

УДК 553.3/4.078:553.2:551.73

ЛАНТАНИДНЫЙ ТЕТРАДНЫЙ ЭФФЕКТ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В АДАКИТОВЫХ ГРАНИТОИДАХ ЕРУДИНСКОГО КОМПЛЕКСА ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА

Гусев А.И.

*Алтайская государственная академия образования им. В.М. Шукшина,
Бийск, e-mail: anzerg@mail.ru*

В адакитовых гранитоидах ерудинского комплекса гранито-гнейсовых куполов раннепротерозойского возраста проявлен тетрадный эффект фракционирования РЗЭ М – типа. Фракционирование расплава генерированного в процессе мантийно-корового взаимодействия с участием мантийных высоковосстановленных флюидов плюмовой природы и плавления нижнекорových гранулитов сопровождалось и проявлением тетрадного эффекта. Петрогеохимические индексы пород комплекса показали отсутствие признаков возможного редкометалльного оруденения, но факторы фракционирования расплава и РЗЭ не исключают возможность генерации глубинным очагом оруденения других металлов.

Ключевые слова: лантанидный тетрадный эффект фракционирования, М-тип, гранито-гнейсовые купола, плюмовый источник, нижнекоровый источник

THE LANTHANIDE TETRAD EFFECT FRACTIONATION OF RARE EARTH ELEMENTS IN THE ADAKITE GRANITOIDS OF ERUDINSKII COMPLEX ENISEISKII KRJAZH

Gusev A.I.

The Shukshin Altai State Academy of Education, Biisk, e-mail: anzerg@mail.ru

The tetrad effect fractionation of REE M-type display in the adakite granitoids erudinskii complex of granite-gneissic cupols. Fractionation of melt, generating in the process mantle-crust interaction with participation of mantle high reduced fluids of plum nature and melting lower crust granulites that it accompany display tetrad effect. Petrogeochemical indexes of rocks complex show absent signs of possible rare earth ore mineralization, but factors of fractionation of melt and REE do not exclude possibility generation by deep molting spot of ore mineralization of other metals.

Keywords: lanthanide tetrad effect fractionation, M-type, granite-gneissic cupols, plum source, lower crust source

Лантанидный тетрадный эффект фракционирования (ТЭФ) редкоземельных элементов (РЗЭ) обычно выявляется в высокоэволюционированных кремнекислых гранитоидах умеренно-щелочного, щелочного и шошонитового типов, а также в карбонатитовых комплексах, обогащённых летучими компонентами [2]. Проявление тетрадного эффекта в адакитовых гранитоидах, обычно не обогащённых летучими компонентами, – явление весьма редкое, но имеющее большое петрогенетическое значение [1]. В этой связи особый интерес и актуальность представляет анализ проявления ТЭФ РЗЭ в древних адакитовых гранитоидах раннепротерозойского возраста, претерпевших огнейсование. Цель исследования – выявление тетрадного эффекта фракционирования в древних адакитовых гранитоидах Енисейского кряжа.

Результаты исследований и их обсуждение

Гранитоиды ерудинского комплекса представлены конкордантными телами плагиогнейсогранитов, диоритогнейсов, реже – гранодиоритогнейсов, тоналитог-

нейсов и гнейсоватых гранитов и лейкогранитов сформировались на начальной стадии образования гранитогнейсовых куполов [3]. Гранитоиды образуют Ерудино-Чиримбинский ареал распространения, приуроченный к Панимбинскому антиклинорию, сложенному глубоко метаморфизованными породами (гнейсами, амфиболитами, кварцитами, мраморами и кристаллическими сланцами) немтихинского и малогаревского метаморфических комплексов предположительно архейского возраста. Гиперстеневые гнейсы по некоторым реликтам и составу обнаруживают близость парапородам и могут быть отнесены к гранулитовой фации метаморфизма.

