УДК 549.514.51.81.283:551.71 (470.22)

# ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ ЦИРКОНЫ ИЗ РУДНЫХ АМФИБОЛИТОВ МАССИВА ТРАВЯНАЯ ГУБА, СЕВЕРНАЯ КАРЕЛИЯ

В. Н. Кожевников, В. А. Земцов

Институт геологии Карельского научного центра РАН

Впервые в регионе проведено комплексное изучение локальными методами гидротермальных цирконов из рудных (ЭПГ, Au) амфиболитов в массиве Травяная Губа, расположенном в Беломорском мобильном поясе. Изучение твердых минеральных включений в цирконах и роговых обманках и содержания микроэлементов в цирконах с последующим статистическим анализом позволило наметить связи в группах элементов с REE и с золотом, откладывавшимся совместно с платиноидами. В ходе длительного гидротермального процесса были сформированы две ассоциации амфиболов и гидротермальных цирконов. Многофазные включения сложных соединений Pd и Pt обнаруживаются в крупных амфиболах поздней более низкотемпературной генерации, с которыми ассоциируют крупные зерна гидротермального циркона. На завершающем этапе гидротермального процесса, сопровождаемого привносом неформульных элементов (Fe, Al, Ca, Na и др.), радикально изменилась структура корреляционных связей Au с другими микроэлементами. Последующее изотопное датирование цирконов позволит разрешить дискуссионный вопрос о возрасте гидротермального рудного процесса и самого массива Травяная Губа.

К лючевые слова: гидротермальные цирконы, рудные амфиболиты, золото, редкоземельные элементы, корреляция, минеральные включения, массив Травяная Губа.

# V. N. Kozhevnikov, V. A. Zemtsov. HYDROTHERMAL ZIRCONS FROM ORE AMPHIBOLITES OF THE TRAVYANAYA GUBA MASSIF, NORTH KARELIA

Hydrothermal zircons from ore-bearing (PGE, Au) amphibolites of the Travyanaya Guba massif located at the Belomorian mobile belt, were studied for the first time in the region by local methods. Having studied solid mineral inclusions in zircons and hornblende, and the content of trace elements in zircons, with subsequent statistical analysis we identified associations in the groups of elements with REE and with gold deposited together with PGE. Two amphibole and hydrothermal zircon assemblages formed through a long hydrothermal process. Multi-phase inclusions of complex Pd and Pt compounds are encountered in a late lower-temperature generation of coarse amphibole with which coarse hydrothermal zircon grains are associated. At the end of the hydrothermal process, accompanied by the addition of non-formula elements (Fe, Al, Ca, Na, etc.), the structure of the correlations of Au with other trace elements changed radically. Subsequent isotopic dating of zircons is expected to resolve a debatable problem – the age of the hydrothermal ore process and the Travyanaya Guba massif itself.

K e y w o r d s: ore amphibolites, multi-element geochemistry of hydrothermal zircons, correlation, mineral inclusions, Travyanaya Guba massif.

76

### Введение

Интенсивное геохимическое изучение цирконов из пород порфировых, эпи- и мезотермальных золоторудных месторождений позволило наряду с магматическим типом выделить гидротермальные и гидротермально-измененные цирконы, обладающие рядом специфических морфологических, минералогических и геохимических признаков [Claoué-Long et al., 1990; Rubin et al., 1993; Kerrich, Kyser, 1994; Ballard et al., 2002; Hoskin, Schaltegger, 2003; Mernagh et al., 2004; Hoskin, 2005; Kebede et al., 2007; Guo et al., 2011]. Изучение популяций цирконов всех типов дало возможность реконструировать временную последовательность магматических и постмагматических процессов, включая время отложения рудного вещества [Vakh et al., 2011; von Quadt et al., 2011]. Однако некоторые из геохимических характеристик цирконов, например Th/U отношение, как оказалось, не всегда являются четким дискриминирующим признаком, позволяющим различать их природу. Важным признаком гидротермальных цирконов из золоторудных объектов является наличие в них включений золота, рудных минералов и богатых летучими компонентами минералов, кристаллизовавшихся в условиях малоглубинных низкотемпературных гидротерм [Кожевников, Сафронов, 2012]. Показано, что гидротермальный циркон может быть использован для датирования процессов инфильтрации флюидов и взаимодействия в системе «вода-порода» в золоторудных процессах [Claoué-Long et al., 1990; Oreskes, Einaudi, 1990; Kerrich, King 1993; Lawrie, Mernagh, 2003; Pettke et al., 2005; McNaughton et al., 2005; Pelleter et al., 2007; Schaltegger, 2007; Fu et al., 2009; Schneider et al., 2012]. Прямым указанием на рост цирконов в золоторудных гидротермальных системах является наличие в них значимого содержания золота и других элементов - индикаторов рудных процессов.

Изучение изотопных возрастов, минеральных включений и геохимии детритовых гидротермальных цирконов из палеопротерозойских кварцитов и конгломератов Карельского кратона позволило наметить в его архейской истории несколько рубежей гидротермальной активности, с некоторыми из них было связано формирование золоторудных кварцевожильных систем. В связи с этим встал вопрос об изучении гидротермальных цирконов из известных на сегодняшний день благороднометалльных объектов, связанных с гидротермальными процессами. В качестве такого объекта был выбран базит-гипербазитовый массив Травяная Губа в Северной Карелии, с которого у авторов имелся собранный в ходе полевых исследований каменный материал, необходимый для выделения цирконов из горизонта рудных амфиболитов. Хорошая изученность геологии и петрологии массива, его рудной минералогии является необходимым базисом для проведения прецизионного изучения цирконов. Особый интерес к изучению цирконов из этого рудного объекта был вызван тем, что до настоящего времени отсутствуют данные по изотопному возрасту как самого гипербазитового тела, так и метаморфогенного рудного процесса, а геолого-петрологические оценки их возрастов (неоархей? сумий?) являются дискуссионными. Принципиально важным было получить результаты по мультиэлементной геохимии гидротермальных цирконов из базитов, поскольку подобная информация для докембрия Фенноскандинавского щита на сегодняшний день отсутствует и такие данные могут рассматриваться как первые для цирконов подобного типа.

