

УДК 552.3:550.4:550.42:550.93

**ПЕТРОЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОРОД КАРАДАГА  
(ВОСТОЧНЫЙ КРЫМ, РОССИЯ)**

**Гусев А.И.**

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

Приведены новые данные по геохимии и петрологии вулканических пород Карадага, представленных трахибазальтами, андезибазальтами, трахитами, дацитами, риодацитами, трахириодацитами, риолитами. Все породные различия относятся к пералюминиевому типу с разной насыщенностью железом и магнием. Основные и щелочные различия пород формировались в восстановительной обстановке, а риолиты – в окислительной. Генерация вулканитов протекала в результате мантийно-корового взаимодействия щелочного мантийного расплава с выплавками материала верхней коры. Мантийный материал основных и щелочных различий формировался за счёт плавления шпинелевого и гранатового лерцолита. Тетрадный эффект М-типа проявлен как в кислых, средних, так и основных и щелочных различиях.

**Ключевые слова:** *эффузивы, трахибазальты, андезибазальты, трахиты, дациты, риодациты, трахириодациты, риолиты, мантийно-коровое взаимодействие, плавление шпинелевого лерцолита, гранатового лерцолита, тетрадный эффект фракционирования редкоземельных элементов М-типа*

**PETROLOGY AND GEOCHEMISTRY OF VOLCANIC ROCKS KARADAG  
(EASTERN CRIMEA, RUSSIA)**

**Gusev A.I.**

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

New data on geochemistry and petrology of volcanic rocks Karadag lead that occur by trachibasalts, andezibasalts, trachites, dacites, riodiacites, trachiriodiacites, riolites. All rock differences refer to peraluminous type with different saturation by iron and magnesium. The basic and alkali differences of rocks formed in reduce setting, but riolites – in oxidizes. Generation of volcanic rocks happen in result of mantle-crust interaction alkali mantle melt with melts of materials of upper crust. The mantle material of basic and alkali differences formed for count melting of spinel lherzolite and garnet lherzolite. Tetradic effect fractionation of rare earth elements M-type display as in acid, middle and basic so in alkali differences.

**Keywords:** *volcanic rocks, trachibasalts, andezibasalts, trachites, dacites, riodiacites, trachiriodiacites, riolites, mantle-crust interaction, melting of spinel lherzolite and garnet lherzolite, tetradic effect fractionation of rare earth elements M-type*

Гора Карадаг в Восточном Крыму представляет собой уникальное для Горного Крыма геологическое образование, имеющее все признаки палеовулкана центрально-го типа (фрагмент полигенного стратовулкана). Его изучение интенсивно проводилось в 60-е годы прошлого века с детальным описанием петрографии пород [3]. Возраст вулкана считался среднеюрским, сформировавшимся в островодужной обстановке [4, 5]. Однако, в последнее время появились данные о его среднеюрско-раннемеловом возрасте [12] и продолжительности вулканической деятельности на Карадаге в 30 млн лет, что может значительно повлиять на взгляды по геодинамической обстановке формирования вулканитов и их петрологии. *Цель исследования* – изучить петрологические и геохимические особенности вулканитов Карадага с применением современных методов анализа пород.

**Результаты исследования  
и их обсуждение**

Наше обследование проведено через всю стратовулканогенную последовательность

карадагского разреза с изучением трахибазальтов, андезибазальтов, трахитов, дацитов, риодацитов, трахириодацитов, риолитов. Для всех пород характерны интрателлурические выделения: лабрадор-битовнита № 65–75, авгита, биотита, гиперстена, ортоклаза (в трахибазальтах), олигоклаз-андезина № 26–37, биотита, эгирин-авгита, ортоклаза (в трахитах), олигоклаза № 13–28, реже анортоклаза, биотита (в риодацитах, трахириодацитах и риолитах). Микроструктуры пород меняются от микролитовой в трахибазальтах, андезибазальтах, трахитах до витрокластической в риолитах и риодацитах. В вулканическом стекле основной массы трахибазальтов, трахитов, андезибазальтов, дацитов, риодацитов присутствуют микропузырьки газов, захваченных лавами. В риолитах отмечены пемзовые участки, занимающие до 30% по объёму. Это свидетельствует о значительной насыщенности этих пород расплавленными флюидами. Биотит относится к F-биотиту с повышенными концентрациями CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SrO и других компонентов. В основных и щелочных различиях пород присутствие ильменита

