

ГЕОХИМИЯ ПРОЦЕССА ЦИРТОЛИТИЗАЦИИ ЦИРКОНОВ ПРИ ГИПЕРГЕНЕЗЕ

В. М. Ненахов, Г. С. Золотарева

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 30 сентября 2010 г.

Аннотация. Изучение Ti-Zr – россыпных объектов в системе коренная порода – кора выветривания – россыпь показало, что значительная часть цирконов меняет свой типоморфизм и типохимизм, теряя при этом цирконий, кремнезем и приобретая OH-, U, Th, Y, REE, Ca. Характер и степень указанных изменений зависят от особенностей гипергенеза и материнского субстрата, носят закономерный характер, определяя своеобразный генетический код измененных цирконов (циртолитов). Указанные свойства циртолитов рекомендуется учитывать при подсчетах ресурсного потенциала россыпей и разработке технологий их освоения.

Ключевые слова: коренной источник, кора выветривания, россыпь, акцессорные минералы, циркон, геохимия, типохимизм, циртолит.

Abstract. Study of Ti-Zr – alluvial sites in the bedrock – weathered crust – sprinkle showed that a significant proportion of zircons changes its typomorphism and typochemism, losing zirconium, silica and acquiring OH-, U, Th, Y, REE, Ca. The nature and extent of these changes depend on the characteristics of supergene and the parent substrate, are a natural character, defining a kind of genetic code change in United zircons (cyrtolite). The above properties cyrtolite recom-is the subject of calculation of resource potential placers and development of technologies for their development.

Key words: original source, residual soil, placer, accessory minerals, zircon, geochemistry, typochemism, cyrtolite

Циркон является одним из наиболее изученных акцессорных минералов разнообразных пород земной коры. Он широко используется при определении абсолютного возраста [1; 2], для корреляции «немых» стратифицированных образований, установления генетических особенностей формирования магматических и метаморфических комплексов, в том числе температуры их образования [3]. Массив данных по использованию «цирконового метода» в различных областях геологической науки и практики очень обширен, а спектр решаемых с его помощью задач весьма разнообразен. К настоящему времени накоплен огромный фактический материал по геохимии цирконов из различных пород эндогенного происхождения. Вместе с тем, поведение циркона в гипергенных условиях изучено недостаточно.

Цель предлагаемой работы – показать возможности метода для решения ряда прикладных задач, связанных с изучением Ti-Zr россыпей, используя уникальные геохимические особенности циркона, меняющиеся в гипергенных условиях в корах выветривания. Вопреки распространенному мнению о чрезвычайной устойчивости цирконов при ги-

пергенезе [4–6 и др.] встречаются указания о том, что при определенных условиях они могут разлагаться [7; 8 и др.] или даже регенерироваться [9].

Эйфория относительно широких возможностей использования типоморфных особенностей циркона в настоящее время несколько утихла в силу конвергенции признаков и частой противоречивости выявленных связей, неоднозначной зависимости типоморфических особенностей от условий кристаллизации, о чем писал один из основателей и корифеев цирконового метода В. В. Ляхович [10]. Обобщая возможности цирконового метода, он приходит к выводу, что «не совсем убедительно то большое значение, которое придается “типологии” циркона при выяснении генезиса гранитоидов, их рудоносности, корреляции и т. п. Наиболее достоверным признаком следует признать состав циркона» [4, с. 126]. Очевидно, что геохимические свойства цирконов еще далеко не изучены, и в связи с появлением новых аналитических возможностей [11; 12 и др.] открываются широкие перспективы этого направления.

В качестве объекта исследования выбрана территория Воронежской антеклизы, в чехле которой обнаружен ряд россыпных объектов, изученных в системе материнская порода – кора выветривания – промежуточный коллектор – россыпь [13; 14].

Типоморфизм и типохимизм цирконов кристаллических пород ВКМ

Типоморфизм цирконов из кристаллических пород ВКМ был изучен по главным, доминирующим разновидностям метаморфических и магматических пород, распространенность которых показана на круговой диаграмме.

Среди метаморфических пород наибольшим распространением пользуются разнообразные гнейсы обоянского комплекса, занимающие значительную территорию блока КМА (53 %). В них преобладает циркон детритового типа, практически не регенерированный за счет наложенного метаморфизма. Окраска циркона в коричневых тонах, из 100 зерен лишь 5 % приходится на слабо окрашенный или бесцветный циркон, который характеризуется высокой прозрачностью, отсутствием включений и более мелким размером. Отмечается прямая зависимость степени окраски зерен от их размера (чем крупнее, тем интенсивнее окрашены). Зональность, не характерная для большинства кристаллов, встречается лишь в единичных зернах. Минеральные и газовой-жидкие включения относительно редки. Цирконы обоянского комплекса по коэффициенту удлинения характеризуются бимодальным распределением, причем один пик приходится на интервал 1,8–2,2, а второй – на 2,6–3,0.

Вторыми по распространенности метаморфическими породами ВКМ, слагающими его юго-восточную часть, являются метатерригенные отложения воронцовской серии (17 %), среди которых доминируют метапесчаники. Цирконы из метапесчаников характеризуются кластогенной природой и несут следы экзогенной обработки, заключающейся в сглаженности граней и наличии полуокатанных и окатанных форм. Преобладают слабо окрашенные в розовый цвет кристаллы гиацинтового типа с многочисленными минеральными включениями. Цирконы характеризуются незначительным разбросом по коэффициенту удлинения (1,0–3,4) с отскоком в интервале (3,8–4,6) и доминантой, приходящейся на интервал 1,8–2,2.

Третьим по распространенности метаморфическим комплексом является лосевская серия (~6,3 %), слагающая шовную зону, разделяющую блоки КМА и Калач-Эртильский. Среди метаморфитов лосевской серии наибольшим распространением пользуются метаплагиоориодациты, цирконы которых преимущественно гиацинтового типа, реже (до 5,0 %) скипетровидные, слабо окрашенные в розовые тона, прозрачные, с небольшим количеством включений.

В отдельных изометричных зернах наблюдается зональность параллельного типа, иногда в центре зерен отмечаются ядра с выраженными кристаллографическими очертаниями. При большом увеличении видны следы растворения, чаще всего со стороны одной из дипирамид (за счет чего формируются скипетровидные формы). Для дипирамид характерна островершинная форма с гранями (311). Диапазон коэффициента удлинения колеблется от 1,0 до 4,2. Отмечаются два слабо выраженных пика (1,8–2,2 и 2,6–3,0), обуславливающих общую бимодальность распределения коэффициента удлинения цирконов.

Интрузивные комплексы характеризуются большим разнообразием и представлены как гранитоидным, так и мафит-ультрамафитовым рядами. Типоморфизм цирконов был изучен из девяти магматических комплексов.

Объемы статьи не позволяют останавливаться на детальном описании типоморфизма цирконов из всех магматических комплексов, поэтому их краткая характеристика приведена в табл. 1.

Типохимизм циркона по наиболее распространенным СВК кристаллического фундамента, в совокупности слагающим 76,3 % площади, а также из разнообразных интрузивных комплексов, главным образом протерозойских, слагающих ~7 % площади выходов докембрия, изучен как по главным минералообразующим компонентам (Zr, Hf, SiO₂), так и по примесям (Ca, REE, Y, U, Th и др.). Ниже приводится краткая характеристика типохимизма цирконов (табл. 2).

В системе координат Zr-Hf (рис. 1) для цирконов коренных источников характерен достаточно узкий диапазон содержания Zr (63–67 %) и Hf (0,8–1,6 %).