# Краткая геологическая и минералогическая характеристика объекта опробования

В Беломорском подвижном поясе (рис. 1), в субмеридиональной полосе развития гранатовых и гранат-полевошпатовых амфиболитов к востоку от оз. Кереть на участке Травяная Губа выявлены реликты дифференцированного габбро-анортозитового массива, сложенного габбро, оливиновыми и рудными вебстеритами и амфиболитами по ним [Степанов, Карпова, 1991; Степанов, 2001]. Рудные тела, в которых руды представлены двумя типами ильменит-титаномагнетитовым (тип 1) и ильменитовым (тип 2), имеют пластообразную форму. Богатые вкрапленные и сидеронитовые руды типа 1 сложены титаномагнетитом, ильменитом и их симплектитовыми срастаниями с оливином и ортопироксеном. Руды ильменитового типа 2 в гранатовых амфиболитах и прожилковая минерализация вблизи контакта с пегматитами были перекристаллизованы и переотложены при метаморфизме. К титаномагнетитовым рудам приурочена малосульфидная благороднометалльная минерализация (ЭПГ до 1,58 г/т, Аи до 2,5 г/т, по [Степанов, 2001]), представленная ассоциацией халькопирита, борнита, Pd-Pt-стибиоарсенидов, в т. ч. с Ві и Те, сульфидов Рt и Рd,



Рис. 1. Геологический план участка Травяная Губа, по [Степанов, Карпова, 1991]. Усл. обозн.: 1 - пегматитовые жилы; 2 - светлые плагиоклазовые амфиболиты; 3 – гранатовые и гранат-полевошпатовые амфиболиты; 4 - рудные амфиболиты (Орх и Срх); 5 – рудные вебстериты; 6 - рудные перидотиты с участками симплектитового строения; 7 – рудные перидотиты; 8 – элементы залегания контактов: 9 минеральная линейность: 10 ОП мелких складок; 11 - контуры обнажений; 12 - место отбора пробы на геофизическом профиле А-Б. На врезке фрагмент Карты размещения месторождений и проявлений металлических полезных ископаемых Республики Карелия, М 1:1000000, 2005 г. (Приложение к [Минерально-сырьевая база..., 2006]), на которой показано положение массива Травяная Губа

редких интерметаллидов (Pd-Cu-Sn), самородной платины и селена [Земцов и др., 2007; Кулешевич и др., 2007; Kuleshevich, Zemtsov, 2009]. В ильменитовых рудах и прожилках вблизи пегматитов в основном встречаются арсениды палладия и платины, но появляются галенит, самородные серебро и висмут и нерудные минералы – торит, апатит, циркон, барит, монацит и др., по-видимому, связанные с влиянием гранитоидов [Кулешевич, Земцов, 2009].

Монофракции цирконов были выделены из отобранной В. А. Земцовым по геофизическому профилю А-Б пробы рудных амфиболитов (см. рис. 1, обр. 1005). Кроме того, по разрезу этих амфиболитов была отобрана серия аншлифов для их изучения на СЭМ VEGA-TESKAN.

78

#### Методические аспекты исследования

Приготовление препаратов. Цирконы выделяли из раздробленных проб весом 5–7 кг, используя гравитационные и магнитные методы разделения. По схеме, разработанной в лаборатории технической минералогии ИГ КарНЦ РАН, были получены чистые монофракции цирконов без использования жидкости Клеричи, с тем чтобы избежать заражения проб таллием. Выделенные зерна имплантировались в эпоксидную смолу в шайбы в виде серии дорожек. После вскрытия зерен шайбы полировались и декорировались углеродом.

Минеральные включения. Состав твердых минеральных включений в цирконах, содержание в них главных элементов, их вариации, связанные как с первичной геохимической гетеро-



*Рис. 2.* BSE-изображения мелких цирконов, включенных в роговую обманку A2 (A–B), и крупных гидротермальных цирконов (Г, Д) с обильными включениями роговой обманки A1, биотита и других минералов, светлые неизмененные домены (1), темные, измененные поздним гидротермальным процессом домены (2) с микронными включениями содержащего селен галенита (Е – белое включение)

генностью, так и с поздним гидротермальным изменением зерен цирконов, определялись на CЭМ VEGA II LSH (фирма TESKAN) в аналитической лаборатории Института геологии КарНЦ РАН (аналитики – вед. физики А. Н. Сафронов и А. Н. Терновой). При выборе участков изучения внутренне гетерогенных зерен использовались электронные изображения зерен в обратнорассеянных электронах (ВSE-имидж). Диаметр анализируемого участка составлял 2–5 мкм, относительная погрешность определения содержания элементов 5–10 %. В аналогичном режиме изучались цирконы, амфиболы, пироксены и рудные минералы в полированных аншлифах.

Прецизионная геохимия – LA-ICP-MS. Анализ содержания золота, малых, редких и редкоземельных элементов в зернах цирконов, предварительно изученных на CЭM VEGA II LSH, проводился квадрупольным масс-спектрометром X-SERIES 2 (Thermo scientific) с приставкой лазерной абляции UP-266 MACRO (New Wave Research) (аналитик – вед. физик А. С. Парамонов). Система UP MACRO включает в себя учетверенный по частоте лазер Nd: YAG с длиной волны 266 нм. Анализ химического состава проводился при параметрах работы лазера: энергия – 0,133 мДж, скорость сканирования - 70 мкм/сек, частота повторения импульсов - 10 Гц. Диаметр лазерного пучка в эксперименте составлял около 30 мкм. В качестве внешнего калибровочного стандарта для микроэлементов использовалось стекло NIST 612, которое многократно анализировалось в каждой индивидуальной измерительной сессии. Точность и достоверность анализов NIST 612 для большинства элементов составляли 1-5 %. Количественные результаты были получены для 39 элементов, пределы обнаружения для которых составляли (в ppm): 0,02-0,80 (Mn, Nb, Ag, Sb, Ba, Mo, La-Lu, Hf, Au, Pb, Bi, Th, U); 0,90–8,85 (Li, P, Sc, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Y); 11,00 (Cd); 22,00 (Ti); 150,00 (Te).

Гетерогенность зерен цирконов, обусловленная минеральными включениями, в том числе микронными, наличием гидротермально измененных доменов и, наконец, гидротермальной природой значительной части зерен, сделала необходимым в каждом зерне определять содержание элементов по двум импульсам, каждый из которых выжигал кратер на глубину 3–4 мкм. Таким способом анализировалось вещество, полученное с интервалов 0–4 и 6–8 мкм. Большой разброс полученных значений и корреляционные связи между элементами, свидетельствующие о присутствии в анализе крупных минеральных включений, определяли выбраковку таких результатов. По этим данным можно было приблизительно оценивать размеры таких включений. Холостое измерение состава эпоксидной смолы, в которую имплантировались зерна, показало, что содержание каждого из элементов в ней пренебрежимо мало по сравнению с их минимальным содержанием в зернах циркона. Содержание REE нормировалось на состав хондрита C1 [McDonough, Sun, 1995].

### Результаты микрозондового изучения аншлифов рудных амфиболитов

Микрозондовое изучение аншлифов на СЭМ VEGA II LSH (фирма TESKAN) показало, что существуют по две морфологические группы амфиболов и цирконов, находящихся в сложных соотношениях между собой и с рудными гидротермальными минералами, в том числе с минералами платиновой группы (МПГ).

Наличие двух морфологических групп и амфиболов, и цирконов обосновывается тем, что в аншлифах крупные зерна роговых обманок, условно обозначенные как амфиболы А2, слагающие основную массу рудных амфиболитов, содержат включения мелких (до 20 мкм) преимущественно неограненных округлых зерен цирконов (рис. 2, А-В). В крупных зернах роговой обманки, условно обозначенных как АЗ, содержатся многочисленные микронные включения разнообразных ранее описанных МПГ, редко золота. Некоторые примеры таких полифазных включений благороднометалльных минералов в крупных зернах роговой обманки приведены на рисунке 3. Роговые обманки, обозначенные как амфиболы А1, представляют собой округлые, реже идиоморфные включения размером 10-30 мкм в крупных зернах гидротермальных цирконов, содержащихся в основной массе амфиболита (рис. 2, Г, Д). Химический состав (в ат. %) всех трех групп роговых обманок приводится в таблице 1. Крупные роговые обманки A2 и A3 практически не различаются по составу, в то время как мелкие амфиболы А1, включенные в зерна циркона, являются более железистыми, глиноземистыми и заметно чаще содержат натрий (рис. 4). Таким образом, мелкие зерна роговой обманки А1 – включения в крупных цирконах – и крупные породообразующие зерна А2 и А3, включающие и мелкие гидротермальные цирконы, и МПГ, являются представителями двух генераций амфибола.