и титаномагнетита в качестве аксессуаров указывает на принадлежность их к восстановленному типу ильменитовой серии пород. Риолиты и риодациты содержат магнетит и могут рассматриваться как окисленные породы магнетитовой серии. В целом породы отличаются свежим обликом и местами подвержены лишь слабой хлоритизации и карбонизации аутометасоматического типа.

В химизме пород наблюдается преобладание натрия над калием во всех породных типах, за исключением некоторых риолитов (табл. 1). Весь спектр пород относится к низкотитанистой серии. Отношения U/Th низкие и варьируют от 0,16 до 0,43, указывая на отсутствие значительных наложенных гидротермальных изменений на породы.

Таблица 1

Представительные анализы вулканических пород Карадага  
(оксиды в масс. %, элементы – в г/т)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO <sub>2</sub>	50,5	50,9	58,1	66,16	70,2	63,7	69,07	69,21	75,15	76,14
TiO <sub>2</sub>	0,69	0,75	0,88	0,63	0,7	0,65	0,83	0,69	0,11	0,09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,3	18,4	17,8	16,3	14,38	19,2	13,31	15,2	12,25	11,7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,5	1,7	1,32	1,14	1,25	1,75	2,43	1,1	0,3	0,15
FeO	6,8	6,1	6,1	2,36	2,1	2,2	3,2	2,1	0,6	0,7
MnO	0,18	0,12	0,15	0,18	0,12	0,33	0,27	0,31	0,07	0,04
MgO	8,6	4,0	2,97	0,75	0,38	0,83	0,87	0,4	0,37	0,36
CaO	6,5	7,3	9,05	5,63	4,02	6,96	1,43	2,1	1,3	1,51
Na <sub>2</sub> O	4,93	4,84	2,75	3,65	3,8	2,29	7,23	7,57	2,9	3,63
K <sub>2</sub> O	1,26	1,31	0,35	1,8	1,53	1,12	0,45	1,6	3,93	2,01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,06	0,1	0,23	0,22	0,24	0,13	0,31	0,25	0,03	0,02
Be	1,2	1,3	1,1	1,2	1,4	1,5	1,2	1,7	1,9	2,1
Li	2,4	3,2	4,1	3,2	3,3	4,2	5,1	5,5	4,6	4,8
V	330	288	292	107	78	97	145	48	4,5	4,2
Cr	17,3	8,6	7,5	9,5	4,5	8,3	9,4	2,6	1,5	1,3
Co	23	24	20,4	6,2	7,2	9,3	10,3	6,3	2,1	2,0
Ni	3,8	2,8	8,7	5,7	5,2	6,0	6,1	2,5	2,0	5,0
Ba	165	151	121	436	693	455	20	223	370	365
Sc	31	27	29	18	17,1	18,4	22	14,5	3,2	2,8
Ga	15,9	18,1	17,2	15	14,2	15,3	9,6	8,7	9,5	9,2
Zn	72	67,6	80	66	69	76	107	89	45	35
Cu	113	52	70	8,9	5,7	5,8	6,9	5,7	5,5	4,7
Mo	2,0	2,1	2,2	3,1	3,3	3,0	3,2	2,8	3,1	3,1
Nb	2,4	1,3	1,8	3,0	3,5	3,7	3,9	3,6	2,3	2,6
Y	18,9	19	26,8	30	29,7	30,3	32,2	39,2	14,8	19,5
Zr	23	20	75	116	105	112	118	121	75	76
Sr	450	470	281	240	210	198	19	35	149	232
Rb	19,8	25,2	4,6	34,1	25,6	27,7	3,1	16,5	61	40,8
Th	2,3	2,5	2,6	4,3	3,6	4,1	5,6	4,2	7,5	7,2
U	0,5	0,4	0,9	1,5	1,2	1,1	2,3	1,0	3,2	3,0
Pb	9,5	5,6	5,8	7,9	5,6	10,3	15,2	9,0	7,7	8,9
La	9,4	5,9	14,7	18,7	16,0	16,3	17,3	14,4	15,1	17,8
Ce	17,5	13,1	35,5	44,0	36,2	36,8	50,1	18,1	28,1	35,1
Pr	3,4	3,3	4,9	6,0	5,1	5,4	6,3	5,5	3,4	4,3
Nd	11,0	10,5	17,4	21,1	15,2	15,5	27,1	19,8	10,9	13,7
Sm	2,8	2,7	3,5	3,9	3,0	3,1	4,8	3,9	1,4	2,1
Eu	1,65	1,75	1,89	2,8	2,4	0,87	1,4	1,26	1,0	2,4
Gd	4,5	5,5	5,50	7,8	7,1	2,80	5,6	5,2	1,5	7,1
Tb	1,15	1,35	0,93	1,11	1,2	0,52	0,9	0,93	1,6	1,2

