

## НОВЫЕ ДАННЫЕ О ПЕТРОГЕОХИМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЯХ УЛЬТРАМАФИТ-МАФИТОВЫХ ПОРОД НЕОАРХЕЙСКОГО ЛЬГОВСКО-РАКИТНЯНСКОГО ЗЕЛЕНОКАМЕННОГО ПОЯСА КМА (НА ПРИМЕРЕ КОСИНОВСКОГО УЧАСТКА)

Е. М. Боброва

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 25 февраля 2011 г.

**Аннотация.** Приведена петрогеохимическая характеристика мафит-ультрамафитовых пород Косиновского участка КМА. Ввиду их практически полной преобразованности и невозможной микроскопической диагностики, на основе петрогеохимических критериев, а также сравнения характера распределения РЗЭ магматитов Косиновского участка и коматиитов эталонных объектов зеленокаменных провинций Мира доказана принадлежность мафит-ультрамафитов к коматиит-базальтовому формационному типу. Индикаторными петрогеохимическими критериями выступают: высокая магнезиальность, низкая щелочность, низкая титанистость, повышенные значения параметров  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ , преимущественно пологие спектры распределения содержаний РЗЭ, нормированных на примитивную мантию и хондрит, и низкие  $(\text{La}/\text{Sm})_n$  и  $(\text{La}/\text{Yb})_n$  отношения.

**Ключевые слова:** коматиит, базальт, Курская магнитная аномалия, Косиновский участок, петрохимия, геохимия.

**Abstract.** Petrogeochemical characteristic of mafic-ultramafic rocks of Kosinovsky site KMA is shown. Due to their almost complete transformation and impossible microscopic diagnosis, accessory of studied mafic-ultramafic rocks to basaltic komatiite formational type is proved by petrogeochemical criteria and comparison of the distribution of REE in magmatites of Kosinovsky site and komatiites in reference objects of World's greenstone provinces. Indicator petrogeochemical criteria are: high Mg, low alkalinity, low Ti-, higher values of  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  ratio, mostly flat spectra of distribution of REE normalized to primitive mantle and chondrite, and low  $(\text{La}/\text{Sm})_n$  and  $(\text{La}/\text{Yb})_n$  ratio.

**Key words:** komatiite, basalt, Kursk magnetic anomaly, Kosinovsky site, petrochemistry, geochemistry

### Введение

Во всем Мире интенсивно изучаются докембрийские высокомагнезиальные вулканиды в связи с обнаружением промышленных месторождений никеля, золота и других металлов в породах, слагающих зеленокаменные пояса.

В обеспечении сырьевой безопасности и устойчивого долгосрочного социально-экономического развития Центрального региона России, в расширении перспектив его производственного комплекса важнейшее значение приобретают сульфидные медно-никелевые месторождения и проявления. Одно из таких проявлений располагается на Косиновском участке КМА.

В данной статье приводятся результаты изучения ультрамафит-мафитовых пород Косиновского участка Льговско-Ракитнянского зеленокаменного пояса с целью уточнения их формационной

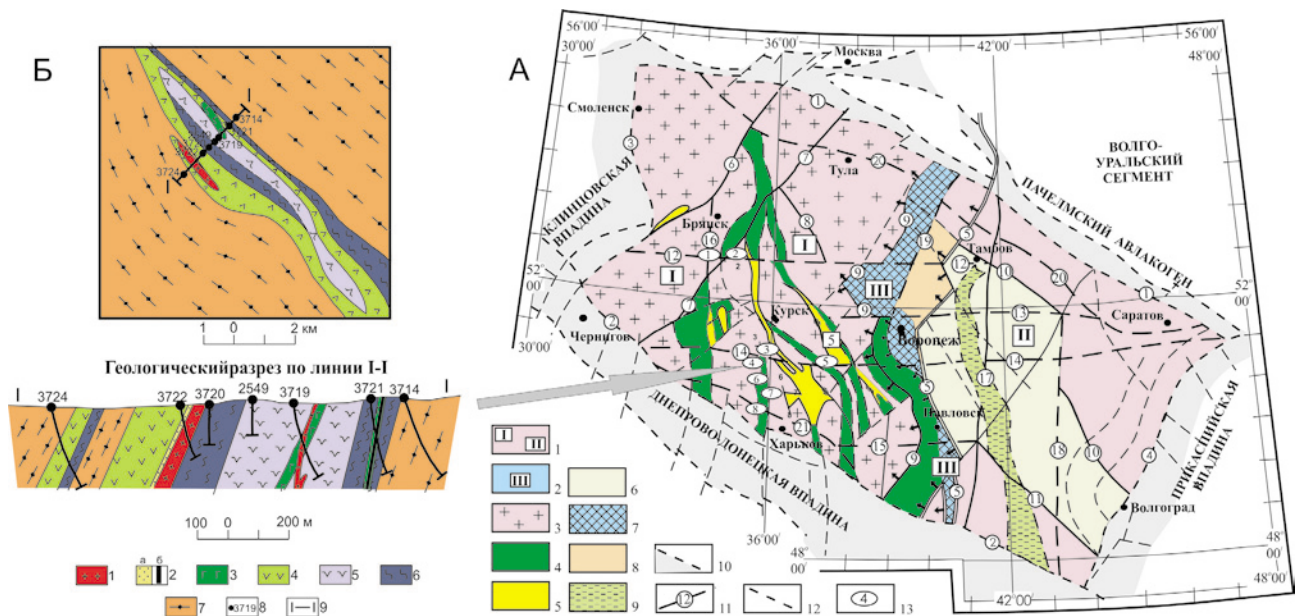
принадлежности и потенциальной рудоносности на цветные и благородные металлы. Особое внимание обращено на петрогеохимическую характеристику пород и их сравнение с эталонными объектами зеленокаменных провинций Мира. Все образцы изучаемых пород представляют собой керн скважин. Анализ породообразующих элементов выполнен методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии (XRF) на спектрометре последовательного действия PW2400 в ИПТМ РАН, г. Черноголовка, аналитик А.И. Якушев, 2010 г. Малые и редкие элементы определялись методом индуктивно-связанной плазмы с масс-спектрометрическим окончанием анализа (ICP-MS) в ИГЕМ РАН, г. Москва, аналитик С.А. Горбачёва, 2010 г. Получены новые данные о петрогеохимических особенностях пород Косиновского участка, которые позволили четко определить их принадлежность к коматиит-базальтовой формации.

**Положение в структуре ВКМ Косиновского участка и его геологическое строение**

Воронежский кристаллический массив (ВКМ) – крупный (540 × 1000 км) сегмент Восточно-Европейской платформы – представляет собой сравнительно неглубоко погребенный (0–500 м) выступ докембрийского фундамента. Границы массива контролируются системой депрессивных структур: с северо-востока и юго-запада рифейскими Пачелмским и Днепровско-Донецким авлакогенами, Оршанской и Прикаспийской впадинами палеозойского заложения (рис. 1), располагающимися с северо-запада и юго-востока. В пределах ВКМ в качестве структур первого порядка (крупных, длительно развивающихся блоков, геофизически прослеживающихся на всю мощность земной коры)

выделяются: мегаблок Курской магнитной аномалии (КМА), Хоперский мегаблок и разделяющая их линейная Лосевская шовная зона [1, 2].

Мегаблок КМА (500 × 550 км) расположен в западной части ВКМ. Являющийся автономным по своим петрофизическим характеристикам, он относится к “легким” и “высокомагнитным” структурам со значительной мощностью земной коры. В западной и центральной частях (см рис. 1) располагаются два четко выраженных неоархейских зеленокаменных пояса северо-западного простирания – Львовско-Ракитнянский (Белгородско-Михайловский) и Алексеевско-Воронецкий (Орловско-Тимской). Первый из них протягивается на 300–400 км, Алексеевско-Воронецкий – приблизительно на 400 км.