Таблица 1.	Составы амфиболов из рудных амфибо-
литов	

·····••											
	Na	Mg	Al	Si	Ca	Fe	O, OH				
Мелкий а	амфиб	ол (А1	), вклн	пный ці	иркон						
11 m	1,10	3,36	4,24	15,96	3,39	5,41	66,27				
11,1 m	0,94	4,20	4,33	16,89	3,96	5,91	63,52				
13 m	н. о.	4,28	3,87	17,11	3,50	6,21	65,03				
13,1 m	1,44	4,00	4,97	17,73	4,12	5,90	61,84				
26 m	н. о.	4,79	3,57	17,83	4,39	6,56	62,85				
33 m	н. о.	4,18	4,88	18,49	4,05	6,54	61,87				
41 m	н. о.	4,73	4,64	18,11	4,20	6,63	61,68				
55 m	н. о.	3,82	5,27	16,96	3,38	6,72	63,86				
64,1 m	н. о.	5,01	3,87	18,03	4,39	5,88	62,83				
66 m	н. о.	4,37	4,53	18,42	4,13	6,58	61,98				
68 m	н. о.	4,34	5,36	17,47	5,03	7,39	60,41				
71 m	н. о.	4,59	4,34	18,76	5,17	6,67	60,47				
71,1 m	н. о.	4,45	3,74	15,25	3,82	4,99	67,74				
76 m	н. о.	4,42	5,64	18,37	4,81	7,35	59,41				
93 m	н. о.	3,98	4,56	17,04	4,73	6,63	63,07				
106 m	н. о.	4,83	4,54	16,96	3,90	5,68	64,09				
122 m	н. о.	4,64	2,79	18,19	4,33	6,10	63,95				
130 m	н. о.	3,70	5,57	16,80	4,35	6,64	62,94				
131 m	1,32	3,80	4,88	16,18	3,84	5,85	63,76				
136 m	н. о.	4,58	4,00	16,50	4,23	5,43	64,96				
136,1 m	1,37	4,59	4,24	16,73	4,41	6,21	61,98				
139 m	н. о.	3,73	5,22	17,63	4,40	5,91	63,11				
Крупный а	мфиб	ол (А2	) с вкл	ючения	ми ме	лкого ці	иркона				
A8	1,27	6,75	3,74	19,13	3,29	5,48	60,13				
A14	1,14	5,9	3,14	19,09	3,55	7,13	60,04				
A17	0,76	5,4	3,50	19,17	4,28	6,45	60,22				
A18	1,05	4,97	4,82	17,76	4,57	7,01	59,82				
A20	1,31	6,04	3,13	18,97	3,90	6,49	59,86				
A25	0,77	5,34	3,24	19,32	4,13	6,92	60,28				
A29	0,99	5,62	3,93	18,84	4,37	6,10	60,15				
A34	н. о.	6,15	3,70	18,71	4,18	6,99	60,28				
A45,1	н. о.	5,12	3,97	17,23	4,32	5,82	63,56				
A45	н. о.	5,3	3,11	17,31	4,17	6,18	63,94				
Кру	пный а	амфиб	ол (АЗ	) с вклк	учения	ими МПГ	-				
A5	1,1	5,52	3,47	16,97	4,31	5,69	62,94				
A7	0,9	5,08	3,12	17,37	4,50	5,91	62,96				
A32	0,92	5,36	3,54	16,76	4,07	5,632	63,72				
A40	н. о.	6,32	2,5	18,59	2,89	7,10	62,60				
A41	н. о.	6,3	2,92	18,43	3,79	6,96	61,58				
A53	н. о.	5,67	3,13	17,34	4,85	5,23	63,38				
A62	н. о.	5,49	3,32	18,77	3,82	6,75	61,86				
A66	н. о.	6,07	2,61	17,66	3,48	6,15	64,02				
A68	1,29	5,73	3,30	17,00	4,50	5,49	62,69				
A71	1,55	5,18	3,66	16,69	4,19	5,43	63,31				
A72	н. о.	6,02	3,28	17,00	4,30	5,43	63,97				
A73	н. о.	5,29	3,82	17,74	4,40	6,15	62,60				
A74	н. о.	5,2	2,74	16,24	3,16	6,02	66,30				
A76	н. о.	6,47	2,21	18,45	3,05	6,00	62,95				
Δ7Q	1 34	5 44	3 23	17.60	4.06	5.80	62 51				

Примечание. н. о. – элемент не обнаружен.

Специфика мелких цирконов, включенных в роговые обманки, изучалась только в аншлифах на СЭМ VEGA-TESKAN, поскольку из-за их малых размеров ни изготовление шайб, ни лазерная абляция были практически невозможны. Как уже отмечено, включенные зерна имеют преимущественно овальную форму. В них отсутствуют признаки осцилляционной или секториальной зональности, и по данным энергодисперсионного анализатора в свежих участках зерен обнаружи-



Рис. 3. BSE-изображения полифазных микронных включений рудных минералов в роговой обманке A2: A (1 – ( $Pd_{_{0.72}}Fe_{_{0.03}}$ )<sub>0.75</sub>( $As_{_{0.18}}Sb_{_{0.04}}Bi_{_{0.03}}$ )<sub>0.25</sub> – Bi-винцентит, 2 – Au<sub>0.53</sub>Ag<sub>0.47</sub> – электрум); Б (1 –  $Pd_{_{0.47}}Fe_{_{0.05}}$ )<sub>0.52</sub>( $Bi_{_{0.39}}Te_{_{0.09}}$ )<sub>0.48</sub> – котульскит, 2 – ( $Pt_{_{0.33}}Fe_{_{0.06}}$ )<sub>0.39</sub>As<sub>0.61</sub> – сперрилит, 3 –  $Pd_{_{0.73}}(As_{_{0.23}}Sb_{_{0.03}})_{_{0.26}}$  – мертиит I); В (1 –  $Pd_{_{0.53}}Bi_{_{0.47}}$  – соболевскит, 2 – ( $Pd_{_{0.58}}Ni_{_{0.04}}Cu_{_{0.03}}Fe_{_{0.07}}$ )<sub>0.72</sub>As<sub>0.28</sub> – стиллвотерит); Г (1 – ( $Pd_{_{0.48}}Fe_{_{0.05}}$ )<sub>0.53</sub>( $Bi_{_{0.37}}Te_{_{0.10}}$ )<sub>0.47</sub> – котульскит, 2 – ( $Pd_{_{0.64}}Cu_{_{0.03}}Fe_{_{0.04}}$ )<sub>0.71</sub>As<sub>0.29</sub> – стиллвотерит)

вается присутствие Fe и Au, что может отражать гидротермальную природу мелких зерен цирконов. Более поздние изменения (проявленные как темные области на BSE-изображении), обусловленные вхождением в решетку так называемых неформульных элементов – Al, Mg, Ca, Fe, Mn, Y, P и др. [Geisler et al., 2003, 2007; Hay, Dempster, 2009], наблюдаются в цирконах этой генерации часто (см. рис. 2, A–B). Необходимо подчеркнуть, что в таких зернах не обнаружены диагностируемые твердые минеральные включения.