Изменение содержания SiO₂ в цирконах составляет всего 2 % (от 32,0 до 34,0), при этом диапазон колебаний Zr/Hf отношений составляет от 22 до 90 и более, в целом отвечая «гранитоидному парагенезису» [4]. Основная масса Zr/Hf отношений образует еще более компактное сгущение в диапазоне 30–80. Единичные отклонения от сгущения в сторону пониженных значений характерны для плагиогнейсов обоянского комплекса, а в сторону повышенных – для метапесчаников воронцовской серии, бобровского, павловского гранитоидных комплексов и байгоровских вулканитов. Намечившийся тренд объясняется, по видимому, увеличением доли Zr относительно Hf в более кислой минералообразующей среде, приводящей к незначительному увеличению относительной доли кремнезема в кристаллической решетке циркона.

Таблица 1

Типоморфные особенности цирконов магматических комплексов ВКМ

Название комплекса и его распространенность, %	Состав	Габитус	Цвет циркона	Коэффициент удлинения
Павловский (2,8)	Граносиениты	Гиацинтовый	Светло-розовый	1,0–2,2 (84 %), в том числе 1,0–1,4 (19 %); 1,4–1,8 (31 %); >2,2 (16 %)
Усманский комплекс (3,2)	Плагиограниты	Гиацинтовый (90 %), цирконовый (10 %)	Слабо окрашенные розовые, крупные зерна желтоватого оттенка	1,4–3,0 (90 %), в том числе 1,8–2,2 (32 %); 2,2–2,8 (24 %)
Бобровский (~0,1)	Мусковит-биотитовые гранитоиды	Гиацинтовый	Светло-коричневый	1,0–7,0 (75 %), в том числе 2,2–2,6 (11 %); 4,6–5,0 (9 %)
Артюшковский (< 0,1)	Сиенит-порфиры	Гиацинтовый, реже цирконовый	Бесцветный или слабо окрашенный в розовый	1,0–2,2 (85 %), в том числе 1,0–1,4 (30 %); 1,4–1,8 (28 %); 1,8–2,2 (27 %)
Новомеловатский (< 0,1)	Гранодиориты	Гиацинтовый, в меньшей степени цирконовый	Розовато-коричневый	1,0–5,0 (~92 %), в том числе 1,0–1,4 (8 %); 1,4–1,8 (10 %); 1,8–2,2 (27 %); 2,2–2,6 (17 %); 3,4–4,2 (14 %)
	Габбродиориты	Гиацинтовый, в меньшей степени цирконовый	Слабо-розовый	1,0–3,0 (75 %); 3,4–3,8 (7 %)
Лискинский (< 0,1)	Гранитоиды	Гиацинтовый, реже цирконовый	Высокая степень замутненности, ~50 % в зеленоватых, а ~50 % в коричневатых тонах	1,4–3,8 (100 %), в том числе 1,8–2,2 (29 %); 2,2–2,6 (32 %); 2,6–3,0 (23,3 %)
Байгоровский вулканоплутонический (< 0,1)	Андезибазальты	Основная масса циркона гиацинтового, реже цирконового типов	Крупные зерна – коричневый, розовый цвет, мелкие – прозрачные, неокрашенные	1,0–4,6 (92 %), в том числе 1,0–1,4 (32 %); 1,4–1,8 (15 %); 2,2–2,6 (11 %)
Мамонский (0,4)	Оливиновые габбро-диориты	Гиацинтовый	Бледно-розовый	1,0–2,6 (100 %), в том числе 1,0–1,4 (59 %); 1,4–1,8 (~30 %)
Еланский (0,1)	Диориты	Гиацинтовый, реже цирконовый, единичные зерна копьевидные	Коричневого цвета с розоватым оттенком	1,0–5,0 (95 %), в том числе 1,4–1,8 (18 %); 1,8–2,2 (19 %); 2,2–2,6 (19 %)

Таблица 2

Химический состав цирконов из кристаллических пород докембрия ВКМ

№ п/п	№ точки	№ пробы	Комплекс	SiO ₂	ZrO ₂	HfO ₂	Y ₂ O ₃	ThO ₂	CaO	REE	UO ₂	Σ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1ц	стГРТ/225	Обоянский, росошанский тип, гнейс	32,78	63,59	1,46	0	0	0	0,14	0,13	98,1
2	2ц			33,13	64,31	1,39	0	0,07	0,02	0,28	0,04	99,24
3	3ц			32,84	63,9	1,83	0,03	0,06	0,07	0,21	0,12	99,06
4	4ц			32,1	64,25	1,45	0	0,01	0,04	0,33	0,16	98,34
5	5ц			31,66	65,53	1,34	0,15	0	0,12	0,36	0,08	99,24
6	6ц			32,75	65,42	0,97	0,19	0,18	0	0,32	0,18	100,01
7	7ц			32,56	64,91	1,32	0	0,02	0,09	0,37	0,16	99,43
8	8ц			32,25	64,81	1,51	0	0	0,03	0,6	0,06	99,26
9	1к			33,0	66,43	1,44	0	0	0,02	0,01	0,05	100,95
10	4к			32,67	62,68	1,23	0	0	0,01	0,34	0,01	100,95

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
11	1ц	7626/3	Обоянский, нерасчлененный, гнейс	32,27	65,93	1,0	0,12	0	0,01	0,24	0	99,57
12	2ц			32,59	64,87	1,45	0	0	0,02	0,2	0	99,13
13	3ц			31,88	63,78	2,83	0,01	0	0	0,31	0,15	98,96
14	4ц			31,98	62,66	2,37	0,03	0	0	0,35	0,32	97,71
15	5ц			32,89	65,72	0,98	0,2	0,06	0,02	0,35	0,09	100,31
16	2кр			32,07	64,07	1,82	0,04	0	0	0,17	0,18	98,35
17	5н.кр			32,17	62,83	1,73	0,12	0	0,05	0,62	0,13	97,65
18	5в.кр			32,63	64,58	1,67	0,02	0	0,06	0,3	0	99,23
19	1ц	0150	Лосевская серия, метаплагио-риодацит	31,98	65,23	1,34	0	0	0	0,37	0,05	98,97
20	2ц			32,02	64,5	1,33	0,01	0	0	0,24	0,09	98,19
21	3ц			32,61	64,25	1,69	0	0	0,1	0,37	0,06	99,08
22	4ц			32,17	63,03	1,44	0	0,02	0	0,14	0,02	96,82
23	2кр			32,17	63,9	1,29	0	0	0	0,26	0,07	97,69
24	4кр			32,4	64,52	1,54	0	0	0,02	0,16	0,12	98,76
25	1ц			32,34	66,66	1,52	0	0	0	0,32	0,11	100,95
26	2ц	32,5	66,02	1,58	0	0	0	0,34	0,13	100,57		
27	3ц	32,8	66,14	1,37	0	0	0	0,12	0,03	100,31		
28	4ц	32,65	66,39	1,0	0	0	0	0,2	0,06	100,31		
29	5ц	32,64	65,46	1,42	0	0,01	0,02	0,2	0	99,74		
30	6ц	32,32	66,21	1,1	0,32	0	0	0,48	0,04	100,61		
31	7ц	32,14	66,72	1,55	0	0,14	0,01	0,15	0	100,58		
32	8ц	32,33	66,43	1,32	0	0,01	0,02	0,04	0,12	100,26		
33	6кр	32,46	65,46	1,44	0,04	0	0	0,35	0,1	99,85		
34	7кр	32,02	62,65	1,52	0,02	0	0	0,22	0,09	96,52		
35	1ц	8109	Мамонский, Елань-Коленовский массив, габбродиорит	32,81	66,63	1,2	0	0	0	0,02	0	100,66
36	2ц			32,87	62,96	1,06	0,01	0	0	0,23	0,06	97,19
37	3ц			32,73	67,69	1,26	0	0,12	0,01	0,16	0	101,97
38	4ц			32,74	66,25	1,18	0,13	0,05	0	0,13	0,16	100,64
39	1ц	7159	Воронцовская серия, гнейс	32,66	66,0	1,05	0	0,01	0	0,06	0	99,78
40	2ц			32,59	66,44	1,14	0	0,06	0,03	0,2	0	100,46
41	3ц			32,54	67,25	1,12	0	0,05	0	0,08	0	101,04
42	4ц			32,71	64,02	1,36	0	0	0	0,04	0	98,13
43	1ц	8424	Еланский, массив Елка, диориты	33,13	63,82	1,13	0,11	0,11	0,01	0,22	0	98,53
44	2ц			33,4	63,38	0,96	0	0,05	0	0,29	0,12	98,2
45	3ц			33,06	65,65	1,37	0,02	0	0	0,33	0	100,43
46	4ц			32,71	66,1	1,24	0,01	0	0	0,11	0	100,17
47	5ц			32,97	65,72	1,14	0	0,13	0	0,18	0,02	100,16
48	6ц			32,96	65,97	1,38	0	0	0	0,12	0	100,43
49	7ц			32,46	65,75	1,42	0,04	0,01	0,01	0,13	0,13	99,95
50	1ц	0162	Бобровский, Коршевский массив двуслюдяные граниты	32,9	64,79	0,87	0,12	0,02	0	0,27	0,14	99,11
51	2ц			32,68	64,86	0,99	0,13	0,1	0,05	0,21	0,04	99,06
52	3ц			32,79	66,05	0,75	0,08	0,07	0,04	0,11	0	99,89
53	4ц			32,78	65,72	1,17	0,26	0,16	0,01	0,2	0,22	100,52
54	5ц			32,82	65,79	1,21	0,08	0,02	0,07	0,2	0	100,19
55	6ц			32,77	65,63	1,03	0,19	0,1	0,09	0,18	0,11	100,1
56	7ц			32,71	65,59	1,05	0,01	0,05	0,01	0,12	0,01	99,56
57	1ц	7755	Байгоровская свита, андезибазальты	33,16	66,06	0,79	0	0	0,05	0,14	0	100,2
58	2ц			33,16	63,08	0,99	0	0	0	0,05	0,01	97,29
59	3ц			33,01	65,9	0,93	0,02	0,06	0	0,08	0,16	100,16
60	4ц			32,84	65,81	1,5	0	0	0	0,23	0,07	100,45
61	5ц			32,25	66,43	1,5	0	0,05	0,01	0,18	0,09	100,51
62	6ц			32,38	66,15	0,93	0,1	0,02	0,01	0,05	0,17	99,81