Преобладающие плагиогранитогнейсы характеризуются серой и тёмно-серой окрасками. Чаще всего они мелко-среднекристаллические, порфиробластовые. Нередко имеют гнейсовидную планпараллельную текстуру и полосчатость. Микроструктуры пород лепидогранобластовая и гранобластовая, участками – гипидиоморфнозернистая. Состав (об. %): кварц – 18–34, плагиоклаз – 38–58, калиевый полевой шпат – не более 5–6, биотит – 3–12, амфибол 13–16,

моноклинный пироксен – 2–3, акцессории – 1–2 (ильменит, сфен, турмалин, гранат, циркон, апатит, дистен, ставролит, пирит, пирротин, реже – ортит и магнетит). Минеральный парагенезис акцессориев свидетельствует о близости пород: 1 – к высокоглинозёмистым гранитоидам S – типа и 2 – к ильменитовой (сильно восстановленной) серии.

Гранодиоритогнейсы обладают тёмносерой окраской. Это массивные и гнейсоватые разности мелко-среднекристаллического сложения. Структуры гранобластовые, реже близкие к гипидиоморфнозернистым. Минеральный состав (об.%): кварц – 10–16, плагиоклаз – 40–60, биотит – 5–16, амфибол – 15–22, пироксен – 4–6. Набор акцессориев такой же как и в плагиогранитоидогнейсах. Плагиоклаз отличается большей

основностью, чем в плагиогранитоидогнейсах – андезин (№ 32–38).

В гранитоидах имеются некоторые признаки, указывающие на участие в их образовании парад гранулитовой фации и метаморфизма (биотит гранитоидов обладает высокой железистостью, высокой щелочностью и невысоким содержанием TiO_2 , что указывает на близость слюды к анниту, характерному для гранулитов и формировавшемуся при высокотемпературных условиях).

В контактах некоторых тел ерудинских гранитоидов развиты скарны. По обобщённой изохроне для гранитоидов получен абсолютный возраст (Rb-Sr методом) 2243 ± 76 млн лет при $^{87}Sr/^{86}Sr_0 = 0,7128$ [3]. Представительные анализы породных типов гранитоидов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Химические составы гранитоидов ерудинского комплекса

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	59,8	66,9	68,6	68,8	74,1	73,8	73,5	71,34	71,44
TiO ₂	1,1	0,53	0,51	0,65	0,24	0,25	0,26	0,4	0,34
Al ₂ O ₃	14,5	15,9	15,32	15,65	14,4	14,06	14,73	15,04	15,1
Fe ₂ O ₃	5,8	2,12	0,62	0,7	0,14	0,11	0,72	0,87	0,81
FeO	2,3	3,8	3,3	3,94	1,73	1,81	1,11	2,52	2,6
MnO	0,12	0,1	0,08	0,14	0,03	0,04	0,11	0,12	0,12
MgO	2,9	1,1	1,71	1,09	0,24	0,33	0,43	0,68	0,7
CaO	4,8	2,6	3,2	3,4	1,60	1,47	2,12	2,7	2,6
Na ₂ O	3,9	3,7	3,9	3,05	4,1	3,2	3,1	2,68	2,7
K ₂ O	1,6	2,6	2,2	1,8	3,35	4,2	3,6	3,2	2,9
P ₂ O ₅	0,25	0,12	0,11	0,14	0,04	0,15	0,05	0,1	0,07
Li	3,9	26,3	19,0	23,82	25,1	24,8	21,1	34,4	34,1
Sc	6,2	6,4	5,5	4,0	4,7	3,3	3,2	1,7	1,9
V	12	10,3	24,7	35	11,1	11	12	11	12
Cr	21	4,7	18,1	14	2,9	10,4	3	9,6	5
Co	11	7,1	7,5	8,1	7,0	3,8	3	6,1	6,0
Ni	9	3,2	9,5	6,2	5,1	3,5	2,3	3,6	4,1
Cu	2,8	10,8	12,3	4,4	4,8	1,9	3,3	3,8	3,5
Zn	11	107	51,2	59,2	62,2	36,5	30	39,9	35,2
Ga	26,8	22,6	20,5	24,1	18,7	20,3	19,75	20,8	19,8
Rb	4,5	108	61	120	92	142	138	115	117
Sr	1100	283	255	250	282	198	220	215	220
Y	9,6	28,4	9,8	14,5	11,3	7,4	7,3	7,9	7,7
Zr	160	224	275	260	160	138	169	168	155
Nb	16,2	12,5	8,1	11	18,8	8,0	7,0	8,6	8,2
Cs	0,25	1,7	1,9	4,5	3,6	4,1	2,8	3,1	3,0
Ba	475	635	565	145	310	4804	580	650	559
U	2,3	2,2	1,3	1,4	4,1	1,5	1,7	0,9	1,1
Th	6,3	22,4	14,8	17,2	25,1	8,4	12,1	12,2	13,1

