под вмещающие породы. Граниты содержат ксенолиты габбро-диоритов и прорваны многочисленными дайками мелкозернистых гранитов, лейкогранитов и аплитов с гнездами кварц-полевошпатовых пегматитов, а также позднемеловых сиенитов. В центре Мокринского массива лейкограниты слагают шток до 200 м в диаметре. Их изотопный Rb-Sr возраст 132±6 млн. лет.

Граниты гетерозернистые и мелкозернистые порфиоровидные с вкрапленниками плагиоклаза, кварца и биотита, к которым изредка присоединяются амфибол или калишпат. Основная масса гипидиоморфно-зернистая или аллотриоморфно-зернистая, с участками пегматоидного строения. Плагиоклаз крупных зерен и порфиоровидных выделений – многозональный олигоклаз-андезин и олигоклаз с оплавленными ядрами андезина (38–40 % an). Зональность ритмичная, с общим поокислением к периферии (32→25→18 % an; 35→28→14 % an). В центре зерен встречаются мелкие корродированные включения реститового ферросилита (f = 66,3 %, T = 943 °C, P = 1,6 ГПа). В крупных зернах иногда «просвечивает» рисунок замещенного субстрата из плотно упакованного пакета мелких изометрично-округлых зерен плагиоклаза. Плагиоклаз основной массы – неотчетливо зональный олигоклаз (25→14 % an). Амфибол (магнезиальная роговая обманка с f = 45,4–48,5 %) образует единичные выделения, реже отмечается в основной массе. Несет включения сфена, апатита, циркона, рудного минерала. Биотит начинает кристаллизоваться вместе с периферическими зонами плагиоклаза в виде мелких идиоморфных вкрапленников с включениями циркона, апатита, ортита, ксенотима, рудного ми-

нерала, а завершает последним, проникая в интерстиции всех породообразующих минералов. В процессе кристаллизации состав его меняется от Fe-биотита до лепидомелана, оставаясь близким биотитам гранитов А-типа региона [15] (рис. 2, а, б). Лепидомелан образует также мелкие шпиры – один или вместе с железистой (f = 72,2–78,6 %) роговой обманкой. В таких скоплениях оба минерала густо насыщены включениями апатита и монацита. Кристаллизуется биотит из водонасыщенного расплава (4–8 % H₂O – рис. 2, в). По условиям образования: умеренным значениям активности кислорода, воды и хлора и низким – фтора не сопоставим с биотитами продуктивных рудно-магматических систем.

Кварц порфиоровидных выделений – идиоморфный, с хорошо оформленными гранями и зонами роста. Наряду с ними присутствуют единичные, очень крупные катаклазированные зерна весьма прихотливого абриса, которые мы относим к реститовым. Калиевый полевой шпат – микропертитовый микроклин. Пятнисто альбитизирован и пелитизирован. В поздне-постмагматический этап оба минерала разрастаются с образованием неправильной формы порфиробластов или крупнозернистых пегматоидных обособлений.

Среди аксессуаров определены F-apatит, ортит, сфен, монацит, ксенотим, циркон, марганцовистый ильменит, пирит. F-apatит обогащен Ce (до 0,8 %), La (до 0,84 %, в одном случае – 4,5 %), Y (до 0,72 %), Ba (до 0,5 %). Циркон зональный, с широко варьирующими значениями ZrO₂/HfO₂ (62–15) и с оплавленными ядрами со значениями ZrO₂/HfO₂ = 72–84, характерными для пород среднего или основного состава. Интенсивно обогащен U (до 9,6 %), Th (до 2,1 %), Y (до 2,4 %), Yb (до 0,48 %). Гранат – низкотемпературный верхнекоровый спессартин-альмандин (4,7–7,4 % py, 14,2–20,1 % spess).

В гранитах присутствуют ксенолиты биотитизированных роговиков и неправильной формы, разбитые на фрагменты обособления (1–3 мм), сложенные плотно упакованным агрегатом мелкопризматических зерен андезина и небольшого количества (около 10 %) актинолитизированного амфибола, которые мы склонны относить к реститовым. Характерны также кальцит-хлоритовые и кварцевые гнезда и прожилки.

Лейкограниты гетерозернистые, с участками среднезернистого и пегматоидного сложения в мелкозернистом аллотриоморфном или гипидиоморфном матриксе. Плагиоклаз пород – неотчетливо зональный кислый олигоклаз и альбит (18–7 % an); калишпат – альбитизирован-

ный микропертитовый микроклин, часто с участками решетчатого строения; биотит – лепидомелан ($f = 76,6\text{--}80,2\%$), также близкий по составу биотитам гранитов А-типа. В лейкогранитах бассейна р. Желтая он обладает аномально высоким содержанием фтора ($1,63\text{--}1,83\%$), еще более возрастающим при мусковитизации (до $2,77\%$). Кристаллизуется из водонасыщенного расплава (до 10% H_2O) в условиях низкой активности кислорода, при умеренных значениях активности воды и галогенов (табл. 2). Содержание его не более $1,5\%$, он часто замещается тонковолокнистым мусковитом. Мусковит также дает крупные гнезда радиально-лучистого строения. В акцессорной фракции определены F- и OH-апатиты с повышенными содержаниями Y (до $0,62\%$) и La (до $0,58\%$); спессартин-альмандин ($13\text{--}26\%$ spess); марганцовистый ильменит; циркон с содержанием U до $0,54\%$, Y – до $0,62\%$, Yb – до $0,2\%$. Породы рассекаются жилами крупнозернистого кварца с гнездами крупночешуйчатого мусковита. Вдоль трещин иногда все полевые шпаты замещаются микрозернистым агрегатом кварца.

Петрохимический состав пород

Западный выход Буор-Юрхского массива сложен кварцевыми диоритами с отклонениями к габбро-диоритам в эндоконтактах (рис. 3, а, табл. 4). Породы метаглиноземистые, магнезиальные, низкокалиевой толеитовой с переходом к среднекалиевой известково-щелочной серии (рис. 3, б, в, г), кварц-диопсид-гиперстен-нормативные с резким преобладанием нормативного альбита над ортоклазом (в среднем $20,6\%$ и $9,3\%$). Соотношения $\text{Al}/(\text{Mg}+\text{Fe}) - \text{Ca}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ (рис. 3, д) указывают на генерацию расплава в амфиболитах нижней коры. В соответствии с этим температура его оценена в $1200\text{--}1250\text{ }^\circ\text{C}$ [24] при давлении $1,5\text{--}1,4$ ГПа [1]. Рассчитанные [23, 27] для серии образцов температуры кристаллизации варьировали от $1173\text{ }^\circ\text{C}$ до $734\text{ }^\circ\text{C}$ (табл. 5). По основным параметрам состава и соотношениям $\text{Sr} - \text{Rb}/\text{Sr}$ (рис. 4) эти породы близки надсубдукционным гранитоидам М-типа. Учитывая, что массив прорывает складчатые толщи, его формирование может быть отнесено к начальным этапам орогенного процесса. Гранодиориты и граниты восточного выхода и даек, которые мы рассматриваем как дифференциаты того же исходного расплава (Df среднее, $42,9\%$ и $68,3\%$), отличаются несколько большей глиноземистостью и меньшим преобладанием нормативного альбита ($22,7\%$) над ортоклазом ($16,3\%$). Материнский расплав генерировался на уровне дацитоналитовых субстратов (рис. 3, д) при $P = 1,0\text{--}$

$1,1$ ГПа, $T = 1150\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$, температурный интервал кристаллизации – $1087\text{--}747\text{ }^\circ\text{C}$. Состав дает отклонения от гранитоидов М-типа к гранитоидам I-типа.

