

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ИСТОЧНИКИ РАСПЛАВОВ НЕОАРХЕЙСКИХ УЛЬТРАКАЛИЕВЫХ РИОЛИТОВ КУРСКОГО БЛОКА ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА

Н. В. Холина

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 16 января 2018 г.

Аннотация: в пределах Курского блока Воронежского кристаллического массива располагаются неоархейские высококремнистые ультракалиевые риолиты, которые по своим геохимическим особенностям относятся к гранитоидам А-типа и сформировались во внутриплитной постколлизийной геодинамической обстановке. Формирование ультракалиевых расплавов кислого состава происходило при частичном высокотемпературном плавлении коры, которая обогащалась мантийным веществом, несущим калийсодержащие флюиды. В качестве корового источника расплава могли быть тоналит-трондjemит-гранодиоритовые гнейсы обоянского комплекса, а источником мантийного вещества в пределах Курского блока могут являться неоархейские метабазиты, подстилающие ультракалиевые риолиты.

Ключевые слова: неоархей, ультракалиевые риолиты, геохимия, Курский блок, граниты А-типа, источники расплавов.

GEOCHEMICAL TYPIZATION AND SOURCES OF MELTS OF THE NEOARCHEAN ULTRAPOTASSIC RHYOLITES OF THE KURSK BLOCK, VORONEZH CRYSTALLINE MASSIF

Abstract: within a block of the Kursk Voronezh crystalline massif are Neoproterozoic high-ultrapotassic rhyolites, which by their geochemical characteristics belong to granitoids A-type and formed in intraplate post-collisional geodynamic setting. The formation of ultrapotassic melts acid composition occurred at high temperature partial melting crust, which has been enriched mantle substance bearing a potassium-containing fluids. As the crustal source of the melt could be tonalite-trondhjemite-granodiorite gneisses of the Oboyan complex and the source of the mantle material within the Kursk block can be Neoproterozoic metabasites, the underlying ultrapotassic rhyolites.

Keywords: Neoproterozoic, ultrapotassic rhyolites, geochemistry, Kursk block, A-type granites, sources of melts.

Введение

Риолиты с высоким содержанием калия достаточно широко развиты в различных регионах мира, где они образуются на завершающих стадиях орогенеза или при активизации платформ (континентальный рифтогенез). Появляясь на завершающих этапах орогенного развития регионов, а также в процессе их тектоно-магматической активизации. Ультракалиевые риолиты могут служить реперами тектонической стадийности, позволяющими проследить эволюцию вулканической деятельности во времени и в пространстве на различных этапах геотектонического развития регионов.

На территории Курского блока Воронежского кристаллического массива риолиты с высоким содержанием калия располагаются в пределах Воронежско-Алексеевского зеленокаменного пояса и распространены ограниченно в южном замыкании Тим-Ястребовской структуры (рис. 1). Неоархейские кис-

лые вулканы объединены в лебединскую свиту Михайловской серии и стратиграфически залегают на границе неоархея и палеопротерозоя.

В настоящей статье задачами исследования являются: (1) выявление геохимических особенностей неархейских ультракалиевых риолитов Курского блока, (2) установление источников расплавов и тектонической обстановки проявления кислого магматизма в конце неархея.

Геологическое положение

Курский блок расположен в западной части Воронежского кристаллического массива и представляет собой гранит-зеленокаменную область, в пределах которой выделяются два неархейских зеленокаменных пояса северо-западного простирания: западный Львовско-Ракитнянский (Белгородско-Михайловский) и восточный Алексеевско-Воронежский (Орловско-Тимской).

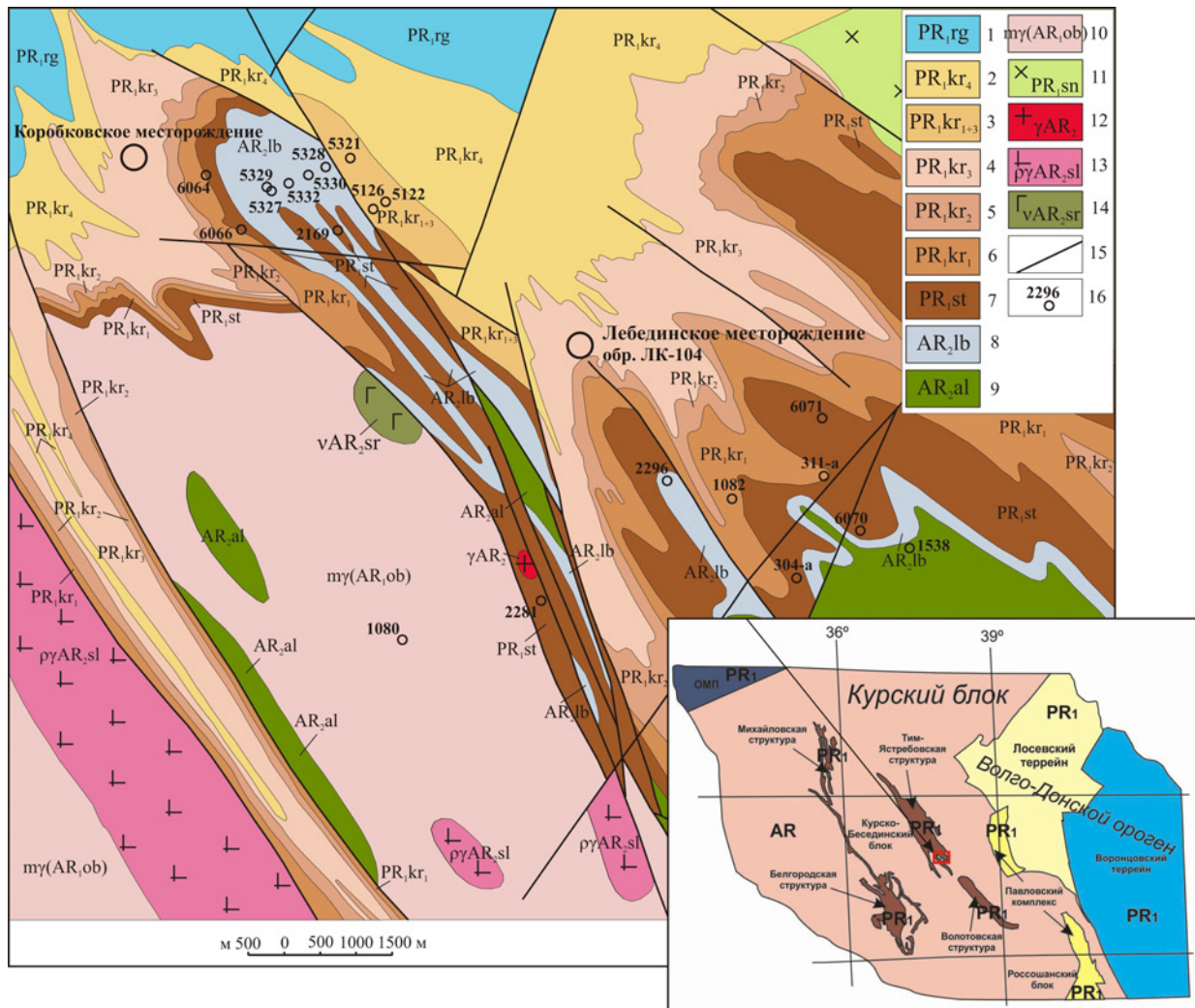


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Старооскольского рудного района с расположением скважин, вскрывших лебединскую свиту михайловской серии (по неопубликованным материалам Н. А. Плаксенко). НИЖНИЙ ПРОТЕРОЗОЙ. Оскольская серия: 1 - роговая свита. Кварцево-сланцевые сланцы, известняки и доломиты, метаалевролиты, метапесчаники, конгломераты. Курская серия. 2-7: 2-6 - коробковская свита. Кварциты магнетитовые, магнетит-гематитовые, силикатно-магнетитовые; сланцы кварц-биотитовые, кварц-амфиболовые, кварц-хлоритовые, углеродистые. 7 - стойленская свита. Сланцы кварц-биотитовые, кварц-серицитовые, кварц-хлоритовые, кварц-двуслюдяные, метапесчаники, кварциты, метагравелиты, метакогломераты. ВЕРХНИЙ АРХЕЙ. 8-9 - Михайловская серия: 8 - лебединская свита. Метариолиты, метариодациты, метадациты, сланцы кварц-биотитовые, кварц-двуслюдяные, кварц-хлоритовые, иногда метапесчаники, кварциты; 9 - александровская свита. Ортоамфиболиты, ортосланцы основного и ультраосновного состава. НИЖНИЙ АРХЕЙ. 10 - обоянская серия. Мигматизированные и гранитизированные гнейсы, мигматиты, прослои амфиболитов, амфиболовых сланцев. ИНТРУЗИВНЫЕ КОМПЛЕКСЫ. Раннепротерозойские: 11 - стойло-николаевский комплекс. Вторая фаза - гранодиориты, диориты, габбродиориты. 12-13 - позднеархейские: 12 - гранит-порфиры; 13 - салтыковский комплекс. Плагиограниты, тоналиты, гранодиориты; 14 - сергеевский комплекс. Вторая фаза - амфиболитовое габбро, аподиабазовые амфиболиты; 15 - региональные разломы; 16 - буровые скважины и их номера.

Ультракалийевые риолиты распространены локально в южном обрамлении Тим-Ястребовской структуры Алексеевско-Воронецкого зеленокаменного пояса, где они сохранились от размыва в отдельных структурно-фациальных зонах (Старооскольский рудный район) (рис. 1). Стратиграфическое положение пород установлено точно, так как в ряде скважин (6064, 6066, 5321, 12-а и др.) на толще вулканитов с размывом и угловым несогласием залегают метапесчаники и метакогломераты стойленской свиты курской серии. Максимальная видимая мощность отложений до 300 м.

В разрезах скважин (5321, 5329 и др.) отмечены маломощные прослои метапесчаников, разделяющие толщу вулканических пород на отдельные пачки и фиксирующие прерывистый характер процесса вулканизма. Количество потоков в разрезах скважин установить трудно, на их наличие указывает только присутствие прослоев осадочных пород (рис. 2).

Абсолютный возраст, определенный U-Pb методом по циркону из ультракалийевых риолитов Лебединского участка (гидрогеологическая шахта под Лебединским железорудным карьером, обр. ЛК-104), составляет 2612 ± 10 млн. лет (SHRIMP) [1].

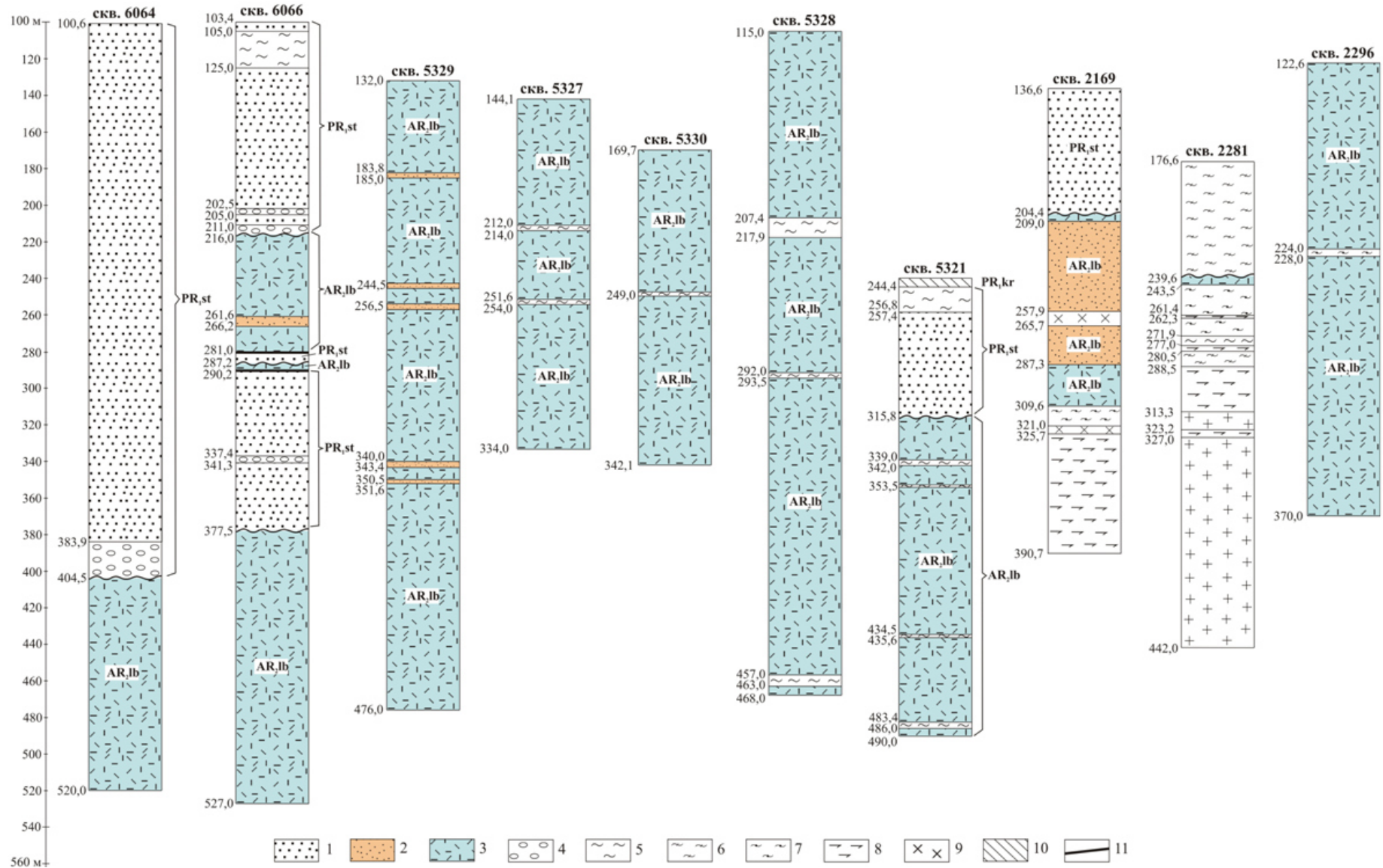


Рис. 2. Разрезы скважин, вскрывших образования неархейских ультракалевых риолитов КМА: 1 – кварцевый метапесчаник (PR₁st); 2 – кварц-биотит-полевошпатовый метапесчаник (AR₂lb); 3 – метариолиты, метатUFFы кварц-полевошпатового порфира (AR₁lb); 4 – конгломераты (PR₁st); 5 – сланцы кварц-биотитовые, биотит-мусковитовые; 6 – сланцы биотит-полевошпатовые; 7 – сланцы биотит-амфиболовые; 8 – амфиболиты; 9 – диориты; 10 – сланцы и железистые кварциты курской серии (PR₁kr); 11 – разломы.

Петрография

Среди кислых эффузивов наибольшим распространением пользуются литокристаллокластические метатифы риолитового состава (скв. 311а, 304а, 2296, 5328 и др.) и метариолиты (скв. 2296, 5327, 5328, 5329, 6066 и др.) (рис. 3). Все породы подверглись региональному метаморфизму, рассланцованы в различной степени, участками до мусковит-кварцевых сланцев.

Метатифы риолитового состава и метариолиты макроскопически схожи, серой и светло-серой окраски иногда с розовым оттенком, сланцеватой текстуры, структура порфириовидная, обусловленная наличием в мелкозернистой основной массе крупных зерен (кристаллокластов и порфириовидных вкрапленников) кварца, микроклина. В метатифах часто наблюдаются мелкие обломки кристаллических биотитовых сланцев, метапесчаников. Микроскопически породы характеризуются порфириовой, порфириобластовой структурой с гранобластовой, лепидогранобластовой и микролепидогранобластовой структурами основной массы (рис. 3а, б, в, г). В риолитах отсутствует вулканическое стекло, которое было перекристаллизовано при метаморфических изменениях.

Вкрапленники составляют до 15 % объема породы. Резко преобладающими являются вкрапленники кварца характерного бледно-голубого цвета (иногда

до 10 мас. %). Их форма преимущественно угловато-округлая, иногда наблюдаются кристаллы близкие к прямоугольной или шестиугольной форме размером до 5–7 мм. Присутствуют также вкрапленники микроклин-пертита, представляющие собой структуры распада, состоящие из альбита и микроклина, угловато-округлой формы (рис. 3в). Отмечаются отдельные единичные зерна микроклина с хорошо выраженной решетчатой структурой размером от 0,5 до 3 мм.

Ориентировки распределения вкрапленников не наблюдается. Кроме вкрапленников присутствуют ксенокристаллы, образующие агрегаты мелких зерен. Ксенокристаллы кварца срastaются в отдельные участки или прерывистые полосы.

Основная масса породы представлена равномерно-зернистым агрегатом зерен кварца размером 0,05 мм и меньше, составляющим 55–60 % объема породы, полевыми шпатами – альбитом и микроклином (около 15 %), мусковитом (до 15 %), биотитом до 5 %. Акцессорные минералы представлены редкоземельными фосфатами (монацит, ксенотим), силикатами (циркон, эпидот, алланит, цоизит), единичными зернами апатита, рутила. Рудные минералы представлены единичными зернами пирита (до 2 %), сфалерита (до 1 %), ильменита (около 1 %). В качестве вторичных минералов присутствуют бастнезит, хлорит, кальцит.

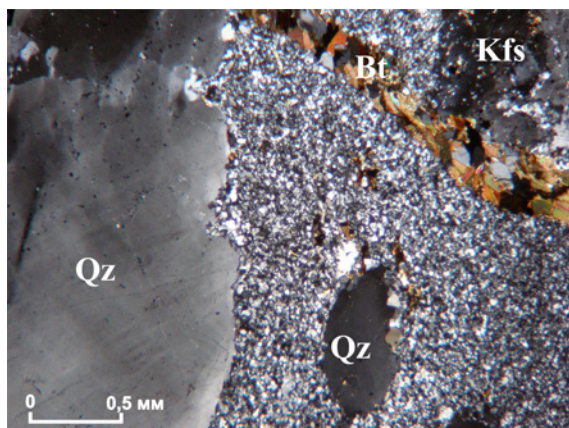


Рис. 3а. Метариолит. Николи скрещены, увеличение х4, обр. 2296/250,5.

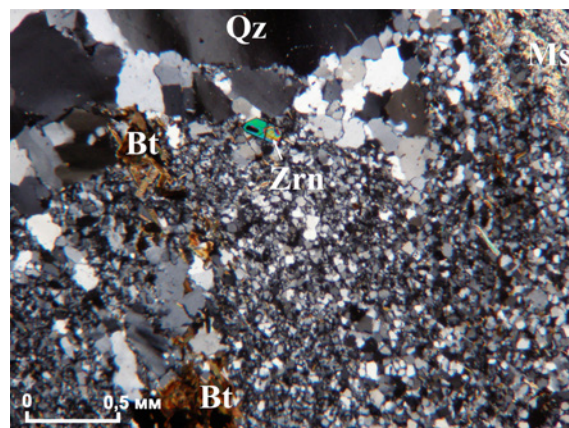


Рис. 3б. Метариолит. Николи скрещены, увеличение х4, обр. 2296/211,5.

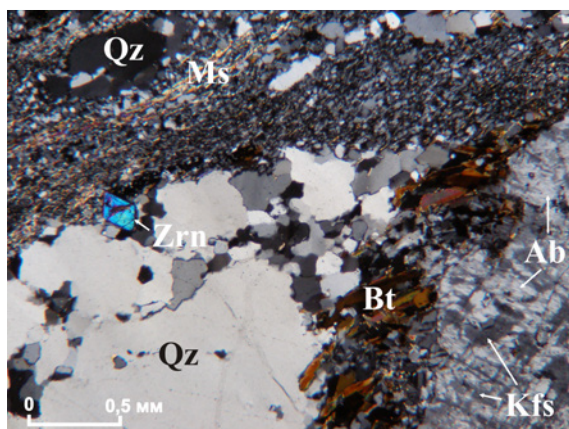


Рис. 3в. Метатиф риолитового состава. Николи скрещены, увеличение х4, обр. 5329/170,8.

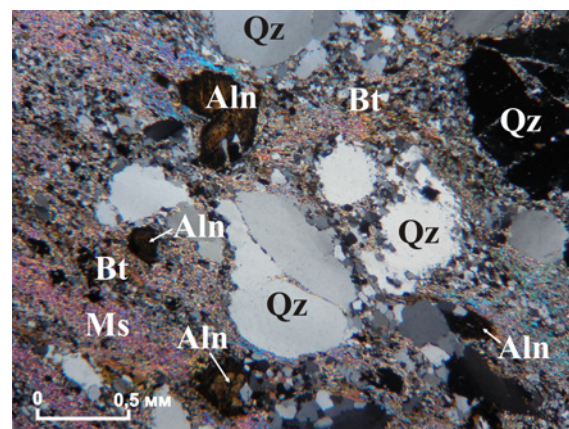


Рис. 3г. Метатиф риолитового состава. Николи скрещены, увеличение х4, обр. 5328/297,7.

Методика аналитических исследований

Анализы химического состава проб производили на спектрометре последовательного действия PW-2400 производства компании PhilipsAnalytical B.V в ИГЕМ РАН. При калибровке спектрометра использованы отраслевые и государственные стандартные образцы химического состава горных пород и минерального сырья (14 ОСО, 56 ГСО). Подготовка препаратов для анализа породообразующих элементов выполнена путем плавления 0,3 г порошка пробы с 3 г тетрабората лития в индукционной печи с последующим отливом гомогенного стеклообразного диска. Точность анализа составляла 1–5 отн. % для элементов с концентрациями выше 0,5 мас. % и до 12 отн. % для элементов с концентрацией ниже 0,5 мас. %.

Малые и редкие элементы определяли методом индукционно-связанной плазмы с масс-спектрометрическим окончанием анализа (ICP-MS) в АСИЦ ИПТМ РАН. Разложение образцов пород, в зависимости от их состава, проводили путем кислотного вскрытия, как в открытой, так и в закрытой системах. Пределы обнаружения для REE, Hf, Ta, Th, U составляли 0,02–0,03 ppm, для Nb, Be, Co – 0,03–0,05 ppm, для Li, Ni, Ga, Y – 0,1 ppm, для Zr – 0,2 ppm, для Rb, Sr, Ba – 0,3 ppm, для Cu, Zn, V, Cr – 1–2 ppm. Правильность анализа контролировалась путем измерения международных и российских стандартных образцов GSP-2, VM, СГД-1А, СТ-1. Ошибки определения концентраций составляли от 3 до 5 мас. % для большинства элементов.

Sm-Nd изотопный анализ и изотопные исследования цирконов выполнены в Центре изотопных исследова-

ований ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург). Выделение циркона проводилось по стандартной методике с использованием тяжелых жидкостей. Измерения абсолютного возраста цирконов проводились на ионном микрозонде SHRIMP-II по стандартной методике [2] с использованием эталонных цирконов «91500» и «Темога». При расчетах использовали константы распада, предложенные в работе [3] и вводили поправку на нерадиоγενный свинец по [4] на основе измеренного отношения $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$. Полученные результаты обрабатывали с помощью программ «SQUID v1.12» и «ISOPLOT/Ex 3.22» [5, 6].

Петрогеохимия

Метариолиты и метатифы риолитового состава характеризуются высокими содержаниями SiO_2 , часто превышающими 75 мас. % (табл. 1, рис. 4а), высоким содержанием K_2O (до 7–8 %) (рис. 5), низкими CaO (0,05–1,4 мас. %) и MgO (0,34–1,4 мас. %), повышенной железистостью ($X_{\text{Fe}} = 0,54 - 0,89$) и насыщенностью глиноземом ($A/\text{CNK} = 1,05 - 2,0$) (рис. 4б) [7]. В них отмечаются широкие вариации в целом повышенных содержаний щелочей ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 5,8 - 9,5$) с преобладанием калия, часто очень резким ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1,4 - 43,6$) (табл. 1).

Зависимость содержаний петрогенных оксидов от концентрации SiO_2 представлена на рис. 5 [8] и проявлена весьма незначительно. Это говорит о практически полном отсутствии линейности в изменении состава пород. Следовательно, породы представляют собой недифференцированную серию ультракалийевых риолитов.

