



ПЕТРОЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ ТУРМАЛИНОВЫХ ЛЕЙКОГРАНИТОВ ГОРНОГО АЛТАЯ

А. И. Гусев, Е. М. Табакаева

Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В. М. Шукшина, Бийск, Россия

Приведены данные по петрогеохимии, петрологии и рудоносности турмалиновых лейкогранитов Горного Алтая, объединенных в две группы: 1) с ассоциацией минералов мусковит-биотит-турмалин-кварц-полевых шпатов (редко гранатов), 2) с ассоциацией турмалин-мусковит-кварц-полевых шпатов (иногда гранатов). Они отнесены к пералюминиевому и железистому типам пород. По возрасту они объединены также в две группы: 1) раннеюрские и позднепермско-среднетриасовые, 2) раннедевонские и раннетриасовые. Приведены обоснования их образования за счет плавления пералюминиевых лейкогранитов, метаграувакк и фельзических пелитов и за счет фракционирования базальтоидных и андезитовидных источников. В турмалиновых лейкогранитах проявлены два типа тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ (W и M). Показано, что проявление обоих типов и увеличение концентраций вольфрама связано с повышением кислотности среды. С массивами, в составе которых имеются турмалиновые лейкограниты, пространственно и парагенетически связаны различные типы оруденения W, Mo, Sc, U, Be.

Ключевые слова: турмалиновые лейкограниты, возрастные группы, источники плавления, тетрадный эффект фракционирования РЗЭ M- и W-типов, кислотность среды, Mo, Sc, U, Be.

PETROLOGY AND GEOCHEMISTRY OF TURMALINE LEUCOGRANITES OF GORNY ALTAI

A. I. Gusev, E. M. Tabakaeva

Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University, Biysk, Russia

Data on petro-geochemistry, petrology and ore-bearing properties of tourmaline leucogranites of the Gorny Altai are presented. They are divided in 2 groups: 1 – leucogranites with association of minerals muscovite-biotite-tourmaline-quartz-feldspars (rarely garnets), and 2 – leucogranites with the association tourmaline-muscovite-quartz-feldspar, sometimes garnet. Tourmaline leucogranites of the region are referred to the peraluminous and ferruginous types of rocks. By age, they are also divided in 2 groups: 1 – Early Jurassic and Late Permian-Middle Triassic, and 2 – Early Devonian and Early Triassic. Reasons for their formation are given as follows due to the melting of peraluminous leucogranites, metagrawacks and felsic pelites, and 2 due to the fractionation of basaltoid and andesitoid sources. In tourmaline leucogranites, two types of tetradic fractionation effect (TFE) of REEs are apparent: W and M. It is shown that the manifestation of both types of TFE of REEs and an increase in tungsten concentrations are associated with an increase in the medium acidity. Different types of W, Mo, Sc, U, Be mineralization are spatially and paragenetically related to massifs that have tourmaline leucogranites in their composition.

Keywords: tourmaline leucogranites, age groups, melting sources, tetradic fractionation effect of REEs of M- and W-types, medium acidity, Mo, Sc, U, Be.

DOI 10.20403/2078-0575-2018-2-39-48

Впервые повышенные концентрации турмалина в гранитоидах Алтая отмечены коллективом геологов СНИИГГиМС в массивах Джулалю (до 4000 г/т), Чиндагатуйском (до 1000 г/т), Ак-Алахинском (до 100 г/т), Калгутинском (до 500 г/т) [8]. Позднее турмалин зафиксирован в гранитоидах Барбургазинского, Синюшинского массивов [5] и Кумирского штока [4]. Актуальность исследования турмалиновых гранитоидов региона определяется тем, что с массивами, в составе которых имеются в своем составе такие разности пород, пространственно и парагенетически связаны различные типы оруденения W, Mo, Sc, U, Be. Цель исследования – осветить новые данные по петрогеохимическим особенностям турмалиновых гранитоидов Алтая, установить их генезис и особенности рудоносности.

Петрографические и геохимические аспекты турмалиновых гранитоидов Горного Алтая

Изучение турмалина в гранитоидах различных массивов показало, что он приурочен к лейкогранитам заключительных фаз внедрения и образует тонкую вкрапленность (0,2–0,5 мм), редко гломеропорфировые скопления выделений (до 1 мм). В некоторых массивах помимо вкрапленности отмечаются нодулы турмалина размерами 0,5–1,5 см в поперечнике. Чаще всего турмалин в массе лейкогранитов образует гипидиоморфные выделения призматической формы и корродирует плагиоклаз, биотит и калиевый полевой шпат. С мусковитом он имеет взаимокоррозионные отношения. Все турмалиносодержащие породы могут быть объединены в две группы: 1) турмалиносодержащие двуслюдяные лейкограниты с ассоциацией минералов –