В составе массивов Холодный, Мокринский, интрузивных выходов бассейна р. Желтая преобладают амфибол-биотитовые граниты высококалиевой известково-щелочной серии с отклонениями к гранодиоритам среднекалиевой известково-щелочной серии в эндоконтактах (табл. 4, рис. 3). Породы метаглиноземисты и слабо пересыщенные глиноземом, гиперстен-нормативные с небольшим преобладанием нормативного альбита над ортоклазом. Железистость широко варьирует ($68\text{--}88\%$) с переходом от магнезиальных к железистым разностям (рис. 3, в). По основным параметрам состава породы близки гранитоидам I-типа активных окраин континента. Соотношения $\text{Al}/(\text{Mg}+\text{Fe}) - \text{Ca}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ (рис. 3, д) указывают на генерацию расплава на границе дацитоналитовых и метаграувакковых субстратов. Расчетные параметры магмогенерации: $P = 1,0$ ГПа, $T = 950\text{ }^\circ\text{C}$, температурный интервал кристаллизации – $1048\text{--}718\text{ }^\circ\text{C}$ для массива Холодный и $P = 0,8\text{--}0,9$ ГПа, $T = 1065\text{--}1071\text{ }^\circ\text{C}$, температурный интервал кристаллизации – $1011\text{--}791\text{ }^\circ\text{C}$ для Мокринского массива (табл. 5).

Сопровождающие массивы дайки лейкогранитов высококварцевые, высококалиевой известково-щелочной серии, метаглиноземистые или незначительно пересыщенные глиноземом (рис. 3, г), железистые, гиперстен-нормативные, с близкими количествами нормативных альбита и ортоклаза. Расчетное давление при формировании расплава не превышало $0,6$ ГПа ($0,2\text{--}0,6$), индекс дифференциации Df составлял $90\text{--}95\%$, что в целом соответствует кристаллизации из остаточных гранитных расплавов. В то же время по соотношениям $f - \text{SiO}_2$ и $\text{Sr} - \text{Rb}/\text{Sr}$ они близки гранитам А-типа посторогенной или рифтогенной обстановки (табл. 4, рис. 3, г, 5). Температура начала их кристаллизации сопоставима с таковой гранитов главных фаций, а для лейкогранитов бассейна р. Желтая даже выше нее (табл. 4). Это позволяет высказать предположение о поступлении дополнительного тепла на завершающих стадиях становления гранитных массивов.

Геохимические особенности пород

Диориты Буор-Юрхского массива по содержаниям микроэлементов (табл. 6) близки гранитоидам андезитового геохимического типа [12]. Они интенсивно обогащены хлором и менее бором и геохимически специализированы на As, Sn, Au, Ag и W. С учетом этой специализации и кристаллизация при высокой активности воды и

ПЕТРОЛОГИЯ ГРАНИТОИДОВ ЮГО-ВОСТОЧНЫХ РАЙОНОВ ХР. ПОЛОУСНОГО

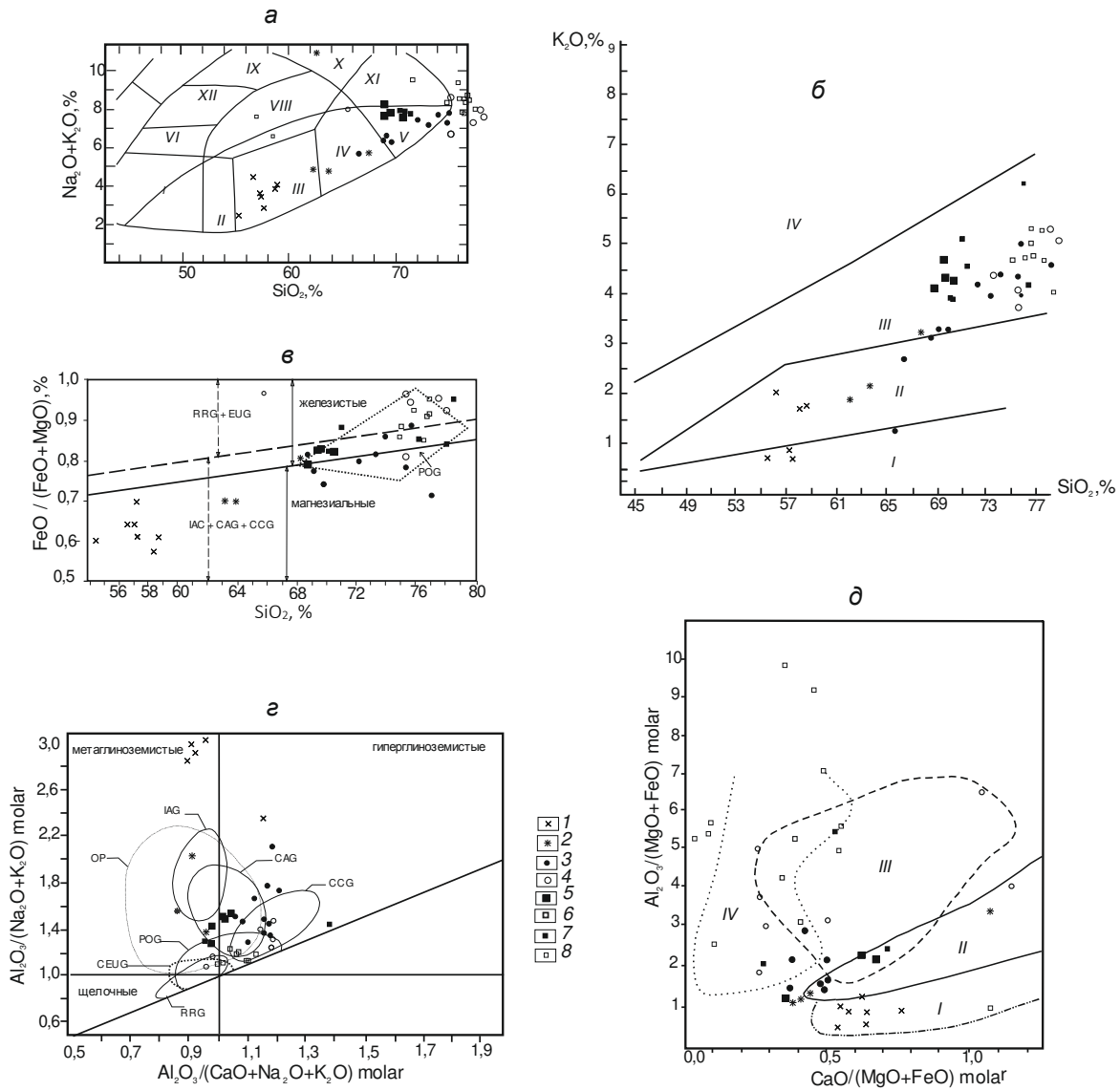


Рис. 3. Петрохимический состав магматических пород:

1 – диориты и 2 – гранодиориты Буор-Юряхского массива; 3 – граниты и 4 – лейкограниты массива Холодный; 5 – граниты и 6 – лейкограниты Мокринского массива; 7 – граниты и 8 – лейкограниты бассейна р. Желтая;

а – классификационная диаграмма. Поля диаграммы [28]: I – габбро, II – габбро-диориты, III – диориты, IV – гранодиориты, V – граниты, VI – субщелочное габбро, VII–VIII – монзониты, IX–X – сиениты, XI – щелочные граниты; б – петрохимические серии гранитоидов. Поля диаграммы [29]: I – низкокалиевая толеитовая, II – среднекалиевая известково-щелочная, III – высококалиевая известково-щелочная, IV – шощонитовая петрохимические серии; в – соотношения SiO_2 и железистости гранитоидов. Поля диаграммы, гранитоиды [25]: IAG – островодужные, CAG – континентальных дуг, CCG – континентальные коллизионные, POG – посторогенные, CEUG – континентального эпейрогенического воздымания, RRG – рифтогенные;