# Результаты микрозондового изучения крупных цирконов

Морфология крупных зерен цирконов, минеральные включения и предварительная геохимия свежих и измененных доменов изучались на CЭМ VEGA-TESKAN. Для морфологии всех (около 80) изученных зерен характерны: отсутствие огранки; округлая или комковатая форма; отсутствие осцилляционной или секториальной зональности; широкое развитие темных измененных доменов самой разнообразной формы, обусловленных наиболее поздним гидротермальным изменением исходных зерен; обилие твердых минеральных включений; наличие зерен с комковатой структурой (рис. 2, Г-Е). Минеральные включения широко представлены мелкими (до 20 мкм) округлыми, редко ограненными зернами роговой обманки А1 и торита часто в ассоциации с биотитом. Отмечены единичные включения клино- и ортопироксена, хлорита, монацита, бадделеита, паризита и смеси гидратированных фаз, содержащих Th, Fe и кремнезем. Включения рудных минералов представлены обильными каплевидными округлыми микронными выделениями минералов ряда галенита PbS - клаусталлита PbSe, содержащего до 0,5 ф. е. Se,

и единичными зернами халькопирита и железистого сфалерита. Включения селенистого галенита обнаруживаются главным образом в темных участках позднего изменения крупных зерен (см. рис. 2, E).

Наборы элементов-примесей в светлых и темных доменах крупных зерен заметно различаются. Так, в светлом домене (см. рис. 2, Е, спектр 1) значимое (для СЭМ VEGA) содержание определено для Au, Hf и W. В темных участках интенсивного изменения (см. рис. 2, Е, спектр 2) добавляются U, Ca, Fe, Mn и Na. Именно наборы этих элементов определяют геохимическую специфику наиболее поздних порций гидротермальных растворов, из которых происходило выделение селено-сульфидов свинца. Таким образом. по морфологии и большей частью по интенсивности свечения BSE-изображения вся совокупность изученных зерен была разбита на две группы – более ранние светлые и более поздние темные. Граница между ними является размытой, поскольку соотношение светлых и темных доменов представлено в разных зернах в разных

82

пропорциях, а сама структура является нерегулярно-сетчатой.

# Результаты изучения геохимии крупных цирконов методом LA-ICP-MS

В таблице 2 представлены интервалы содержания и средние для 24 микроэлементов в обоих типах цирконов – со светлым (52 анализа) и темным (18 анализов) свечением при BSE-съемке. Кроме представленных в таблице, было определено содержание нескольких других элементов, которые не вошли в обсуждение. Так, аномальное содержание Fe, Mg, Al, Ca, Na определялось крупными минеральными включениями роговой обманки, биотита, гидроокислов железа, а при определении содержания Ta и W наряду с аномальными величинами было много нулевых значений.

Для обеих групп элементов характерны широкие вариации значений содержания, которые могут достигать нескольких порядков, как, например, у Pb, Th, Y, Ba, что связано с невозмож-



*Рис. 4.* Бинарные диаграммы, иллюстрирующие некоторые различия в химизме трех групп амфиболов, представленных микровключениями в крупных цирконах (А1), крупными зернами с микровключениями цирконов (А2) и крупными зернами с микровключениями платиноидов (А3)

Таблица 2. Диапазон и средние значения содержания (в ppm) ряда элементов в светлых (выделено полужирным) и в измененных темных зернах гидротермальных цирконов (курсив) из рудных амфиболитов в массиве Травяная Губа

Au	Li	Р	Sc	Ti	Mn
0,923-19,41*	34,23-78,78	36,11-50,38	40,74-73,32	64,92-439,30	33,54-122,80
5,64**	50,31	44,80	54,74	145,16	46,26
0,879–21,77	28,42-66,46	42,61–48,84	45,74–76,21	61,07-252,79	36,91-202,40
7,16	46,81	45,07	58,54	170,91	74,99
Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr
11,99–62,45	23,14-94,59	35,75–95,91	7,12–112,00	23,11-50,88	0,58-108,90
24,99	41,91	44,47	36,88	35,22	19,61
8,805-191,80	14,97–97,53	35,70–78,12	3,21–104,50	24,91-48,57	4,89-986,60
38,27	37,61	47,53	41,87	35,00	210,63
Y	Nb	Мо	Ag	Cd	Те
65,70-4614,00	1,49-22,54	10,53-43,39	146,10-662,60	79,99–772,6	0-627,5
1440,81	8,76	21,95	337,95	316,58	175,94
343,3-9046	1,97–28,69	10,58–43,74	64,80–645,2	73,5–600,1	0–582,3
2945,7	9,73	25,79	342,06	346,9	246,03
Ва	Hf	Pb	Bi	Th	U
0,75–137,4	6811-31090	4,81–1276	0–4,93	46,21-18120	368,7-5461
15,88	15200	259,16	0,68	1503,3	1674,8
1,85-359,4	2783-35620	109,9–7553	0–5,07	223,8-6524	801,3-10730
85,76	16490	1528,5	0,90	2268,4	3714,4

Примечание. \* – диапазон содержания, \*\* – среднее содержание.

ностью избежать влияния мелких включений минералов - концентраторов этих элементов. Средние значения содержания большинства элементов в обеих группах цирконов достаточно близки (см. табл. 2). Соотношение аналогичных показателей в темных и светлых зернах (X<sup>att</sup>/X<sup>in</sup>)<sup>1</sup> для Li, P, Sc, Ti, Ni, Cu, Zn, As, Nb, Mo, Ag, Cd и Hf – около 1. Оно заметно выше для Mn, Co, Th, Те, Ві, Аи и достигает аномальных значений 2-6,04 для Sr, Pb, Ba, U, Th и Y (рис. 5). Высокие значения Х<sup>аlt</sup>/Х<sup>in</sup> могут быть обусловлены как привносом элементов-изоморфов в измененные домены цирконов, так и наличием мелких микронных и субрентгеновских твердых минеральных включений. Обилие микронных включений галенита, содержащего селен, в темных доменах цирконов подтверждает это.