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
63	1ц	ВП 727	Новомеловатский, габбродиориты	32,74	66,1	1,11	0	0,01	0	0,16	0,08	100,2
64	2ц			32,95	65,99	1,04	0	0	0	0,19	0	100,17
65	3ц			32,39	65,93	1,0	0	0	0,02	0,22	0,07	99,63
66	1ц	ВП 521	Новомеловатский, гранодиориты	33,07	65,68	0,91	0	0,01	0,01	0,21	0,05	99,94
67	2ц			32,94	65,76	1,03	0	0,08	0,03	0,23	0,09	100,16
68	3ц			32,3	66,04	1,24	0,03	0,07	0,03	0,32	0	100,03
69	1ц	О152	Усманский, плагиограниты	32,64	66,91	1,16	0	0,01	0	0,27	0,02	101,01
70	2ц			30,57	55,53	1,13	0,07	0,03	0,36	0,44	0,13	88,26
71	3ц			32,8	62,88	1,66	0	0	0,01	0,17	0,06	97,58
72	5ц			32,61	64,88	1,4	0	0	0	0,25	0	99,14
73	6ц			32,87	62,7	1,36	0	0	0,02	0,13	0	97,08
74	7ц			32,76	65,37	1,38	0	0,02	0,01	0,29	0,01	99,84
75	8ц			32,78	65,03	1,24	0,03	0,13	0	0,17	0,15	99,53
76	3кр			30,25	56,44	2,1	0	0	4,36	0,48	0,8	94,43
77	5кр			32,54	66,09	1,57	0	0	0,01	0,21	0,05	100,47

Примечание: здесь и далее химический состав цирконов изучен на микрозонде Camebax Microbeam в лаборатории ИМГРЭ, аналитик И. М. Куликова.

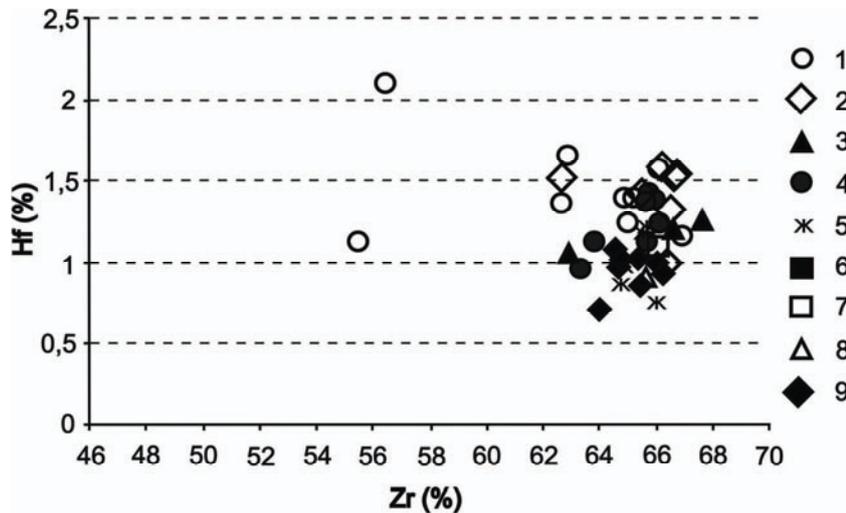


Рис. 1. Фигуративные точки цирконов по коренным породам в координатах Zr-Hf. 1–9 магматические комплексы: 1 – усманский (Костенковский массив); 2 – артюшковский; 3 – мамонский (Елань-Коленовский массив); 4 – еланский (Елkinский массив); 5 – бобровский (Коршевский массив); 6 – байгоровский вулcano-плутонический; 7–8 – новомеловатский (Новомеловатский массив): 7 – габбродиориты; 8 – гранодиориты; 9 – павловский (Павловский массив)

Типоморфизм и типохимизм цирконов из россыпей осадочного чехла Воронежской антеклизы

Циркон в зоне гипергенеза – один из наиболее устойчивых минералов. Тем не менее даже поверхностное, беглое знакомство с типоморфизмом циркона в россыпях показывает изменение цветовой гаммы у значительной части цирконов по сравнению с коренными источниками, в качестве которых выступали кристаллические породы ВКМ [13].

Важнейшие типоморфные особенности цирконов россыпных объектов в обобщенном виде представлены в табл. 3.

По промежуточным коллекторам и россыпям были изучены вещественные особенности цирконов, результаты которых помещены в табл. 4.

Колебания содержания ZrO₂ в цирконах россыпных объектов достаточно широкие (48–71 %), хотя наиболее часто встречающиеся содержания отвечают диапазону 54–67 % (с особым сгущением в интервале содержаний 63–67 %). При этом содержания HfO₂ образуют сгущения точек в диапазоне 0,8–1,7 %, практически не отличаясь от содержаний в цирконах из коренных пород (рис. 2).