г – глиноземистость гранитоидов. Поля диаграммы [25]; д – субстраты магмогенерации. Поля диаграммы [21]: I – парциальное плавление амфиболитов, II – дацитов и тоналитов, III – метаграувакк, IV – метапелитов

Fig. 3. Petrochemical composition of igneous rocks:

1 – diorites and 2 – granodiorites of Buor-Yuryakh massif; 3 – granites and 4 – leucogranites of Kholodny massif; 5 – granites and 6 – leucogranites of Mokrinsky massif; 7 – granites and 8 – leucogranites of basin of river Zheltaya;

a – classification diagram. Fields of diagram [28]: I – gabbro, II – gabbro-diorites, III – diorites, IV – granodiorites, V – granites; VI – subalkaline gabbro; VII–VIII – monzonites, IX–X – syenites, XI – alkaline granites; б – petrochemical series of granitoids. Fields of diagram [29]: I – low-potassium tholeiitic, II – medium-potassium calc-alkaline, III – high potassium calc-alkaline, IV – shoshonitic petrochemical series; в – ratios of SiO_2 and iron content of granitoids. Fields of diagram, granitoids [25]. IAG – island arcs, CAG – continental arcs, CCG – continental collisional, POG – post-orogenic, CEUG – continental epirogenic uplift, RRG – riftogenic; г – alumina of granitoids. Fields of diagram [25]; д – magma generation substrates. Fields of diagram [21]: I – partial melting of amphibolites, II – dacites and tonalites, III – metagraywacke, IV – metapelites

Средние составы гранитоидов
Average compositions of granitoids

Окислы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	M**	S**	A**	I**
n	8	4	5	4	6	4	3	2	7				
SiO ₂	55,89	65,46	66,20	73,43	75,73	68,58	75,31	69,92	74,52	66,20	70,30	73,80	66,00
TiO ₂	1,00	0,81	0,54	0,38	0,12	0,34	0,03	0,33	0,18	0,60	0,48	0,26	0,45
Al ₂ O ₃	17,30	15,00	15,64	13,45	12,23	14,92	12,83	15,88	13,20	15,30	14,1	12,40	15,50
Fe ₂ O ₃	1,91	2,02	1,03	0,40	0,66	0,54	0,42	1,32	1,12	2,21	0,56	1,24	0,77
FeO	5,78	4,88	3,89	2,54	1,61	3,26	1,15	1,33	0,96	3,15	2,87	1,58	3,57
MnO	0,17	0,08	0,09	0,06	0,03	0,07	0,02	0,06	0,04				
MgO	4,22	2,50	1,17	0,60	0,23	0,79	0,17	0,48	0,42	1,94	1,42	0,20	1,68
CaO	7,30	3,02	2,57	1,32	0,73	2,43	0,69	1,07	0,57	5,11	2,03	0,75	4,15
Na ₂ O	2,62	2,43	3,73	3,07	2,95	3,41	3,41	4,10	3,63	3,75	2,41	4,07	3,01
K ₂ O	1,55	2,49	2,66	4,25	4,57	4,31	4,75	4,46	4,63	1,38	3,96	4,65	3,85
P ₂ O ₅	0,12	0,10	0,12	0,07	0,01	0,08	0,03	0,05	0,02				
CO ₂	0,06	0,12	0,36		0,08	0,15	0,13	0,24	0,30				
H ₂ O ⁻	0,12	0,20	0,18	0,11	0,11			0,14	0,12				
H ₂ O ⁺	1,43	1,48	0,82	0,20	0,42	0,23	0,34	0,86	0,59				
F	0,07	0,11	0,12	0,09	0,10	0,05	0,07	0,05	0,08				
Cl	0,09	0,14	0,07	0,05	0,06	0,03	0,04	0,03	0,04				
Li ₂ O	0,0073	0,0082	0,0094	0,0112	0,0058	0,0123	0,0175	0,0095	0,0224				
Rb ₂ O	0,0043	0,0090	0,0112	0,0118	0,0136	0,0120	0,0241	0,0085	0,0320				
Cs ₂ O	0,001	0,001	0,001		0,001								
S	0,10	0,22	0,16		0,06	0,19	0,17	0,32	0,15				
Ппп	0,75		0,66		0,14				0,39				
Сумма	100,37	100,66	99,85	99,93	99,75	99,40	99,60	100,51	100,87				
Коэффициенты													
DI	42,9	68,3	73,2	87,1	92,1	79,5	93,1	90,1	93,6				
K/Rb	330	227	219	333	311	331	182	481	133				
K/(K+Na)	0,28	0,40	0,32	0,47	0,50	0,45	0,48	0,42	0,46	0,19	0,52	0,43	0,46
Ca/(Na+K)	1,11	0,41	0,26	0,12	0,07	0,21	0,06	0,08	0,05	0,61	0,22	0,12	0,41
Al/(2Ca+Na+K)	0,90	1,23	1,14	1,12	1,10	1,02	1,07	1,18	1,10	0,90	1,18	>1	0,93
(Na+K)/Al	0,35	0,45	0,58	0,72	0,80	0,69	0,80	0,73	0,83	0,50	0,58	0,95	0,59
Fe*/(Fe*+Mg)	0,5	0,6	0,70	0,73	0,84	0,73	0,83	0,75	0,72	0,59	0,55	0,88	0,58
Параметры													
T, °C	1065	1060	917	900	952	880	947	872	983				
P, кбар	14,7	8,8	9,6	4,8	2,7	8,4	3,7	9,1	4,4	8,7	6,4	3,9	9,8

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории физико-химических методов анализа ИГАБМ СО РАН: 1 – диориты и 2 – гранодиориты Буор-Юряхского массива; 3 – гранодиориты; 4 – граниты и 5 – лейкограниты массива Холодный; 6 – граниты и 7 – лейкограниты Мокринского массива; 8 – граниты и 9 – лейкограниты бассейна р. Желтая. n – количество анализов; DI – индекс дифференциации; Fe* = Fe²⁺ + Fe³⁺; **средние составы гранитоидов различных петротипов – по [9]. Определение температуры T – по [24], давления P – по [1].

Notes. The analyses were carried out at the Laboratory of physico-chemical methods of analysis of the Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS: 1 – the diorites and 2 – the granodiorites of the Buor-Yuryakh massif; 3 – the granodiorites, 4 – the granites and 5 – the leucogranites of the Kholodny massif; 6 – the granites and 7 – the leucogranites of the Mokrin sky massif; 8 – the granites and 9 – the leucogranites of the river Zheltaya. n is the number of the analyses; DI is the differentiation index; Fe* = Fe²⁺ + Fe³⁺; **the average compositions of the granitoids of the various petrotypes are according to [9]. The determination of the temperature is according to [24], the pressure – according to [1].