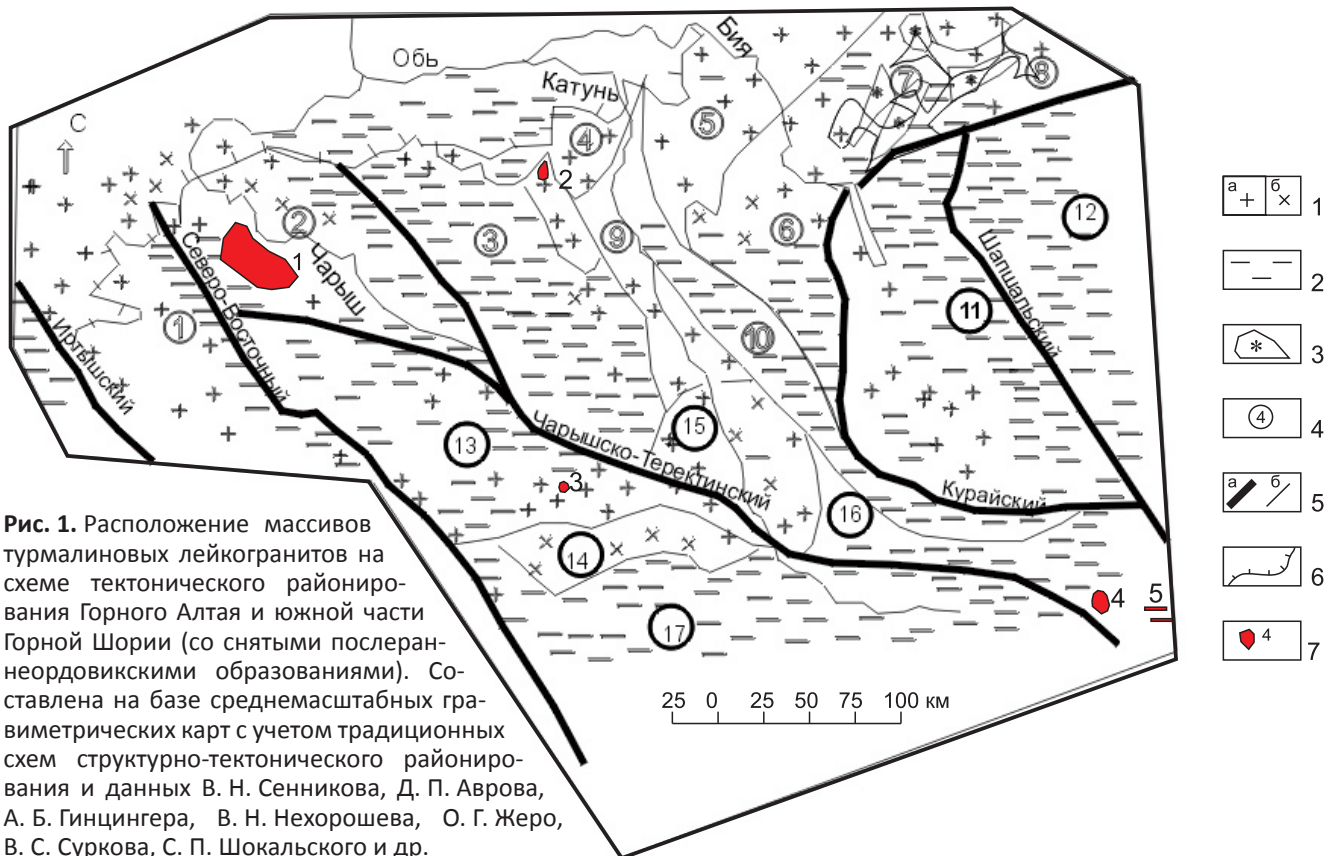


Рис. 1. Расположение массивов турмалиновых лейкогранитов на схеме тектонического районирования Горного Алтая и южной части Горной Шории (со снятыми послераннеордовикскими образованиями). Составлена на базе среднемасштабных гравиметрических карт с учетом традиционных схем структурно-тектонического районирования и данных В. Н. Сенникова, Д. П. Аврова, А. Б. Гинцингера, В. Н. Нехорошева, О. Г. Жеро, В. С. Суркова, С. П. Шокальского и др.

1 – площади с положительным полем силы тяжести: а – с выходом плотных пород R_3 – E_2 на поверхность, б – перекрытые низкоплотными породами E – D ; 2 – площади с отрицательным полем силы тяжести; 3 – ранне-позднекембрийские гранитоиды; 4 – тектонические блоки (1 – Рудно-Алтайский, 2 – Чарышский, 3 – Ануйский, 4 – Каимский, 5 – Бийский, 6 – Уйменско-Лебедской, 7 – Мрасский, 8 – Верхнелебедской, 9 – Катунский, 10 – Кадрино-Баратальский, 11 – Телецко-Чулышманский, 12 – Западно-Саянский, 13 – Коргоно-Терехтинский, 14 – Южно-Терехтинский, 15 – Онгудайский, 16 – Чуйский; 17 – Холзуно-Чуйский); 5 – межблоковые разломы: а – трансрегиональные, б – региональные; 6 – граница горного сооружения и Бийско-Барнаульской впадины; 7 – выходы турмалиновых лейкогранитов и номера массивов (1 – Синюшинский, 2 – Точильный, 3 – Кумирский, 4 – Ак-Алахинский, 5 – дайки эльванов Южно-Калгутинского месторождения)

мусковит-биотит-турмалин-кварц-полевые шпаты, редко гранат (интрузивы Джулалю, Чиндагатуй, Калгутинский, Точильный шток, дайки эльванов Южно-Калгутинского месторождения); 2) мусковит-турмалиновые лейкограниты с ассоциацией минералов – турмалин-мусковит-кварц-полевые шпаты, иногда гранат (Ак-Алахинский, апофиза Синюшинского массива, Кумирский шток) (рис. 1).

Возраст интрузий первой группы раннеюрский и позднепермский – среднетриасовый, а второй – раннедевонский и раннетриасовый. Раннедевонский возраст Кумирского штока принят по [4]. Во всех случаях турмалин вкрапленников имеет магматическую природу. Ранее нами установлено, что все составы турмалинов изученных массивов на классификационных диаграммах попадают в поле шерлового турмалина и оксишерлового фойтита. Следует отметить, что турмалины первой группы раннеюрского возраста (массивов Калгутинского, Джулалю и даек эльванов) по составу приближаются к границе дравитового ряда. Эта группа турмалинов отличается от других самыми низкими концентрациями суммы РЗЭ, Nb, Y, Zr, Hf, Ga и повышенными содержаниями Mg, F, W, Ge, Ag, V [3].

Представительные анализы турмалиновых лейкогранитов приведены в таблице.

По химизму турмалиновые гранитоиды относятся к подотряду нормально- и низкощелочных и умеренно-щелочных лейкогранитов с суммой щелочей менее 8 % или более 8 % по [7].

Турмалиновые лейкограниты региона характеризуются пониженными концентрациями титана, стронция, бария, циркония и повышенными – железа, суммы щелочей, галлия, ниобия, что свойственно анорогенным образованиям. В них отмечаются варьирующие содержания вольфрама, цезия, рубидия. Сумма РЗЭ колеблется от 37,44 до 278,4 г/т. Отношения U/Th в породах менее 1, что свидетельствует об отсутствии наложенных на них процессов. Значительные колебания нормированных к хондриту отношений La/Yb_N и La/Sm_N указывают на разную степень фракционирования моделей распределения РЗЭ. В породах проявлены два типа тетрадного эффекта фракционирования (ТЭФ) РЗЭ: М (пороговое значение выше 1,1) и W (пороговое значение менее 0,9) (см. таблицу).

Соотношение $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$ – $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ позволяет относить все турмали-



Представительные анализы турмалиновых лейкогранитов (оксиды – мас. %, элементы – г/т)

Компонент	Порода									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	75,01	75,26	75,49	75,6	76,0	74,5	74,7	74,2	74,7	75,1
TiO ₂	0,02	0,02	0,14	0,11	0,02	0,23	0,21	0,20	0,07	0,06
Al ₂ O ₃	14,41	14,37	12,7	12,8	13,7	14,1	14,0	14,2	14,5	14,4
Fe ₂ O ₃	0,49	0,46	1,01	0,93	0,13	0,6	0,55	0,65	0,37	0,34
FeO	0,45	0,41	0,97	0,9	0,11	2,1	1,95	2,0	0,33	0,28
MnO	0,04	0,03	0,06	0,05	0,02	0,05	0,04	0,05	0,07	0,08
MgO	0,11	0,10	0,26	0,22	0,1	0,45	0,3	0,43	0,14	0,15
CaO	0,07	0,08	0,72	0,6	0,31	1,1	1,0	1,15	0,42	0,5
Na ₂ O	4,47	4,51	3,89	4,1	4,46	3,0	2,9	3,1	3,95	4,1
K ₂ O	4,10	4,15	4,54	4,3	4,0	4,6	4,55	4,7	4,43	4,41
P ₂ O ₅	0,06	0,06	0,11	0,1	0,1	0,4	0,45	0,46	0,22	0,21
П.п.п.	0,61	0,48	0,4	0,3	0,36	0,33	0,28	0,3	0,87	0,8
Σ	99,76	99,98	99,97	99,98	99,5	99,95	99,94	99,97	100,1	99,96
V	4,5	4,3	5,1	4,8	3,5	14	12	11	4,6	5,2
Cr	16	15	21,1	22,3	11,8	8	6	7	12,5	13,1
Ba	78	123	37,2	38,1	7,8	97	95	94	45,7	46,3
Ni	2,1	2,0	2,2	2,1	1,9	4	3,3	4,2	3,4	3,5
Co	1,0	0,9	3,1	2,8	1,2	2	1,8	2	2,3	2,4
Cu	2,5	2,3	18,3	17,5	12,7	5,7	4,8	5,8	18,9	17,5
Zn	63	50	45,9	46,3	23,7	28,9	30,2	27,4	34,7	35,8
Pb	10,2	9,8	12,1	13,1	9,5	10,7	12,3	9,6	12,8	13,9
Sn	11,5	12,1	5,1	6,2	9,8	11,8	10,9	12,3	10,8	12,8
Sc	7,13	7,5	10,2	9,8	8,7	3	2	3,2	7,7	8,1
Sr	11,1	45	20,1	21,5	15,3	280	277	283	24,3	25,2
Zr	30,4	30,1	130,1	123	50,1	150	145	160	36,4	40,6
Nb	30,9	29,8	35,2	36,7	45,6	15	16,5	15,6	57,9	56,9
Y	29,9	30,0	25,1	25,5	30,1	20	19,4	22	8,8	9,0
U	5,18	3,7	15,2	13,7	8,6	0,82	0,8	0,83	4,1	4,4
Th	9,96	13,8	43,2	39,6	14,3	1,97	1,95	1,98	4,5	5,2
Li	71,6	72,3	69,4	72,3	45,5	104	101	102	124	132
W	4,98	5,0	4,3	4,5	6,7	37,5	38,9	36,5	120	119
Mo	0,51	0,65	0,3	0,4	5,3	4,1	4,7	5,2	1,6	3,2
Rb	398	401	26,1	27,7	235	280	275	285	570	583
Cs	21,3	34	13,4	14,5	10,5	21	20	21,8	118	121
Ga	26,7	27,2	28,5	30,5	29,5	31	29,6	30	45,8	46,4
La	12,0	11,6	50,0	49,6	10,9	30	29	31	4,85	5,1
Ce	20,9	28,8	67,1	70,3	26,3	30,4	30,7	30,5	11,1	13,6
Pr	5,5	6,7	12,0	11,6	3,4	2,5	2,6	2,6	1,23	1,4
Nd	14,1	13,9	21,3	20,5	12,9	8,6	8,7	8,8	4,77	5,6
Sm	6,7	6,2	20,7	18,9	4,5	2,75	2,8	2,8	1,17	1,2
Eu	0,27	0,02	10,56	9,6	0,06	0,56	0,58	0,6	0,18	0,15
Gd	8,1	5,6	11,1	12,2	4,2	4,35	4,4	4,4	1,19	1,3
Tb	2,0	2,3	10,55	10,3	0,75	0,82	0,81	0,84	0,25	0,26
Dy	5,1	2,8	22,6	21,5	4,78	4,6	4,8	4,7	1,33	1,5
Ho	2,0	0,5	6,8	5,8	1,1	1,02	1,0	1,1	0,27	0,3
Er	3,2	1,7	12,1	11,3	3,24	2,95	3,0	2,91	0,85	0,91
Tm	0,8	0,4	2,1	2,2	0,58	0,46	0,47	0,44	0,15	0,18
Yb	1,10	2,6	5,0	5,2	3,86	2,2	2,0	2,3	1,1	1,3
Lu	0,13	0,09	1,43	1,3	0,66	0,21	0,2	0,21	0,2	0,3
Hf	3,3	2,7	4,7	4,6	4,1	0,78	0,8	0,79	3,1	2,9
Ta	4,5	5,3	3,8	3,9	9,3	1,55	1,6	1,53	12,4	11,8
In	0,8	0,9	1,1	1,2	1,6	2,5	2,2	2,6	2,8	3,1
Bi	0,8	0,77	0,9	1,0	1,2	1,9	2,1	2,3	2,2	2,7

Компонент	Порода									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ΣREE	112,4	113,2	278,4	275,8	107,3	111,4	108,3	115,2	37,44	42,1
La/Yb _N	7,48	2,94	6,6	6,3	1,86	9,0	9,6	8,9	2,9	2,6
La/Sm _N	1,09	1,14	1,48	1,6	1,48	6,7	6,3	6,7	2,5	2,6
Eu/Eu*	0,11	0,01	1,94	1,83	0,042	0,5	0,51	0,53	0,47	0,38
U/Th	0,52	0,27	0,35	0,34	0,6	0,42	0,41	0,42	0,91	0,85
TE _{1,3}	1,02	1,61	1,59	1,6	1,05	0,88	0,91	0,87	1,04	1,12

Примечания. 1. Анализы выполнены: силикатный на главные компоненты химическим методом в лаборатории Западно-Сибирского испытательного центра (Новокузнецк); на микроэлементы – в лаборатории ИМГРЭ методами ICP-MS и ICP-AES.

2. Значения РЗЭ нормированы по хондриту по [9]; Eu* = (Sm_N + Gd_N/2); TE_{1,3} – тетрадный эффект фракционирования РЗЭ как среднее между первой и третьей тетрадами по [17].

3. Породы: 1–2 – турмалиновые лейкограниты Кумирского штока; 3–4 – лейкограниты с турмалином Синюшинской апофизы; 5 – лейкогранит Точильного штока; 6–8 – Ак-Алахинский шток; 9–10 – эльваны Южно-Калгутинского месторождения.

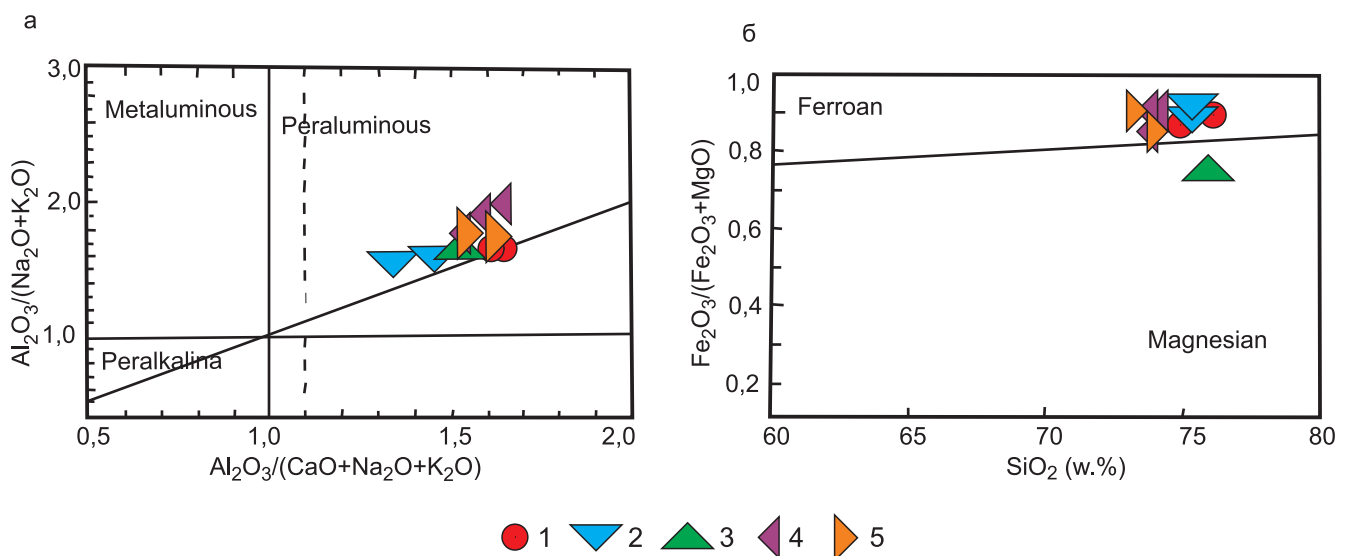


Рис. 2. Диаграммы соотношений: а – $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O) - Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ по [19]; б – $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+MgO) - SiO_2$ по [26] для турмалиновых гранитоидов Горного Алтая

Турмалиновые лейкограниты и турмалиновые эльваны Горного Алтая: 1 – Кумирского штока, 2 – Колыванской апофизы Синюшинского массива, 3 – Точильного штока, 4 – Ак-Алахинского штока, 5 – эльваны Южно-Калгутинского месторождения

новые лейкограниты региона к пералюминиевому типу, а соотношение $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+MgO) - SiO_2$ указывает на принадлежность преобладающей части пород к железистому типу, за исключением турмалиновых лейкогранитов Точильного штока (рис. 2), попадающего в поле магнезиальных пород за счет биотитовых скоплений в миароловых полостях.

Обсуждение результатов

Появление двуслюдяных и турмалиновых лейкогранитов может быть связано с различными причинами: 1) образованием мусковит-турмалиновых лейкогранитов в результате фракционирования двуслюдяных лейкогранитов [22, 23]; 2) образованием двух типов лейкогранитов в результате плавления различных фракций из одного и того же источника [16]; 3) бимодальностью, отражающей различные протолиты, за счет которых плавилась

двуслюдяные лейкограниты и мусковит-турмалиновые лейкограниты [15, 23, 27]. Кроме того, существует мнение о том, что пералюминиевые составы турмалинсодержащих лейкогранитов характеризуются соотношением изотопов стронция ($Sr_i > 0,710$) [18, 21] и соотношением изотопов кислорода ($\delta^{18}O > +10\%$), которые подтверждают, что они были генерированы путем частичного плавления метаосадочных пород. Последнее положение согласуется и с нашими данными по некоторым массивам Горного Алтая. Текстуальные характеристики и химические вариации показывают, что турмалин во всех случаях кристаллизовался в течение относительно ранней магматической стадии в субсолидусных условиях. Согласно [13] ассоциация биотит±кордиерит и турмалин с мафическими фосфатными минералами (апатитом) могут кристаллизоваться в суперсолидусных условиях.

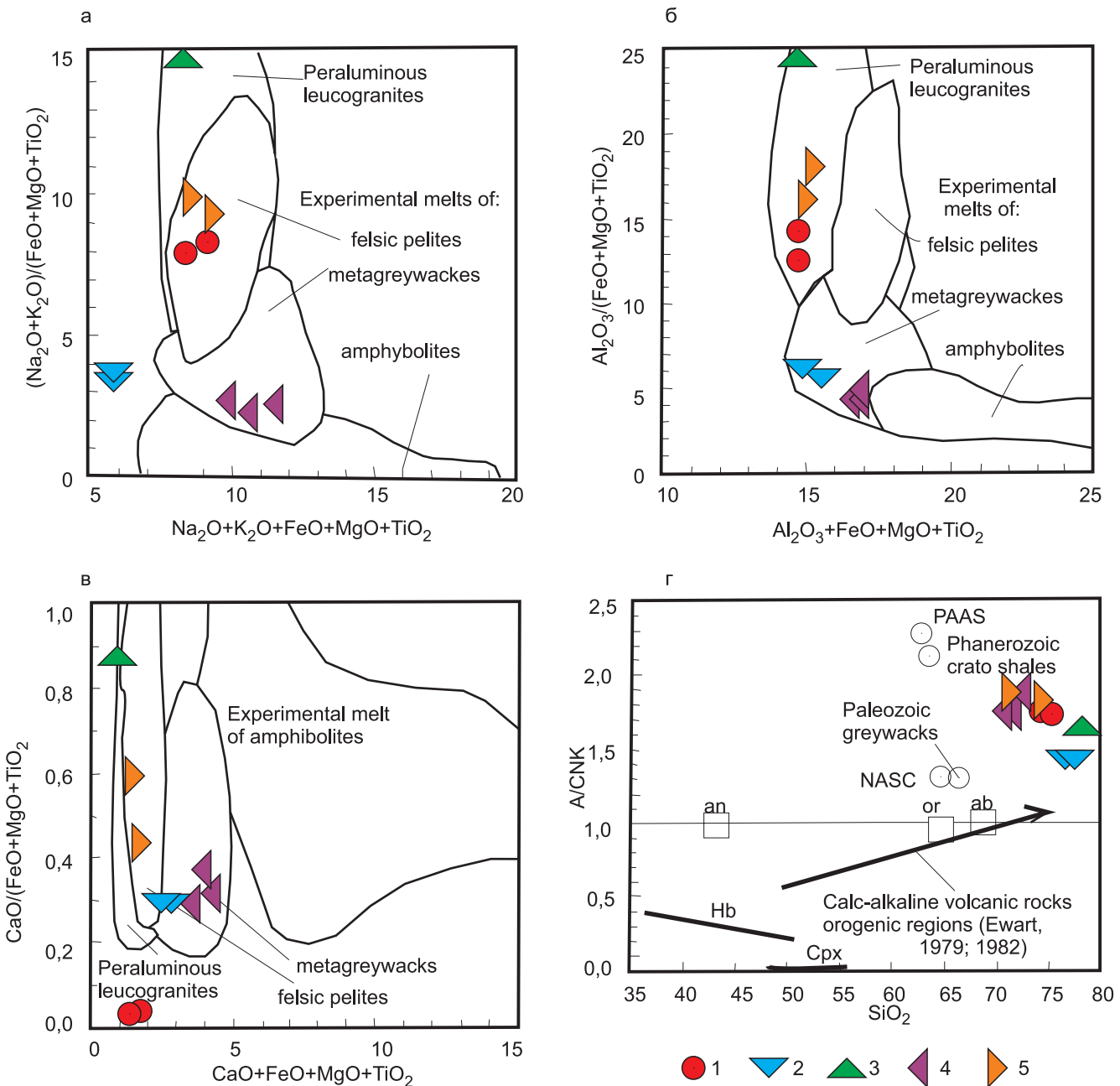


Рис. 3. Экспериментальные диаграммы: а, б, в – композиционных экспериментальных расплавов из плавления фельзитических пелитов (мусковитовых сланцев), метаграувак и амфиболитов [29] для турмалиновых лейкогранитов Горного Алтая; г – SiO_2 – A/CNK для турмалиновых лейкогранитов Горного Алтая. Тренд известково-щелочного фракционирования вулканических пород орогенных регионов по [11, 12]; А – Al_2O_3 , CNK – сумма CaO , Na_2O , K_2O . Остальные усл. обозн. см. на рис. 2

В Корнубианском батолите фракционирование элементов в связи с образованием турмалиновых лейкогранитов за счет плавления метаосадочных пород, содержащих турмалин, приводило к обогащению гранитной бор-обогащенной системы такими элементами, как Li, Ga, In, Sn, Nb, Ta, W, Bi [14]. Данные по турмалиновым лейкогранитам Горного Алтая свидетельствуют о том, что наблюдается насыщение бор-обогащенных гранитных систем региона некоторыми элементами (Li, Ga, Nb), а некоторые элементы показывают неоднозначную картину: с обогащением и обеднением (In, Sn, Ta, W, Bi). Такое распределение элементов в турмалиновых лейкогранитах Горного Алтая связано с геологическими

особенностями и петрогенезисом анализируемых гранитоидов региона.

На экспериментальных диаграммах составы турмалиновых лейкогранитов региона тяготеют к полям плавления пералюминиевых лейкогранитов, метаграувак и фельзитических пелитов (рис. 3). По соотношениям A/CNK – SiO_2 составы пород тяготеют к среднему составу фанерозойских кратонных сланцев (см. рис. 3, г).

По соотношениям $\text{Th} - \text{La}$ и $\text{Th} - \text{U}$ турмалиновые лейкограниты локализируются в разных частях диаграмм. Указанные породы Кумирского, Точильного штоков и Синюшинской апофизы тяготеют к полю среднепротерозойской коры, эльваны Юж-

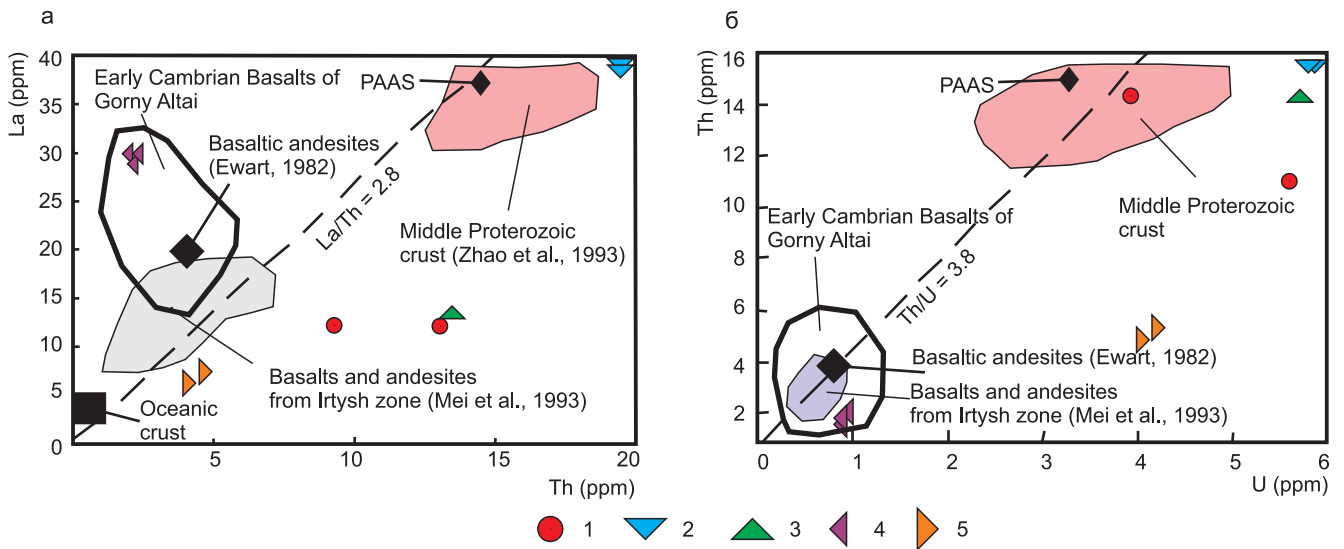


Рис. 4. Диаграммы La – Th (a) и Th – U (б) по [10] для турмалиновых гранитоидов Горного Алтая. Розовое поле – осадочные породы среднепалеозойской коры по [24]; серое поле – базальты и андезиты Иртышской зоны смятия по [25]; PAAS (post-Archaean average Australian shale) – постархейские австралийские сланцы, представленные весьма зрелыми осадочными породами по [20]. Поле Early Cambrian Basalts Gorny Altai (раннекембрийские базальты Горного Алтая) выделено по авторским данным (более 450 анализов)

Усл. обозн. см. на рис. 2

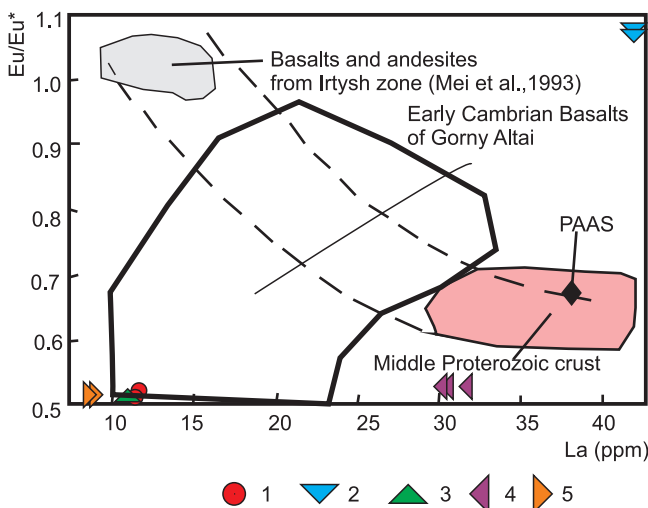


Рис. 5. Диаграмма $Eu/Eu^* - La$ по [10, с добавлениями авторов] для турмалиновых гранитоидов Горного Алтая
Усл. обозн. см. на рис. 2

но-Калгутинского месторождения – к базальтам и андезитам Иртышской зоны смятия, а турмалиновые лейкограниты Ак-Алахинского штока – к полю раннекембрийских базальтоидов Горного Алтая (рис. 4).

На диаграмме соотношений $Eu/Eu^* - La$ группа турмалиновых лейкогранитов Кумирского, Точильного штоков и Синюшинской апофизы также тяготеют к полю составов среднепротерозойской коры (рис. 5), все остальные турмалиновые лейкограниты – к полю раннекембрийских базальтоидов Горного Алтая.

Следовательно, турмалиновые лейкограниты Горного Алтая формировались в результате плавления различных источников (фельзических пелитов, пералюминиевых лейкогранитов и метаграувакк)

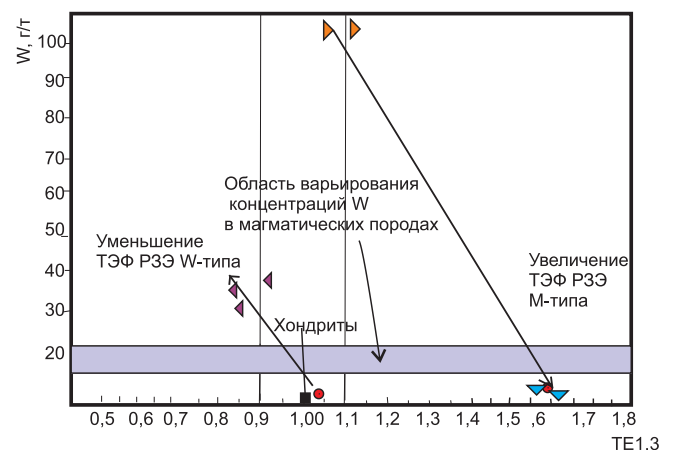


Рис. 6. Диаграмма $W - TE_{1,3}$ по [2] для турмалиновых лейкогранитов Горного Алтая. Серая область на диаграмме выделена на основании средних содержаний вольфрама в изверженных породах по [1]; содержания вольфрама в хондритах по [28]

Усл. обозн. см. на рис. 2

и тяготеют к составу среднепротерозойской коры, а также в результате смешения с базальтоидными источниками и последующей дифференциации и фракционирования, тяготеющих по составам к базальтоидам и андезиитоидам Иртышской зоны смятия и базальтоидам раннего кембрия Горного Алтая.

Различный генезис турмалиновых лейкогранитов Горного Алтая отразился и на особенностях проявления тетрадного эффекта фракционирования редкоземельных элементов (ТЭФ РЗЭ) в них (W- и M-типов), обусловленных разнообразием составов флюидного режима и активностью главных летучих компонентов (F, B, H₂O).

На диаграмме $W - TE_{1,3}$ фигуративные точки анализируемых турмалиновых лейкогранитов образуют контрастные кластеры, позволяющие по

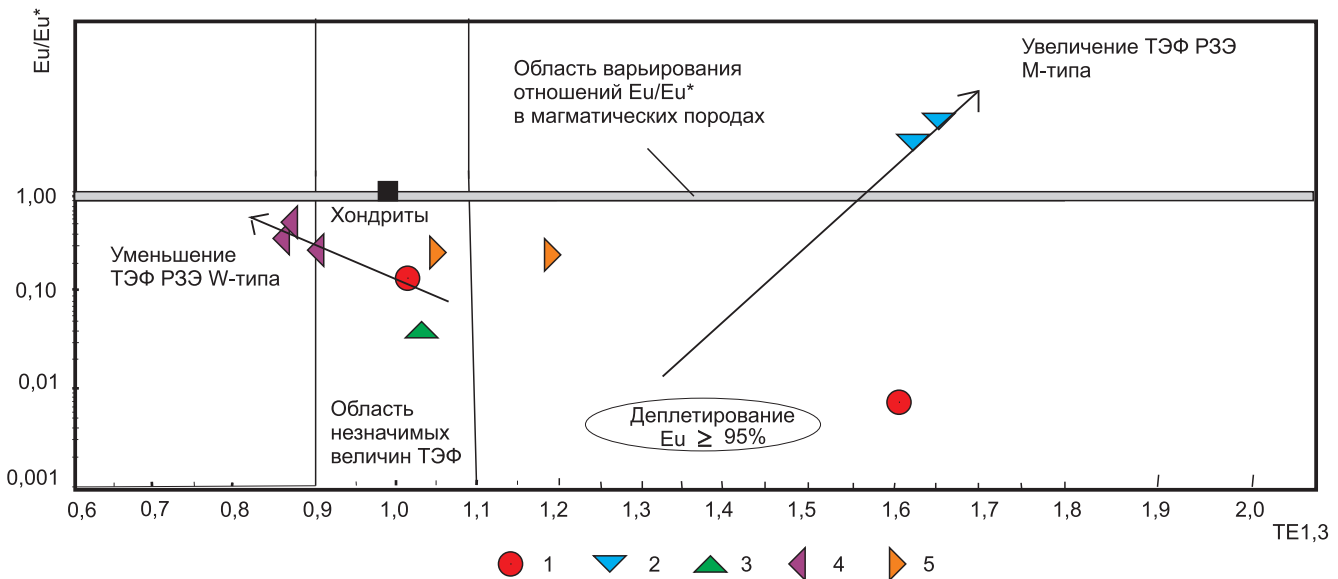


Рис. 7. Диаграмма $Eu/Eu^* - TE_{1,3}$ для турмалиновых лейкогранитов Горного Алтая (составлена авторами)
Усл. обозн. см. на рис. 2

трендам наметить зависимости концентраций вольфрама и проявления ТЭФ РЗЭ M- и W-типов (рис. 6). В лейкогранитах с проявлением ТЭФ РЗЭ W-типа содержания вольфрама увеличиваются с возрастанием значений ТЭФ РЗЭ (в Ак-Алахинском штоке), обнаруживаются признаки присутствия ингредиентов раннекембрийских базальтоидов Горного Алтая. Противоположная тенденция наблюдается для турмалиновых лейкогранитов с проявлением M-типа ТЭФ РЗЭ. Здесь уменьшение концентраций вольфрама происходит с увеличением значений ТЭФ РЗЭ M-типа (в Колыванской апофизе и Кумирском штоке), источник плавления которых тяготеет к составу среднепротерозойской коры.

На диаграмме соотношений фиксируется резкое увеличение соотношений Eu/Eu^* с возрастанием значений $TE_{1,3}$ (рис. 7). Увеличение отношения Eu/Eu^* при проявлении ТЭФ РЗЭ M-типа согласно рядам кислотности – щелочности элементов [6] спектра элементов Sm, Gd, Eu (участвующих в соотношении Eu/Eu^*) в водно-сероводородных растворах при стандартных условиях отвечает повышению кислотности среды. Следовательно, снижение концентраций вольфрама в турмалиновых лейкогранитах с возрастанием значений ТЭФ РЗЭ M-типа обусловлено повышением кислотности среды. Это происходит в Колыванской апофизе и Кумирском штоке, которые образованы за счет плавления среднепротерозойской коры. Аналогичная картина наблюдается и для группы турмалиновых лейкогранитов Ак-Алахинского штока, несущего метки базальтоидного источника. Увеличение концентраций вольфрама в них обусловлено также повышением кислотности среды.

Выводы

1. Турмалиновые гранитоиды принадлежат к подотряду нормально- и низкощелочных и уме-

ренно-щелочных лейкогранитов с суммой щелочей менее или более 8 %.

2. Все турмалиновые лейкограниты региона относятся к пералюминиевому типу, а по железомagneзному соотношению выявляется принадлежность преобладающей части пород к железистым варитетам, за исключением турмалиновых лейкогранитов Точильного штока, относящихся к магнетической разности.

3. В формировании турмалиновых лейкогранитов наблюдаются различные источники плавления. Одна группа показывает кислые седиментогенные и интрузивные источники (фельзические пелиты, пералюминиевые лейкограниты и метаграувакки, тяготеющие к составам среднепротерозойской коры), а во второй отмечаются признаки смешения с базальтоидными источниками, а также последующей дифференциации и фракционирования. Источники этой группы тяготеют по составам к базальтоидам и андезитоидам Иртышской зоны смятия и базальтоидам раннего кембрия Горного Алтая.

4. В указанных группах гранитоидов выявлены разные типы ТЭФ РЗЭ. В турмалиновых лейкогранитах Ак-Алахинского штока (с отчетливо проявленным ТЭФ РЗЭ W-типа), несущих метки базальтоидного источника, увеличение концентраций вольфрама обусловлено повышением кислотности среды. В турмалиновых лейкогранитах, образовавшихся за счет плавления пералюминиевых лейкогранитов и седиментогенных разностей пород, проявлен ТЭФ РЗЭ M-типа, уменьшение концентраций вольфрама в них связано с повышением кислотности среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Виноградов А. П.** Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. – 1962. – № 7. – С. 555–572.



2. **Гусев А. И.** Геохимия и петрология Орочаганского массива гранитоидов юга Горного Алтая // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2016. – № 3, ч. 2. – С. 277–281.
3. **Гусев А. И.** Турмалин в гранитоидах Горного Алтая // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2016. – № 4, ч. 2. – С. 409–413.
4. **Гусев А. И., Табакаева Е. М.** Геологическое строение и полезные ископаемые междуречья Коргон – Чарыш Горного Алтая. – Бийск: Изд-во АГАО, 2014. – 215 с.
5. **Гусев А. И., Табакаева Е. М.** Новые данные по магматизму и оруденению Колыванского месторождения (Горный Алтай) // *Природные ресурсы Горного Алтая: геология, геофизика, экология, минеральные, водные и лесные ресурсы*. – 2013. – № 2. – С. 24–34.
6. **Маракушев А. А.** Термодинамические факторы образования рудной зональности // *Прогнозирование скрытого оруденения на основе зональности гидротермальных месторождений*. – М.: Наука, 1976. – С. 36–51.
7. **Петрографический кодекс России.** Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. Изд. третье, испр. и доп. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. – 200 с.
8. **Петрохимическая характеристика, геохимия и радиология гранитоидов Горного Алтая:** справочник / Н. Н. Амшинский, И. В. Мариич, В. Б. Дергачев и др. – Новосибирск: СНИИГиМС, 1983. – 90 с.
9. **Anders E., Greevesse N.** Abundances of the elements: meteoric and solar // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. – 1989. – Vol. 53. – P. 197–214.
10. **Chen B., Jahn B.-M.** Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of northwest China and their tectonic implications // *Geol. Mag.* – 2002. – Vol. 139, no. 1. – P. 1–13.
11. **Ewart A.** A review of the mineralogy and chemistry of Tertiary – Recent dacitic, latitic, rhyolitic and related salic rocks // *Trondjemites, Dacites and Related Rocks*. – Amsterdam, 1979. – P. 13–121.
12. **Ewart A.** The mineralogy and petrology of Tertiary – Recent orogenic volcanic rocks: with special reference to the andesitic – basaltic compositional range // *Andesites: orogenic andesite and related rocks* / ed. R. S. Thorpe. – Chichester: Wiley, 1982. – P. 25–95.
13. **Experimental silicate-phosphate equilibria in peraluminous granitic magmas, with a case study of the Albuquerque batholith at Tres Arroyos, Badajoz, España** / D. London, M. Wolf, G. B. Morgan VI, M. Gallego-Garrido // *Journal of Petrology*. – 1999. – Vol. 40. – P. 215–240.
14. **Fractionation of Li, Be, Ga, Nb, Ta, In, Sn, Sb, W and Bi in the peraluminous Early Permian Variscan granites of the Cornubian Batholith: Precursor processes to magmatic-hydrothermal mineralization** / B. Simons, J. C. Ø. Andersen, R. K. Shail, F. E. Jenner // *Lithos*. – 2017. – Vol. 278–281. – P. 491–512.
15. **Guillot S., Le Fort P.** Geochemical constraints on the bimodal origin of High Himalayan leucogranites // *Lithos*. – 1995. – Vol. 35. – P. 221–234.
16. **Harris N., Inger S., Massey J.** The role of fluids in the formation of High Himalayan leucogranites / ed. P. J. Treloar, M. Searle // *Himalayan Tectonics*. Vol. 74. – London: Geological Society, Special Publications, 1993. – P. 391–400.
17. **Irber W.** The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. – 1999. – Vol. 63, no. 3/4. – P. 489–508.
18. **Linares E., Pellitero E., Saavedra J.** Primeras edades radiométricas en el área estanno-wolfrámifera de Morille – Martinamor (Centro-Oeste de España) // *Boletín Geológico y Minero*. – 1987. – Vol. XC-VIII. – P. 640–646.
19. **Maniar P. D., Piccoli P. M.** Tectonic discrimination of granitoids // *Geol. Soc. Amer. Bull.* – 1989. – Vol. 101. – P. 635–643.
20. **Nance W. B., Taylor S. R.** Rare earth element patterns and crustal evolution – I. Australian post-Archean sedimentary rocks // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. – 1976. – Vol. 40. – P. 1539.
21. **Ramírez J. A.** Estudio petrológico, geoquímico e isotópico del batolito de Jálama: PhD thesis // *Norte de Extremadura*. – Universidad de Granada, 1996. – P. 201.
22. **Scaillet B., France-Lanord C., Le Fort P.** Badrinath – Gangroti plutons (Garhwal, India): petrological and geochemical evidence for fractionation processes in a high Himalayan leucogranite // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 1990. – Vol. 44. – P. 163–188.
23. **Scaillet B., Pichavant M., Roux J.** Experimental crystallization of leucogranite magmas // *Journal of Petrology*. – 1995. – Vol. 36. – P. 663–705.
24. **The REE, isotopic composition of O, Pb, Sr and Nd and petrogenesis of granitoids in the Altai region** / Z. H. Zhao, Z. G. Wang, T. R. Zou, A. Masuda // *Progress of solid-earth sciences in northern Xinjiang, China* / ed. G. Z. Tu). – Beijing: Science Press, 1993. – P. 239–266. – (In Chinese with English abstract).
25. **Trace element geochemistry of late Palaeozoic volcanic rocks on the southern side of the Irtysh River and the evolutionary history of tectonic setting** / H. J. Mei, X. C. Yang, J. D. Wang, et al. // *Progress of solid-earth sciences in northern Xinjiang, China* / ed. G. Z. Tu. – Beijing: Science Press, 1993. – P. 199–216. – (In Chinese).
26. **Villaseca C., Barbero L., Herreros V.** A re-examination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts // *Trans. of Royal Soc. of Edinburgh: Earth Science*. – 1998. – Vol. 89. – P. 113–119.
27. **Visona D., Lombardo B.** Two-mica and tourmaline leucogranites from the Everest-Makalu region



(Nepal – Tibet). Himalayan leucogranite genesis by isobaric heating // *Lithos*. – 2002. – Vol. 62. – P. 125–150.

28. **Wasson J. T., Kallemeyn G. W.** Composition of chondrites // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* – 1988. – Vol. 201. – P. 535–544.

29. **What** do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origins of granitic magmas? // *Geol. Soc. London. Spec. Publ.* – 1999. – Vol. 168. – P. 55–75.

REFERENCES

1. Vinogradov A.P. [The average content of chemical elements in the main types of igneous rocks of the Earth's crust]. *Geokhimiya – Geochemistry*, 1962, no. 7, pp. 555–572. (In Russ.).

2. Gusev A.I. [Geochemistry and Petrology of the Orochagan Granitoid Massif in the south of Gorny Altai]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy – International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2016, no. 3, part 2, pp. 277–281. (In Russ.).

3. Gusev A.I. [Tourmaline in granitoids of Gorny Altai]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy – International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2016, no. 4, part 2, pp. 409–413. (In Russ.).

4. Gusev A.I., Tabakaeva E. M. *Geologicheskoe stroenie i poleznye iskopaemye mezhdurech'ya Korgon-Charysh Gornogo Altaya* [The geological structure and minerals of the interfluvium of the Korgon–Charysh in Gorny Altai]. Biysk, AGAO Publ., 2014. 215 p. (In Russ.).

5. Gusev A.I., Tabakaeva E. M. [New data on magmatism and mineralization of the Kolyvan deposit (Gorny Altai)] *Prirodnye resursy Gornogo Altaya: geologiya, geofizika, ekologiya, mineral'nye, vodnye i lesnye resursy – Natural resources of Gorny Altai: geology, geophysics, ecology, mineral, water and forest resources*, 2013, no. 2, pp. 24–34. (In Russ.).

6. Marakushev A.A. [Thermodynamic factors in the formation of ore zoning]. *Prognozirovaniye skrytogo orudneniya na osnove zonal'nosti gidrotermal'nykh mestorozhdenij*. [Forecasting of hidden mineralization based on the zonation of hydrothermal deposits]. Moscow, Nauka Publ., 1976, pp. 36–51. (In Russ.).

7. *Petrograficheskiy kodeks Rossii. Magmaticheskie, metamorficheskie, metasomaticheskie, impaktnye obrazovaniya* [Petrographic Code of Russia. Magmatic, metamorphic, metasomatic, impact formations]. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2009. 200 p. (In Russ.).

8. Amshinskiy N.N., Mariich I.V., Dergachev V.B., et al. *Petrokhimicheskaya kharakteristika, geokhimiya i radiologiya granitoidov Gornogo Altay. Spravochnik* [Petrochemical characteristics, geochemistry and radiology of granitoids of the Gorny Altai. Handbook]. Novosibirsk, SNIIGiMS Publ., 1983. 90 p. (In Russ.).

9. Anders E., Greevesse N. Abundances of the elements: meteoric and solar. *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1989, vol. 53, pp. 197–214.

10. Chen B., Jahn B.-M. Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of northwest China and their tectonic implications. *Geol. Mag.*, 2002, vol. 139, no. 1, pp. 1–13.

11. Ewart A. A review of the mineralogy and chemistry of Tertiary – Recent dacitic, latitic, rhyolitic and related salic rocks. *Trondjemites, Dacites and Related Rocks*. Amsterdam, 1979. pp. 13–121.

12. Ewart A. The mineralogy and petrology of Tertiary – Recent orogenic volcanic rocks: with special reference to the andesitic – basaltic compositional range. *Andesites: orogenic andesite and related rocks*, ed. R. S. Thorpe. Chichester, Wiley, 1982, pp. 25–95.

13. London D., Wolf M., Morgan G.B., Gallego-Garrido M. Experimental silicate-phosphate equilibria in peraluminous granitic magmas, with a case study of the Albuquerque batholith at Tres Arroyos, Badajoz, España. *Journal of Petrology*, 1999, vol. 40, pp. 215–240.

14. Simons B., Andersen J.C.Ø., Shail R.K., Jenner F.E. Fractionation of Li, Be, Ga, Nb, Ta, In, Sn, Sb, W and Bi in the peraluminous Early Permian Variscan granites of the Cornubian Batholith: Precursor processes to magmatic-hydrothermal mineralization. *Lithos*, 2017, vol. 278–281. pp. 491–512.

15. Guillot S., Le Fort P. Geochemical constraints on the bimodal origin of High Himalayan leucogranites. *Lithos*, 1995, vol. 35, pp. 221–234.

16. Harris N., Inger S., Massey J. The role of fluids in the formation of High Himalayan leucogranites / ed. P. J. Treloar, M. Searle. *Himalayan Tectonics*. Vol. 74. London: Geological Society, Special Publications, 1993, pp. 391–400.

17. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1999, vol. 63, no. 3/4, pp. 489–508.

18. Linares E., Pellitero E., Saavedra J. Primeras edades radiométricas en el área estanno-wolframífera de Morille – Martinamor (Centro-Oeste de España). *Boletín Geológico y Minero*, 1987, vol. XCVIII, pp. 640–646.

19. Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1989, vol. 101, pp. 635–643.

20. Nance W.B., Taylor S.R. Rare earth element patterns and crustal evolution – I. Australian post-Archean sedimentary rocks. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1976, vol. 40, p. 1539.

21. Ramírez J. A. Estudio petrológico, geoquímico e isotópico del batolito de Jálama: PhD thesis. *Norte de Extremadura*. Universidad de Granada, 1996. P. 201.

22. Scaillet B., France-Lanord C., Le Fort P. Badrinath – Gangroti plutons (Garhwal, India): petrological and geochemical evidence for fractionation processes in a high Himalayan leucogranite. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1990, vol. 44, pp. 163–188.



23. Scaillet B., Pichavant M., Roux J. Experimental crystallization of leucogranite magmas. *Journal of Petrology*, 1995, vol. 36. pp. 663–705.

24. Zhao Z.H., Wang Z.G., Zou T.R., Masuda A. The REE, isotopic composition of O, Pb, Sr and Nd and petrogenesis of granitoids in the Altai region. *Progress of solid-earth sciences in northern Xinjiang, China*. Ed. G.Z.Tu. Beijing, Science Press, 1993, pp. 239–266. (In Chinese with English abstract).

25. Mei H.J., Yang X.C., Wang J.D., et al. Trace element geochemistry of late Palaeozoic volcanic rocks on the southern side of the Irtysh River and the evolutionary history of tectonic setting. *Progress of solid-earth sciences in northern Xinjiang, China*. Ed. G.Z.Tu. Beijing, Science Press, 1993, pp. 199–216. (In Chinese)

26. Villaseca C., Barbero L., Herreros V. A re-examination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts. *Trans. of Royal Soc. of Edinburg: Earth Science*, 1998, vol. 89, pp. 113–119.

27. Visona D., Lombardo B. Two-mica and tourmaline leucogranites from the Everest-Makalu region (Nepal – Tibet). Himalayan leucogranite genesis by isobaric heating. *Lithos*, 2002, vol. 62, pp. 125–150.

28. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Composition of chondrites. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1988. vol. 201, pp. 535–544.

29. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origins of granitic magmas? *Geol. Soc. London. Spec. Publ.*, 1999, vol. 168, pp. 55–75.

© А. И. Гусев, Е. М. Табакаева, 2018