Окончание табл. 1										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Dy	6,7	8,7	5,5	5,6	6,9	3,3	4,8	5,7	4,2	6,9
Ho	0,44	0,46	0,99	1,03	1,34	0,66	1,0	1,21	1,1	1,34
Er	0,33	0,33	2,9	2,6	4	1,88	2,9	3,5	2,5	4
Tm	0,70	0,70	0,42	0,34	0,57	0,29	0,5	0,45	0,47	0,57
Yb	7,7	7,7	2,5	2,1	3,8	2,8	5,4	5,6	5,5	3,8
Lu	0,70	0,70	0,38	0,3	0,54	0,27	0,5	0,4	0,5	0,54
Hf	2,9	4,9	4,5	6,8	5,3	1,67	2,4	3,6	2,9	1,65
Ta	1,31	1,35	1,53	1,85	1,45	0,23	0,099	0,45	11,0	1,2
W	0,33	0,35	0,41	1,4	2,7	1,42	2,21	2,23	4,0	1,5
Ba/Nb	68,8	116,2	67,2	145,3	198,0	123,0	5,1	61,9	0,41	140,4
La/Nb	3,9	4,5	8,2	6,2	4,6	4,4	4,4	4,0	6,6	6,8
Zr/Y	1,2	1,0	2,8	3,9	3,5	3,7	3,7	3,1	5,1	3,9
Zr/Nb	9,6	15,4	41,7	38,7	30,0	30,3	30,2	33,6	32,6	29,2
U/Th	0,22	0,16	0,35	0,35	0,33	0,27	0,41	0,24	0,43	0,42
(La/Yb) <sub>N</sub>	0,8	0,5	3,9	5,9	2,8	3,8	2,12	1,7	1,8	3,1
Eu/Eu*	1,43	1,38	1,55	1,54	0,89	0,87	0,86	0,86	2,1	1,73

Примечание: Анализы выполнены: силикатные на главные компоненты в Лаборатории Западно-Сибирского испытательного центра (г. Новокузнецк); микроэлементы определены методом ICP-MS) в лаборатории Сибирского отделения РАН (г. Иркутск). Значения РЗЭ нормированы по хондриту по [7]. Породы Карадага: 1–2 – трахибазальты, 3 – андезибазальт, 4–5 – трахиты; 6 – дацит; 7 – риодацит; 8 – трахириодацит; 9, 10 – риолиты.

Соотношения (La/Yb)<sub>N</sub> в породах невысокие и варьируют от 0,5 до 5,9, указывающие на незначительную дифференцированность редких земель.

На канонической диаграмме Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) все породы классифицируются как пералюминиевые, сильно пересыщенные глинозёмом (рис. 1, а).

Соотношение Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MgO) – SiO<sub>2</sub> свидетельствует о том, что трахибазальты, андезибазальты и риолиты относятся к магнезиальному типу, а все

остальные породы – к железистому (рис. 1, б).

На диаграмме La<sub>UCN</sub> – Sm<sub>UCN</sub> большая часть составов пород попадает в поле плавления обогащённой мантии (рис. 2) и лишь составы риолитов локализируются в области верхней коры. Следовательно, основные и щелочные разности пород обязаны своим происхождением за счёт плавления обогащённой мантии, а риолиты – за счёт плавления субстрата верхней коры в промежуточной камере вблизи палеповерхности.

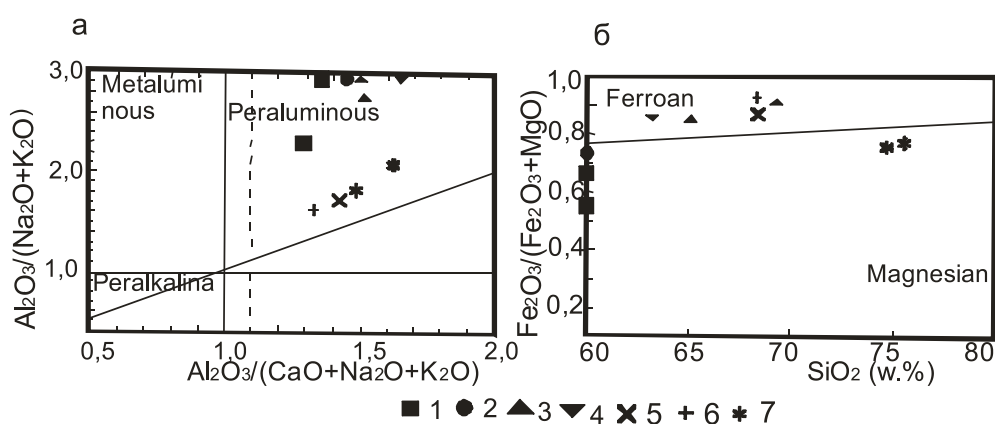


Рис. 1. а – диаграмма Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O+CaO) по [10] и б – диаграмма SiO<sub>2</sub> – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MgO) по [15] для пород Карадага. Породы Карадага: 1 – трахибазальты, 2 – андезибазальт, 3 – трахиты, 4 – дацит, 5 – риодацит, 6 – трахириодацит, 7 – риолит

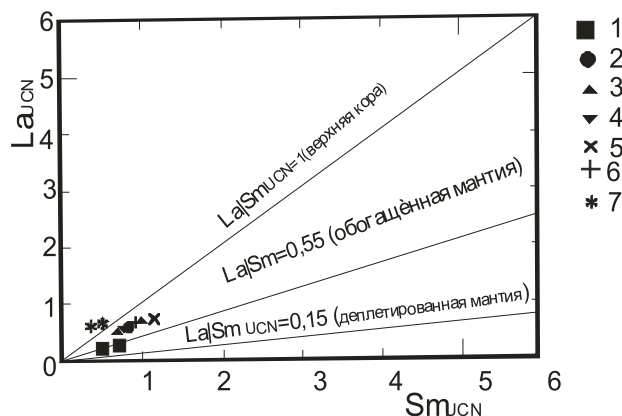


Рис. 2. Диаграмма  $La_{UCN} - Sm_{UCN}$  по [13, 14] для пород Карадага.  $La_{UCN}$  и  $Sm_{UCN}$  – значения концентраций лантана и самария, нормализованные верхне-коревые значения по [11]. Остальные условные обозначения см. на рис. 1

Реставрация мантийного материала, за счёт которого происходило плавление мантийного субстрата по соотношению  $La/Sm$  –  $La$  показывает, что такими породами служили действительно породы обогащён-

ной мантии – шпинелевые и гранатовые лерцолиты с небольшой степенью частичного плавления, дающие по составу близкие породы к обогащённым базальтам срединно-океанических хребтов (от 0,05 до 0,3) (рис. 3).

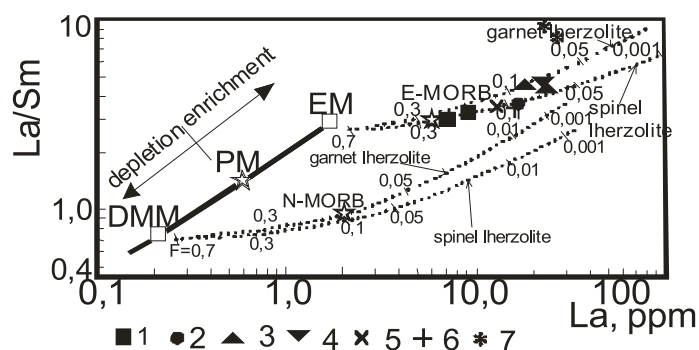


Рис. 3. Диаграмма  $La/Sm - La$  по [6] для пород Карадага. DMM – деплетированный мантийный источник MORB. PM – примитивная мантия; EM – обогащённый мантийный источник; E-MORB – и N-MORB – составы обогащённых (E) и нормальных (N), базальтов срединно-океанических хребтов; точечные линии – тренды плавления источников DMM и EM, засечки с цифрами на точечных линиях – степень частичного плавления для соответствующих мантийных источников. Условные те же, что на рис. 1

Таблица 2

Величины тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ и отношения некоторых элементов в породах Карадага

Отношения элементов и величины ТЭФ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Отношения в хондритах
Zr/Hf	7,9	4,1	16,7	17,0	19,8	67,0	49,2	33,6	25,9	46,1	36,0
Y/Ho	42,9	41,3	27,1	29,1	22,2	45,9	32,2	32,7	13,4	14,6	29,0
La/Nb	3,9	4,5	8,2	6,2	4,6	4,4	4,4	4,0	6,6	6,8	17,2
La/Ta	7,2	4,4	9,6	10,1	11,0	70,8	174	32,0	1,4	14,8	16,8
Sr/Eu	272	268	149	86	88	227	14	28	149	97	100,5
Eu/Eu*	1,43	1,38	1,55	1,54	0,89	0,87	0,86	0,86	2,1	1,73	1,0
$TE_{1,3}$	1,6	1,76	1,11	1,06	1,13	1,16	1,06	0,92	1,64	1,07	

Примечание:  $TE_{1,3}$  – тетрадный эффект фракционирования РЗЭ как среднее между первой и третьей тетрадами по [8].  $Eu^* = (Sm_N + Gd_N)/2$ . Породы Карадага: 1–2 – трахибазальты, 3 – андезибазальт, 4–5 – трахиты; 6 – дацит; 7 – риодацит; 8 – трахириодацит; 9, 10 – риолиты.

Новые данные по геохимии и петрологии вулканитов Карадага показывают, что их генерация происходила длительно и включала процессы плавления мантийного субстрата, материала верхней коры и мантийно-коровое взаимодействие с образованием широкого спектра пород различной кремнекислотности и щёлочности. Нередко такое взаимодействие протекает на фоне сильной насыщенности магматогенными флюидами [1]. Наличие пузырьков (везикул) в лавах с газами свидетельствует о значительной флюидонасыщенности

расплавов. В этой связи интересен факт проявления тетрадного эффекта фракционирования (ТЭФ) РЗЭ ( $TE_{1,3}$ ) в породах, который наблюдается во всём спектре породных типов (от трахибазальтов до риолитов) (табл. 2), что является необычным фактом, так как чаще всего ТЭФ РЗЭ М-типа проявлен в высоко эволюционированных гранитных системах [2, 9].

Соотношение  $Y/No - TE_{1,3}$  показывает, что тренд увеличения значения тетрадного эффекта в целом совпадает с увеличением отношений  $Y/No$  (рис. 4).