ПЕТРОЛОГИЯ ГРАНИТОИДОВ ЮГО-ВОСТОЧНЫХ РАЙОНОВ ХР. ПОЛОУСНОГО

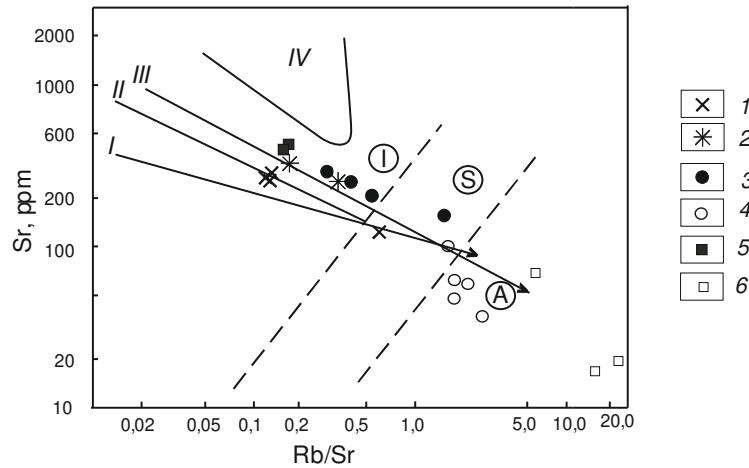


Рис. 4. Соотношения Sr – Rb/Sr в гранитоидах:

1 – диориты и 2 – гранодиориты Буор-Юряхского массива; 3 – граниты и 4 – лейкограниты массива Холодный; 5 – граниты и 6 – лейкограниты бассейна р. Желтая. Тренды дифференциации типовых серий [4]: I – толеитовая островных дуг, II – известково-щелочная островных дуг, III – известково-щелочная активных окраин, IV – рифтовых зон континентов; I, S, A – петротипы гранитоидов

Fig. 4. Sr – Rb/Sr ratios in granitoids:

1 – diorites and 2 – granodiorites of Buor-Yuryakh massif; 3 – granites and 4 – leucogranites of Kholodny massif; 5 – granites and 6 – leucogranites of basin of river Zheltaya. Trends of differentiation of standard series [4]: I – island arc tholeiitic, II – island arc calc-alkaline, III – active margin calc-alkaline, IV – rift zones of continents; I, S, A – petrotypes of granitoids

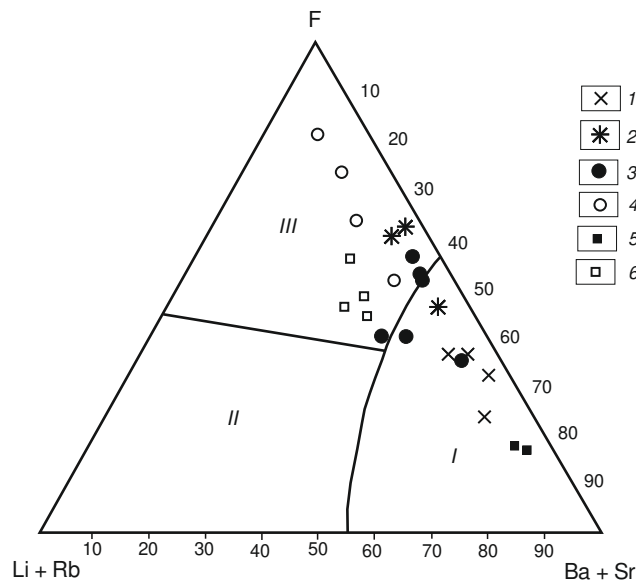


Рис. 5. Соотношения (Li+Rb) – F – (Ba+Sr) в гранитоидах:

1–6 – см. рис. 4. Поля диаграммы [6]: I – нерудоносные, II – ограниченно рудоносные, III – ультрарудоносные гранитоиды

Fig. 5. (Li+Rb) – F – (Ba+Sr) ratios in granitoids:

1–6 – see Fig. 4. Fields of diagram [6]: I – non-ore-bearing, II – limitedly ore-bearing, III – ultra ore-bearing granitoids

**Температуры кристаллизации гранитоидов
Temperatures of crystallization of granitoids**

№ обр.		T _{расплава}	T _{тi}	T _{Zr}	T _{ап}	ASI
Буор-Юряхский массив						
P2387/1	Диорит	1166	852		768	0,835
P2385/7	"	1173	815		71	0,868
O154/4	"	1123	860	734		
P2386/1	"	1134	804		759	0,857
P2385/10	"	1136	848		779	0,931
O155/3	"	1137	845	743	814	0,886
O155/2	"	1130	826	754		
P2386/2	"	1043	907		829	0,946
O156/2	Гранодиорит	1025	846		776	1,176
O156/3	"	1087	869		843	0,905
O157/4	"	1078	844	792		
O157/1	Гранит	1027	932	866	932	2,797
P2385/13	Сиенит	1003	847	747	844	0,902
Массив Холодный						
P2381/6	Гранодиорит	1036	795	717	731	1,055
O148/2	"	1048	844	813	718	1,189
O153/11	Гранит	1020	880		817	1,105
P2380/5	"	1017	876		773	1,214
O149	"	1019	878	838	783	1,168
O153/6	"	998	855	770	846	1,076
P2384/2	"	989	851		809(509)	1,162
P2381/1	"	979	810		828	1,099
P2383/1	Лейкогранит	975	761	721	802	0,971
P2380/9	"	989	789	836	634 (326)	1,186
O153/10	"	974	709	730		1,142
O153/9	"	979	815		806	1,142
O151/2	"	969	747	722		
O151/1	"	975	705	726	739	1,180
O151/3	"	958	638	762	786	
Мокринский массив						
P2393/6	Гранит	1010	825		836	1,011
P2393/4	"	1011	814		891	0,987
799б	"	1015	791			
P2393/1	"	1003	820		871	1,043
799	Лейкогранит	973	652			
P2393/7	"	965	612		842	1,07
P2392/7	"	967	638		845	1,074
P2392/1	Сиенит	1113	894		969	0,776
P2393/8	"	1118	909		959	0,790

Примечание. Температура расплава T – по [27], температура насыщения рутилом – T_{тi}, цирконием T_{Zr}, апатитом T_{ап} – по [23]; ASI – индекс глиноземистости гранитоидов.

Note. The melt temperature T is according to [27]; the temperature of saturation by rutile is T_{тi}, by zirconium is T_{Zr}, by apatite is T_{ап} according to [23]; ASI is the alumina index of granitoids.

хлора – одного из важнейших комплексообразователей Au [5], близких условиям становления золотоносных рудно-магматических систем, мы вправе предполагать генетическую связь с массивом золото-редкометалльного оруденения. Гранодиориты и граниты западного выхода массива наследуют эту специализацию за исключением Au. Условия кристаллизации были также близки, но с учетом низкой концентрации Au в связи с их становлением вероятнее формирование комплексных рудопроявлений Sn–Ag–As.

Гранодиориты и граниты массива Холодный по распределению элементов-примесей в основном соответствуют геохимическому типу палингенных гранитоидов известково-щелочного ряда. Гранодиориты специализированы на Sn, As, Ag, Au; граниты – на As, Ag. Граниты Мокринского массива и мелких массивов бассейна р. Желтая по содержаниям K, Ba, Mo, Pb, W дают отклонения от палингенных известково-щелочных гранитоидов к гранитоидам латитового ряда. Те и другие, как и граниты массива Холодный, геохимически специализированы на As и Ag, а граниты бассейна р. Желтая также и на Au. Они кристаллизуются из водонасыщенного расплава, но при большей активности воды, что предполагает возможность формирования в связи с ними прежде всего Au-Ag оруденения.

Лейкограниты и пегматоидные граниты, сохраняя геохимические черты палингенных гранитоидов известково-щелочного ряда, по содержаниям Li, Rb, Ba сопоставимы с плюмазитовыми гранитами, а по содержаниям F и Sr – с гранитами латитового ряда. Они также кристаллизуются из водонасыщенных расплавов, геохимически специализированы на As и Ag и, в меньшей степени, на Cu и W (табл. 6). На диаграмме (Li+Rb) – F – (Ba+Sr) точки их составов располагаются в поле ультрарудноносных образований (рис. 5). Соответственно, мы вправе ожидать в связи с ними серебро-редкометалльных проявлений.

Обсуждение результатов

Наиболее ранние из рассматриваемых магматических пород габбро-диориты и диориты отличаются от коровых образований низкими содержаниями K, Rb, Th, U, Nb и повышенными – титана (рис. 6), приближаясь по параметрам состава к надсубдукционным образованиям М-типа раннеколлизийного (раннеорогенного) этапа. Гранодиориты и граниты восточного выхода массива и даек отчасти наследуют эти признаки, но дают отклонения к палингенным известково-щелочным гранитоидам I-типа по более низким содержаниям Cr, Co и V, повышенным – F и Li и соотношениям Sr – Rb/Sr (табл. 4, 6, рис. 4). По сравнению с диоритами они несколько

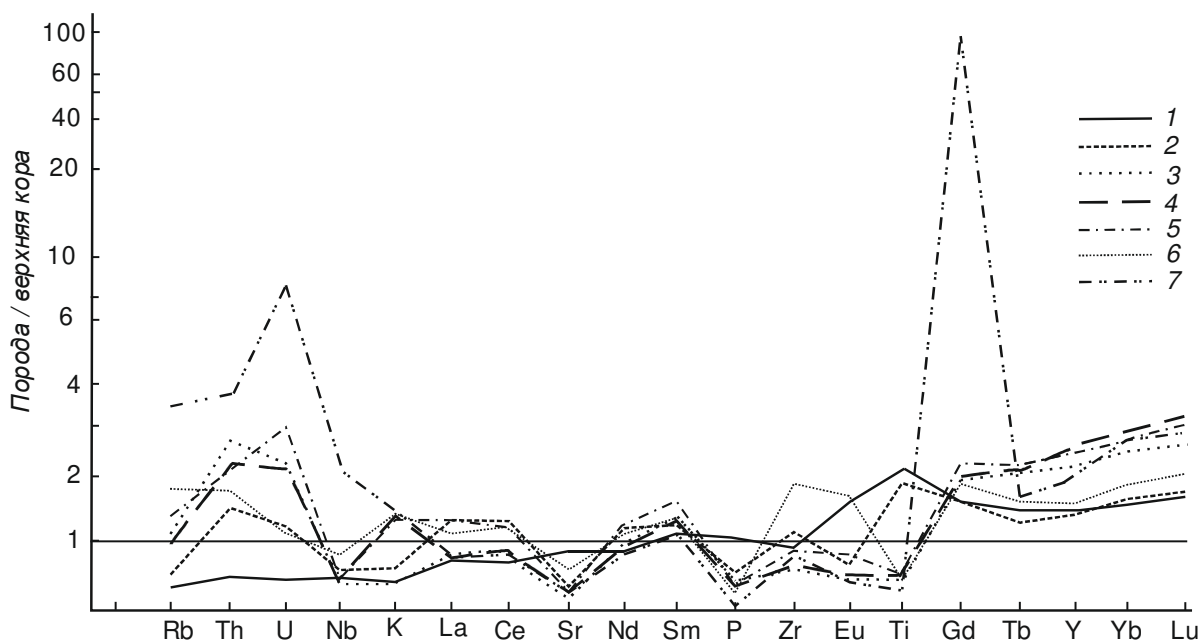


Рис. 6. Спайдер-диаграммы для магматических пород (нормировано по [13]):

1 – диорит и 2 – гранодиорит Буор-Юряхского массива; 3 – гранодиорит; 4 – гранит и 5 – лейкогранит массива Холодный; 6 – гранит и 7 – лейкогранит бассейна р. Желтая

Fig. 6. Spider diagrams for igneous rocks (normalized according to [13]):

1 – diorite and 2 – granodiorite of Buor-Yuryakh massif; 3 – granodiorite, 4 – granite and 5 – leucogranite of Kholodny massif; 6 – granite and 7 – leucogranite of basin of river Zheltaya

Средние содержания микроэлементов в гранитоидах (г/т, Au – мг/т)
Average contents of trace elements in granitoids (g/t, Au – mg/t)

Элементы	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n	9	4	2	11	10	15	4	2	6
F	700/1,4	1100/2	1200/2,1	900/1,1	1000/0,8	500/0,6	700/0,9	500/0,6	8539,00/0,9
Cl	900/9	1400/8,7	700/4,4	500/2,6	600/3,2	300/1,6	400/2,1	300/1,6	400/2,1
Li	34/1,2	38/1,5	44/1,2	52/1,4	27/0,7	57/1,6	82/2,2	44/1,2	104/2,8
Rb	39/0,5	81/0,7	101/0,8	106/0,6	122/0,7	108/0,6	217/1,2	78/0,4	288/1,6
B	33,1/2,8	35,2/2,9	11/0,9	13,2/1,1	11,8/0,9	15,7/1,3	22,5/1,8	8,3/0,7	18,3/1,5
Sn	15,9/13,2	22,5/11,8	13,6/7,2	2,7/0,9	2,8/0,9	4/1,3	4/1,3	1,9/0,6	4,9/1,6
W	2,5/2,3	4,7/2,9	2,5/1,6	2,3/1,1	2/0,9	3,1/1,4	5/2,3	5/2,3	2,5/1,5
Mo	1/1	1,6/1,6	0,8/0,8	1,3/0,9	1,5/1	2,5/1,7	1,5/1	0,3/0,2	0,9/0,6
Pb	12,9/1,2	25/1,7	16/1,1	24/1,3	31,4/1,7	25/1,3	50/2,6	14/0,7	21,5/1,1
Zn	75/1	160/2,7	58/1	30/0,8	33/0,8	58,7/1,5	25/0,6	34/0,9	20/0,5
Cu	48,2/1,2	49/1,7	26/1	23/2,3	47/4,7	19,7/2	25/2,5	27,5/2,7	11,2/1,1
As	36,7/16,7	34,3/10	10/5,6	20/12,5	22/14	15,3/9,3	160/100	30/18,8	14/8,8
Ag	0,33/3,7	0,5/8,9	0,23/4,1	0,28/7,4	0,44/11,6	0,15/3,9	0,35/9,2	0,1/2,6	0,17/4,5
Au	21/7,5	15,5/5,7	10/3,6	2,1/0,8	2,4/0,9			0,5/0,2	16,5/6,1
Nb	11,2/0,7	12/0,6	19,5/1	10,9/0,5	11,1/0,5	14,7/0,7	17,5/0,8	15/0,7	46,7/2,2
Zr	135/0,8	160/1,1	170/1,2	115/0,6	103/0,6			210/1,2	110/0,6
Y	29,3/1,2	15/0,5	48/1,4	36/0,7	39/0,8	28/0,6	40/0,8	27/0,5	53/1,1
Yb	2,9/1,2	11/0,4	4,6/1,2	4,5/1,1	4,9/1,2	2,7/0,7	3/0,8	4,3/1,1	7,1/1,8
Ba	527/1,3	737/1,3	1100/2	605/0,8	427/0,6			2000/2,7	395/0,5
Sr	282/0,7	159/0,4	255/0,6	159/1	94/0,6			350/2,3	38,2/0,3
Cr	95,8/1,8	46,3/2,1	20,5/0,9	21/3,8	25/4,5	34,9/6,2	25/4,5	44/7,9	26,5/4,7
Ni	35,3/0,9	12/0,8	20/1,2	15/4,3	22/6,3	9,1/2,6	8,5/2,4	20/5,7	21/0,6
V	183/1,3	28/0,3	13,5/0,1	23/0,6	15,2/0,4	27,7/0,7	6/0,2	50/1,3	9,6/0,3
Co	24,7/1,8	6/0,8	10,1/1,3	5,8/5,8	4,8/4,8	5,6/5,6	3/3	6,4/6,4	3,8/3,8
Sc	35,7/2	7/0,5	25/1,9	9,9/1,5	7,7/1,2	15/2,3	10/1,5	12/1,8	2,5/0,4
K/Rb	330	227	219	333	311	331	182	481	133
Rb/Sr	0,14	0,51	0,40	0,67	1,30			0,22	7,36
F x (Li+Rb) /(Sr+Ba)	63,2	146,1	128,4	186,1	286,0			26,0	539,2

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории физико-химических методов анализа ИГАБМ СО РАН: 1 – диориты и 2 – гранодиориты Буор-Юряхского массива; 3 – гранодиориты, 4 – граниты и 5 – лейкограниты массива Холодный; 6 – граниты и 7 – лейкограниты Мокринского массива; 8 – граниты и 9 – лейкограниты бассейна р. Желтая; n – количество анализов. В числителе – содержание микроэлемента, в знаменателе – отношение к кларку (Kk – кларк концентрации по [10]). Жирным шрифтом выделены значимые положительные отклонения от кларка.

Notes. The analyses were carried out at the Laboratory of physico-chemical methods of analysis of the Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS: 1 – the diorites and 2 – the granodiorites of the Buor-Yuryakh massif; 3 – the granodiorites, 4 – the granites and 5 – the leucogranites of the Kholodny massif; 6 – the granites and 7 – the leucogranites of the Mokrinsky massif; 8 – the granites and 9 – the leucogranites of the river Zheltaya. n is the number of the analyses. In the numerator there is the content of the trace element, in the denominator there is the ratio to the percent abundance (Kk is the percent abundance of the concentration according to [10]). The significant positive deviations from the percent abundance are marked out in bold.

обогащены Th и LREE (табл. 7), что не характерно для дифференцирующего расплава и требует поступления этих элементов из внешних источников. Диориты специализированы на широкий круг рудных элементов: As, Sn, Ag, W, но главным ассоциирующим с ними полезным элементом является Au. Формированию в связи с ними комплексных его проявлений способствует и обогащение пород хлором, и кристаллизация в условиях его высокой активности и активности воды, что предопределяет возможность отделения рудоносных гидротерм. Гранодиориты и граниты массива геохимически специализированы на те же элементы, кроме Au, и кристаллизовались в близких условиях, но с учетом низкой концентрации Au в связи с их становлением вероятнее формирование комплексных рудопроявлений Sn–Ag–As–Bi.

Граниты Холодного и Мокринского массивов и бассейна р. Желтая по составу и величине основного геохимического коэффициента Л.В. Таусона [12] $= F \times (Li+Rb)/(Ba+Sr)$ близки геохимическому типу палингенных известково-щелочных гранитоидов I-типа активных окраин континента, но с отклонениями к мантийно-коровым гранитам А-типа по высокой железистости, низким значениям $Ca/(Na+K)$, повышенным $-Al/(2Ca+Na+K)$ и составу биотитов. Гранодиориты массива Холодный геохимически специализированы на Sn, As, Ag, Au; граниты – на As,

Ag, Cu. Они кристаллизовались из водонасыщенного расплава при высокой активности воды, но при невысоких содержаниях фтора и бора – основных комплексообразователей редких металлов. Граниты Мокринского массива и мелких массивов бассейна р. Желтая отличаются от палингенных известково-щелочных гранитоидов низкими содержаниями рубидия и по содержаниям K, Ba, Mo, Pb, W близки гранитам латитового ряда. Они геохимически специализированы на As и Ag, а граниты бассейна р. Желтая также и на Au. Кристаллизация проходила из насыщенного водой расплава, но при относительно невысокой ее активности, поэтому мы предполагаем возможность формирования в связи с ними вкрапленного или миаролового (в пегматитах) оруденения с ведущей ролью Ag и As.

Лейкограниты наиболее близки к гранитам А-типа и по параметрам состава определяются уже как посторогенные или рифтогенные. Соотношения в них $(Li+Rb) - F - (Ba+Sr)$ отвечают ультрарудоносным образованиям (рис. 5). Кристаллизация из водонасыщенного расплава при высокой активности воды благоприятна для формирования рудоносных гидротерм, также с ведущей ролью Ag и As.

Обращают на себя внимание стабильно высокие содержания HREE, Y, U и Th в гранитах, не сопоставимые с таковыми ни в коровых образованиях, ни в примитивной мантии (табл. 7). Это

Т а б л и ц а 7

Содержание редкоземельных и радиоактивных элементов в гранитоидах
Content of rare earth and radioactive elements in granitoids

Элемент	Буор-Юряхский массив		Массив Холодный			Бассейн р. Желтая	
	P2387/1 диорит	O154/2 гранит	P2381/6 гранодиорит	O153/11 гранит	O153/9 лейкогранит	I22/7 гранит	O178/8 лейкогранит
Th	5,1	16	29	27	23	15	40
U	1,18	3,46	6,1	6,2	8,9	4,82	23
Hf	4,89	6,7	4,64	8,7	6	12	6,7
Ta	0,78	1,3	1,78	1,53	2,24	1,61	4,41
La	23	39	25	39	39	37	23
Ce	46	81	53	78	77	90	52
Pr	5,6	9	6,6	9,4	8,9	10,7	5,8
Nd	22	31	25	36	32	39,5	20
Sm	5,1	5,6	6,2	8,2	7,35	8,1	4,89
Eu	1,43	0,615	0,4	1,135	0,68	2,2	0,39
Gd	6,15	6,15	7,4	9,6	8,65	8,9	5,7
Tb	0,94	0,815	1,315	1,41	1,42	1,21	1
Dy	6,05	5,11	8,45	8,75	9,3	7,25	6,75
Ho	1,22	1,06	1,75	1,71	1,87	1,39	1,42
Er	3,68	3,44	5,6	5,15	5,9	4,46	4,845
Tm	0,49	0,5	0,84	0,7	0,89	0,62	0,78
Yb	3,315	3,475	5,5	4,795	5,85	4,165	5,65
Lu	0,54	0,56	0,84	0,76	0,89	0,66	0,94

Примечание. ИСП-МС – анализ, выполнен под руководством О.В. Зарубиной в Институте геохимии СО РАН, г. Иркутск
Note. The ICP-MS analysis was carried out under O.V. Zarubina's supervision at the Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk

указывает на поступление дополнительных, богатых этими элементами флюидов в процессе магмогенерации. Такие повышенные содержания HREE присущи прежде всего щелочным базальтоидным расплавам, производным метасоматизированной мантии [7]. Максимальными их содержаниями обладают лейкограниты. Расчетное давление при формировании последних (0,4–0,6 ГПа) и высокие значения индекса дифференциации соответствуют производным остаточных гранитных расплавов. Но температуры кристаллизации лейкогранитов близки или даже выше, чем вмещающих гранитов, т.е. при их становлении вместе с привнесом U, Th, HREE имел место и дополнительный разогрев гранитных магматических очагов (табл. 7).

Установлена также общность геохимической специализации всех изученных пород вне зависимости от их состава и последовательности внедрения. Все они специализированы на As и Ag и в большинстве своем на Au и обладают повышенными содержаниями Cl. Это позволяет предполагать привнос, хотя бы части перечисленных элементов из внешнего источника. С учетом петрогеохимической специфики пород логично предполагать глубинный его характер, что косвенно подтверждается повышенными концентрациями в большинстве из них Cr, Ni, Co, присущих основным расплавам.

Заключение

Территория зоны сочленения Селенняхского, Туостяхского и Полоусного антиклинорий в меловое время была ареной проявления интенсивного гранитоидного магматизма – от надсубдукционного раннеколлизийного (раннеорогенного) М-типа до позднеколлизийного активной континентальной окраины I-типа и посторогенного или рифтогенного А-типа. Все гранитоиды геохимически специализированы на As и Ag и в большинстве своем также на Au. Условия их кристаллизации обуславливают возможность генерации в связи с ними золото-редкометалльного и/или серебро-мышьякового оруденения. Особенности химического состава пород, общность их геохимической специализации и характер распределения в них редких и редкоземельных элементов указывают на наличие постоянно действовавшего внешнего (глубинного) источника, обусловившего поступление дополнительного тепла и богатых U, Th и HREE флюидов, по всей вероятности связанных с подъемом щелочно-основных диапиров.

Литература

1. *Беляев Г.М., Рудник В.А.* Формационно-генетические типы гранитоидов. Л.: Недра, 1978. 168 с.
2. *Гоневчук В.Г.* Оловоносные системы Дальнего Востока: магматизм и рудогенез. Владивосток: Дальнаука, 2002. 297 с.
3. *Гусев А.И.* Типизация гранитоидов на основе составов биотитов // Успехи современного естествознания. 2009. № 4. С. 54–57.
4. *Даценко В.М.* Петрогеохимическая типизация гранитоидов юго-западного обрамления Сибирской платформы // Материалы Второго Всеросс. петрограф. совещ. Т. 2. Сыктывкар, 2000. С. 270–274.
5. *Диман Е.Н., Некрасов И.Я.* Высокотемпературная растворимость золота в воде и генезис золоторудных месторождений // Изв. вузов. Геология и разведка. 1987. № 11. С. 66–74.
6. *Козлов В.Д.* Геохимия и рудоносность гранитоидов редкометалльных провинций. Новосибирск: Наука, 1985. 304 с.
7. *Леснов Ф.П.* Редкоземельные элементы в ультрамафических и мафических породах и их минералах. Кн. 1. Главные типы пород, породообразующие минералы. Новосибирск: Гео, 2009. 403 с.
8. *Ляхович В.В.* Акцессорные минералы горных пород. М.: Недра, 1979. 296 с.
9. *Ненахов В.М., Иванников В.В., Кузнецов Л.В., Стрик Ю.Н.* Особенности изучения и геологического картирования коллизийных гранитоидов. М.: Роскомнедра, 1992. 101 с.
10. *Овчинников Л.Н.* Прикладная геохимия. М.: Недра, 1990. 248 с.
11. *Самусин А.И.* Государственная геологическая карта СССР м-ба 1:200 000. Серия Яно-Индиго-Иркутская. Лист R-54-XXIX-XXX. Объяснительная записка. М., 1979. 80 с.
12. *Таусон Л.В.* Типизация магматитов и их потенциальная рудоносность // 27-й МКГ. Т. 9. Петрология. М.: Наука, 1984. С. 221–228.
13. *Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М.* Континентальная кора, ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 380 с.
14. *Трошин Ю.П., Гребенщикова В.И., Антонов А.Ю.* Летучие компоненты в биотитах и металлогеническая специализация интрузий // Минералогические критерии оценки рудоносности. Л.: Наука, 1981. С. 73–83.
15. *Трунилина В.А., Орлов Ю.С., Роев С.П., Зайцев А.И.* Состав и генетические аспекты формирования гранитов А-типа Верхояно-Колымской складчатой области // Отечественная геология. 2008. № 5. С. 99–109.
16. *Трунилина В.А., Роев С.П., Орлов Ю.С.* Петро- и геохимические особенности гранитоидов Северного батолитового пояса Верхояно-Колымских мезозой как критерии их генезиса и геодинамической обстановки формирования // Отечественная геология. 2011. № 5. С. 97–106.

17. Щеглов А.Д., Говоров И.Н. Нелинейная металлогения. Л.: Недра, 1987. 325 с.

18. *Brimhall G.H., Crerar D.A.* Ore fluids: Magmatic to supergene. In thermodynamic modeling of geological materials // Minerals, Fluids and Melts. Reviews in mineralogy. Michigan, 1987. V. 17. P. 235–321.

19. *Brown G.G.* A comment on the role of water in the partial fusion of crystal rocks // Earth and Planet. Sci. Lett. 1970. V. 9. P. 13–22.

20. *Foerster H.J.* Halogen Fugicities (HF, HCl) in Melts and Fluids. A. Surv. of Published Data // Z. geol. Wissenschaft. 1990. V.18. P. 255–266.

21. *Gerdes A., Worner G., Henk A.* Post-collisional granite generation and HT-LP metamorphism by radiogenic heating: the Variscan South Bohemian Batholith // J.Geol. Soc. London. 2000. V. 157. P. 577–587.

22. *Henry D.A., Guidotti Ch.V., Thompson J.A.* The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: implication for geothermometry and Ti-substitution mechanism // Amer. Miner. 2005. V. 90. P. 316–328.

23. *Janoušek V., Farrow C.M., Erban V.* Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit) // Journal of Petrology. 2006. V. 47. P. 1255–1259.

24. *Jung S., Pfander J.A.* Source composition and melting temperatures of orogenic granitoids – constrains from CaO/Na₂O, Al₂O₃/TiO₂ and accessory mineral saturation thermometry // European Journal of Mineralogy. 2007. No. 1. P. 5–40.

25. *Maniar P.D., Piccoli P.M.* Tectonic discrimination of granitoids // Geological Society of America Bulletin. 1989. V. 101. P. 635–643.

26. *Uchida E., Endo S., Makino M.* Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits // Resource Geology. 2007. V. 57, no. 1. P. 47–56.

27. *Von Rainer Th.* Abshatzung der Bildungstemperatur magmatischerv SCHMELZER // Zeit. Geol. Wiss. 1990. B. 18, № 1. S. 5–14.

28. *Wilson M.* Igneous petrogenesis. Unwin Hayman. London. 1989.

29. *Whiteford D.G., Nicholls I.A. and Taylor S.R.* Spatial variations in the geochemistry of quaternary lavas across the Sunda arc in Java and Bali // Contribs. Mineral. and Petrol. 1979. V. 70. P. 341–356.

30. *Wones D.R., Eugster H.P.* Stability of biotite: experiment, theory and application // Amer. Mineral. 1985. No. 9. P. 1228–1272.

31. *Yavuz F.* A revised program for microprobe-derived amphibole analyses using the IMA rules // Computers & Geosciences. 1999. V. 25, no. 8. P. 909–927. DOI: 10.1016/S0098-3004(99) 00055-2.

32. *Yavuz F.* Win Pyrox: A windows program for pyroxene calculation classification and thermobarometry // American Mineral. 2013. V. 98. P. 1338–1359. DOI: 10.2138/am.2013.4292.

References

1. *Belyaev G.M., Rudnik V.A.* Formatsionno-geneticheskie tipy granitoidov. L.: Nedra, 1978. 168 s.

2. *Gonevchuk V.G.* Olovonosnye sistemy Dal'nego Vostoka: magmatizm i rudogenez. Vladivostok: Dal'nauka, 2002. 297 s.

3. *Gusev A.I.* Tipizatsiya granitoidov na osnove sostavov biotitov // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2009. № 4. S. 54–57.