Таблица 1

Химические составы неархейских ультракалийевых риолитов лебединской свиты Курского блока

Скв./глуб.	2296/ 211,5	2296/ 250,5	2296/ 260,3	2296/ 288,5	2296/ 297,8	2296/ 324,0	5329/ 170,8	5329/ 203,7	5329/ 228,0	5329/ 238,2	5329/ 386,6	5329/ 391,8
SiO_2	76,65	75,2	74,5	72,3	75,8	75,17	74,5	73,98	72,04	74,17	76,56	76,2
TiO_2	0,28	0,4	0,41	0,39	0,37	0,23	0,46	0,33	0,34	0,35	0,16	0,28
Al_2O_3	10,5	12,2	13,0	13,9	10,85	11,59	12,35	12,06	13,66	13,03	12,34	12,7
FeO	н.п.	1,97	1,44	2,63	2,27	н.п.	1,8	н.п.	0,84	н.п.	н.п.	1,02
Fe_2O_3	2,44	0,81	1,34	1,75	0,84	2,21	0,99	2,9	1,97	2,63	0,63	0,79
MgO	0,49	0,48	0,72	0,76	0,76	0,48	0,51	0,34	0,59	0,48	0,34	0,63
MnO	0,015	0,03	0,02	0,04	0,02	0,026	0,03	0,023	0,073	0,025	0,01	<0,01
CaO	0,057	0,44	0,33	0,72	0,44	0,53	0,33	0,27	1,3	0,18	0,15	0,22
Na_2O	0,63	1,52	0,25	0,13	1,76	3,75	1,69	3,74	3,02	2,72	1,28	0,72
K_2O	8,06	6,73	6,51	5,68	6,09	5,33	4,86	5,71	5,14	5,36	7,72	6,12
P_2O_5	0,034	0,06	0,06	0,06	0,04	0,037	0,06	0,035	0,02	0,04	0,018	0,03
ППП	0,32	0,54	1,18	1,91	0,58	0,27	0,92	0,31	1,03	0,71	0,35	1,41
Сумма	99,56	100,3	99,77	100,2	99,84	99,78	100,6	99,74	99,64	99,7	99,68	100,1
Mg#	0,19	0,15	0,21	0,15	0,2	0,19	0,16	0,12	0,2	0,17	0,37	0,26
Fe#	0,83	0,84	0,78	0,84	0,79	0,82	0,84	0,89	0,79	0,84	0,65	0,73
$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	12,81	4,42	26,04	43,69	3,46	1,42	2,87	1,52	1,7	1,97	6,0	8,5
$\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$	0,078	0,22	0,04	0,023	0,29	0,7	0,34	0,65	0,58	0,5	0,16	0,12
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2$	3,225	3,65	2,49	5,57	1,99	2,95	3,79	3,6	3,39	3,48	1,15	1,70
A/CNK	1,2	1,4	1,61	2,13	1,05	1,2	1,79	1,24	1,44	1,57	1,35	1,54

Продолжение табл. 1

Скв./глуб.	ЛК-104	6066/505,5	6072/351,0	5328/217,8	5327/310,7	5321/339,8	5321/376,0	5321/394,4	5321/473,8	5321/487,5	2281/322,4	2281/367,0
SiO ₂	75,59	76,25	74,14	77,36	77,50	76,9	76,6	74,2	76,6	76,4	76,0	76,2
TiO ₂	0,19	0,24	0,43	0,16	0,25	0,2	0,18	0,27	0,21	0,2	0,25	0,18
Al ₂ O ₃	13,20	11,38	10,76	11,8	13,3	11,8	11,8	12,0	11,7	11,9	12,45	12,55
FeO	н.п.	н.п.	2,46	н.п.	1,2	1,2	1,56	1,62	1,08	1,44	1,08	0,6
Fe ₂ O ₃	1,24	2,26	3,28	1,51	0,39	0,69	0,77	1,12	1,5	0,62	0,82	0,72
MgO	1,04	0,43	1,28	0,76	0,49	0,87	1,42	1,86	1,02	0,71	0,86	0,47
MnO	0,005	0,02	0,06	н.п.	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,02	0,01
CaO	0,05	0,38	1,4	н.п.	0,37	0,12	0,37	0,18	0,25	0,37	0,66	0,44
Na ₂ O	0,21	2,15	1,0	0,78	1,41	0,35	0,66	1,28	0,36	0,26	2,72	2,93
K ₂ O	6,43	4,40	4,7	7,22	5,67	5,72	5,83	5,77	5,62	6,48	4,22	4,81
P ₂ O ₅	0,02	0,02	0,05	н.п.	0,03	0,02	<0,02	0,02	0,02	0,02	<0,03	<0,03
ППП	1,85	1,31	1,32	0,24	1,14	1,28	1,15	0,97	1,35	1,15	0,69	0,48
Сумма	99,85	99,89	98,42	99,87	99,49	99,18	100,4	99,34	99,75	99,64	99,77	99,39
Mg#	0,48	0,16	0,19	0,33	0,24	0,32	0,38	0,41	0,29	0,26	0,32	0,27
Fe#	0,54	0,84	0,80	0,66	0,76	0,67	0,61	0,58	0,70	0,73	0,68	0,72
K ₂ O/Na ₂ O	30,62	2,04	4,7	9,21	4,02	16,3	8,83	4,5	15,6	24,9	1,55	1,64
Na ₂ O/K ₂ O	0,032	0,48	0,21	0,1	0,25	0,06	0,11	0,22	0,06	0,04	0,64	0,6
Fe ₂ O ₃ +MgO+MnO+TiO ₂	2,47	2,95	5,05	2,43	1,17	1,79	2,41	3,29	2,76	1,57	1,09	1,38
A/CNK	1,97	1,26	1,51	1,47	1,45	1,69	1,46	1,38	1,64	1,46	1,21	1,16

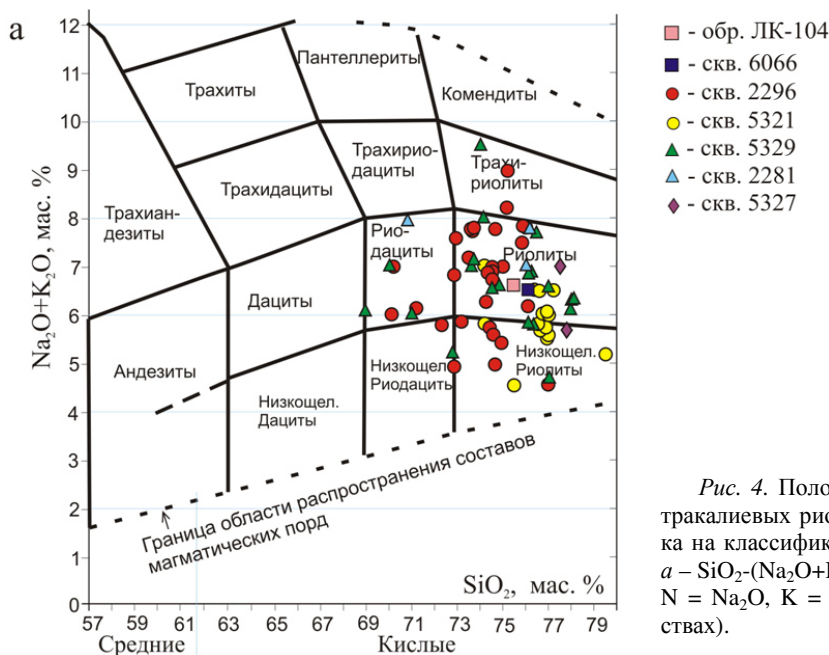
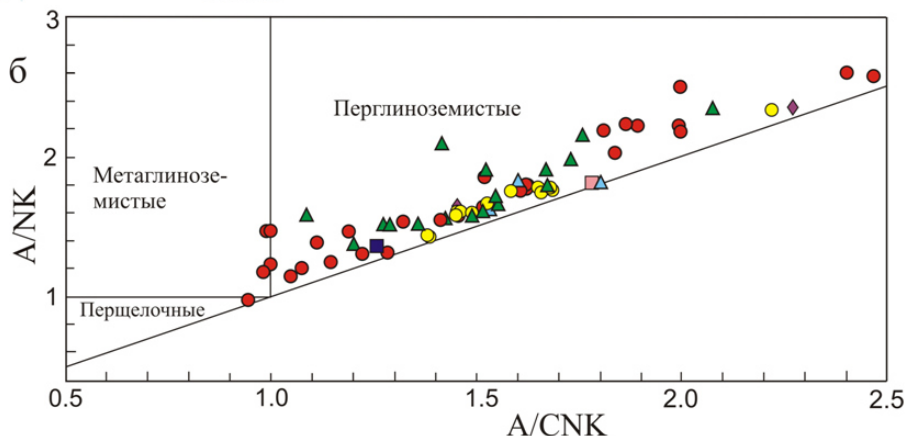


Рис. 4. Положение точек составов неархейских ультракалийевых риолитов лебединской свиты Курского блока на классификационных петрохимических диаграммах: а – SiO₂-(Na₂O+K₂O); б – A/NK–A/CNK [7], где A = Al₂O₃, N = Na₂O, K = K₂O, C = CaO (в молекулярных количествах).



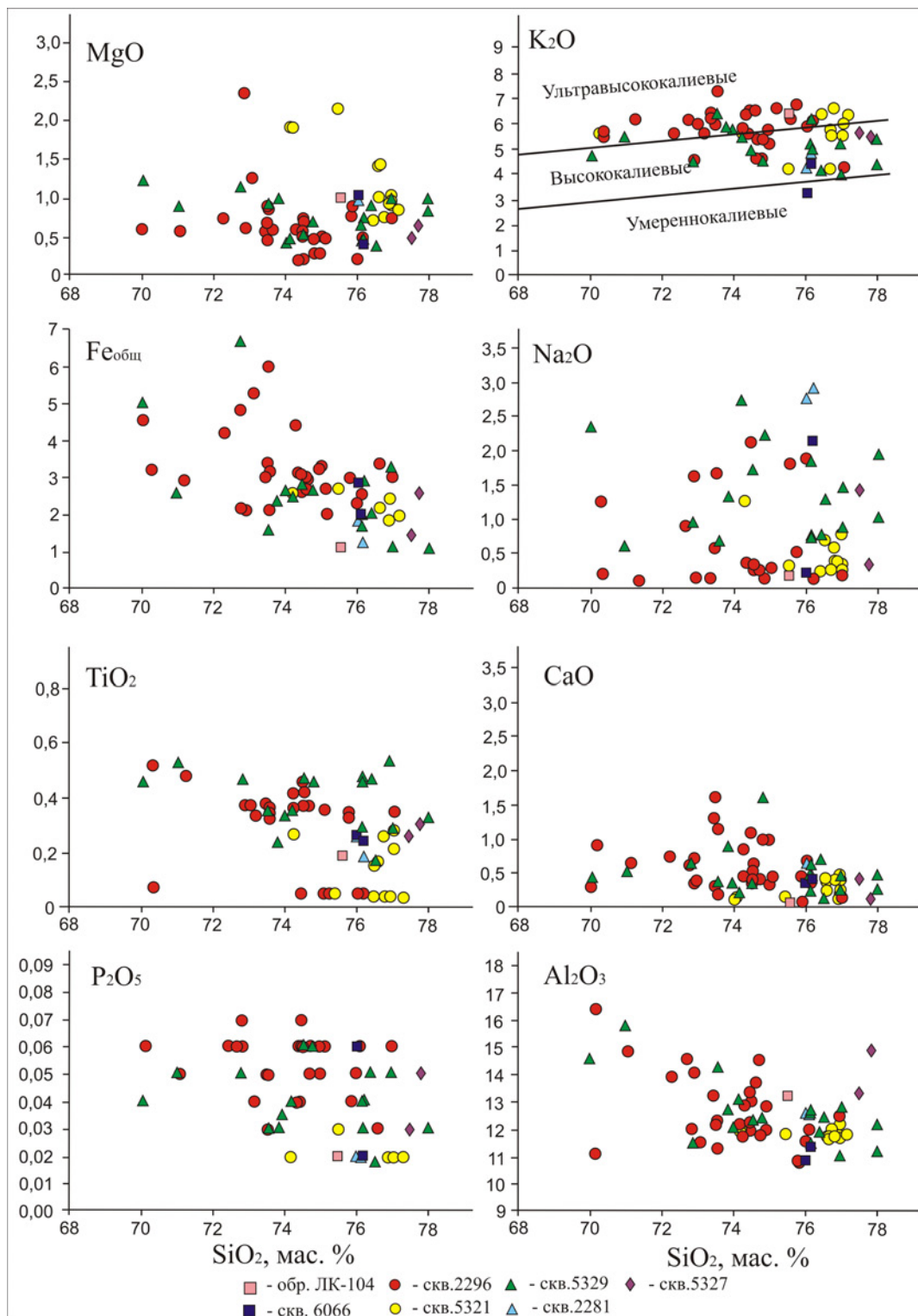


Рис. 5. Положение фигуративных точек составов неархейских ультракалиевых риолитов лебединской свиты Курского блока на вариационных диаграммах Харкера [8].

По содержанию редких и редкоземельных элементов ультракалиевые риолиты резко обеднены Sr (20–60 ppm), обогащены Ba (до более чем 1000 ppm), Rb (116–208 ppm), высоkozарядными элементами, особенно Nb (22–75 ppm), Ta (1,6–3,7 ppm), Y (43–90 ppm), Th (16–29 ppm), и редкоземельными элементами (REE) ($\sum \text{REE} = 413\text{--}683$ ppm) (табл. 2, рис. 6). В

распределении REE отмечается обогащение легкими редкоземельными элементами с сильным фракционированием $(\text{La}/\text{Yb})_n = 9,5\text{--}16$ и глубокими отрицательными европиевыми аномалиями $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,10\text{--}0,39$. Тяжелые редкоземельные элементы (HREE) характеризуются относительно «плоским» распределением ($\text{Gd}/\text{Yb}_N = 1,5\text{--}2,2$).

Таблица 2

Содержания редких и редкоземельных элементов
в неорархейских ультракалийевых риолитах лебединской свиты Курского блока

Скв./Глуб.	2296/211,5	2296/324,0	ЛК-104	5329/203,7	5329/228,0	5329/238,2	5329/386,6
Li	6,9	10,8	19,6	11,1	12,2	14,1	11,2
Be	1,1	5,0	2,9	1,3	2,3	2,2	5,1
Sc	3,1	3,0	2,5	3,0	3,7	2,6	0,58
V	17,7	19,8	9,2	26,5	9,6	7,9	16,6
Cr	14,1	13,5	0,64	25,4	1,9	1,2	18,1
Co	1,2	1,5	0,51	0,80	0,94	0,47	1,7
Ni	0,87	< ПО	0,85	0,69	2,2	0,82	1,2
Cu	54,9	6,9	3,9	4,2	4,8	3,3	8,3
Zn	1301	64,5	17,7	64,8	90,2	80,1	434
Ga	14,0	15,0	18,9	17,6	22,7	21,5	18,0
Rb	154	116	155	118	122	146	208
Sr	200	48,7	45,4	20,1	58,8	36,7	22,0
Y	62,4	43,2	50,6	60,5	80,2	80,9	89,5
Zr	431	449	243	559	601	454	560
Nb	29,3	36,2	21,6	60,1	51,9	50,1	75,0
Mo	1,9	1,6	0,40	0,64	0,91	0,39	4,2
Cs	1,6	0,86	1,8	0,96	1,2	1,4	0,84
Ba	1365	1113	415	1076	1131	949	718
La	92,0	97,3	92,4	115	134	146	155
Ce	179	188	191	223	274	293	299
Pr	19,7	20,6	19,1	24,1	30,2	32,2	32,5
Nd	73,3	75,7	63,1	91,7	100	106	119,7
Sm	12,3	12,7	11,6	15,4	17,8	18,6	20,8
Eu	1,1	1,3	0,58	1,6	1,6	1,7	0,67
Gd	10,9	10,7	10,2	12,5	16,7	16,7	17,9
Tb	1,7	1,4	1,6	1,8	2,6	2,6	2,7
Dy	10,4	7,7	9,0	10,6	14,6	14,3	15,5
Ho	2,0	1,4	1,8	2,0	2,9	2,8	2,9
Er	5,9	4,2	5,4	5,9	8,3	7,9	8,1
Tm	0,80	0,58	0,78	0,81	1,2	1,1	1,0
Yb	5,3	4,1	5,2	5,5	7,8	6,9	6,7
Lu	0,72	0,59	0,75	0,78	1,16	0,99	0,88
Hf	8,6	8,7	7,4	11,3	15,2	11,6	14,2
Ta	1,6	1,6	1,6	2,7	3,1	2,8	3,7
W	0,78	0,73	1,6	0,78	0,48	1,3	1,1
Pb	209	28,8	8,1	4,1	18,5	5,7	67,0
Bi	0,13	< ПО	0,056	< ПО	0,024	0,005	< ПО
Th	18,1	22,9	29,3	16,3	21,9	19,3	25,6
U	3,1	2,8	4,6	2,1	2,6	2,2	5,0
∑REE	415	426,9	412,5	510	612,8	650,8	683,3
Eu/Eu*	0,29	0,39	0,16	0,34	0,28	0,29	0,1
(Gd/Yb) _n	1,64	2,11	1,58	1,82	1,72	1,95	2,15
(La/Yb) _n	11,64	16,05	11,98	14,02	11,58	14,26	15,49
Sr/Y	3,2	1,13	0,89	0,33	0,73	0,45	0,24
La/Yb	17,26	23,8	17,77	20,8	17,18	21,16	22,98
Ybn	25,5	19,56	24,8	26,5	37,3	33,0	13,22
Nb/Ta	18,7	22,91	13,5	22,62	16,74	17,89	20,26
Yb/Ta	3,40	2,58	3,25	2,08	2,51	2,46	1,82
Y/Nb	2,13	1,19	2,34	1,01	1,54	1,61	1,19
K/Rb	216,42	286,08	214,7	281,39	272,62	227,39	159,9

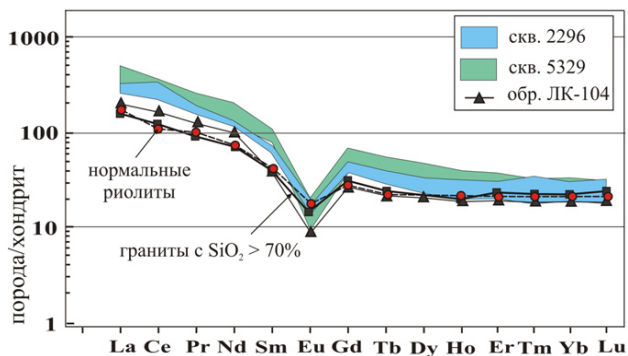


Рис. 6. Нормированные к хондриту содержания редкоземельных элементов в неархейских ультракалийевых риолитах лебединской свиты Курского блока.

Обсуждение результатов

Геохимическая типизация кислых вулканитов

Вулканиты кислого состава являются аналогами гранитоидов, поэтому для определения источников вулканитов могут быть использованы методики, при-

меняемые для реконструкции источников гранитов.

Петрохимические особенности ультракалийевых риолитов, такие как: высокое содержание щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$), низкие концентрации CaO , а также обогащение Ga, Zr, Nb, Y, REE (кроме Eu) и невысокие содержания Sr, Sc, V и Eu свидетельствуют о том, что кислые вулканиты близки к анарогенным гранитоидам А-типа. Это подтверждается положением точек их составов на дискриминантных диаграммах по [9] (рис. 7).

Определение геотектонической обстановки формирования риолитов по соотношениям редких элементов [10] показывает их образование во внутриплитных, либо постколлизийных условиях (рис. 8а). Совмещение полей двух обстановок не позволяет однозначно говорить о геодинамических условиях формирования кислых пород, поэтому была дополнительно использована серия дискриминантных диаграмм [11], на которых точки составов риолитов попадают в поле внутриплитной обстановки и имеют постколлизийную природу (рис. 8б).

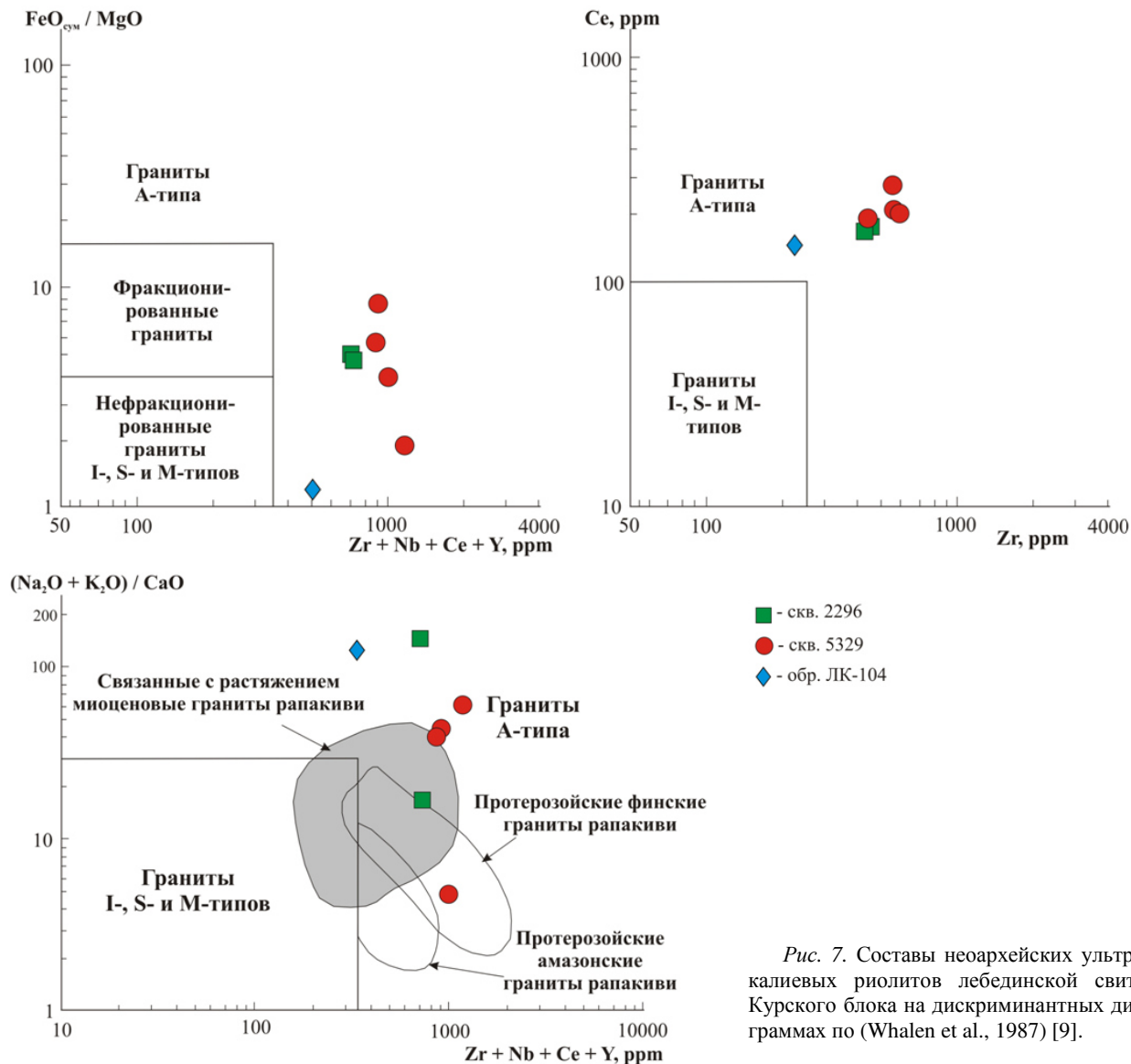


Рис. 7. Составы неархейских ультракалийевых риолитов лебединской свиты Курского блока на дискриминантных диаграммах по (Whalen et al., 1987) [9].

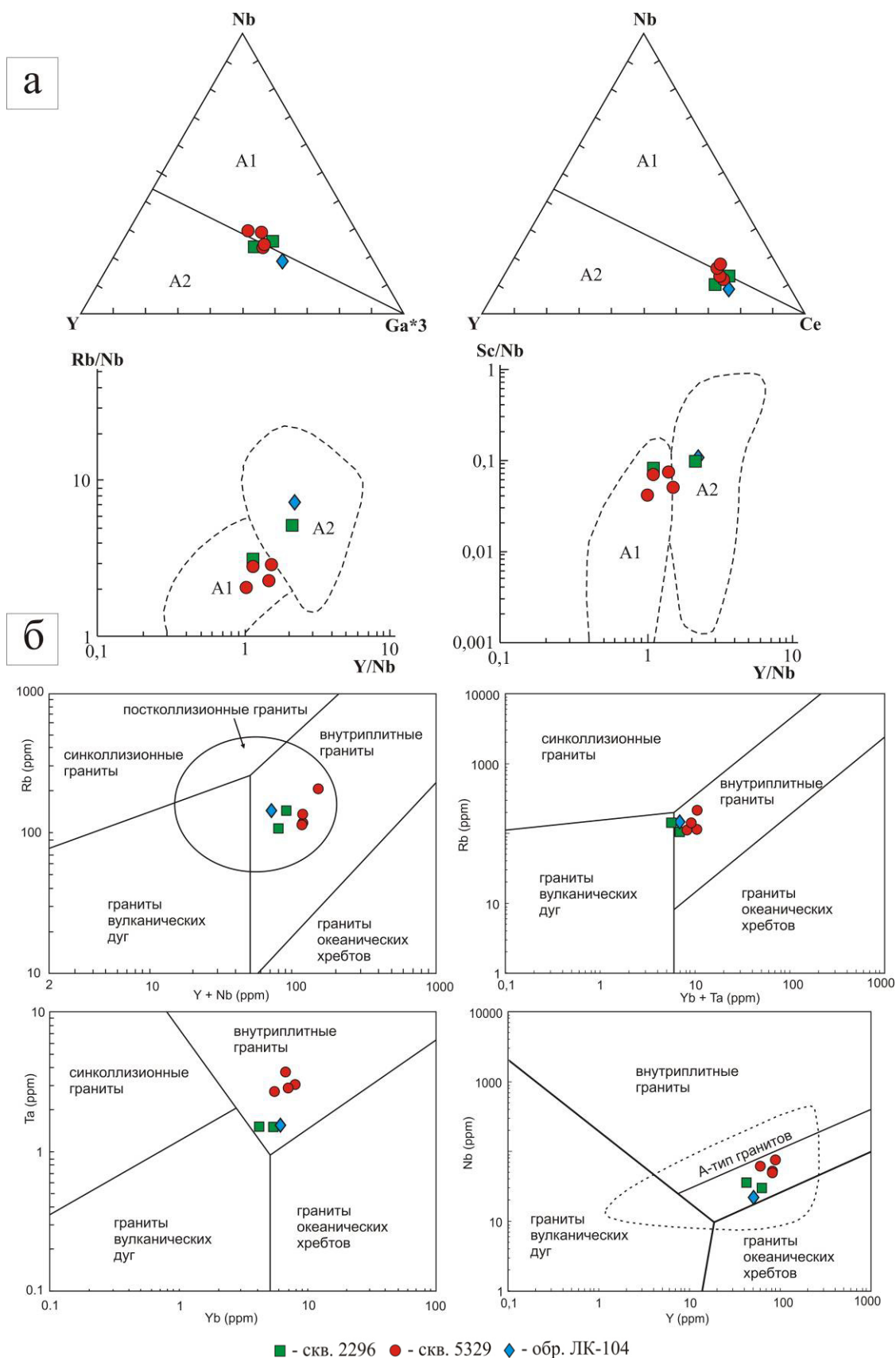


Рис. 8. Составы неархейских ультракалийевых риолитов лебединской свиты Курского блока: а – на дискриминантных диаграммах по (Eby, 1992) [10]; б – на дискриминантных диаграммах по (Pearce et al., 1984) [11]. Поля гранитоидов А-типа: А1 – кислые магматические породы океанических островов и континентальных рифтов; А2 – анорогенные гранитоиды постколлизийных обстановок (в геодинамических условиях внутри- и окраинно-континентального типов).

Данные геотектонические условия образования ультракалийевых риолитов лебединской свиты согласуются и с временной позицией геологической истории формирования Курского блока в неорхее. Определенный возраст ультракалийевых риолитов в интервале времени 2612 ± 10 млн лет [1] свидетельствует об образовании этих пород после образования складчатости, а также фиксирует одновременное проявление кислого внутриплитного вулканизма вместе с гранитоидными интрузиями атаманского комплекса ($2528 \pm 4 - 2615 \pm 15$ млн лет) [12]. Таким образом, ультракалийевые риолиты появились на завершающем этапе орогенного развития Курского блока в процессе

его тектоно-магматической активизации и определили нижнюю границу формирования палеопротерозойских толщ курской серии.

Возможные источники расплавов

Для оценки возможных источников вулканитов кислого состава были проанализированы Sm-Nd изотопно-геохимические данные. Отрицательные значения ϵ_{Nd} (табл. 3) для кислых вулканитов могут свидетельствовать о том, что их источники имели длительную коровую предысторию ($T_{Nd(DM)} = 3300$ млн лет).

Таблица 3

Sm-Nd изотопные данные для неорхейских ультракалийевых риолитов лебединской свиты Курского блока

№ обр.	Содержание, ppm		$^{147}Sm/^{144}Nd^*$	$^{143}Nd/^{144}Nd$	T**	$\epsilon_{Nd(T)}$	T-DM***
	Sm мкг/г	Nd мкг/г					
ЛК104	4,8272	25,5434	0,11424	0,510892	2612	-6,4	3436
2296/211,5	13,7819	77,5896	0,10735	0,510789	2612	-6,1	3361

В результате анализа литературных данных были рассмотрены достаточно разнообразные гипотезы образования ультракалийевых риолитов [13, 14, 15], основными из которых являются: 1) магматическая модель формирования, которая представлена как минимум тремя возможными способами обогащения расплава калием – парциальное плавление обогащенного калием кристаллического субстрата земной коры, ликвидационное расщепление расплава на натриевую и калиевую фазы и метамагматическая модель, основанная на постепенном обогащении магматического расплава калием (флюидно-магматическое взаимодействие); 2) немагматическая модель формирования предполагает присутствие метасоматических процессов в накоплении калия, или же объясняется низкотемпературной одуляризацией первично стекловатых риолитов.

Согласно экспериментальным данным, возможными коровыми источниками для кислых расплавов А-типа могут быть породы, образующиеся при высокотемпературном частичном плавлении нижне- и среднекоровых пород тоналитового или гранодиоритового состава, на формирование которых могут влиять как температура плавления, так и окислительно-восстановительные условия. В качестве подобного корового источника для неорхейских ультракалийевых риолитов лебединской свиты можно рассматривать тоналит-грандиоритовые гнейсы обоянского комплекса (рис. 9).

Однако остается нерешенным вопрос о привносе в магматический расплав большого количества калия для того, чтобы сформировались расплавы высококалийевого состава. Такие расплавы, возможно, могли возникнуть при парциальном плавлении кристаллического субстрата при последовательном метаморфизме метапелитовых пород [13]. Возможно, формирование ультракалийевых расплавов кислого состава происходило при воздействии на гранитные расплавы потоков калийсодержащих флюидов, что указывает на их связь с мантийными компонентами.

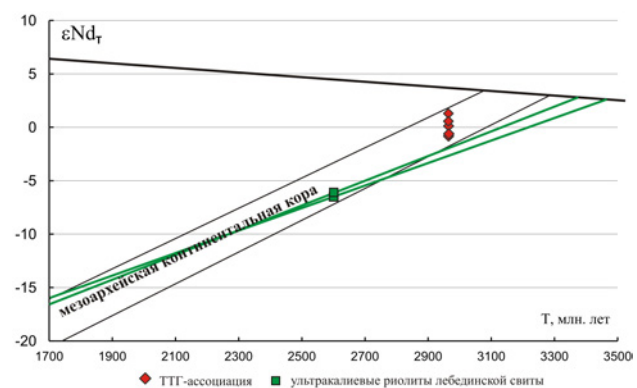


Рис. 9. Диаграмма $\epsilon_{Nd}-T$ для неорхейских ультракалийевых риолитов лебединской свиты Курского блока.