Типоморфные особенности цирконов промежуточных коллекторов и россыпей

Россыпь (коллектор)	Возраст	Габитус (форма зерен)	Цвет	Коэффициент удлинения
Ястребовская	D_{3js}	Гиацинтовый	Розовый, желтый, серо-зеленый	1,0–3,4 (96 %), в том числе 1,0–1,4 (8 %); 1,4–1,8 (25 %); 1,4–1,8 (8 %); 1,8–2,2 (25 %); 2,2–2,6 (19 %); 2,6–3,0 (11 %)
Петинская	D_{3pt}	Гиацинтовый (50 %), детритовый – интенсивно окатанные зерна (50 %)	Густо окрашенный серый с зеленоватым оттенком, молочно-белый, непрозрачный, слабо окрашенный в розоватых тонах, прозрачный, густо окрашенный коричневый	1,0–22,0 (100 %), в том числе 1,0–1,4 (24 %); 1,4–1,8 (50 %); 1,8–2,2 (26 %)
Центральная	K_{2s}	Гиацинтовый (40 %), детритовый – округлые, яйцеобразные, изометричные зерна	Прозрачные, бесцветные со слабым розоватым оттенком, редко насыщенный коричневый, значительная часть – бледно-зеленый	1,0–4,2 (98 %), в том числе 1,8–2,2 (25 %); 2,6–3,0 (24 %)
Кирсановская	K_{2st}	Гиацинтовый (40 %), реже цирконовый (50 %), все зерна в различной степени окатанные	40 % с зеленоватым оттенком (цирколиты), остальная часть зерен прозрачная	1,0–3,0 (96 %), в том числе 1,4–1,8 (30 %); 1,8–2,2 (20 %); 2,2–2,6 (20 %)
Высоконовская	P-N	Гиацинтовый (40 %), редко цирконовый (~15 %), основная часть зерен окатанные	30 % зерен имеет коричневатый оттенок до ясно выраженного светло-коричневого с зеленоватым оттенком, редко бесцветные со слабым розоватым оттенком	1,0–1,8 (83 %), в том числе 2,2–2,8 (7 %); 2,6–3,0 (5 %)

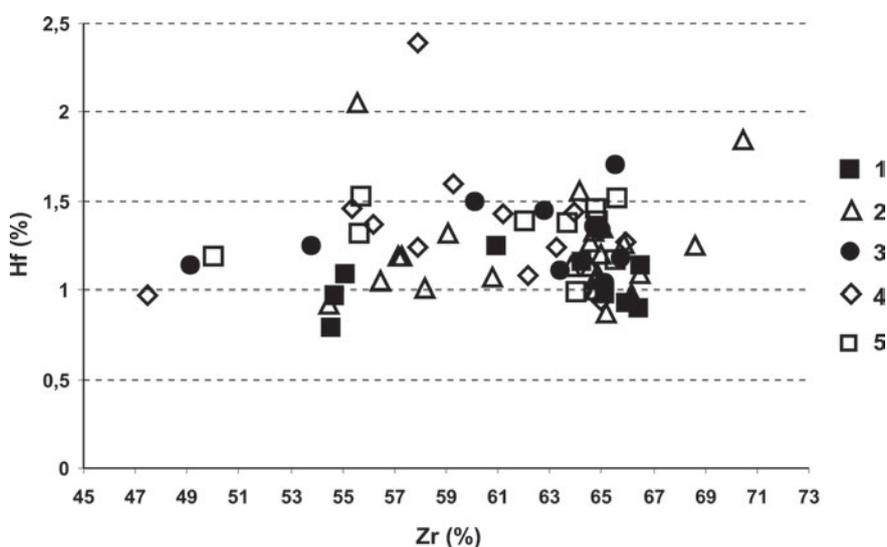


Рис. 2. Фигуративные точки цирконов из промежуточных коллекторов и россыпей в координатах Zr-Hf: 1 – ястребовский горизонт; 2 – петинский горизонт; 3–5 – россыпи: 3 – «Центральная»; 4 – «Кирсановская»; 5 – «Высоконовская»

Химический состав цирконов из осадочного чехла ВА

№ п/п	№ точки	№ пробы	Россыпь и ее возраст	SiO ₂	ZrO ₂	HfO ₂	Y ₂ O ₃	ThO ₂	CaO	REE	UO ₂	Σ
Промежуточные коллектора												
1	2ц	Р6	Петинский горизонт, франский	33,06	64,68	1,0	0,4	0,11	0,03	0,08	0,06	99,96
2	3ц			24,13	57,26	1,19	1,16	0,17	1,43	0,68	0,47	86,49
3	4ц			31,39	64,53	1,27	0,32	0	0,72	0,6	0,27	99,1
4	5ц			32,65	64,14	1,56	0	0,05	0,03	0	0,12	98,55
5	6ц			28,41	60,75	1,07	0,62	0,07	0,82	0,34	0	92,08
6	6кр			32,71	66,19	0,96	0	0	0,02	0,11	0,17	100,16
7	7ц			32,49	65,89	1,26	0	0,05	0,06	0,03	0,25	100,03
8	8ц			24,38	57,12	1,19	0,8	0,19	2,08	0,9	0,23	86,89
9	9ц			32,53	64,95	1,2	0,07	0,1	0,05	0,3	0,28	99,48
10	10ц			26,31	58,16	1,01	0,88	0,08	1,4	0,74	0	88,58
11	11ц			24,96	59,06	1,32	0,75	0,03	1,69	0,42	0,04	88,27
12	12ц			32,89	64,53	1,13	0,15	0,1	0,16	0,03	0,22	99,21
13	13ц			21,67	56,49	1,05	2,15	0,09	2,33	1,15	0,08	85,01
14	14ц			19,51	55,54	2,05	1,03	0,05	2,65	0,64	0,1	81,57
15	15ц			25,61	54,47	0,92	3,18	0,11	1,59	0,69	0,17	86,74
16	16ц			32,45	65,03	1,35	0,01	0	0	0,13	0,03	99,0
17	17ц			32,57	64,7	1,33	0,11	0	0,07	0,21	0	98,99
18	18ц			32,47	64,85	1,09	0	0,07	0,04	0,1	0	98,62
19	19ц			32,62	63,77	1,13	0	0	0	0,27	0	97,79
20	20ц			32,42	65,07	0,99	0	0	0	0,2	0,01	98,69
21	21ц			32,25	65,18	0,87	0	0,07	0,01	0,11	0	98,49
22	22ц			32,42	64,77	1,06	0	0	0,02	0,04	0,06	98,37
23	23ц			32,43	64,76	1,0	0,04	0,03	0	0,19	0,02	98,47
24	24ц			32,40	66,51	1,09	0,1	0,03	0,04	0,19	0	100,36
25	25ц			32,25	66,15	0,97	0	0,03	0,03	0,14	0,21	99,78
Россыпи												
26	1ц	12/Л-1	Центральная россыпь, сеноманский	33,43	65,09	1,04	0,23	0	0	0,15	0	99,94
27	2ц			32,25	65,71	1,18	0,07	0	0	0,1	0,05	99,36
28	3ц			33,42	62,79	1,45	0	0	0,01	0,15	0,04	97,86
29	4ц			27,56	60,09	1,5	0,87	0,1	1,61	0,61	0,13	92,47
30	5ц			30,57	53,76	1,25	1,06	0,14	0,76	0,68	0,16	88,38
31	7ц			33,3	63,37	1,11	0,02	0,03	0	0,13	0,04	98,0
32	8ц			33,04	65,52	1,71	0	0	0	0,34	0,05	100,66
33	4кр			33,14	64,69	1,36	0	0,04	0,1	0,27	0,07	99,67
34	5кр			28,05	49,15	1,14	1,79	0,11	1,52	0,98	0,1	82,84
35	6кр			33,05	65,0	1,34	0	0,02	0,01	0,5	0,12	100,04
36	1ц			13/Л-4	Кирсановская россыпь, сантонский	26,67	57,89	2,39	0,73	0,16	1,43	0,74
37	2ц	32,69	63,96			1,44	0,08	0	0,04	0,35	0,1	99,66
38	3ц	32,78	61,17			1,43	0,05	0	0,03	0,4	0,07	95,93
39	4ц	32,81	63,24			1,24	0,19	0	0,01	0,51	0,05	98,05
40	5ц	32,35	65,9			1,27	0	0	0,02	0,34	0,11	99,99
41	6ц	32,78	47,47			0,97	0,18	0	0,45	0,36	0,06	82,27
42	7ц	30,66	62,14			1,08	0,13	0,06	0,04	0,36	0,04	94,51
43	8ц	32,89	64,99			0,94	0,33	0,1	0	0,44	0,02	99,71
44	9ц	30,17	57,88			1,24	0,1	0,03	0,9	0,73	0,16	91,21
45	1кр	27,39	56,19			1,37	0,63	0,15	1,97	0,93	0,22	88,85
46	3кр	33,17	63,94			1,44	0	0	0,01	0,09	0,1	98,75
47	7кр	25,59	59,26			1,6	0,54	0,3	0,47	0,61	0,09	88,46
48	9кр	27,06	55,35			1,46	0,19	0	1,13	0,29	0,16	85,64
49	1ц	11/Л-2	Высоконовская россыпь, палеоген-неогеновый	25,56	55,62	1,32	2,1	0,08	0,6	1,45	0,14	88,97
50	2ц			32,3	65,52	1,17	0,33	0	0,01	0,45	0,08	99,86
51	3ц			32,12	63,7	1,38	0,12	0	0,01	0,26	0,06	97,65
52	4ц			32,71	62,01	1,39	0	0	0	0,3	0,08	96,49
53	5ц			23,69	50,01	1,19	3,56	0,11	1,71	2,78	0,36	83,41
54	6ц			32,44	65,57	1,52	0	0	0	0,27	0,15	99,95
55	7ц			33,11	64,02	0,99	0	0,02	0	0,4	0,08	98,62
56	1кр			32,4	64,86	1,39	0,26	0,07	0,01	0,42	0,09	99,5
57	4кр			32,84	64,77	1,46	0	0,01	0,05	0,52	0,06	99,71
58	5кр			27,88	55,69	1,53	1,95	0,06	0,93	0,85	0,22	89,11