**Рис. 1.** А – Геолого-тектоническая схема Воронежского кристаллического массива [2]: 1 – мезоархейские мегаблоки: Курский (I) и Хоперский (II); 2 – Лосевская шовная зона (III) палеопротерозоя; 3–5 – структурно-вещественные комплексы мезо- (3) и неоархея (4), палеопротерозоя (5); 6 – Воронцовский эпикратонный прогиб палеопротерозоя; 7 – Лосевская шовная зона палеопротерозоя; 8 – Воронежско-Шуковская наложенная грабен-синклиналь; 9 – Калач-Эртильская наложенная структура (реактивизированный рифт); 10 – границы ВКМ; 11 – линейные структурные элементы: 1–4 – глубинные разломы, структурные швы мантийного заложения (внеранговые): 1 – юго-западный бортовой Пачелмского авлакогена, 2 – северо-восточный бортовой, 3 – Смоленско-Рославльский, 4 – Волгоградско-Камышенский; 5 – Лосевско-Мамонский надвиг (1-го ранга); 6–11 – глубинные корово-мантийные разломы (2-го ранга): 6 – Кировско-Клинцовский, 7 – Серпуховско-Бахмачский, 8 – Мценско-Ливненский, 9 – Рязско-Кантемировский (надвиг), 10 – Тамбовско-Балашов-Волгоградский, 11 – Чернышевский; 12–21 – трансрегиональные сквозные разломы корово-мантийные (2-го ранга): 12 – Трубчевско-Липецкий, 13 – Воронежско-Курский, 14 – Суджано-Икорецкий, 15 – Купянско-Богучарский, 16 – Белопольско-Навлинский, 17 – Шумилинско-Новохоперский, 18 – Михайловский, 19 – Графский, 20 – Торопец-Саратовский, 21 – Конотоп-Купянский; 12 – региональные разломы (4-го и более высокого ранга); 13 – местоположение участков коматиит-базальтовой формации: 1 – Михайловский, 2 – Жидеевский, 3 – Дичнянский, 4 – Косиновский, 5 – Александровский, 6 – Ивнянско-Береговой, 7 – Висловский, 8 – Олимпийский; Б – схема геологического строения коматиитовой толщи Косиновского участка [6]: 1 – плагиоклаз-микроклиновые граниты; 2 – а) кремнистые породы, б) железистые кварциты; 3 – габбро-амфиболиты; 4 – метабазиты; 5–6 – апокоматиитовые серпентиниты; 7 – гранито-гнейсы; 8 – скважина и ее номер; 9 – линия разреза

Предполагается двухэтапное формирование зеленокаменных структур [2]: первый этап, во время которого преобладали условия растяжения – энсиалического рифтогенеза, обусловившего формирование метакоматиит-базальтовой ассоциации нижней части разреза ЗКП и второй этап – коллизионный, связанный с закрытием рифтогенных структур и формированием гранитоидов.

Косиновский участок расположен в центральной части Белгородско-Михайловского зеленокаменного пояса (см. рис. 1). Вулканиды здесь сохранились в форме узких линейных структур север-северо-западного простирания, расположенных среди гранито-гнейсов. Длина их составляет 15–20 км, при ширине 2–4 км. Разрез характеризуется чередованием апокоматиитовых серпентинитов и метабазитов [3–6].

### Петрогеохимическая характеристика ультрамафит-мафитовых пород Косиновского участка

Ультрамафит-мафиты метаморфизованы в условиях зеленосланцевой и эпидот-амфиболитовой фаций [3–6] и в современном состоянии представляют собой серпентиниты, амфиболитизированные и карбонатизированные серпентиниты, тремолит-карбонатные породы и амфиболиты. Поэтому определяющее значение при оценке их формационной принадлежности имеют петрогеохимические критерии.

### Петрохимия

Согласно петрографическому кодексу [7], на Косиновском участке автором выделены следующие породы: *перидотитовые метакоматииты* ( $MgO > 25\%$ ), *пироксенитовые метакоматииты* ( $MgO = 18–25\%$ ), *магнезиальные метабазалты* ( $MgO = 8–12\%$ ). В дальнейшем приставка «мета» опущена, но подразумевается практически полная преобразованность пород вторичными процессами. Все имеющиеся аналитические данные по породам Косиновского участка, нанесены на известные классификационные диаграммы (рис. 2) для подтверждения принадлежности к коматиитовой серии. На диаграмме TAS [7] (см рис. 2, А) ультрамафит-мафитовые магматиты попадают в поля ультрамафит-мафитовых пород нормальной щелочности. Так как многие высокомагнезиальные породы, особенно докембрийские, не сохраняют своего первичного состава и в большей или меньшей степени преобразованы, использование наиболее подвижных компонентов (К, Na и др.) менее удачно. В качестве главных параметров хи-

мической классификации высокомагнезиальных вулканических пород [8, 9, 10] используются три элемента Mg, Al и Ti, поскольку они имеют наиболее широкое распространение в земной коре и устойчивы при метаморфизме; относятся к разным группам Периодической системы Д.И. Менделеева (Mg – ПА, Al – ША, Ti – IVБ) и разным типам (Mg – s, Al – p, Ti – d). Mg – главный элемент, отражающий генетическую природу (степень плавления мантийного субстрата) и степень дифференциации магматического расплава в процессе петрогенеза, составляющий основу доминирующих минеральных фаз высокомагнезиальных вулканических пород (оливин, пироксены). Al и Ti – геохимически труднорастворимые, резко амфотерные элементы, склонные к концентрации и стабильные при метаморфизме, а их отношение  $Al_2O_3/TiO_2$  – (алюмо-титановый модуль – АТМ), как правило, соответствует АТМ материнского магматического расплава. Чтобы более точно охарактеризовать породы коматиит-базальтовой формации, Куликовым В.С. [8] предложена классификационная бинарная диаграмма  $MgO-TiO_2$  (рис. 2, Б), на которой выделяются перидотитовые коматииты – ПК ( $MgO > 24–25\%$ ), высокомагнезиальные коматиитовые базальты – ВКБ ( $MgO = 14–24\%$ ) и низкомагнезиальные коматиитовые базальты – НКБ ( $MgO = 9–14\%$ ).

*Перидотитовые коматииты (ПК)* образуют (см таблица 1, рис. 2, А, Г) компактную петрохимическую группу высокомагнезиальных ультрамафитов, соответствуя одноименному полю. Индикаторными петрохимическими признаками являются высокая магнезиальность ( $MgO > 25\%$  ( $25,00–40,01\%$ )), крайне низкая щелочность ( $\Sigma(Na_2O + K_2O) < 0,30\%$ ,  $Na_2O \gg K_2O$ ), невысокое содержание кремнезема (среднее  $44,90\%$ ), умеренная для ультрамафитов железистость ( $FeO/MgO = 0,26–0,48$ ), низкое содержание титана ( $TiO_2 = 0,14–0,53\%$ ), отношения  $CaO/Al_2O_3 = 0,50–4,40$  (среднее  $3,05$ ) и  $Al_2O_3/TiO_2 > > 4,60$  (среднее  $11$ ). *Пироксенитовые коматииты (ПЮК)* отличаются от перидотитовых коматиитов (см. табл. 1, рис. 2, А, Б) меньшей магнезиальностью ( $MgO = 17,92–21,97\%$ ), более высоким содержанием кремнезема ( $SiO_2 = 41,24–51,39\%$ ), щелочей ( $\Sigma(Na_2O + K_2O) > 0,50\%$ ,  $Na_2O \gg K_2O$ ),  $CaO/Al_2O_3 > 1,00$ ,  $Al_2O_3/TiO_2 > 30,00$ ,  $FeO/MgO = 0,41–0,81$ . По соотношению  $MgO - TiO_2$  (см. рис. 2, Б) и  $Fe_2O_3 + FeO + TiO_2 - Al_2O_3 - MgO$  (см. рис. 2, Г) точки анализов обособляются в полях высокомагнезиальных коматиитовых базальтов (ВКБ) и базальтовых коматиитов (ВК), соответственно.