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hf	4,0	5,9	6,1	6,15	4,2	3,6	4,7	4,2	4,1
Ta	1,1	1,7	0,6	0,95	1,3	0,65	1,2	0,72	0,8
Pb	3,9	21	13	14,1	25	22,1	28,1	20	15,6
La	11,5	66,8	32,6	53,2	59,6	19,0	25	13,8	13,82
Ce	25	126	50,2	78,6	111	40,36	46,0	35,8	35,77
Pr	2,6	12,9	7,4	19,45	10,9	3,53	4,5	2,5	2,53
Nd	9,35	45	25,1	35,7	34,6	12,1	14,65	8,3	9,52
Sm	1,9	7,7	4,12	5,65	5,11	2,2	2,36	1,51	1,45
Eu	1,16	1,3	1,04	1,08	1,08	0,72	0,86	0,94	0,93
Gd	1,91	6,7	3,2	4,45	3,8	2,02	1,89	1,69	1,69
Tb	0,33	1,1	0,37	0,64	0,5	0,28	0,25	0,26	0,31
Dy	1,65	5,8	1,97	2,8	2,4	1,42	1,43	1,44	1,43
Ho	0,37	1,1	0,36	0,52	0,45	0,26	0,26	0,30	0,30
Er	0,94	3,1	0,81	1,34	1,3	0,75	0,68	0,85	0,81
Tm	0,15	0,43	0,11	0,2	0,14	0,13	0,12	0,18	0,16
Yb	0,9	2,46	0,81	1,2	1,04	0,7	0,69	0,91	0,9
Lu	0,14	0,35	0,1	0,17	0,14	0,11	0,12	0,15	0,13
(La/Yb)N	8,5	17,9	27,6	30,7	39,3	18,2	24,0	9,9	10,2
Sr/Y	115	10,0	26,5	17,0	24,8	26,5	30,2	27,3	26,4
Th/U	2,7	10,2	11,4	12,3	6,1	5,6	7,1	13,5	11,9
Nb/Ta	14,7	7,4	13,5	11,6	14,5	12,3	5,8	11,9	10,3

Примечание. Силикатные анализы выполнены в Лабораториях Западно-Сибирского Испытательного Центра (г. Новокузнецк); анализы на малые элементы выполнены в Лаборатории ИМРГЭ (г. Москва) методами ICP-MS и ICP-AES. Породы ерудинского комплекса: 1 – диоритогнейс; 2 – гранодиоритогнейс; 3 – граниты гнейсоватый; 4 – плагиигранитогнейс; 5, 6, 7 – лейкограниты гнейсоватые; 8, 9 – граниты гнейсоватые.

Торий-урановые отношения в породах выше единицы (2,7–13,5), что указывает на слабые вторичные изменения гранитоидов, не смотря на их разнейсование. Высокие отношения Nb/Ta указывают на ювенильный источник гранитоидов.

Принадлежность к адакитовым гранитоидам огнейсованных пород ерудинского

комплекса подтверждается низкими концентрациями Y (менее 18 г/т) и Yb (менее 1,8 г/т), за исключением гранодиоритогнейсов (табл. 1). Показательно положение фигуративных точек породных типов на диаграмме Sr/Y – Y (рис. 1). Все породы, кроме гранодиоритогнейсов, попадают в поле адакитов.

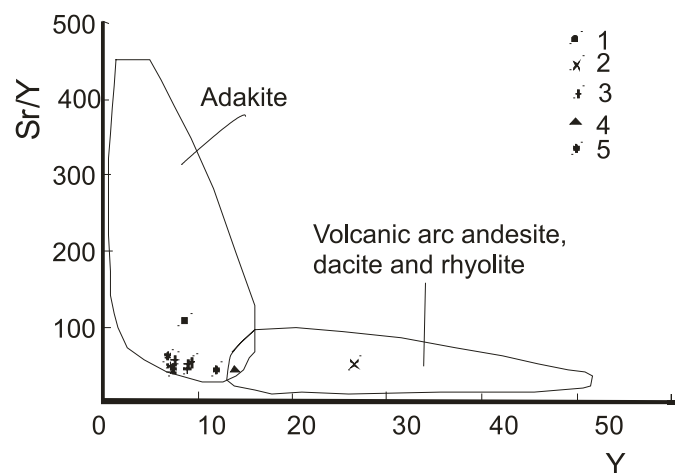


Рис. 1. Диаграмма Sr/Y – Y по [6] для пород ерудинского комплекса Енисейского кряжа: 1 – диоритогнейс; 2 – гранодиоритогнейс; 3 – граниты гнейсоватые; 4 – плагиигранитогнейсы; 5 – лейкограниты гнейсоватые