Об участии корового и мантийного компонентов [16] при формировании кислых пород могут свидетельствовать данные по содержанию Rb и отношения K/Rb в риолитах. Положение точек составов пород на диаграмме K/Rb-Rb (рис. 10), на которой выделены области мантийных, коровых и мантийно-коровых гранитоидов [17], свидетельствует об их принадлежности к гибридным образованиям, состоящим из смеси корового и мантийного материала. Следовательно, возможным источником тепла и поставщиком мантийного вещества были базитовые расплавы. Таким образом, коровое вещество доминирует в составе кислых пород, а мантийное вещество является носителем тепловой энергии, за счет которой плавился материал коры, а также служит источником привноса калийсодержащих флюидов.

Предполагается, что процессы формирования риолитового расплава протекали под воздействием глубинных флюидов с низкой активностью H_2O из высокотемпературных магм (более 1000°) при давлении > 8 кбар (температура кристаллизации риолитов $850-860^\circ$) [18].

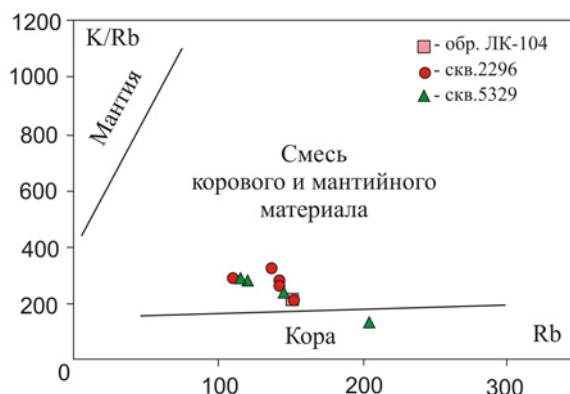


Рис. 10. Диаграмма K/Rb-Rb для ультракалийевых риолитов лебединской свиты Курского блока.

Источником мантийного вещества в пределах Курского блока могут являться неархейские метабазиты, подстилающие ультракалийевые риолиты (рис. 2).

Выводы

Проанализировав полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

1. По петрогеохимическим характеристикам породы представляют собой недифференцированную серию ультракалийевых риолитов и типичны для магматических пород кислого состава корового происхождения. Что свидетельствует о магматической природе этих пород.

2. Установлено, что по своим геохимическим особенностям ультракалийевые риолиты лебединской свиты относятся к гранитоидам А-типа и сформировались во внутриплитной постколлизийной геодинамической обстановке. Локальное расположение риолитов, незначительный объем и их приуроченность к отдельным структурным зонам Тим-Ястребовской структуры Курского блока указывает на приуроченность данных пород к постколлизийной рифтовой структуре.

3. Формирование ультракалийевых риолитовых расплавов возможно при взаимодействии коровых магм с обогащенным материалом подлитосферной мантии. В качестве возможного корового источника расплава для неархейских ультракалийевых риолитов могли быть тоналит-гранодит-гранодиоритовые гнейсы обоянского комплекса, которые взаимодействовали с мантийным веществом, несущим калийсодержащие флюиды при низкой активности H_2O . Источником мантийного вещества в пределах Курского блока могут являться неархейские метабазиты михайловской серии, подстилающие ультракалийевые риолиты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Возраст неархейских ультракалийевых риолитов – важный геохронологический репер эволюции раннедокембрийской коры Воронежского кристаллического массива / К. А. Савко [и др.] // Изотопное датирование геологических процессов: новые

результаты, подходы и перспективы. Материалы VI Российской конференции по изотопной геохронологии. — ИГД РАН Санкт-Петербург. СПб : Sprinter, 2015. — С.247–249.

2. Larionov, A. N. The Vendian alkaline igneous suite of northern Timan: ion microprobe U-Pb zircon ages of gabbros and syenite / A.N. Larionov, D.G. Gee, V.L.(Eds.) Pease // Geol. Soc. London Mem. – 2004. – V. 30. – P. 69–74.

3. Steiger, R. H. Subcommittee on geochronology: convention of the use of decay constants in geo- and cosmochronology / R. H. Steiger, E. Jäger // Earth Planet. Sci. Lett. – 1977. – V. 36. – P. 359–362.

4. Stacey, J. S. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model / J. S. Stacey, J. D. Kramers // Earth and Planet. Sci. Lett. – 1975. – V. 26. – N. 2. – P. 207–221.

5. Ludwig, K. R. SQUID 1.12 A User's Manual. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel / K. R. Ludwig // Berkeley Geochronology Center Special Publication. – 2005a. – 22 p.

6. Ludwig, K. R. User's Manual for ISOPLOT/Ex 3.22. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel / K. R. Ludwig // Berkeley Geochronology Center Special Publication. – 2005b. – 71 p.

7. Maniar, P. D. Tectonic discrimination of granitoids / P. D. Maniar, P.M. Piccoli // Geol. Soc. Amer. Bull. – 1989. – V. 101. — P. 635–643.

8. Harker, A. The Tertiary igneous rocks of skye / A. Harker // Mem. Geol. Surv. – United Kingdom. – 1904. – 481 p.

9. Whalen, J. B. A-type granites: geochemical characteristics discrimination and petrogenesis / J. B. Whalen, K. L. Currie, B. W. Chappell // Contrib. Mineral. Petrol. – 1987. – V. 95. – P. 407–419.

10. Eby, G. N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications / G. N. Eby // Geology. — 1992. – V. 20. – P. 641–644.

11. Pearce, J. A. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks / J. A. Pearce, N. B. W. Harris, A. G. Tindle // J. Petrol. – 1984. – V. 25. – P. 956–983.

12. Артеменко, Г. В. Геохронологическая корреляция вулканизма и гранитоидного магматизма юго-восточной части Украинского щита и Курской магнитной аномалии / Г. В. Артеменко // Геохимия и рудообразование. – Киев: Наукова думка, 1995. – Вып. 21. – С. 129–154.

13. Фромберг, Э. Д. Ультракалийевые риолиты – геология, геохимия, петрология: Автореф. дис. ...д-ра геолого-минерал. наук: 04.00.08 / Э. Д. Фромберг. Московский гос. ун-т. – Москва, 1993. – 45 с.

14. Литвиновский, Б. А. Генезис ультракалийевых кварцевых порфиров на севере Арабо-Нубийского щита / Б. А. Литвиновский, Н. С. Карманов, Е. Вапник // Геология и геофизика. – 2006. – Т.47. – №11. – С.1123–1147.

15. Safonov, O. G. Interaction of biotite-amphibole gneiss with H_2O - CO_2 -(K, Na)Cl fluids at 550 MPa and 750 and 800°C: experimental study and applications to dehydration and partial melting in the middle crust / O. G. Safonov, S. A. Kosova, Dirk D. van Reenen // Journal of Petrology. – 2014. – V. 55. – N. 12. – P. 2419–2456.

16. Гребенников, А. В. Гранитоиды А-типа: проблемы диагностики, формирования и систематики / А. В. Гребенников // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 9. – С. 1356–1373.

17. Коваленко, В. И. Вариации коэффициента распределения рубидия в магматических породах / В. И. Коваленко, В. С. Антипин, И. Д. Рябчиков // Геохимия. – 1981. – № 7. – С. 1017–1029.

18. Холина, Н. В. Высокие температуры кристаллизации неархейских риолитов Курского блока Воронежского кристаллического массива: результаты минеральной термометрии / Н. В. Холина, К. А. Савко, В. М. Холин // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. : Геология. – 2016. – №3. – С. 53–60.

Воронежский государственный университет
Холина Наталья Викторовна, преподаватель кафедры полезных ископаемых и недропользования, ведущий инженер НИИ Геологии ВГУ
E-mail: holina_geol@mail.ru; Тел.: 8 (473) 222-64-19

Voronezh State University
Holina N. V., Lecturer of the Mineral Resource Department, the Master Engineer of SRI of Geology
E-mail: holina_geol@mail.ru
Tel.: 8 (473) 222-64-19