Приблизительно 40 % цирконов на диаграммах обнаруживают значительный разброс содержаний SiO_2 от 22 до 31 %, при этом диапазон колебаний Zr/Hf отношений абсолютного большинства цирконов сужается и находится в районе 40–60.

Содержания гафния в цирконах с уменьшенными содержаниями SiO_2 для россыпей достаточно стабильны и приходятся в основном на интервал 0,9–1,5 %, что соответствует в целом содержаниям гафния в цирконах кристаллических пород докембрия ВКМ (рис. 2).

В то же время содержания циркония достаточно вариативны и колеблются от 48 до 70 % (табл. 4). Указанная вариативность связана с воздействием на цирконы процессов гипергенеза, при которых цирконий обнаруживает большую подвижность по сравнению с гафнием.

Сравнительный анализ типоморфизма и типохимизма цирконов из пород кристаллического основания Воронежской антеклизы показал, что типоморфные признаки не могут являться надежным коррелятивным признаком для установления источников сноса для россыпей дальнего переноса. Типохимические признаки в качестве коррелятивного инструмента более эффективны и надежны. Для Воронежской антеклизы путем интегрального моделирования было доказано [13], что главным поставщиком полезных компонентов Ti-Zr россыпей служили именно кристаллические породы основания. Однако ~40 % всего количества цирконов в россыпях приобретают новые, не свойственные цирконам коренных пород типохимические признаки.

Для выяснения причин указанного феномена нами ранее [7] были изучены цирконы из гранитоидов павловского комплекса и из коры выветривания по ним. Указанный объект исследования наиболее удачен для изучения, т. к. характеризуется хорошей доступностью, благодаря одноименному карьеру, в котором производится добыча гранитоидов для получения строительного щебня. Гранитоиды павловского комплекса относятся к субщелочному ряду и представлены гаммой пород от щелочных гранитов и граносиенитов до гранитов повышенной щелочности. В додевонское время гранитоиды неоднократно выводились на поверхность и подвергались процессам мощного площадного корообразования. Фрагменты доверхнедевонской коры выветривания, степень зрелости которых отвечает третьей – каолинитовой стадии, широко распространены на павловском выступе и перекрываются верхнедевонскими морскими мел-

ководными отложениями воробьевского, а затем и ястребовского горизонта. Последний представляет собой промежуточный коллектор – россыпь с промышленными концентрациями ильменита и с подчиненным количеством циркона.

Считается [15–17], что химический состав цирконов в зоне гипергенеза меняется лишь незначительно. Однако по нашим данным циркон в триаде гранитоиды – кора выветривания – россыпь существенно изменяет не только свой типоморфизм, но и типохимизм. На изменения цирконов в зоне гипергенеза указывалось и ранее, в частности, отмечалось [18], что в зоне гипергенеза в цирконах снижается содержание Zr и меняются Zr/Hf отношения. Гидратированность циркона в зоне гипергенеза в ограниченном масштабе отмечалась для УЩ [8; 19]. Причины способности циркона в некоторых случаях менять свой состав еще далеко не выяснены, хотя можно предположить, что эта способность зависит от степени дефектности кристаллической решетки минерала, показателем которой является наличие примесей U, Th, редких земель и других элементов (табл. 5).

В этой связи логично предположить, что периферическая часть магматических цирконов должна интенсивнее подвергаться цирколитизации в зоне гипергенеза. Однако анализ степени измененности зерен цирконов в их центре и в краях показывает, что это происходит далеко не всегда. Часто центр зерен в большей степени цирколитизирован, чем периферия, что говорит о неравномерности указанного процесса, о его амебообразном проникновении внутрь зерна (рис. 3). Анализ

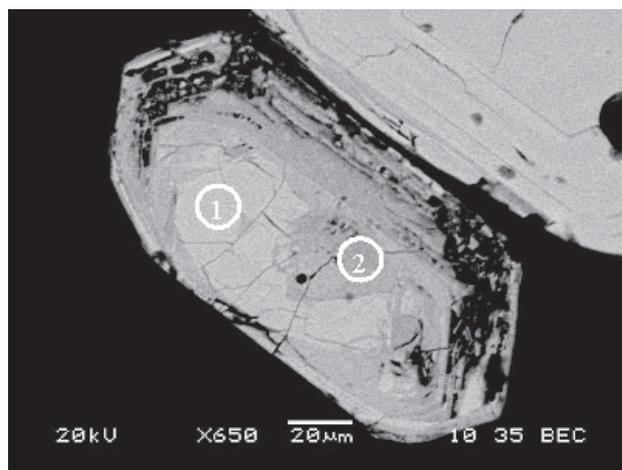


Рис. 3. Циркон с участками, затронутыми процессами цирколитизации: неизменные зоны – светлый фон (1) и амебообразные участки цирколитизации циркона (2)

химизма неизменных цирконов материнских пород (гранитоидов) и коры выветривания по гранитоидам показывает существенные их различия, прежде всего по содержаниям U, Th и редких земель. В гранитоидах цирконы по содержаниям указанных элементов достаточно вариативны, в то время как неизменные цирконы коры выветривания характеризуются минимальными значениями этих элементов и соответствуют лишь незначительной части цирконов ранних генераций неизменных гранитоидов.

Сравнение составов цирконов из гранитоидов и коры выветривания показывает, что при корообразовании только часть цирконов подвержена процессу циртолитизации. Это касается наиболее крупных цирконов поздней генерации, характеризующихся повышенной трещиноватостью. Цирто-

литизация выражается в появлении зеленоватого цвета, снижении блеска и уменьшении двупреломления под микроскопом.

По результатам микрозондового анализа (табл. 5, рис. 4) в циртолитах снижается содержание SiO_2 (до 21–22 % вместо 33 %), ZrO_2 (до 52–54 % вместо 65 %), одновременно несколько понижаются Zr/Hf отношения (до 54 вместо 73), содержание суммы редких земель повышается (в 4–5 раз). Повышение содержаний характерно и для UO_2 и ThO_2 .

Можно выделить две стадии процесса циртолитизации. На первой стадии содержание кремнезема снижается до 27–29 %. Одновременно снижается количество ZrO_2 (до 57–60 %) и повышается содержание суммы окислов редких земель (от 0,19 % до 0,26–0,87 %) и ThO_2 (от 0 до 0,17 %).

Таблица 5

Химический состав цирконов из граносиенитов павловского комплекса, коры выветривания по ним и рудного пласта ястребовского горизонта [7]

№ п/п	№ точки	№ пробы	Порода	SiO_2	ZrO_2	HfO_2	Y_2O_3	ThO_2	CaO	REE	UO_2	Σ
1	1ц	ПК	Павловский массив, граносиениты	32,93	66,04	1,01	0	0	0,01	0,2	0	100,19
2	2ц			32,57	66,26	0,95	0,03	0,02	0,01	0,01	0,16	100,01
3	3ц			32,31	65,51	0,86	0	0	0,02	0,16	0,1	98,96
4	4ц			32,38	64,76	1,02	0,04	0,09	0,01	0,19	0,13	98,62
5	5ц			32,88	65,41	1,02	0,05	0	0,02	0,19	0	99,57
6	6ц			32,95	64,07	0,7	0,12	0,02	0,03	0,17	0	98,06
7	7ц			33,21	64,74	0,97	0,07	0,06	0	0,02	0,1	99,17
8	8ц			33,04	64,55	1,08	0,09	0,08	0,01	0,24	0,01	99,1
9	1ц	P1	Каолинистая кора выветривания по граносиенитам	21,07	52,48	1,05	3,11	0,48	1,76	1,31	0,47	81,73
10	2ц			21,56	53,64	0,9	2,95	0,79	3,02	1,66	0,45	84,97
11	3ц			27,57	57,24	1,06	1,18	0,17	1,1	0,87	0,17	89,36
12	4ц			31,20	60,46	0,82	0,49	0,06	0,73	0,27	0,08	94,11
13	5ц			29,61	59,2	1,42	0,57	0,27	0,77	0,26	0,23	92,33
14	6ц			32,59	64,58	0,89	0,04	0	0	0,19	0,19	98,48
15	1ц	P2	Ястребовский горизонт	32,91	65,12	0,98	0	0	0	0,03	0,04	99,08
16	2ц			26,15	54,68	0,97	1,91	0,17	1,19	0,81	0,13	86,01
17	3ц			30,89	64,2	1,16	0,39	0	0,29	0,23	0	97,16
18	4ц			24,01	54,54	0,79	2,06	0,16	1,01	0,91	0	83,48
19	5ц			23,93	55,06	1,09	1,76	0,04	1,95	0,67	0,28	84,78
20	6ц			28,32	60,9	1,25	0,55	0,01	0,87	0,51	0,09	92,5
21	7ц			32,66	65,9	0,93	0,06	0,07	0	0,22	0,04	99,88
22	8ц			32,52	66,44	0,9	0	0	0	0,29	0,04	100,19
23	9ц			32,90	66,48	1,14	0	0	0	0,13	0,06	100,71

На второй стадии отмеченные тенденции усиливаются. При этом содержание SiO_2 снижается до 21,0 % (циртолитов с более низким содержанием кремнезема не отмечено; по-видимому, рубеж содержания 21,0 % является критическим, ниже которого происходит распад кристаллической решетки циртолита). Сумма окислов в циртолитах по результатам микрозондового анализа колеблется в

интервале от 84 до 93 %. Недостающая часть, по-видимому, приходится на H_2O , содержание которой в циртолитах может достигать значительных (более 10 %) величин [20]. Сравнение цирконов и циртолитов коры выветривания с цирконами гранитоидов показывает, что последние содержат ThO_2 от 0,01 до 0,24 % (среднее 0,15 %) и UO_2 от 0 до 0,16 %, причем явная корреляция между U и Th отсутствует.

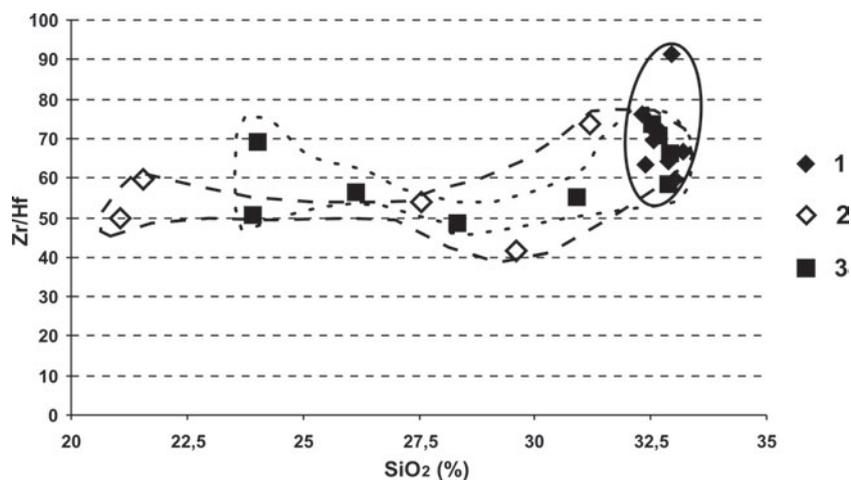


Рис. 4. Фигуративные точки цирконов в координатах SiO_2 -Zr/Hf: 1 – павловский комплекс; 2 – кора выветривания; 3 – ястребовский горизонт

Неизмененные цирконы, встречающиеся в рудном пласте, характеризуются минимальным содержанием UO_2 и ThO_2 , в то время как в цирколитах отмечаются те же самые закономерности поведения элементов редкоземельной группы, U и Th, как и в коре выветривания. Судя по типохимизму цирконов пласта, источником сноса при его формировании служили как кора выветривания по гранитоидам, так и дополнительные источники, о чем свидетельствует и более широкий спектр аксессуаров по сравнению с гранитоидами (появление в большом количестве арсенопирита, пирита, ильменита и хромшпинелидов).

При изучении состава цирконов в корах выветривания по другим материнским породам выяснилось, что цирколита (SiO_2 21,0–31,0 %) характерны не только для коры выветривания павловских гра-

нитоидов и девонских продуктов ее перемыва, но и для Лискинского массива, также затронутого процессами корообразования.

Как уже отмечалось, процессы корообразования приводят к изменению Zr/Hf отношений, но при этом часть цирконов сохраняют их первичные содержания. В системе координат Zr-Hf цирконы павловского комплекса (рис. 5) характеризуются наиболее выдержанным составом, а поля фигуративных точек образуют весьма локализованную область.

При перемыве коры выветривания (ястребовский горизонт) происходит расширение области Zr/Hf отношений (прежде всего за счет появления дополнительных источников), хотя область фигуративных точек практически перекрывается с областью фигуративных точек цирконов из коры выветривания.

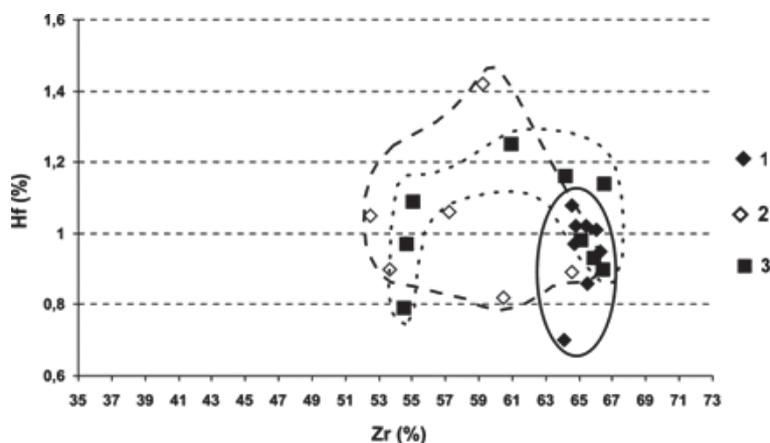


Рис. 5. Фигуративные точки цирконов в координатах Zr-Hf: 1 – павловский комплекс; 2 – кора выветривания; 3 – ястребовский горизонт

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что при формировании россыпей ближнего сноса (промежуточных коллекторов) за счет размыва коры выветривания по кристаллическим породам часть цирконов меняет свой типохимизм, подвергаясь циртолитизации, которая характерна для цирконов с нарушенной кристаллической решеткой. Циртолитизированные различия менее устойчивы к механическому износу, что приводит к потерям при формировании ресурсного потенциала россыпей.

Обсуждение результатов

В результате проведенных исследований установлено, что значительное количество циртолитизированных цирконов россыпей осадочного чехла Воронежской антеклизы связано с процессами корообразования, обуславливающих освобождение акцессорного циркона из материнского субстрата. На примере Павловского выступа показано, что в коре выветривания часть цирконов гидратируется с образованием циртолитов. Этому процессу, прежде всего, подвергаются цирконы с дефектной кристаллической решеткой. Степень ее дефектности зависит от количества элементов-примесей (U, Th, Y, REE, Ca и др.). При замещении циркония или гафния указанными элементами могут освобождаться положительные валентные связи, которые компенсируются гидроксильной группой OH^- . Параллельно за счет перераспределения могут освобождаться и отрицательные связи кремнекислородного тетраэдра SiO_4^{4-} , в результате чего прочная кристаллическая решетка «расшатывается» и повышается ее связывающая способность, при этом в нее могут входить свободные катионы. Это под-

тверждается тем, что более гидратированные циртолиты (табл. 5) содержат в несколько раз больше элементов-примесей, чем циртолиты начальных стадий разложения. Так, например, в цирконах с содержаниями SiO_2 , приближающимися к теоретическим (32,5–33,0 %), суммарное количество примесей составляет меньше 1 %, при последовательном разложении циркона и потере кремнезема в коре выветривания их количество увеличивается, достигая величин 7–9 % при содержаниях SiO_2 в 21,0–21,5 % (рис. 6).

Следует отметить, что такая же закономерность практически характерна и для циртолитов рудного пласта ястребовского промежуточного коллектора, рудный материал для которого поставлялся за счет доверхнедевонской коры выветривания по павловским гранитоидам. Подобное поведение характерно для всех элементов-примесей, в частности иттрия и кальция (рис. 7). Причем наиболее закономерно фигуративные точки содержания иттрия ложатся на усредненную кривую для коры выветривания, в то время как для россыпного коллектора ястребовского горизонта дисперсия содержаний относительно усредненной кривой явно увеличивается, что, вероятно, связано с дополнительными источниками сноса циркона за счет кор выветривания по другим материнским породам. Это наводит на мысль, что циртолиты из коры выветривания несут определенный «генетический код», отражающий геохимические особенности корообразования по определенному материнскому субстрату.

Сравнение генетического кода цирконов и циртолитов из кор выветривания по гранитоидам Павловского и Лискинского массивов (рис. 8)

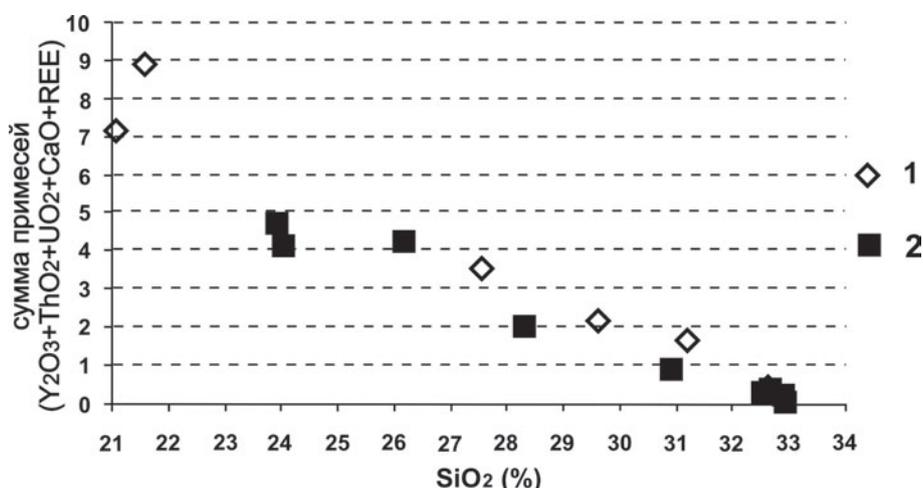


Рис. 6. Зависимость суммы содержаний элементов-примесей и степени гидратированности циртолитов: 1 – цирконы коры выветривания; 2 – цирконы рудного пласта ястребовского горизонта

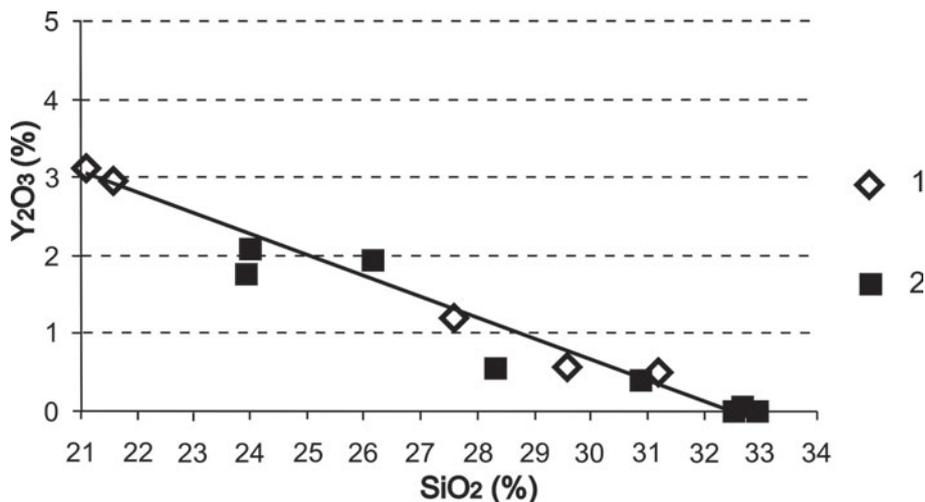


Рис. 7. Зависимость содержаний Y_2O_3 в цирколитах от степени их гидратированности: 1 – цирконы коры выветривания; 2 – цирконы рудного пласта ястребовского горизонта

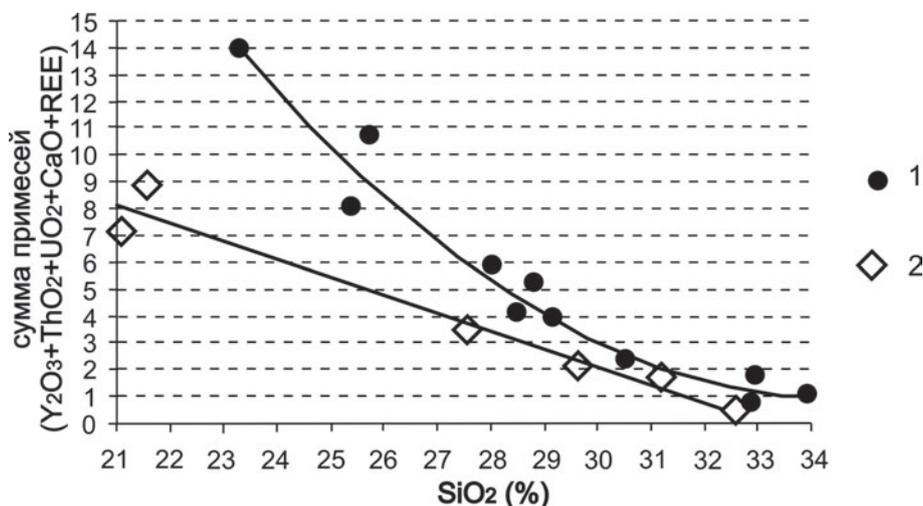


Рис. 8. Генетический код цирконов коры выветривания: 1 – по лискинским гранитоидам; 2 – по павловским граносиенитам

показывает их существенные различия, которые особенно проявляются при содержаниях SiO_2 менее 29,5%. Последнее обстоятельство говорит о том, что поглощающая способность цирконов возрастает при повышении степени их гидратированности. При этом количество связанных катионов зависит от геохимического фона материнских пород. По этому признаку гранитоиды Лискинского массива характеризуются значительно более высокими содержаниями U, Th, Y, REE по сравнению с Павловским массивом.