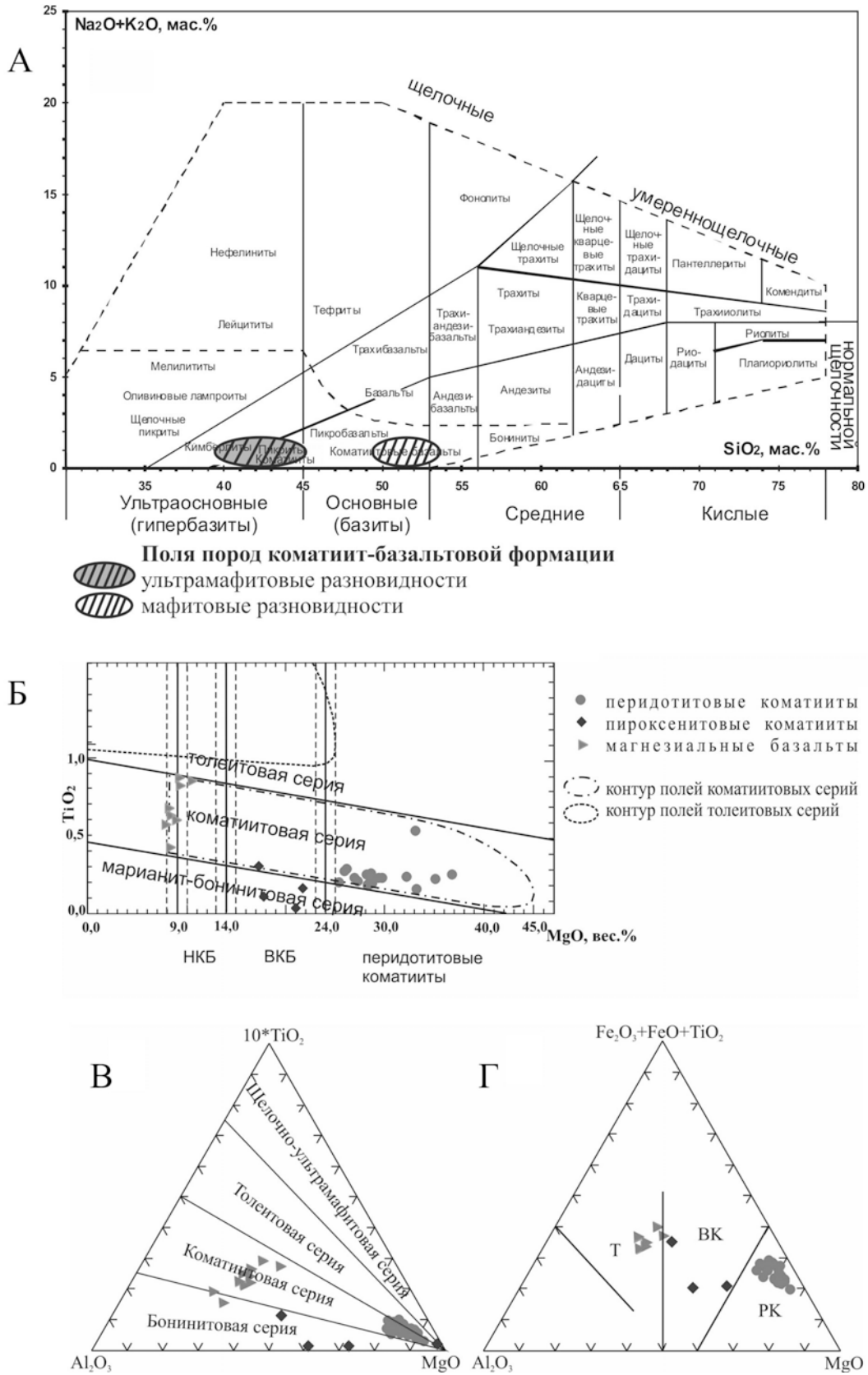
Химический состав главных типов пород Косиновского участка, вес. %

Компоненты	ПК												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	2549/ 396,0*)	2549/ 396,2	3719/ 434,5	3719/ 461,6	3719/ 632,0	3719/ 682,0	3719/ 490,6	2549/ 384,4	3719/ 469,4	3719/ 472,8	3719/ 473,9	3719/ 483,3	3719/ 489,2
SiO <sub>2</sub>	44,97	44,26	44,64	45,70	45,30	44,25	45,95	44,04	48,79	46,28	44,34	47,76	47,17
TiO <sub>2</sub>	0,49	0,26	0,25	0,22	0,27	0,25	0,53	0,29	0,29	0,28	0,26	0,21	0,26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,70	3,06	2,46	3,34	5,14	4,37	2,45	2,54	3,25	3,56	2,54	1,46	2,19
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,29	0,32	0,23	0,26	0,27	0,40	0,34	0,33	–	–	–	–	–
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,57	6,32	7,94	6,98	6,84	7,94	7,26	6,31	6,14	6,90	6,99	6,20	6,60
FeO	5,36	4,76	5,19	4,61	5,81	6,02	6,06	5,52	5,03	6,12	6,19	5,91	5,94
MnO	0,21	0,20	0,18	0,22	0,19	0,21	0,18	0,16	0,21	0,19	0,24	0,19	0,21
MgO	37,90	38,02	37,02	35,11	31,45	32,16	33,14	37,32	27,78	31,51	30,27	31,15	31,14
CaO	3,24	2,76	1,91	3,48	4,39	4,02	3,80	3,37	8,39	5,04	9,05	6,42	6,36
Na <sub>2</sub> O	0,17	0,12	0,21	0,14	0,30	0,26	0,06	0,02	0,05	0,06	0,06	0,09	0,05
K <sub>2</sub> O	0,06	0,06	0,06	0,03	0,04	0,04	0,01	0,01	0,05	0,06	0,06	0,58	0,05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,15	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,34	0,09	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
Сумма	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
CaO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,20	0,90	0,78	1,04	0,85	0,92	1,55	43,87	2,58	1,42	3,56	4,40	2,90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub>	5,51	11,77	9,84	15,18	19,04	17,48	4,62	0,85	11,21	12,71	9,77	6,95	8,42
Компоненты	ПК												
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
	3719/ 494,8	3719/ 495,8	2549/ 384,0	2549/ 391,0	2549/ 397,0	2549/ 397,8	2549/ 401,5	2549/ 403,0	2549/ 410,0	2549/ 413,5	2549/ 419,0	2549/ 364,2- 367,0	2549/ 391,2
SiO <sub>2</sub>	46,01	46,25	44,04	42,45	43,05	44,27	43,72	44,35	43,72	45,06	45,19	–	41,68
TiO <sub>2</sub>	0,29	0,26	0,29	0,26	0,25	0,44	0,40	0,37	0,36	0,36	0,31	0,14	0,19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,35	2,08	2,54	2,24	2,54	3,57	3,84	3,49	3,68	3,83	4,66	2,40	2,26
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	–	0,33	0,22	0,28	0,43	0,23	0,28	0,00	0,33	0,25	–	–
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,20	6,56	6,31	7,21	6,53	6,33	8,10	6,23	6,64	7,57	6,31	12,00	11,53
FeO	5,94	6,05	5,52	5,14	5,31	5,14	4,80	4,72	6,04	5,04	5,08	–	–
MnO	0,20	0,22	0,16	0,15	0,00	0,07	0,19	0,10	0,21	0,15	0,00	0,20	0,18
MgO	31,60	33,07	37,32	40,01	39,88	36,31	34,03	37,04	32,91	30,72	32,48	25,00	33,18
CaO	6,26	5,38	3,37	2,22	1,79	3,33	4,40	2,98	6,26	6,56	5,37	7,00	1,13
Na <sub>2</sub> O	0,09	0,06	0,02	0,01	0,09	0,01	0,00	0,09	0,05	0,10	0,11	0,01	0,07
K <sub>2</sub> O	0,06	0,06	0,01	0,01	0,05	0,01	0,00	0,05	0,02	0,03	0,04	0,01	0,02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01	0,01	0,09	0,08	0,00	0,07	0,08	0,07	0,10	0,09	0,11	0,03	0,01
Сумма	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	–	100,00
CaO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,66	2,59	1,33	0,99	0,70	0,93	1,15	0,85	1,70	1,71	1,15	2,92	0,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub>	8,10	8,00	8,76	8,62	10,16	8,11	9,60	9,43	10,22	10,64	15,03	17,14	11,89

Продолжение табл. 1

Компоненты	РК					РҮК			МВ		
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
	2549/ 407,8- 412,3	3719/ 495,0	3719/ 507,0	3719/ 632,0- 639,3	3721/ 605- 647	2549/ 291,0	2546/ 444,0	3719/ 514,5	2546/ 393,0	2546/ 436,0	2547/ 405,0
SiO <sub>2</sub>	–	–	45,58	44,73	44,48	47,73	41,24	51,39	50,71	50,15	53,56
TiO <sub>2</sub>	0,20	0,29	0,29	0,24	0,25	0,17	0,33	0,24	0,89	0,91	0,62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,30	3,30	3,15	4,57	4,77	11,59	12,16	8,22	10,73	11,38	13,14
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	–	–	–	–	0,14	0,10	0,18	0,12	0,08	0,03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,00	13,30	13,94	14,70	16,01	2,64	3,66	3,41	3,03	2,25	2,72
FeO	–	–	–	–	–	5,95	10,49	5,61	9,67	11,59	7,67
MnO	0,17	0,19	0,20	0,21	0,18	0,18	0,14	0,20	0,10	0,05	0,12
MgO	25,40	26,20	29,19	31,54	30,15	17,92	17,37	21,97	12,94	10,59	9,28
CaO	8,00	5,70	7,51	3,91	4,09	13,22	12,65	8,32	10,25	10,92	9,59
Na <sub>2</sub> O	0,05	0,04	0,09	0,10	0,04	0,31	1,43	0,39	1,12	2,28	2,59
K <sub>2</sub> O	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,21	0,41	0,13	0,41	0,26	0,85
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,08	0,10	0,03	0,22	0,24	0,27
Сумма	–	–	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
CaO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,48	1,73	2,38	0,86	0,86	1,14	1,04	1,01	0,96	0,96	0,73
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub>	11,50	11,38	10,86	19,04	19,08	68,18	36,85	34,25	12,06	12,51	21,19
Компоненты	МВ										
	38	39	40	41	42						
	2547/ 419,2	2546/ 366,5	2546/ 370,3	2546/ 439,0	2546/ 445,0						
SiO <sub>2</sub>	48,87	–	49,21	51,24	–						
TiO <sub>2</sub>	0,85	0,59	0,47	0,70	0,67						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,55	16,90	15,45	9,05	12,40						
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	–	–	–	–						
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,28	11,50	11,38	15,77	14,20						
FeO	8,73	–	–	–	–						
MnO	0,09	0,16	0,16	0,17	0,18						
MgO	10,38	7,50	8,58	9,05	8,30						
CaO	11,43	8,90	12,14	11,24	9,70						
Na <sub>2</sub> O	2,14	3,30	2,35	2,43	2,80						
K <sub>2</sub> O	0,51	0,95	0,22	0,23	0,19						
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,23	0,03	0,03	0,12	0,03						
Сумма	100,00	–	100,00	100,00	–						
CaO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,84	0,53	0,79	1,24	0,78						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub>	15,94	28,64	32,87	12,93	18,51						

Примечание: \*2549/364,2-367,0 – номер скважины/ глубина, м. Прочерк – не определялось. РК – перидотитовые комагиты, РҮК – пироксенитовые комагиты, МВ – магнезиальные базальты. 1–8, 19, 20, 32–34, 37, 38 – [3], 9–15 – [11], 16–18, 21–24, 35–36 – [5], 26, 29–31, 40, 41 – содержание главных элементов измерено методом XRF, ИПМТ РАН, аналитик А.И. Якушев 2010 г., 25, 27, 28, 39, 42 – содержание главных элементов измерено методом ICP-MS, ИГЕМ РАН, аналитик С. А. Горбачёва, 2010 г. Ввиду того, что породы не сохранили своего первичного минерального состава, сделан пересчет химических анализов на безводный остаток.



**Рис. 2.** Положение составов ультрамафит-мафитовых пород Косиновского участка на классификационных петрохимических диаграммах: А –  $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$  [7]; Б –  $\text{MgO} - \text{TiO}_2$  [8]; НКБ – низкомагнезиальные базальты, ВКБ – высокомагнезиальные базальты; В –  $10 \cdot \text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$  [8]; Г –  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$  [12]; РК – перидотитовые коматииты, ВК – базальтовые коматииты, Т – толеиты

Магнезиальные базальты (МВ), пространственно связанные с пироксенитовыми коматиитами [4], характеризуются (см таблица 1) низкой магнезиальностью ( $MgO = 7,50-12,94\%$ ),  $SiO_2 = 48,87-53,56\%$ ,  $TiO_2$  до  $0,91\%$ ,  $CaO/Al_2O_3 = 0,53-1,24$ ,  $Al_2O_3/TiO_2 > 10$ . На диаграмме  $MgO-TiO_2$  (см. рис. 2, Б) магнезиальные базальты принадлежат низкомагнезиальным коматиитовым базальтам (НКБ).

Как видно на рис. 2, В, большинство ультрамафит-мафитовых пород относятся к коматиитовой серии, но некоторые из них в силу определенного дефицита окиси титана, либо избытка глинозема отклоняются в поля бонинитовой серии.

По соотношению  $Fe_2O_3+FeO+TiO_2 - Al_2O_3 - MgO$  (рис. 2, Г) МВ попадают в поле толеитов. Вероятно, это связано, как упоминалось выше, с избытком глинозема, либо о МВ можно говорить как о породах, переходных к толеитовым базальтам.

Зависимость содержаний петрогенных оксидов от концентрации  $SiO_2$  и  $MgO$  проявлена достаточно четко, что в целом типично для пород коматиит-базальтовой формации. С увеличением кремнекислоты и уменьшением магнезиальности содержания  $CaO$  и  $Al_2O_3$  заметно возрастают (рис. 3). Подобные тренды, возможно, отражают элементы фракционной кристаллизации.

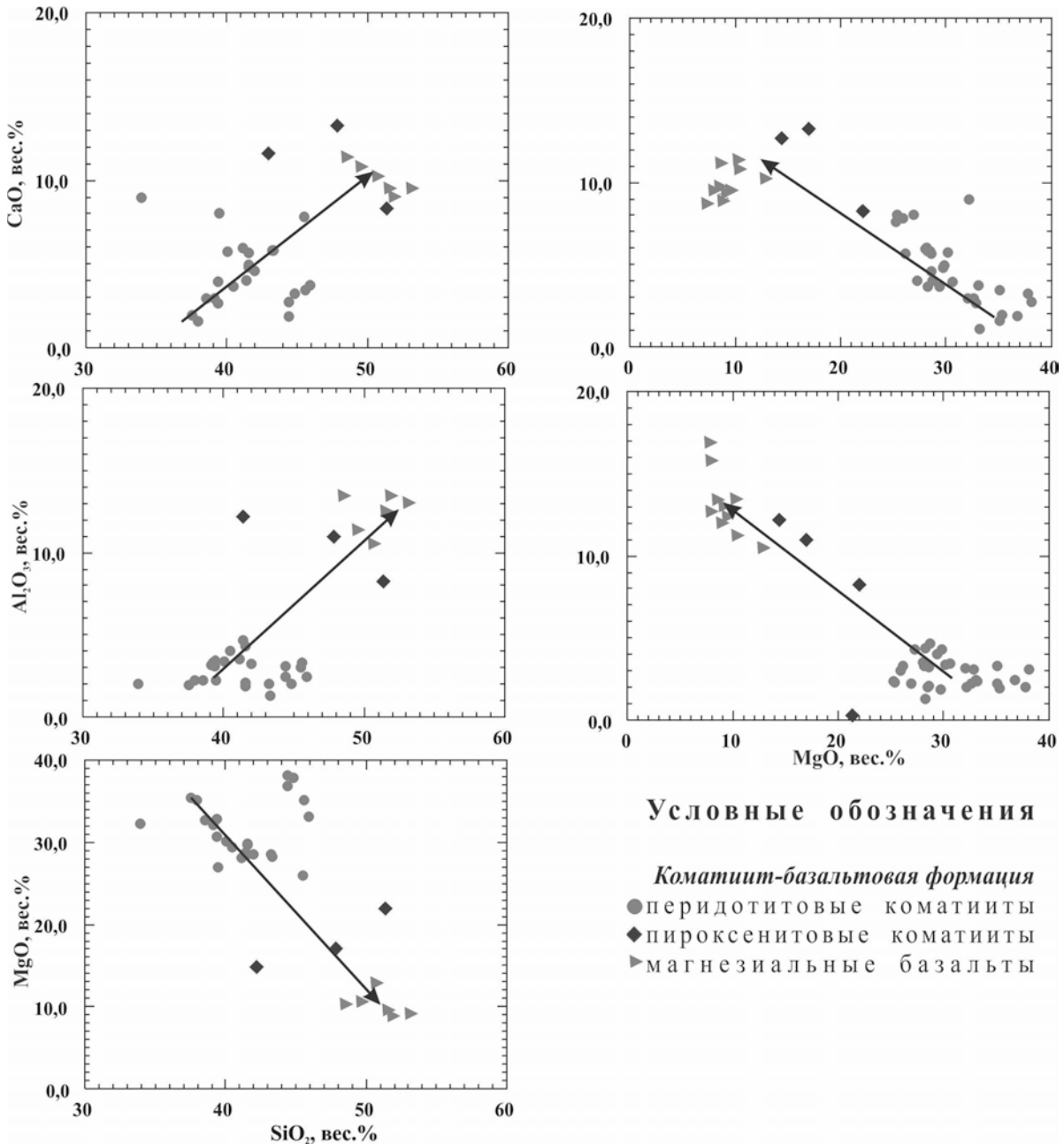


Рис. 3. Положение фигуративных точек ультрамафит-мафитовых пород Косиновского участка на вариационных диаграммах Харкера [13]

Таким образом, в качестве индикаторных признаков принадлежности ультрамафит-мафитовых пород Косиновского участка к коматиит-базальтовой формации выступают: высокая магнезиальность, низкая щелочность, низкая титанистость. Петрохимическими критериями диагностики коматиитов являются присущие им необычно высокие для эффузивных пород содержания  $MgO$ , а также повышенные значения параметров  $CaO/Al_2O_3$ ,  $Al_2O_3/TiO_2$ .

### Геохимия

При геохимической диагностике и систематике коматиитов, а также при решении вопросов генезиса [11, 14, 15] в настоящее время все шире используются данные о распределении РЗЭ и некоторых других элементов-примесей.

*Перидотитовые коматииты* Косиновского участка имеют преимущественно слабо фракционированный характер (таблица 2, рис. 4, а) при значениях отношений  $(La/Yb)_n = 0,31-1,92$  до 6,10 (среднее 0,89),  $(La/Sm)_n = 0,61-1,25$  до 3,75 (среднее 0,94),  $(Gd/Yb)_n = 0,53-2,25$ ,  $(Ce/Yb)_n = 0,41-1,96$  до 4,36. Суммарное содержание РЗЭ в РК изменяется в интервале 5,68–30,95 г/т (среднее 12,22). На графиках нормализованных распределений РЗЭ (рис. 4, а, г) большинство РК Косиновского участка имеют пологий как положительный, так и отрицательный профиль. Преобладают отрицательные европиевые аномалии ( $Eu/Eu^* = 0,353-0,944$ , среднее  $-0,778$ ), которые свидетельствует о том, что в результате процессов фракционной кристаллизации или частичного плавления плагиоклаз остается в источнике.

Интерпретация поведения РЗЭ *пироксенитовых коматиитов* проведена лишь по одному образцу, характеризующегося (см рис. 4, б, д) небольшим обогащением легкими РЗЭ  $(La/Yb)_n = 2,25$ ,  $(La/Sm)_n = 1,25$ ,  $(Gd/Yb)_n = 1,73$ ,  $(Ce/Yb)_n = 1,96$ , пологим отрицательным наклоном с выраженной положительной европиевой аномалией ( $Eu/Eu^* = +2,85$ ), свидетельствующей скорее о мобильности Eu.

*Магнезиальные базальты* характеризуются слабо фракционированным (см рис. 4 в, е) распределением РЗЭ ( $(La/Sm)_n = 0,48-1,07$ ,  $(La/Yb)_n = 0,42-1,07$ ,  $(Gd/Yb)_n = 1,09-1,26$ ,  $(Ce/Yb)_n = 0,45-1,16$ ), суммарным содержанием РЗЭ в пределах 17,7–26,8 г/т (см. табл. 2). Спектры РЗЭ *МВ* Косиновского участка имеют пологий достаточно равномерный профиль.

Распределение РЗЭ в РК, РYК и МВ почти в 5–10 раз превышает хондритовое и очень близко к уровню примитивной мантии (см. рис. 4).

Сходство ультрамафитовых пород коматиитовой серии Косиновского участка КМА с некоторыми зеленокаменными провинциями мира отчетливо прослеживается в характере распределения РЗЭ (табл. 3, рис. 5). Редкоземельные спектры пород зеленокаменных провинций мира, в том числе и Косиновского участка КМА, имеют близхондритовый уровень. Среднее значение редкоземельного спектра коматиитов Косиновского участка имеет слабый пологий отрицательный наклон. Подобные спектры характерны для пород коматиит-базальтовой формации в провинциях Онвервахт, Барбертон и Балтийского щита.

При систематике коматиитов по редкоземельному составу предложено использовать значения двух основных геохимических параметров:  $(La/Sm)_n$  и  $(Gd/Yb)_n$  [16]. По этим критериям выделяют три геохимические группы коматиитов, в свою очередь разделенные на классы (табл. 4).

По данной геохимической классификации ультрамафитовые разновидности пород Косиновского участка принадлежат, главным образом, к классу 5 (II группа) и обнаруживают сходные признаки с коматиитами провинций Онвервахт, Барбертон и в меньшей степени Балтийского щита (табл. 5). То есть это коматииты преимущественно деплетированные тяжелыми РЗЭ и обогащенные легкими РЗЭ.

Ультрамафитовые разновидности коматиитов имеют высокие концентрации (см табл. 2) Cr (1528,57–3752,00 в РК, 231,00 г/т в РYК), Ni (1213,00–2277,52 в РК, 1012,00 г/т в РYК) и Co (90,00–108,19 в РК, 61,8 г/т в РYК) и низкие – Cu (5,80–47,50 в РК, 30,00 г/т в РYК) по сравнению с кларками этих элементов в земной коре. Отношения  $Ni/Cu > 10$  и  $Ni/Co > 10$ , что типично для коматиитов эталонных зеленокаменных провинций [23].

Магнезиальные базальты в сопоставлении с РК и РYК обеднены Cr (147–416 г/т), Ni (94,8–147 г/т) и Co (50,70–70,00 г/т), но содержания Cu выше кларковых (149,00–509,00 г/т) при  $Ni/Cu < 1$  ( $Ni/Cu = 0,19-0,99$ ).

Поведение редких элементов является характерным для пород коматиит-базальтовой формации, что видно на вариационных диаграммах (рис. 6). При уменьшении магнезиальности породы характеризуются снижением содержания Ni (с 2277,52 до 94,80 г/т), Cr (3752,00 до 147,00 г/т), Co



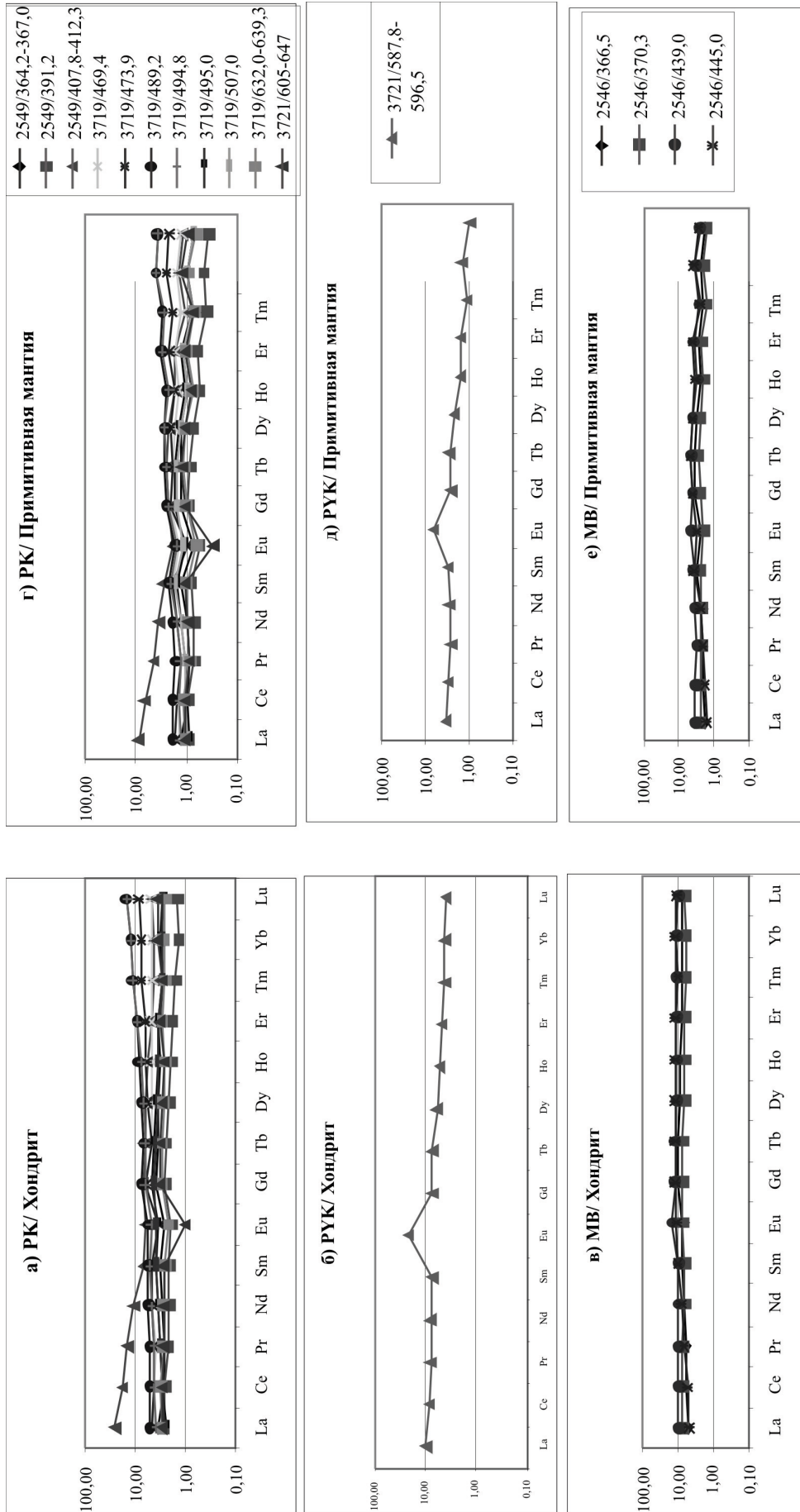


Рис. 4. Нормализованные к хондриту (Evensen, 1978) и примитивной мантии (Sun, 1989) распределения редкоземельных элементов в породах Косиновского участка

Таблица 2

Содержания редких и редкоземельных элементов (г/т) в породах коматитовой серии Косиновского участка КМА

Порода	ПК												РУК				МВ			
	2549/ 364,2- 367,0*	2549/ 391,2	2549/ 407,8- 412,3	3719/ 469,4	3719/ 473,9	3719/ 489,2	3719/ 494,8	3719/ 495,0	3719/ 507,0	3719/ 632,0- 639,3	3719/ 605- 647	3721/ 587,8- 596,5	2546/ 366,5	2546/ 370,3	2546/ 439,0	2546/ 445,0				
Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16				
Ст	1528,57	1721,35	2033,14	1913,00	1780,00	1690,00	1762,00	2252,00	1981,00	2733,00	3752,00	231,00	147,00	243,00	416,00	377,00				
Ni	1683,07	2277,52	1363,27	1556,00	1366,00	1980,00	1875,00	1886,00	1753,00	1743,00	1213,00	1012,00	94,80	147,00	135,00	123,00				
Co	106,93	105,28	108,19	90,00	100,00	99,00	118,00	115,00	100,00	117,00	95,50	61,80	58,20	50,70	53,90	70,00				
Cu	6,97	22,02	35,18	43,00	66,00	28,00	40,00	36,20	47,50	25,20	5,80	30,00	509,00	149,00	250,00	212,00				
Ti	869,41	956,94	1181,99	1618,92	1379,08	1439,04	1558,96	1712,50	1520,04	1073,55	1273,20	265,97	3522,32	2615,76	3866,20	4024,58				
La	0,86	0,65	6,30	1,00	1,10	1,30	0,93	0,60	0,60	0,73	0,70	2,30	1,20	1,70	2,30	1,20				
Ce	1,70	1,60	11,70	2,60	2,70	3,30	2,60	1,80	1,90	2,00	1,90	5,10	3,60	4,50	6,00	3,20				
Pr	0,25	0,21	1,30	0,39	0,40	0,49	0,40	0,31	0,31	0,26	0,26	0,75	0,58	0,67	0,94	0,60				
Nd	1,40	0,94	4,90	2,10	2,10	2,60	2,10	1,70	1,70	1,30	1,30	3,60	3,20	3,20	4,70	3,60				
Sm	0,50	0,33	1,10	0,72	0,76	0,86	0,78	0,61	0,62	0,40	0,41	1,10	1,20	1,00	1,50	1,50				
Eu	0,15	0,11	0,36	0,28	0,20	0,33	0,29	0,22	0,23	0,12	0,06	1,20	0,43	0,41	0,88	0,60				
Gd	0,78	0,54	1,40	1,20	1,20	1,50	1,30	0,94	0,87	0,58	0,64	1,50	2,00	1,40	2,50	2,50				
Tb	0,13	0,09	0,25	0,19	0,19	0,27	0,25	0,16	0,15	0,11	0,12	0,27	0,38	0,27	0,45	0,47				
Dy	0,84	0,51	1,50	1,20	1,40	1,90	1,80	1,00	0,91	0,71	0,75	1,50	2,20	1,70	2,80	3,00				
Ho	0,19	0,11	0,31	0,27	0,35	0,49	0,44	0,20	0,20	0,15	0,16	0,30	0,48	0,38	0,59	0,66				
Er	0,55	0,30	0,83	0,80	1,10	1,60	1,50	0,62	0,58	0,47	0,51	0,78	1,40	1,10	1,90	2,00				
Tm	0,067	0,04	0,11	0,12	0,19	0,30	0,29	0,08	0,08	0,07	0,07	0,11	0,20	0,16	0,27	0,25				
Yb	0,50	0,23	0,69	0,74	1,20	2,10	2,00	0,51	0,50	0,45	0,60	0,68	1,30	1,00	1,70	1,90				
Lu	0,07	0,04	0,11	0,12	0,22	0,38	0,37	0,07	0,60	0,06	0,09	0,10	1,20	1,70	2,30	1,20				
ΣTR	7,96	5,68	30,95	11,73	13,11	17,42	15,05	8,82	8,72	7,38	7,59	19,34	18,20	17,74	26,79	21,75				
(La/Yb) <sub>n</sub>	1,15	1,92	6,10	0,91	0,62	0,42	0,31	0,78	0,84	1,10	0,83	2,25	0,66	1,14	0,90	0,42				
(La/Sm) <sub>n</sub>	1,08	1,25	3,58	0,87	0,91	0,95	0,75	0,61	0,63	1,17	1,13	1,25	0,65	1,07	0,93	0,48				
(Gd/Yb) <sub>n</sub>	1,25	1,92	1,64	1,31	0,81	0,58	0,53	1,50	1,40	1,05	0,86	1,73	1,26	1,14	1,18	1,09				
(Ce/Yb) <sub>n</sub>	0,87	1,82	4,37	0,91	0,58	0,41	0,34	0,93	0,98	1,13	0,81	1,96	0,75	1,16	0,91	0,45				
Eu/Eu*	0,70	0,77	0,89	0,90	0,63	0,86	0,86	0,87	0,94	0,78	0,35	2,85	0,85	1,06	1,35	0,92				

Примечание: \*) см. таблицу 1. 1-3, 8-9 – [ICR MS, ИГЕМ РАН, анализик С. А. Горбачёва, 2010 г.]; 4-7 – [6, 11].

Таблица 3

Средние содержания редкоземельных элементов в коматиитах эталонных объектов различных зеленокаменных провинций Мира, г/т

	Онвервархт (13)	Барбертон (10)	Абитиби (13)	Камбалда (34)	Балтийский щит (33)	Косиновский участок (12)
Возраст	Мезоархей	Мезоархей	Неоархей	Неоархей	Архей	Неоархей
	1	2	3	4	5	6
La	4,79	2,20	1,12	0,72	0,87	1,42
Ce	12,88	5,43	2,51	2,05	2,04	3,24
Pr	Н.д.	Н.д.	Н.д.	0,44	0,34	0,45
Nd	6,58	4,04	2,69	1,93	1,53	2,14
Sm	1,89	1,21	0,94	0,72	0,50	0,69
Eu	0,63	0,41	0,37	0,27	0,15	0,30
Gd	2,27	1,57	1,48	1,06	0,71	1,03
Tb	Н.д.	0,30	Н.д.	0,25	0,11	0,18
Dy	2,56	1,71	1,87	1,41	0,85	1,17
Ho	Н.д.	0,43	Н.д.	0,40	0,20	0,26
Er	1,48	1,00	1,21	0,87	0,53	0,80
Tm	Н.д.	Н.д.	Н.д.	0,16	0,08	0,13
Yb	1,37	0,95	1,08	0,83	0,47	0,85
Lu	0,24	0,17	0,10	0,16	0,07	0,14
ΣTR	34,69	19,42	13,37	11,27	8,45	12,81
(La/Sm) <sub>n</sub>	1,59	1,14	0,75	0,63	1,09	1,30
(La/Yb) <sub>n</sub>	2,35	1,56	0,70	0,58	1,25	1,13
(Ce/Yb) <sub>n</sub>	2,43	1,48	0,60	0,64	1,12	0,99
(Gd/Yb) <sub>n</sub>	1,34	1,34	1,11	1,03	1,22	0,98
Eu/Eu*	-0,93	-0,91	-0,94	-0,94	-0,77	-1,06

Примечание: в скобках указано количество анализов; Н.д. – нет данных; 1 – [16, 17], 2 – [17, 18], 3 – [19, 20], 4 – [18, 21], 5 – [22], 6 – [6, 11, ISP MS, ИГЕМ РАН, аналитик В. Карандашов, 2010 г.].

Таблица 4

Геохимическая классификация коматиитов по [16]

Группа		Класс	
I	Тяжелые РЗЭ – нефракционированные (Gd/Yb) <sub>n</sub> ~ 1,0	1	Легкие РЗЭ – нефракционированные (La/Sm) <sub>n</sub> ~ 1,0
		2	Легкие РЗЭ – истощенные (La/Sm) <sub>n</sub> < 1,0
		3	Легкие РЗЭ – обогащенные (La/Sm) <sub>n</sub> > 1,0
II	Тяжелые РЗЭ – истощенные (Gd/Yb) <sub>n</sub> > 1,0	4	Легкие РЗЭ – истощенные (La/Sm) <sub>n</sub> < 1,0
		5	Легкие РЗЭ – обогащенные (La/Sm) <sub>n</sub> > 1,0
III	Тяжелые РЗЭ – обогащенные (Gd/Yb) <sub>n</sub> < 1,0	6	

Таблица 5

Частота встречаемости геохимических типов коматиитов

Группа	Класс	Провинция					КМА (Косиновский участок) n = 16
		Онвервахт n = 12	Барбертон n = 9	Абитиби n = 7	Камбалда n = 34	Балтийский щит n = 16	
I	1	нет	нет	нет	нет	нет	нет
	2	нет	нет	5	25	1	нет
	3	1	1	нет	нет	2	1
II	4	5	3	нет	6	4	2
	5	5	5	нет	нет	3	11
III	6	1	нет	2	3	6	2

Примечание: n – количество анализов, нет – коматииты данного класса отсутствуют.

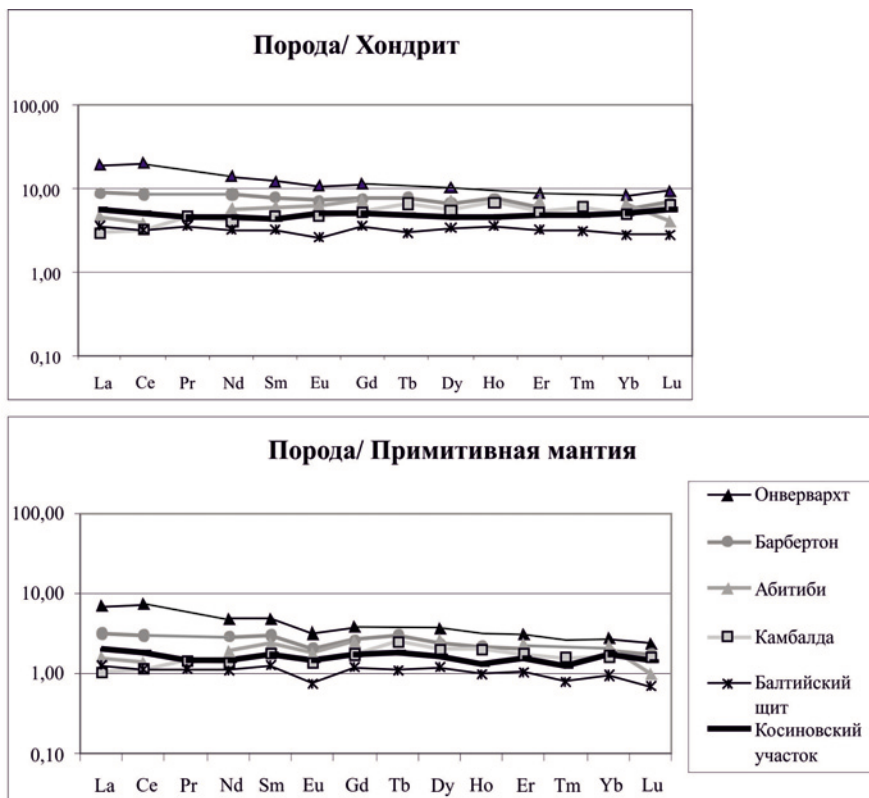


Рис. 5. Сравнительная характеристика распределений РЗЭ пород коматиитовой серии различных эталонных объектов зеленокаменных провинций Мира

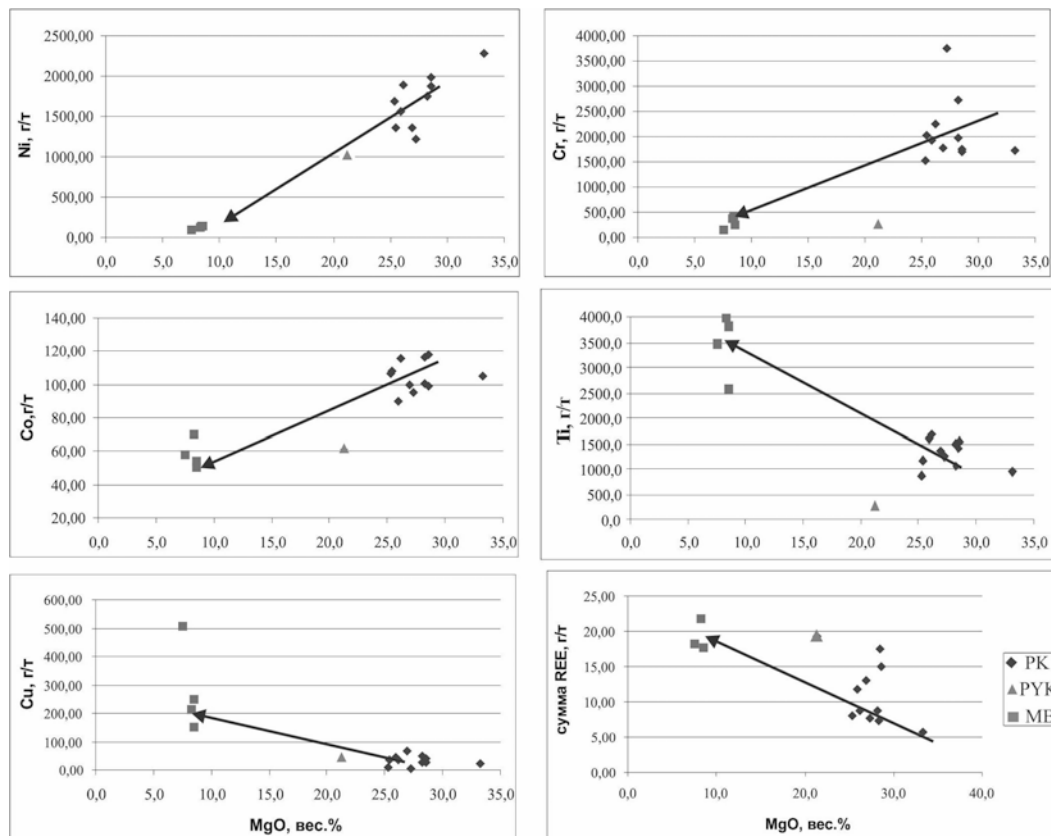


Рис. 6. Вариации концентраций микроэлементов в зависимости от содержания магния в породах коматиитовой серии Косиновского участка

(118 до 50,70 г/т), увеличением содержания Cu (от 5,80 до 509,00 г/т), Ti (от 1074,55 до 4024,58 г/т), Zr (от 1,90 до 32,70 г/т), Sr (от 6,30 до 133,00 г/т) и суммы редкоземельных элементов (от 5,68 до 26,79 г/т).

Таким образом, исследуемые породы Косиновского участка КМА характеризуются преимущественно пологими спектрами распределения содержаний РЗЭ, нормированных на примитивную мантию и хондрит, и низкими  $(La/Sm)_n$  и  $(La/Yb)_n$  отношениями, что, по-видимому, обусловлено высокой степенью плавления мантийных субстратов при образовании родоначальных расплавов. Редкоземельные спектры коматиитов Косиновского участка КМА, как и спектры подобных пород эталонных объектов зеленокаменных провинций Мира, в большинстве своем имеют пологие положительные, иногда отрицательные наклоны, указывающие на относительно слабое фракционирование элементов. Некоторые спектры осложнены либо отрицательными, либо положительными аномалиями Eu низкой интенсивности. Аналогично зеленокаменным провинциям в пределах Косиновского участка, доминирует один из геохимических типов пород, а именно коматииты 5 класса (II группа), т.е. коматииты преимущественно деплетированные тяжелыми РЗЭ и обогащенные легкими РЗЭ.

### Заключение

Изучение петрогеохимических особенностей мафит-ультрамафитовых вулканитов Косиновского участка позволило на основе использования современных методов исследования вещества впервые доказать принадлежность пород к коматиит-базальтовой формации. На базе существующих специальных петрохимических диаграмм выделено три типа пород: перидотитовые коматииты, пироксенитовые коматииты и магнезиальные базальты. При этом среди последних не исключается наличие как коматиитовых, так и толеитовых базальтов. По комплексу петрохимических параметров магматиты Косиновского участка на известных диаграммах TAS,  $MgO - TiO_2$ ,  $Al_2O_3 - MgO - TiO_2$ ,  $Al_2O_3 - MgO - Fe_2O_3 + FeO + TiO_2$  располагаются преимущественно в поле коматиитов. Приуроченность отдельных анализов к бонинитовой и толеитовой сериям связано с высокой степенью переработки исходных пород. Индикаторными петрохимическими критериями выступают: высокая магнезиальность, низкая щелочность, низкая титанистость, повышенные значения параметров  $CaO/Al_2O_3$ ,  $Al_2O_3/TiO_2$ .

Выполненные исследования по распределению редкоземельных элементов и их нормализованные по хондриту и примитивной мантии величины свидетельствуют о принадлежности породной ассоциации Косиновского участка к коматиит-базальтовой формации. Породы характеризуются преимущественно пологими спектрами распределения содержаний РЗЭ, указывающими на относительно слабое фракционирование элементов, и низкими  $(La/Sm)_n$  и  $(La/Yb)_n$  отношениями. Некоторые спектры осложнены либо отрицательными, либо положительными аномалиями Eu низкой интенсивности. Установлен высокий уровень их аналогии по распределению редкоземельных элементов с известными мировыми аналогами (Онвервахт, Барбертон, Абитиби, Камбалда, Балтийский щит). Впервые автором на основе геохимической классификации ультрамафитовых разновидностей пород Косиновского участка выделены как коматииты преимущественно деплетированные тяжелыми РЗЭ и обогащенные легкими РЗЭ. Отмечены присущие лишь коматиитовым вулканитам высокие величины отношений  $Ni/Cu > 10$  и  $Ni/Co > 10$ , что является одним из признаков формационной принадлежности пород к коматиитовой серии.

Развитие в пределах Косиновского участка КМА выделенной коматиитовой породной ассоциации открывает возможности выявления никелевого оруденения австралийского типа.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 08-05-00158-а, ГК №02.740.11.002 и П171*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Чернышов Н. М. Структурно-тектоническое районирование ВКМ (по геологическим и геофизическим данным) / Н. М. Чернышов [и др.] // Современные проблемы геологии : материалы юбилейной научной сессии геолог. ф-та ВГУ. – Воронеж, 1998. – С. 5–7.
2. Чернышов Н. М. Платиноносные формации Курско-Воронежского региона (Центральная Россия) : монография / Н. М. Чернышов. – Воронеж : Изд-во ВГУ, 2004. – 448 с.
3. Бочаров В. Л. Ультрамафит-мафитовый магматизм гранит-зеленокаменной области КМА / В. Л. Бочаров [и др.] – Воронеж : Изд-во ВГУ, 1993. – 176 с.
4. Крестин Е. М. Коматииты позднеархейских зеленокаменных поясов Воронежского кристаллического массива / Е. М. Крестин // Сов. геология. – 1980. – № 9. – С. 84–97.
5. Ножкин А. Д. Радиоактивные элементы в породах раннего докембрия (на примере КМА) / А. Д. Ножкин, Е. М. Крестин. – М. : Наука, 1984. – 126 с.

6. Которгин Н. Ф. Архейские зеленокаменные пояса Центрального региона России / Н. Ф. Которгин. – М. : Современные тетради, 2001. – 164 с.
7. Петрографический кодекс / под ред. О. А. Богатикова, О. В. Петрова. – СПб. : ВСЕГЕИ, 2009 – 198 с.
8. Куликов В. С. Коматииты и высокомагнезиальные вулканиды раннего докембрия Балтийского щита / В. С. Куликов [и др.]. – Л. : Наука, 1988. – 191 с.
9. Куликов В. С. Классификация высокомагнезиальных магматических пород / В. В. Куликова, В. С. Куликов // Материалы 2-й ежегодной научн. конфер. Петрология магматических и метаморфических комплексов. – Томск, 2001. – Вып. 2. – С. 146–151.
10. Куликова В. В. Петрохимические серии магматических пород / В. В. Куликова [и др.]. – Петрозаводск, 2001. – 115 с.
11. Балашов Ю. А. Геохимия редкоземельных и редких элементов в архейских зеленокаменных поясах Воронежского кристаллического массива / Ю. А. Балашов, Н. Ф. Которгин // Геохимия. – 1990. – № 4. – С. 603–609.
12. Jensen L. S. A new cation plot for classifying subalkalic volcanic rocks / L. S. Jensen // Ontario Dept. Mines. 1976. Misc. Pap. V. 66. 22 p.
13. Harker A. The natural history of igneous rocks / Harker A. Methuen. – London, 1909.
14. Конди К. Архейские зеленокаменные пояса: пер. с англ. / Конди К. – М.: Мир, 1983. – 390 с.
15. Леснов Ф. П. Редкоземельные элементы в ультрамафитовых и мафитовых породах и их минералах : в 2 кн. / Ф. П. Леснов; Рос. Акад. наук, Сибирское отд.; Ин-т геологии и минералогии им. В. С. Соболева. – Новосибирск : Гео, 2007. – 403 с.
16. Jahn B. Komatiites of the Onverwacht group, S. Africa: REE geochemistry, Sm/Nd age and mantle evolution / B. Jahn, G. Cruau, A.Y. Glikson // Contrib. Mineral. Petrol. – 1982. Vol. 80. – P. 25–40.
17. Sun Sh. S. Petrogenesis of archaic ultrabasic and basic volcanics: evidence from rare earth elements / Sh. S. Sun, R.W. Nesbitt // Contribs Mineral. Petrol. – 1978. – Vol. 65, № 5. – P. 301–325.
18. Herrmann A.G. Major, minor and trace element composition of peridotitic and basaltic komatiites from precambrium crust of Southern Africa / A. G. Herrmann [et al.] // Contribs Mineral. Petrol. – 1976. – Vol. 59, № 1. – P. 1–12.
19. Arndt N.T. Ultrabasic magma and high-degree melting of mantle / N. T. Arndt // Contrib. Mineral. Petrol. – 1977. – Vol. 64, № 2. – P. 205–221.
20. Beswick A.E. Praymery fractionation and secondary alteration within an archaic ultramafic lava flow (Abitibi) / A. E. Beswick // Contrib. Mineral. Petrol. – 1983. – Vol. 82, – № 2–3. – P. 221–231.
21. Jensen L. S. A new cation plot for classifying subalkalic volcanic rocks / L. S. Jensen // Ontario Dept. Mines. – 1976. – Misc. Pap. – V. 66. – 22 p.
22. Вревский А. Б. Петрология коматиитов Балтийского щита и изотопно-геохимическая эволюция их мантийных источников / А. Б. Вревский, В. А. Матреничев, М. С. Ружьева. – Петрология. – 2003. – Т. 11, № 6. – С. 587–617.
23. Naldrett A. J. Ultramafic and related mafic rocks: Their classification and genesis with special reference to the concentration of nickel sulfides and platinum – group elements / A. J. Naldrett, L. J. Cabri // Econ. Geol. – 1976. – Vol. 71. – P. 1131–1158.

*Воронежский государственный университет*  
Е. М. Боброва, аспирант кафедры минералогии и петрологии  
samorodok2006@mail.ru  
Тел. 8 (473) 220-87-79

*Voronezh State University*  
E. M. Bobrova, post-graduate student of Chair of Mineralogy and Petrology  
samorodok2006@mail.ru  
Tel. 8 (473) 220-87-79