Рис. 5. Соотношение значений среднего содержания элементов в темных (X<sup>ett</sup>) и светлых (X<sup>in</sup>) зернах цирконов и доменах, иллюстрирующее изменение содержания элементов под действием поздних порций флюида

Различия в микроэлементной геохимии светлых и темных зерен или доменов наглядно иллюстрирует сопоставление рассчитанных для обеих этих групп коэффициентов корреляции Au с остальными элементами –  $R^{Au}$  (рис. 6). Последовательность элементов на абсциссе в группе светлых зерен выстроена в направлении возрастания величины  $R^{in}$  от –0,3 (Zn) до 0,66 (Ag). В этой группе существенная часть элементов имеет отрицательные (Zn, As, Ni и Mn) или низкие, не достигающие критического значения (Rcr = 0,25) коэффициенты корреляции их с золотом (P, Li, Sc, Nb, Co, Bi, Sr, Sb, Te, Cd, U, Y). Выше критического значения  $R^{Au}$ имеют Ba, Mo, Pb, Ti, Cu, Th, Hf и Ag.



*Рис. 6.* Коэффициенты корреляции золота с остальными элементами для светлых (R<sup>in</sup>) и темных (R<sup>att</sup>) зерен цирконов. Критические коэффициенты корреляции для светлых зерен – 0,25, для темных – 0,38

В группе темных зерен цирконов структура корреляционных связей элементов с Au заметно отличается. Значения R<sup>att</sup>для Zn, As, Ni, P, Nb, Co,

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Здесь и далее надстрочники: alt – от altered/измененный, in – от initial/исходный.

		-														
	СВЕТЛЫЕ НЕИЗМЕНЕННЫЕ / LIGHT NONALTERED							ТЕМНЫЕ ИЗМЕНЕННЫЕ / DARK ALTERED								
	68a.1	80a.1	128a.1	68a.2	93a.1	98a.1	128a.2	143a.1	103a.2	19a.2	19a.1	84б.1	95б.1	106б.1	44б.2	98б.2
La	3,411	7,773	10,08	3,111	150,1	59,86	25,67	7,281	122,1	627	17,94	367,9	581,1	551,1	60,97	13,30
Ce	29,88	64,2	42,95	40,72	306,4	358	40,94	55,8	598	704,2	147,6	1308	1464	2897	270,00	168,40
Pr	3,778	8,479	7,483	4,261	39,23	46,88	7,027	4,229	81,83	67,94	17,62	159,1	144,4	311,2	36,78	14,34
Nd	15,58	28,06	33,97	16,41	127,1	215,6	50,95	37,74	368,5	214,4	81,24	656,9	713,4	1782	153,80	83,09
Sm	7,845	19,71	8,538	15,69	35,56	87,55	22,77	7,115	80,88	28,59	40,29	167,1	223,7	441,9	45,06	45,65
Eu	1,009	15,79	1,251	1,012	24,29	37,72	4,379	4,171	33,62	6,643	10,44	82,06	90,66	187,8	4,67	13,45
Gd	16,74	8,972	11,57	18,65	29,89	101	11,57	30,84	60,66	129,8	171,4	110,5	151,1	348,8	24,70	47,60
Tb	7,961	2,868	0,9	7,561	9,509	45,38	2,52	5,76	10,93	24,07	48,14	22,06	22,22	70,04	4,57	21,17
Dy	111,3	16,03	7,619	138	120,4	414,2	12,28	69,84	62,65	348,2	498,9	128,5	186,5	860,2	45,66	195,70
Но	45,73	4,027	1,951	57,68	43,87	152,3	3,242	30,26	16,12	141,8	215,7	51,87	49,63	290,2	12,39	79,32
Er	224,1	17,32	10,3	273,7	181,1	590	9,437	199,1	72,1	589,8	816,4	246,9	232	1147	56,39	351,20
Tm	45,29	3,435	0,364	50,35	37,38	122,1	3,236	45,51	12,14	122	179,5	72,71	42,59	224,8	13,00	66,20
Yb	397,8	33,02	14,68	442,3	363,4	988,7	30,82	531,3	111,4	1296	1575	756,3	446,1	1883	91,10	497,00
Lu	86,09	8,435	6,009	99,12	68,2	193,6	5,748	91,97	31,02	209,3	215,6	179,7	93,03	345,6	13,94	100,30
∑REE	996,5	238,1	157,7	1168,6	1536	3413	230,6	1120,9	1662	4510	4035	4310	4440	11341	833,0	1696,7
LuN/LaN	235,5	10,13	5,56	297,29	4,24	30,18	2,09	117,86	2,37	3,11	112,13	4,56	1,49	5,85	2,13	70,37
SmN/LaN	3,56	3,93	1,31	7,81	0,37	2,27	1,37	1,51	1,03	0,07	3,48	0,70	0,60	1,24	1,14	5,32
LuN/GdN	41,61	7,61	4,20	43,00	18,46	15,51	4,02	24,13	4,14	13,05	10,18	13,16	4,98	8,02	4,57	17,05
Ce/Ce*	1,80	1,72	1,16	2,30	0,96	1,57	0,73	2,42	1,42	0,68	1,85	1,32	1,20	1,69	1,37	2,66
Eu/Eu*	0,27	3,63	0,38	0,18	2,28	1,23	0,82	0,86	1,47	0,33	0,38	1,85	1,51	1,46	0,43	0,88

Таблица 3. Представительные анализы содержания REE и некоторые характеристики двух типов крупных гидротермальных цирконов

Sr, Sb сохранились отрицательными или приблизились к нулю. Также опустились ниже критического значения R<sup>Au</sup> для Ba и Cu. Выросли, но не достигли критического (Rcr=0,38) значения коэффициенты корреляции Mn и Bi. В группе гидротермальных цирконов, претерпевших наиболее позднее изменение, возникли сильные корреляционные связи Au c Li, Sc, Te, Cd, U и Y и резко усилились связи c Mo, Pb, Ti, Th, Hf и Ag (рис. 6).

Геохимия редкоземельных элементов является одной из важнейших характеристик цирконов вообще и гидротермальных в частности. В таблице 3 из более семидесяти выполненных определений содержания REE приведены по восемь представительных анализов из обеих сравниваемых групп. Они отобраны таким образом, чтобы продемонстрировать максимальные вариации как в содержании отдельных элементов, так и в значениях важных характеристик, используемых обычно при описании геохимии этой группы элементов. Так, диапазоны значений **УREE** составляют для светлых зерен 157,7-3413 ppm, для темных - 833-11341 ppm, отношение LuN/LaN cootветственно 4,25-297,29 и 2,13-112,13, отношение SmN/LaN соответственно 0,37-7,81 и 0,07-5,32, отношение LuN/GdN соответственно 4,02-43,0 и 4,14–17,05. Вариации значений цериевой и европиевой аномалий также очень велики (в светлых зернах Ce/Ce\* = 0,73-2,30, Eu/Eu\* = 0,18-3,63; в темных - Се/Се\* = 0,68-2,66, Еи/Еи\* = 0,33–1,85). В обеих группах цирконов наряду с типичными для магматических цирконов положительными значениями цериевой аномалии есть зерна с отрицательными (<1) значениями этого параметра, а атипичных для магматических цирконов положительных значений европиевой аномалии в обеих группах очень много.