Аналогичное положение занимают породы ерудинского комплекса и на диаграмме $(La/Yb)_N - (Yb)_N$ (рис. 2).

Оценки величин тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ TE_1 в породах ерудинского комплекса М- типа показали, что они варьируют от 0,93 до 1,26 (табл. 2).

В таблице также сведены отношения некоторых элементов и значения этих же отношений в хондритах. Следует указать, что отношения большей части элементов резко отличаются от хондритовых значений. Ближе всех к хондритовым значениям имеют отношения Y/Ho и Zr/Hf (табл. 2).

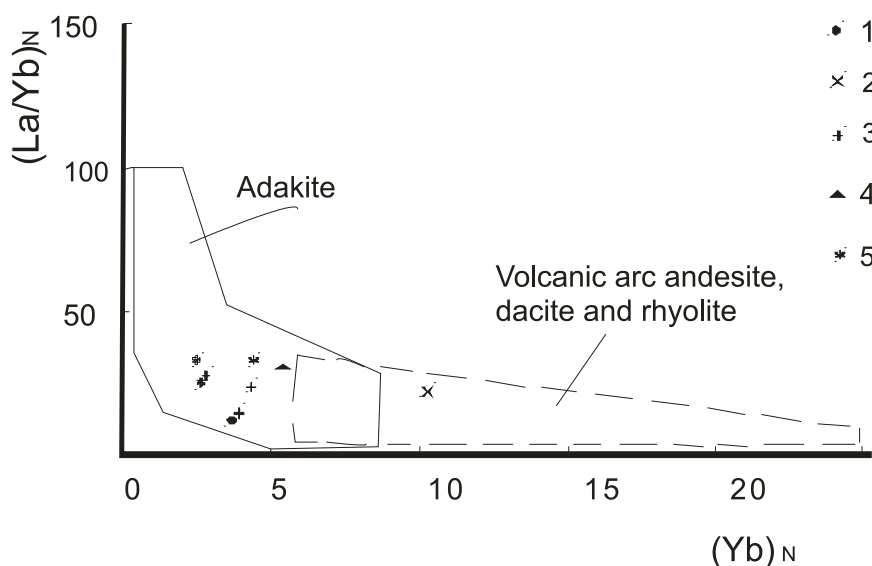


Рис. 2. Диаграмма $(La/Yb)_N - (Yb)_N$ по [6] для пород ерудинского комплекса Енисейского края. Условные обозначения те же, что и на рис. 1

Таблица 2

Отношения элементов в породах ерудинского комплекса

Отношения компонентов	Породы ерудинского комплекса									Хондрит
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Zr/Hf	40,0	37,9	45,1	42,3	38,1	38,3	36,0	40,0	37,8	36,0
La/Nb	0,71	5,3	4,0	4,8	3,2	2,4	3,6	1,6	1,7	1,0
La/Ta	10,4	39,3	54,3	56,0	45,8	29,2	20,8	19,2	17,3	16,8
Y/Ho	25,3	27,0	27,2	28,4	25,1	28,5	28,1	26,3	25,7	29,0
Sr/Eu	948,3	217,7	245,2	231,5	261,1	275,0	255,8	228,7	236,6	100,5
La/Lu	82,1	191,8	326,0	312,9	425,7	172,7	208,3	92,0	106,3	0,975
Eu/Eu*	0,53	1,82	1,36	1,55	1,35	0,98	0,82	0,55	0,54	1,0
TE_1	1,08	1,04	0,96	0,93	1,08	1,11	1,06	1,26	1,17	-

Примечание. TE_1 – тетрадный эффект фракционирования РЗЭ для первой тетрады по [7]. $Eu^* = (Sm_N + Gd_N)/2$. Породы ерудинского комплекса: 1 – диоритогнейс; 2 – гранодиоритогнейс; 3 – гранит гнейсоватый; 4 – плагиогранитогнейс; 5, 6, 7 – лейкограниты гнейсоватые; 8, 9 – граниты гнейсоватые.