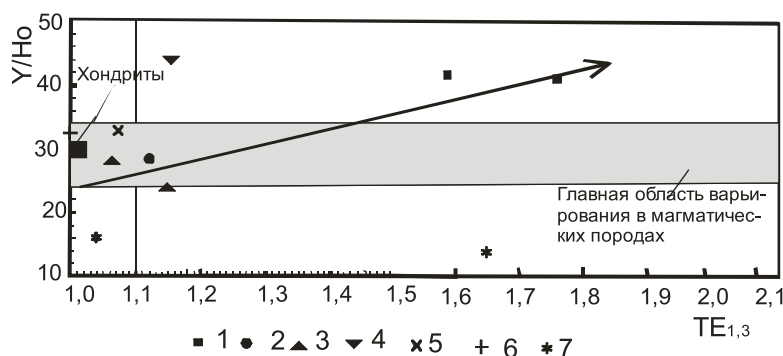


Рис. 4. Диаграмма  $Y/No - TE_{1,3}$  для пород Карадага. Условные обозначения см. рис. 1

### Заключение

Таким образом, вулканиты Карадага формировались по сценарию мантийно-корового взаимодействия. Основные различия пород проявляют признаки формирования за счёт плавления мантийного субстрата, представленного мантийными шпинелевыми лерцолитами и гранатовыми лерцолитами, то есть за счёт плавления обогащённых базальтов E-MORB. При восхождении расплавов базальтоидов к поверхности в малоглубинных очагах происходило плавление верхне-корового материала и смешение с мантийными дифференциатами. Кислые эффузивы проявляют признаки плавления верхне-корового материала. Все различия пород характеризовались пересыщенностью глинозёмом, высокой насыщенностью флюидами, содержащими летучие компоненты в особенности  $F$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $B_2O_3$ . Основные и щелочные различия пород генерировались в восстановительной среде, а кислые – в окислительной. В породах проявлен М-тип ТЭФ РЗЭ.

### Список литературы

1. Гусев А.И., Коробейников А.Ф. Мантийно-коровое взаимодействие в генерации различных типов оруденения: геофизический и петрологический аспекты // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315, № 1. – С. 18–25.
2. Гусев А.И., Гусев Н.И. Тетрадный эффект фракционирования редкоземельных элементов и его использование в решении проблем петрологии гранитоидов // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 5. – С. 45–49.

3. Лебединский В.И., Макаров Н.Н. Вулканизм Горного Крыма. – Киев, 1962. – 143 с.
4. Спиридонов Э.М., Федоров Т.О., Ряховский В.М. Магматические образования Горного Крыма. Ст. 1 // Бюллетень МОИП. Отд. геол. – 1990. – Т. 65. – Вып. 4. – С. 119–134.
5. Спиридонов Э.М., Федоров Т.О., Ряховский В.М. Магматические образования Горного Крыма. Статья 2 // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отделение геологии. – 1990. – Т. 65. – Вып. 6. – С. 102–112.
6. Aldanmaz E., Pearce J.A., Thirlwall M.F., Mitchell J.G. Petrogenetic evolution of late Cenozoic, postcollision volcanism in western Anatolia, Turkey // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2000. – V. 102. – P. 67–95.
7. Anders E., Greevesse N. Abundances of the elements: meteoric and solar // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1989. – V. 53. – P. 197–214.
8. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu\*, Sr/Eu, Y/No, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites // Geochim Cosmochim Acta. 1999. – V.63. – №3/4. – Pp. 489–508.
9. Jahn B., Wu F., Capdevila R. et al. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: the Wodue and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China // Lithos. 2001. – V. 59. – P. 171–198.
10. Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids // Geological Soc. America Bulletin, 1989. – V. 101. – P. 635–643.
11. McLennan S.M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust // Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2001. – V. 2. – Paper 2000GC000109. – 24 p.
12. Meijers M.J.M., Vrouwe B., van Hinsbergen D.J.J. et al. Jurassic arc volcanism on Crimea (Ukraine): Implications for the paleo0subduction zone configuration of the Black Sea region // Lithos, 2010. – V. 119. – P. 41–426.
13. Pearce J.F. A user's guide to basalt discrimination diagrams // Geological Ass. Of Canada Short Course Notes, 1996. – V. 12. – P. 79–113.
14. Putirka K., Busby C.J. The tectonic significance of high-K2O volcanism in the Sierra Nevada, California // Geology, 2007. – V. 35. – P. 923–926.
15. Villaseca C., Barbero L., Herreros V. A re-examination of the typology of peraluminous granite types in the intracontinental orogenic belts // Trans. of Royal Soc. of Edinburg Earth Science, 1998. – V. 89. – P. 113–119.