На рисунке 7 представлены нормированные по хондриту С1 распределения REE в светлых зернах, разделенных на две подгруп-



*Рис. 7.* Нормированное по хондриту C1 распределение редкоземельных элементов в светлых зернах с сильнофракционированным (А) и слабофракционированным (Б) профилями и в темных зернах (В)



пы - с резко фракционированным распределением элементов в диапазоне Gd-Lu (см. рис. 7, А) и с более «плоским» профилем за фракционирования счет меньшего HREE (см. рис. 7, Б). В темных зернах можно отметить плоское с более высоким содержанием LREE распределение, положительные аномалии церия и европия и наличие зерен с U-образным распределением (см. рис. 7, В). В целом можно констатировать, что четких границ между разными группами крупных зерен цирконов установить по топологии REE не удается, что связано с их первичной гидротермальной природой. Намеченные различия носят статистический характер и обусловлены интенсивностью проявления поздних изменений.

Отчетливо различия между обеими группами цирконов по REE проявлены по изменению структуры их корреляционных связей с Аи (рис. 8). Для светлых зерен наиболее сильно эти связи проявлены в интервале La-Gd, в то время как в темных зернах этот интервал характеризуется очень низкими, вплоть до отрицательных (La, Ce, Pr) значениями R<sup>Au</sup>. И наоборот, в интервале Tb-Lu величины R<sup>Au</sup> намного превышают Rcr = 0,38, достигая для Er величины 0,58. Таким образом, судя по значениям R<sup>att</sup> (см. рис. 8), La и Er резко по-разному отреагировали на позднее изменение цирконов. Поэтому анализ структуры связей этой пары элементов со всеми остальными позволяет оценить, как изменилась микроэлементная геохимия исходных гидротермальных цирконов под воздействием наиболее поздних порций гидротермальных растворов.



*Рис. 8.* Коэффициенты корреляции Au с REE в светлых и темных зернах цирконов

В группе светлых зерен по силе связи с La и Er выделяются четыре ассоциации элементов (рис. 9). В первую ассоциацию входят элементы со слабыми (R<sup>in</sup> < 0,25) связями с обоими элементами – Li, Zn, As, Mo, Te и Bi; во вторую – элементы, имеющие сильные связи и с La, и с Er – Sc, Sr, Nb, Cd и Th; в третью – элементы, у которых  $R^{La} > R^{Er}$  – Au, P, Ti, Mn, Co, Ni, Cu, Ag, Ba и Hf; четвертая ассоциация представлена элементами, у которых  $R^{Er} >> R^{La}$ , – Y, Pb и U. В группе темных зерен структуры корреляционных связей La и Er радикально отличаются от связей в светлых зернах (рис. 10). Выделенные по тому же принципу ассоциации элементов выглядят так: ассоциация 1 (R<sup>alt</sup> < 0,38) – Li, P, Co, Ni, Zn, As; acсоциация 2 ( $R^{La} \approx R^{Er} > 0,38$ ) – Mn, Sr, Ba и Bi; ассоциация 3 ( $R^{La} > R^{Er}$ ) – Nb; ассоциация 4  $(R^{Er} >> R^{La}) - Au$ , Sc, Ti, Cu, Y, Mo, Ag, Cd, Te, Hf, Pb, Th и U. Попарное сопоставление выделенных ассоциаций элементов свидетельствует о том, что существуют «сквозные» для обеих групп цирконов элементы, обладающие сходными корреляционными параметрами. К ним относятся: Li, Zn и As (ассоциации 1), Sr (ассоциации 2) и Y, Pb и U (ассоциации 4). Важным фактом является наличие в группе измененных темных цирконов сильных корреляционных связей Er, т. е. НREE или редкоземельных элементов иттриевого ряда с Аи и рядом рудных элементов - его спутников, включая Mo, Ag, Cd и Te. В группе светлых зерен, где Au коррелируется с La, т. е. с LREE или с редкоземельными элементами цериевого ряда, тесно связаны с La рудные элементы Со, Ni, Cu, Ag и Cd.



*Рис. 9.* Коэффициенты корреляции La и Er в светлых зернах цирконов



*Рис. 10.* Коэффициенты корреляции La и Er в темных зернах цирконов

#### Обсуждение результатов

Результаты изучения взаимоотношений цирконов с породообразующими минералами рудных амфиболитов, их морфологии, прецизионной геохимии широкого спектра элементов в разных морфологических типах дают возможность проследить последовательность образования и преобразования гидротермальных цирконов как следствия эволюции элементного состава флюида, в котором происходил их рост и последующее изменение.

Формирование двух генераций цирконов – мелких, включенных в породообразующую роговую обманку, и крупных, ассоциирующих с ней, а также мелкой роговой обманки, включенной в крупные зерна цирконов, происходило, скорее всего, в рамках единого, но эволюционировавшего процесса. Об этом, в частности, свидетельствует состав обеих генераций роговых обманок. Более высокая железистость и глиноземистость мелкой роговой обманки, включенной в крупные цирконы, может быть указанием на более высокую температуру ее образования [Бабушкина, 2001]. Возможно, субсинхронно с ней формировались мелкие гидротермальные цирконы, включенные в крупную роговую обманку. Признаки присутствия Аи в этих цирконах могут указывать на благороднометалльную специфику уже ранних порций флюида.

Обильные включения в породообразующей роговой обманке сложных минеральных фаз с ЭПГ, с которыми ассоциирует и Au, отражают рудную специфику основного этапа формирования рудных амфиболитов. Несмотря на то что в крупных цирконах не было обнаружено включений благородных металлов (что вообще является редким явлением), геохимические характеристики этих цирконов свидетельствуют о том, что их рост происходил в присутствии флюида, содержавшего Au и ряд элементов – его спутников.

Гидротермальная природа всех светлых крупных зерен цирконов не вызывает сомнений, которые могли бы возникнуть при рассмотрении, например, нормированных по С1 распределений REE (см. рис. 7, А). Часть зерен имеет близкое к магматическому распределение с характерными для него положительной цериевой и отрицательной европиевой аномалиями и фракционированным трендом. Долгое время считавшееся классическим для гранитоидов, такое распределение, как выяснилось при изучении REE в ядрах и оболочках цирконов, формировавшихся в гидротермальных золоторудных системах, не является обязательным. Так, в ситуации, которую можно обозначить как «парадокс Yankee Lode», оболочки зерен цирконов из гранитов на порядки обеднены REE, особенно легкими, относительно ядер [Hoskin, 2005], хотя обычно в цирконах из гранитов наблюдается противоположное распределение REE на нормированном по хондриту C1 их профилю. Распределение REE в оболочках цирконов из австралийских гранитоидов Yankee Lode является типично «магматическим», с низким содержанием REE, с фракционированным обедненным LREE профилем, с интенсивной положительной аномалией Се и с отрицательной аномалией Eu [Pettke et al., 2005]. По-видимому, именно к такому типу относятся светлые гидротермальные цирконы, нормированные по C1 профили REE которых представлены на рис. 7, Б.