На диаграмме Zr/Hf– SiO_2 породы ерудинского комплекса локализируются в поле безрудных гранитоидов и располагаются вдоль тренда фракционирования расплавов редкометалльных гранитов (рис. 3).

Кроме того, по соотношениям анализируемых элементов все породы располагаются в пределах поля CNarac (рис. 3), когда элементы с одинаковым ионным радиусом и зарядом (пары Y–Ho

и Zr–Hf) [Bau] экстремально когерентны и располагаются вблизи хондритовых отношений. Заключение о безрудности ерудинского комплекса может быть справедливо только в отношении редкометалльного оруденения.

На диаграмме Zr/Hf– TE_1 породы ерудинского комплекса образуют тренд со слабым наклоном в сторону уменьшения величин отношений Zr/Hf и локализуется вблизи

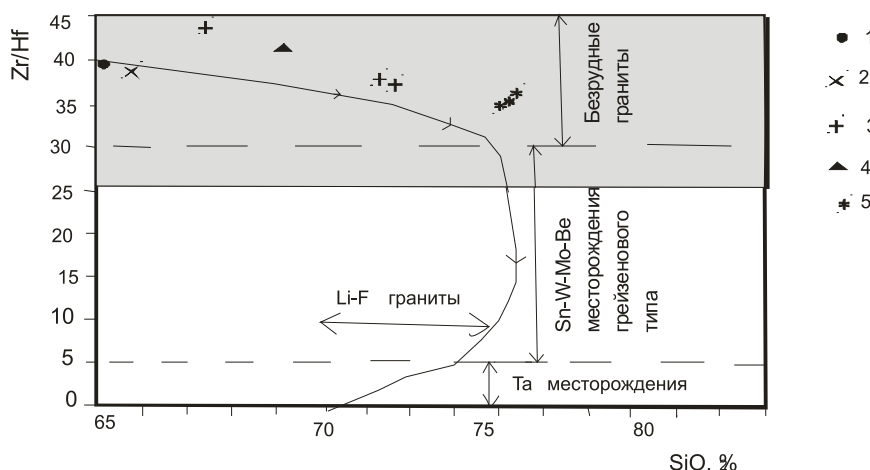


Рис. 3. Тренды фракционирования элементов в координатах $Zr/Hf-SiO_2$ для гранитоидов ерудинского комплекса. Серым фоном на рисунке показано поле HARAC (CHARGE-and-RADIUS-CONTROLLED) по [5]. Дугообразная линия со стрелками – кривая фракционирования расплавов редкометалльных гранитов и поля металлогенической специализации гранитоидов по [4]. Остальные обозначения см. на рис. 1

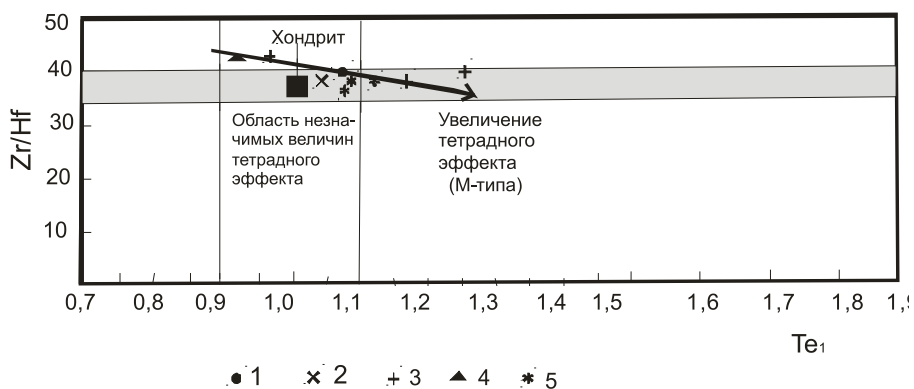


Рис. 4. Диаграмма $Zr/Hf-TE_1$ по Irber [7], для гранитоидов ерудинского комплекса. Серая область отвечает главнейшим отношениям Zr и Hf в магматических породах. Остальные условные как на рис. 1

На диаграмме Eu/Eu^*-TE_1 тренд для пород ерудинского комплекса показывает увеличение значения ТЭФ РЗЭ с уменьшением величины отношения Eu/Eu^* и одновременным деплетированием на Eu (рис. 5).