Несмотря на существующие представления о незначительной вероятности вхождения Y, Th, REE U в кристаллическую решетку циркона в виде изоморфной примеси [21], все вышесказан-

ное подтверждает именно изоморфный характер их вхождения, а не в виде самостоятельных минеральных фаз-микровключений [22].

Выводы

1. Значительная часть цирконов Ti-Zr россыпей территории ВКМ представлена в различной степени цирколитизированными разновидностями.
2. Химизм цирконов способен отражать не только особенности минералообразующей среды магматических и метаморфических процессов, но и особенности гипергенеза.
3. Цирколитизация проявляется на стадии кооробразования по разнообразному материнскому субстрату. При формировании коры выветривания ее особенности отражаются в генетическом коде

циртолитов, который можно использовать в качестве коррелятивного признака для установления источников сноса.

4. Циртолитизация приводит к заметному снижению содержания SiO_2 в кристаллической решетке циркона от 30–34 до 21 %. При дальнейшем снижении SiO_2 , по-видимому, происходит достаточно быстрый распад циртолита и потеря им идентификационных признаков.

5. Изучение процессов циртолитизации в корках выветривания и особенностей циртолитов в россыпных объектах позволит не только пересмотреть ресурсный потенциал известных россыпей, но и внести существенные коррективы в технологические процессы получения титан-циркониевого концентрата.

Работа выполнена по проектам № П-1331; 16.740.11.0188 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы»

ЛИТЕРАТУРА

1. Федотова А. А. Геохимия циркона (данные ионного микроскопа) как индикатор генезиса минерала при геохронологических исследованиях / А. А. Федотова, Е. В. Бибикова, С. Г. Симакин // Геохимия. – 2008. – № 9. – С. 980–997.
2. Bibikova E. V. U-Th-Pb isotopic study of zircons from sanukitoids of the Karelian craton, Baltic Shield / E. Bibikova, A. Petrova, S. Claesson // Lithos. – 2005. – V. 79. – P. 129–145.
3. Watson E. B. Zircon thermometer reveals minimum melting condition on earliest Earth / E. B. Watson, T. M. Harrison // Science. – 2005. – V. 308. – P. 841–844.
4. Ляхович В. В. «Цирконовый метод»: достоинства и недостатки. Статья II / В. В. Ляхович // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Геология. – 2000. – № 9. – С. 124–127.
5. Чайка В. М. Вторичные изменения минералов древних россыпей и проблема эволюции рудного вещества / В. М. Чайка // Литология и полез. ископаемые. – 1969. – № 5. – С. 17–26.
6. Чайка В. М. К методике изучения метаморфических пород / В. М. Чайка // Геология и геофизика. – 1962. – № 12. – С. 71–78.
7. Ненахов В. М. Изменения типоморфических и типохимических свойств цирконов акцессорных минеральных ассоциаций в ряду коренной источник – кора выветривания – россыпь / В. М. Ненахов, Г. С. Золотарева // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Геология. – 2006. – № 2. – С. 141–148.
8. Эльянов М. Д. Россыпные месторождения коры выветривания и связанных с ней отложений Украинско-го щита / М. Д. Эльянов // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Геология. – 1998. – № 6. – С. 123–131.
9. Hoppe G. Zirkone aus Granuliten Ber. Deutsch / G. Hoppe // Ges. geol. Wiss. B. Miner. Lagerstätten. – 1966. – V. 11, № 1. – P. 47–81.
10. Ляхович В. В. «Цирконовый метод»: достоинства и недостатки. Статья I / В. В. Ляхович // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Геология. – 1999. – № 8. – С. 93–103.
11. Скублов С. Г. Распределение редкоземельных и редких элементов в цирконах из миаскитовых лампроитов панозерского комплекса Центральной Карелии / С. Г. Скублов [и др.] // Геохимия. – 2009. – № 9. – С. 958–971.
12. Jung S. Crustal dynamics: Links between geochronology and petrology / S. Jung, A. Möller // Chem. Geol. – 2007. – V. 241. – P. 1–3.
13. Золотарева Г. С. Типоморфизм и типохимизм минералов титан-циркониевых россыпей Воронежской антеклизы как критерий реконструкции условий их формирования : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук / Г. С. Золотарева. – Воронеж, 2009. – 23 с.
14. Кременецкий А. А. Реконструкция условий формирования Ti-Zr россыпей Центральной России в системе коренной источник – промежуточный коллектор – россыпь / А. А. Кременецкий [и др.] // Месторождения природного и техногенного минерального сырья: геология, геохимия, геохимические и геофизические методы поисков, экологическая геология : мат.-лы междунар. конф., посвящ. 90-летию Воронеж. гос. ун-та. – 2008. – С. 125–127.
15. Ильяш В. В. К методике использования химического состава цирконов в петрологии метаморфических пород / В. В. Ильяш // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Геология. – 1999. – № 7. – С. 128–133.
16. Кухаренко А. А. Минералогия россыпей / А. А. Кухаренко. – М., 1961. – 317 с.
17. Ляхович В. В. Акцессорные минералы в гранитоидах Советского Союза / В. В. Ляхович. – М., 1967. – 488 с.
18. Ильяш В. В. Минералого-петрографические признаки метаморфизованного элювия в докембрии КМА / В. В. Ильяш // Геология и генезис месторождений железных руд КМА. – Воронеж, 1987. – С. 3–126.
19. Голецкий Л. С. Подольская металлогеническая область / Л. С. Голецкий, В. А. Рябенко // Металлогения Украины и Молдавии. – Киев, 1974. – С. 386–396.
20. Липова И. М. Изучение метамиктного состояния цирконов и циртолитов / И. М. Липова, Г. А. Кузнецов, Е. С. Макаров // Геохимия. – 1965. – № 6. – С. 681–694.
21. Сидоренко Г. А. Циркон – изоморфная емкость кристаллической структурой, ее нестабильность, возможность изоморфизма / Г. А. Сидоренко, И. С. Наумова // Типоморфизм, синтез и использование циркона. – Киев, 1989. – С. 54–59.
22. Chrustschoff K. Beitrag zur Kenntnis der Zirkone in Gesteinen / K. Chrustschoff // Schweiz. Mineral. and petrogr. Mitt. – 1886. – V. 7. – P. 423–442.

Геохимия процесса циртолитизации цирконов при гипергенезе

*Воронежский государственный университет
В. М. Ненахов, доктор геолого-минералогических
наук, профессор кафедры общей геологии и гео-
динамики
nenahov@mail.vsu.ru
Тел. 8 (473) 220-89-89*

*Voronezh State University
V. M. Nenakhov, Doctor of the Geological and Miner-
alogical Sciences, Professor Geodynamics and Geo-
logical
nenahov@mail.vsu.ru
Tel. 8 (473) 220-89-89*

*Г. С. Золотарева, старший научный сотрудник
akcessoriy@mail.ru
Тел. 8 (473) 220-89-26*

*G. S. Zolotareva, the senior scientific employee
akcessoriy@mail.ru
Tel. 8 (473) 220-89-26*