Вообще, с аномально высоким содержанием REE в гидротермальных цирконах обычно сопряжено аномальное содержание других малых элементов – Hf, Nb, Ta, U, Th, W, Ag, Cd, Pb, Ва, Sr, Te, Sb [Балашов, Скублов, 2011; Сергеев и др., 2008; Скублов и др., 2011; Hoskin, 2005; Schaltegger, 2007]. Большая часть этих элементов, будучи неформульными, могут входить в состав криптокристаллических минеральных включений. В любом случае такие включения могут рассматриваться как сингенетичные, отражающие состав флюида, в присутствии которого кристаллизовался циркон. Сопоставление полученных результатов с новейшими опубликованными данными показало, что по такой характеристике, как широкие вариации до аномально высоких содержаний в гидротермальных цирконах REE, HFSE, рудных элементов и благородных металлов, изученные зерна очень близки к гидротермальным цирконам из осадков тимискаминг и из фельзит-порфиров в синформе Поркьюпайн, вмещающих крупные позднеархейские золоторудные месторождения Pamour и Hoyle Pond в Абитиби [Schneider et al., 2012], а также цирконов из гранитоидов Yankee Lode и Boggy Plane, контролировавших золоторудные процессы в Австралии [Hoskin, 2005; Pettke et al., 2005].

Самостоятельный интерес представляет наметившаяся смена структуры связей микроэлементов, особенно золота и рудных сидерофильных элементов с редкоземельными элементами цериевой группы для светлых зерен и золота и рудных халькофильных элементов с редкоземельными элементами иттриевой группы для темных зерен. Учитывая, что светлые зерна представляют более раннее состояние цирконов (это особенно наглядно видно при доменном строении зерен), а темные часто представляют собой частично или полностью измененные светлые, можно предположить, что геохимическая специфика рудоносного флюида эволюционировала

от LREE-Au-Co-Ni-Cu-Ag-Cd на начальной более высокотемпературной стадии гидротермального процесса до HREE-Au-Mo-Ag-Cd-Te на завершающей низкотемпературной его стадии. Смена халько-сидерофильной ассоциации элементов на сидеро-литофильную может отражать именно платинометалльную специфику раннего гидротермального процесса в мафической среде, когда эти элементы связывались с платиноидами, образуя собственные многочисленные полиэлементные минеральные фазы. С другой стороны, очень сильные связи Au с лито/гранитофильными элементами могут отражать связь гидротермальных рудообразующих и рудопреобразующих процессов с гранитоидным магматизмом или с метаморфогенными растворами - продуктами гранитизации. Оценка возраста этого процесса (этих процессов) является первоочередной задачей, решение которой важно как в фундаментальном, так и в сугубо практическом плане.

#### Заключение

Впервые проведенное комплексное изучение локальными методами, включая прецизионную мультиэлементную геохимию, гидротермальных цирконов из рудных амфиболитов с последующим статистическим анализом, а также твердых минеральных включений в цирконах и роговых обманках и содержания микроэлементов в цирконах, позволило:

 выделить две ассоциации амфиболов и гидротермальных цирконов, сформированные в ходе длительного гидротермального процесса;

 установить, что многофазные включения сложных соединений Pd и Pt обнаруживаются в крупных амфиболах поздней, более низкотемпературной генерации, с которыми ассоциируют крупные зерна гидротермального циркона;

 наметить связи в группах элементов с REE и с Au, откладывавшимся совместно с платиноидами;

 продемонстрировать, что на ранних стадиях гидротермального процесса, когда происходила кристаллизация светлых цирконов, флюид обладал цериевой спецификой, и типоморфной для нее была ассоциация LREE-Au-Co-Ni-Cu-Ag-Cd;

– на завершающем этапе гидротермального процесса, когда происходили рост темных зерен и модификация светлых, сопровождаемые привносом неформульных элементов (Fe, Al, Ca, Na и др.), специфика флюида сменилась на иттриевую с типоморфной ассоциацией HREE-Au-Mo-Ag-Cd-Te.

Авторы признательны сотрудникам ИГ КарНЦ: В. И. Кевличу, заведующему лабораторией технологической минералогии, и его коллегам за качественные выделение цирконов и подготовку препаратов для последующего анализа, ведущим физикам А. Н. Сафронову и А. Н. Терновому за исследование цирконов на энергодисперсионном анализаторе и А. С. Парамонову за результаты по геохимии цирконов. Особая благодарность – рецензентам чл.-корр. РАН, Советнику РАН В. А. Глебовицкому и д. г.-м. н. О. И. Володичеву, замечания которых способствовали улучшению качества представленного материала.

#### Литература

Бабушкина С. А. Типоморфные особенности амфиболов и пироксенов постколлизионных гранитоидов Верхояно-Колымской складчатой области // Тезисы докладов международной научной конференции (VII чтения А. Н. Заварицкого) «Постколлизионная эволюция подвижных поясов». Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2001. 224 с.

Балашов Ю. А., Скублов С. Г. Контрастность геохимии магматических и вторичных цирконов // Геохимия. 2011. № 6. С. 622–633.

Земцов В. А., Кулешевич Л. В., Цельмович В. А. Минералогия и магнетизм благороднометалльных титаномагнетитовых руд участка Травяная Губа (Северная Карелия) // Материалы семинара «Палеомагнетизм и магнетизм горных пород; теория, практика, эксперимент», М.: Геос, 2007. С. 59–63.

Кожевников В. Н., Сафронов А. Н. Включения самородного золота и рудных минералов в обломочных цирконе и кварце из раннедокембрийских кварцитов и кварцевых гравелитов Карельского кратона // ДАН. 2012. Т. 444, № 2. С. 190–193.

Кулешевич Л. В., Земцов В. А., Слюсарев В. Д. Минералогия и локализация благороднометалльного оруденения в Северной Карелии по геолого-геофизическим данным // Геология и минерагения Кольского региона // Труды Всероссийской (с международным участием) научной конференции и IV Ферсмановской научной сессии, посвященных 90-летию со дня рождения акад. А. В. Сидоренко и д. г.-м. н. И. В. Белькова. Апатиты, 4–6 июня 2007 г. Апатиты: К & М, 2007. С. 105–109.

Кулешевич Л. В., Земцов В. А. Минералогия благороднометалльных ильменит-титаномагнетитовых руд проявления Травяная Губа (Северная Карелия) // Записки РМО, 2009. № 5. С. 51–62.

Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Книга 1. Горючие полезные ископаемые. Металлические полезные ископаемые / Отв. ред. В. П. Михайлов и В. Н. Аминов. Петрозаводск: Карелия, 2006. 277 с.

Сергеев С. А., Лобач-Жученко С. Б., Арестова Н. А., Толмачева Е. В., Бережная Н. Г., Матуков Д. И., Лохов К. И., Антонов А. В. Возраст и геохимические особенности цирконов древних гранитоидов р. Выг (Юго-Восточная Карелия) // Геохимия. 2008. № 6. С. 1–13. Скублов С. Г., Марин Ю. Б., Галанкина О. Л., Симакин С. Г., Мыскова Т. А., Астафьев Б. Ю. Первая находка аномально (Y+REE)-обогащенных цирконов в породах Балтийского щита // Доклады АН. 2011. Т. 441, № 6. С. 792–799.

Степанов В. С., Карпова А. К. Рудные вебстериты губы Травяной // Геология и рудогенез докембрия Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр АН СССР, 1991. С. 38-42.