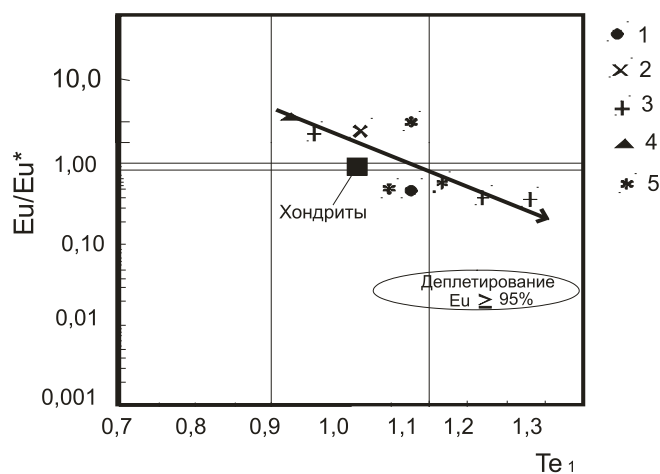


Рис. 5. Диаграмма Eu/Eu^*-TE_1 для пород ерудинского комплекса. Условные обозначения те же, что на рис. 1

Приведенные данные показали, что породы ерудинского комплекса относятся к неизменённым разностям и располагаются вдоль тренда фракционирования расплавов редкометалльных гранитов, но в безрудной его части. Высокий уровень фракционирования расплавов и РЗЭ указывает на процессы трансформации химических элементов в расплавах и в связи с очагами ерудинских гранитоидов могут быть обнаружены проявления других металлов, что потребует проведения дополнительных исследований. Различные петро-геохимические показатели в породах показывают, что формирование гранитоидов происходило с участием двух источников: ювенильного, связанного с подъёмом мантийных ингредиентов во время формирования гранито-гнейсовых куполов (вероятно, высоковосстановленных мантийных флюидов плюмовой природы) и нижнекорового, связанного с плавлением гранулитов при высоких температурах. В самых высокоэволюционированных разностях (гранитах и лейкогранитах) проявлен ТЭФ РЗЭ М-типа, проходившим параллельно с деплетированием расплава на европий.

Выводы

1. Лантанидный тетрадный эффект фракционирования РЗЭ, проявленный в гранитоидах ерудинского комплекса, свя-

зан с процессами мантийно-корового взаимодействия во время воздымания гранито-гнейсовых куполов с участием мантийных и нижнекоровых источников.

2. ТЭФ РЗЭ М-типа протекал одновременно с трансформацией соотношений многих элементов – тантала, ниобия, лутеция, циркония, гафния, европия.

Список литературы

1. Гусев А.И., Гусев А.А. Адакитовые гранитоиды Сумсунурского батолита Восточного Саяна: петрология и геохимия // *Успехи современного естествознания*. – 2012. – № 11. – С. 49–53.
2. Гусев А.И. Лантанидный тетрадный эффект фракционирования редкоземельных элементов в породах карбонатитового комплекса эдельвейс Горного Алтая // *Современные наукоемкие технологии*. – 2013. – № 8 (ч.2). Принята в печать.
3. Динер А.Э., Стороженко А.А., Васильев Н.Ф. Эталон ерудинского плагиогранитного комплекса (Енисейский кряж). – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2006. – 102 с.
4. Зарайский Г.П., Аксюк А.М., Девятова В.Н. и др. Цирконий–гафниевый индикатор фракционирования редкометалльных гранитов // *Петрология*. – 2009. – № 1. – С. 28–50.
5. Bau M. Controls on the fractionation of isoivalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect // *Contrib. Miner. Petrol.* – 1996. – Vol. 123. – P. 323–333.
6. Defant M.J., Drummond M.S. Mount St. Helens: potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc // *Geology*. – 1993. – Vol. 21. – P. 547–550.
7. 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. Cosmochim. Acta*. – 1999. – Vol. 63. – № 3/4. – P. 489–508.