4. *Datsenko V.M.* Petrogeokhimicheskaya tipizatsiya granitoidov yugo-zapadnogo obramleniya Sibirskoy platformy // Materialy Vtorogo Vseross. Petrograf. Sovesch. T. 2. Syvtyvkar, 2000. S. 270–274.

5. *Diman E.N., Nekrasov I.YA.* Vysokotemperaturnaya rastvorimost' zolota v vode i genezis zolotorudnykh mestorozhdenij // Izv. VUZov. Geologiya i razvedka. 1987. № 11. S. 66–74.

6. *Kozlov V.D.* Geokhimiya i rudonosnost' granitoidov redkometall'nykh provintsiy. Novosibirsk: Nauka, 1985. 304 s.

7. *Lesnov F.P.* Redkozemel'nye elementy v ul'tramaficheskikh i maficheskikh porodakh i ikh mineralakh. Kniga 1. Glavnye tipy porod, porodobrazuyuschie mineraly. Novosibirsk: Geo, 2009. 403 s.

8. *Lyakhovich V.V.* Aktsessornye mineraly gornyx porod. M.: Nedra, 1979. 296 s.

9. *Nenakhov V.M., Ivannikov V.V., Kuznetsov L.V., Strik Yu.N.* Osobennosti izucheniya i geologicheskogo kartirovaniya kollizionnykh granitoidov. M.: Roskomnedra, 1992. 101 s.

10. *Ovchinnikov L.N.* Prikladnaya geokhimiya. M.: Nedra, 1990. 248 s.

11. *Samusin A.I.* Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR m-ba 1:200 000. Seriya Yano-Indigirskaya. List R-54-XXIX-XXX. Ob'yasnitel'naya zapiska. M., 1979. 49 s.

12. *Tauson L.V.* Tipizatsiya magmatitov i ikh potentsial'naya rudonosnost' // 27-j MGK. T. 9. Petrologiya. M.: Nauka, 1984. S. 221–228.

13. *Tejlor S.R., Mak-Lennan S.M.* Kontinental'naya kora, ee sostav i evolyutsiya. M.: Mir, 1988. 380 s.

14. *Troshin Yu.P., Grebenshikova V.I., Antonov A.Yu.* Letuchie komponenty v biotitakh i metallogenicheskaya spetsializatsiya intruzij // Mineralogicheskie kriterii otsenki rudonosnosti. L.: Nauka, 1981. S. 73–83.

15. *Trunilina V.A., Orlov Yu.S., Roev S.P., Zajtsev A.I.* Sostav i geneticheskie aspekty formirovaniya granitov A-tipa Verkhoyano-Kolymskoj skladchatoy oblasti // Otechestvennaya geologiya. 2008. № 5. S. 99–109.

16. *Trunilina V.A., Roev S.P., Orlov Yu.S.* Petro- i geokhimicheskie osobennosti granitoidov Severnogo batolitovogo poyasa Verkhoyano-Kolymskikh mezozoid kak kriterii ikh genezisa i geodinamicheskoy obstanovki formirovaniya // *Otechestvennaya geologiya*. 2011. № 5. S. 97–106.
17. *Scheglov A.D., Govorov I.N.* Nelinejnaya metallogeniya. L.: Nedra, 1987. 325 s.
18. *Brimhall G.H., Crerar D.A.* Ore fluids: Magmatic to supergene. In *thermodynamic modeling of geological materials // Minerals, Fluids and Melts. Reviews in mineralogy*. Michigan, 1987. V. 17. P. 235–321.
19. *Brown G.G.* A comment on the role of water in the partial fusion of crystal rocks // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1970. V. 9. P. 13–22. DOI:10.1016/0012-821X(70)90135-4.
20. *Foerster H.J.* Halogen Fugicities (HF, HCl) in Melts and Fluids. A. Surv. of Published Data // *Z. geol. Wissenschaft*. 1990. V.18. P. 255–266.
21. *Gerdes A., Worner G., Henk A.* Post-collisional granite generation and HT-LP metamorphism by radiogenic heating: the Variscan South Bohemian Batholith // *J.Geol. Soc. London*. 2000. V. 157. P. 577–587. DOI: 10.1144/jgs.157.3.577.
22. *Henry D.A., Guidotti Ch.V., Thompson J.A.* The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: implication for geothermometry and Ti-substitution mechanism // *Amer. Miner.* 2005. V. 90. P. 316–328. DOI: 10.2138/am.2005.1498.
23. *Janoušek V., Farrow C. M., Erban, V.* Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit) // *Journal of Petrology*. 2006. V. 47. P. 1255–1259. DOI: 10.1093/petrology/egl013.
24. *Jung S., Pfander J.A.* Source composition and melting temperatures of orogenic granitoids – constrains from CaO/Na₂O, Al₂O₃/TiO₂ and accessory mineral saturation thermometry // *European Journal of Mineralogy*. 2007. No. 1. P. 5–40. DOI: 10.1127/0935-1221/2007/0019-1774.
25. *Maniar P.D., Piccoli P.M.* Tectonic discrimination of granitoids // *Geological Society of America Bulletin*. 1989. V. 101. P. 635–643. DOI: 10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG> 2.3.CO;2.
26. *Uchida E., Endo S., Makino M.* Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits // *Resource Geology*. 2007. V. 57, no. 1. P. 47–56. DOI: 10.1111/j.1751-3928.2006.00004.x.
27. *Von Rainer Th.* Abshatzung der Bildungstemperature magmatischerv SCHMELZER // *Zeit. Geol. Wiss.* 1990. B. 18, no. 1. P. 5–14.
28. *Wilson M.* Igneous petrogenesis. Unwin Hayman. London. 1989.
29. *Whiteford D.G., Nicholls I.A. and Taylor S.R.* Spatial variations in the geochemistry of quaternary lavas across the Sunda arc in Java and Bali // *Contribs. Mineral. and Petrol.* 1979. V. 70. P. 341–356. DOI: 10.1007/BF00375361.
30. *Wones D.R., Eugster H.P.* Stability of biotite: experiment, theory and application // *Amer. Mineral.* 1985. No. 9. P. 1228–1272.
31. *Yavuz F.* A revised program for microprobe-derived amphibole analyses using the IMA rules // *Computers & Geosciences*. 1999. V. 25, no. 8. P. 909–927. DOI: 10.1016/S0098-3004(99)00055-2
32. *Yavuz F.* Win Pyrox: A Windows program for pyroxene calculation classification and thermobarometry // *American Mineral.* 2013. V. 98. P. 1338–1359. DOI: 10.2138/am.2013.4292.

Поступила в редакцию 19.07.2018

Об авторах

ТРУНИЛИНА Вера Аркадьевна, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия, <http://orcid.org/0000-0003-0910-2386>, v.a.trunilina@diamond.ysn.ru;

РОЕВ Сергей Прокопьевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия, <http://orcid.org/0000-0003-3911-2491>, s.p.roev@diamond.ysn.ru;

ЗАЙЦЕВ Альберт Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия, <http://orcid.org/0000-0001-8799-1342>, a.i.zaitsev@diamond.ysn.ru.

About the authors

TRUNILINA Vera Arkadievna, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Chief Researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenin Ave., Yakutsk, 677980, Russia, <http://orcid.org/0000-0003-0910-2386>, v.a.trunilina@diamond.ysn.ru;

ROEV Sergei Prokopievitch, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenin Ave., Yakutsk, 677980, Russia, <http://orcid.org/0000-0003-3911-2491>, s.p.roev@diamond.ysn.ru;

ZAITSEV Albert Ivanovitch, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenin Ave., Yakutsk, 677980, Russia, <http://orcid.org/0000-0001-8799-1342>, a.i.zaitsev@diamond.ysn.ru.