Степанов В. С. Благороднометалльное рудопроявление Травяная Губа и возможная генетическая связь его с комплексом габбро-анортозитов Западного Беломорья // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск, 2001. Вып. 4. С. 54–62.

Ballard J. R., Palin M. J., Campbell I. H. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: application to porphyry copper deposits of northern Chile // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2002. Vol. 144. P. 347–364.

*Claoué-Long J. C., King R. W., Kerrich R.* Archaean hydrothermal zircon in the Abitibi greenstone belt: constraints on the timing of gold mineralization // Earth Planet. Sci. Lett. 1990. Vol. 98. P. 109–128.

*Fu B., Mernagh T. P., Kita N. T., Kemp A. I. S., Valley J. W.* Distinguishing magmatic zircon from hydrothermal zircon: A case study from the Gidginbung high-sulphidation Au-Ag-(Cu) deposit, SE Australia // Chemical Geology / 2009. N 259. P. 131–142.

*Geisler T., Schaltegger U., Tomaschek F.* Reequilibration of zircon in aqueous fluids and melts // Elements. 2007. N 3. P. 43–50.

*Geisler T., Pidgeon R. T., Kurtz R., van Bronswijk W., Schleicher H.* Experimental hydrothermal alteration of partially metamict zircon // American Mineralogist, 2003. Is. 88. P. 1496–1513.

*Guo H., Du Y. S., Yang J. H., Guo L.* U-Pb geochronology of hydrothermal zircon from the Mesoproterozoic Gaoyuzhuang Formation on the northern margin of the North China Block and its geological implications // Science China-Earth Sciences. 2011. Vol. 54, N 11. P. 1675–1685.

Hay D. C., Dempster T. I. Zircon behaviour during low-temperature metamorphism // Journal Petrology. 2009. Vol. 50. Iss. 4. P. 571–589.

*Hoskin P. W. O.* Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2005. Vol. 69. P. 637–648.

*Hoskin P. W. O., Schaltegger U.* The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis / In Hanchar J., Hoskin P. W. O. (eds). Zircon. Mineralogical Society of America and Geochemical Society Reviews in Mineralogy and Geochemistry 53: 2003. P. 27–62.

Kebede T., Horie K., Hidaka H., Terada K. Zircon 'microvein' in peralkaline granitic gneiss, western Ethiopia: origin, SHRIMP U-Pb geochronology and trace element investigations // Chemical Geology 2007. Vol. 242. P. 76–102.

*Kerrich R., King R.* Hydrothermal zircon and baddeleyite in Val-d'Or Archaean mesothermal gold deposits: characteristics, composition and fluid inclusion properties with implication for timing of primary gold mineralization // Canad. J. Earth Sci. 1993. Vol. 30. P. 2334–2351.

88

*Kerrich R., Kyser T. K.* 100 Ma timing paradox of Archean gold, Abitibi Greenstone Belt (Canada): new evidence from U-Pb and Pb-Pb evaporation ages of hydrothermal zircons // Geology. 1994. Vol. 22. P. 1131–1134.

*Kuleshevich L. V., Zemtsov V. A.* Early Paleoproterozoic intrusive magmatism and noblemetal mineralization of the Travyanaya Guba occurance in the Belomorian fold belt // Book of abstracts to 34 the 2-nd Inter. Conference on "Precambrian Continental Growth and Tectonism", Bundelkhand U., Jhansi, India, February 2009. P. 172–173.

*Lawrie K., Mernagh T.* Hydrothermal zircon: a resistate mineral and pathfinder in exploration // Lemenews 2003. N 23. P. 3–4.

*McDonough W. F., Sun S.-s.* The composition of the Earth // Chem. Geol. 1995. Vol. 120. P. 223–254.

*McNaughton N. J., Mueller A. G., Groves D.* The Age of the Giant Golden Mile Deposit, Kalgoorlie, Western Australia: lon-Microprobe Zircon and Monazite U-Pb Geochronology of a Synmineralization Lamprophyre Dike // Economic Geology, 2005. Vol. 100. P. 1427–1440.

Mernagh T. P., Lawrie K. C., Belousova E. A., van Achterbergh E., Ryan C. G. The identification of hydrothermal zircons in mineral deposits // Eugen Stumpfl Memorial Symposium- Poster Abstracts SEG 2004 Predictive Mineral Discovery Under Cover. P. 444–447.

*Oreskes N., Einaudi M. T.* Origin of rare earth element-enriched hematite breccias at the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit, Roxby Downs, S. Australia // Econ. Geol. 1990. Vol. 85. P. 1–28.

Pelleter E., Cheilletz A., Gasquet D., Mouttaqi A., Annich M., El Hakourd A., Deloule E., Feraude G. Hydrothermal zircons: a tool for ion microprobe U-Pb dating of gold mineralization (Tamlalt-Menhouhou gold deposit-Morocco) // Chemical Geology. 2007. Vol. 245. P. 135–161.

*Pettke T., Audetat A., Schaltegger U., Heinrich C. A.* Magmatic-to-hydrothermal crystallization in the W-Sn mineralized Mole Granite (NSW, Australia)–Part II: evolving zircon and thorite trace element chemistry // Chemical Geology. 2005. Vol. 220. P. 191–213.

*Rubin J. N., Henry C. D., Price J. G.* The mobility of zirconium and other "immobile" elements during hydrothermal alteration // Chem. Geol. 1993. Vol. 110. P. 29–47.

Schaltegger U. Hydrothermal Zircon // Elements. 2007. Vol. 3, N 1. P. 51–79.

Schneider D. A., Bachtel J., Schmitt A. K. Zircon Alteration in Wall Rock of Pamour and Hoyle Pond Au Deposits, Abitibi Greenstone Belt: Constraints on Timescales of Fluid Flow from Depth-Profiling Techniques // Economic Geology. 2012. Vol. 107. P. 1043–1072.

*Vakh A. S., Avchenko O. V., Sergeev S. A., Presnyakov S. L.* The first U-Pb data (SHRIMP-II) on the age of zircons from granitoids and ore-bearing rocks of the Berezitovoe gold- polymetallic deposit // Doklady Earth Sciences. 2011. Vol. 438, Is. 2. P. 819–824.

von Quadt A., Erni M., Martinek K., Moll M., Peytcheva I., Heinrich C. A. Zircon crystallization and the lifetimes of ore-forming magmatichydrothermal systems // Geology. 2011. Vol. 39, N 8. P. 731–734.

# СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

#### Кожевников Владимир Николаевич

зав. лаб. региональной геологии и геодинамики, д. г.-м. н.

Институт геологии Карельского научного центра РАН ул. Пушкинская, 11, г. Петрозаводск, Россия, 185036 эл. почта: kvn04@sampo.ru тел.: 89218000320

#### Земцов Виктор Александрович

старший научный сотрудник лаб. региональной геологии и геодинамики, к. г.-м. н.

Институт геологии Карельского научного центра РАН ул. Пушкинская, 11, г. Петрозаводск, Россия, 185036

### Kozhevnikov, Vladimir

Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences 11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia e-mail: kvn04@sampo.ru tel.: 89218000320

## Zemtsov, Victor

Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences 11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia