

Типоморфизм цирконов Медведевского, Юхтинского и Джелтулинского мезозойских щелочных массивов Алданского щита

А.И.ИВАНОВ, А.И.ЖУРАВЛЕВ, Е.Е.ЛОСКУТОВ, А.А.КРАВЧЕНКО, А.В.ОКРУГИН, Н.Н.ЕРМАКОВ (Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАН); 677980, г. Якутск, проспект Ленина, д. 39),
И.Р.ПРОКОПЬЕВ (Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН); 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, д. 3)

Приведены результаты исследований типоморфных свойств цирконов Медведевского, Юхтинского и Джелтулинского мезозойских щелочных массивов. Впервые изучены кристалло-морфологические особенности исследуемых цирконов, а также рассмотрена специфика их химического состава. По классификации Ж.Пюпина были выделены различные типы и морфотипы кристаллов: в Медведевском массиве – S_{21} , S_{23} , Q_3 , гранулитовый; в Юхтинском массиве – S_{23} , А; в Джелтулинском массиве – D, S_5 , отражающие изменения условий формирования щелочных пород массивов. Исследованы химические особенности состава цирконов, особое внимание уделялось UO_2 , ThO_2 . Для циркона Медведевского массива характерна единственная примесь – Hf_2O_3 ; Юхтинского – UO_2 , ThO_2 , Y_2O_3 , HfO_2 ; Джелтулинского – ThO_2 , CeO_2 , Y_2O_3 , Yb_2O_3 , Hf_2O_3 . Установлена зависимость в распределении UO_2 и ThO_2 в цирконах, при повышении концентрации первого отмечается понижение второго и наоборот. Полученные данные указывают на то, что типоморфные особенности циркона отражают условия формирования, специфику составов вмещающих магматических пород и их геохимическую специализацию на такие элементы, как U и Th.

Ключевые слова: циркон, типоморфизм, минералы платиновой группы, сиенит, щелочные породы, Алданский щит.

Иванов Алексей Иванович
Журавлев Анатолий Иванович
Лоскутов Евгений Евгеньевич
Кравченко Александр Александрович
Округин Александр Витальевич
Ермаков Николай Николаевич
Прокопьев Илья Романович



leps_2002@mail.ru
ai.zhuravlevgeo@gmail.com
brannerit@mail.ru
freshrock@yandex.ru
a.v.okrugin@diamond.ysn.ru
allforforest@mail.ru
prokopev_ilya@mail.ru

Typomorphism of zircons from Medvedev, Yukhta and Dzheltula Mesozoic alkaline massifs of Aldan Shield

A.I.IVANOV, A.I.ZHURAVLEV, E.E.LOSKUTOV, A.A.KRAVCHENKO, A.V.OKRUGIN, N.N.ERMAKOV, I.R.PROKOPIEV

Results of studies for typomorphic features of zircons from the Medvedev, Yukhta and Dzheltula Mesozoic alkaline massifs are presented in the article. Crystallomorphologic features of the studied zircons and peculiarities of their chemical composition are studied for the first time. According to J.P.Pupin's classification, different types and morphotypes of crystals were identified in the Medvedev massif – S_{21} , S_{23} , Q_3 , granulite; Yukhta massif – S_{23} , A; Dzheltula massif – D, S_5 , reflecting changes of formation conditions of massif alkaline rocks. Chemical features of zircon composition were studied, particular attention was given to UO_2 , ThO_2 . Admixture of Hf_2O_3 is typical for zircon crystals of the Medvedev massif; UO_2 , ThO_2 , Y_2O_3 , Hf_2O_3 for the Yukhta massif; ThO_2 , CeO_2 , Y_2O_3 , Yb_2O_3 , Hf_2O_3 for the Dzheltula massif. Relationship in UO_2 and ThO_2 content in zircons are identified; when concentration of the former increases, the latter decreases. The data obtained indicate that the typomorphism of zircons reflects formation conditions, peculiarities of host igneous rocks composition and their geochemical specialization in such elements as U and Th.

Key words: zircon, typomorphism, platinum group minerals, syenite, alkaline rocks, Aldan shield.

Мезозойский магматизм Алдано-Станового щита отличается спецификой и исключительным многообразием состава изверженных пород, изучение которых может служить основой для исследований в области петрологии и особенно металлогении, так как с мезозойскими магматическими породами здесь связаны месторождения золота и ряда других полезных ископаемых [9]. В россыпях Центрально-Алданского района часто отмечаются комплексные ассоциации минералов благородных металлов (золота и платины), редких и радиоактивных элементов. Предполагается существование парагенетического родства между данными минералами, связанными с единой мантийной рудно-магматогенной системой, образующей металлогенические ареалы (Au-Pt-U оруденение) и магматическими сериями различных субщелочных и щелочных пород [13]. В связи с возрастающим интересом к месторождениям Эльконского золотоурановорудного узла вопрос о комплексном подходе к исследованию процессов формирования месторождений благородных, редких и радиоактивных элементов приобретает в рассматриваемом районе особую актуальность.

В этом ракурсе, в качестве объектов исследования авторы выбрали Медведевский, Юхтинский и Джелтулинский щелочные массивы (рис. 1), сформировавшиеся в эпоху мезозойской тектономагматической активизации. Особенности геологического строения и составов пород опубликованы в ряде работ [1, 10, 11 и др.], но некоторые вопросы минералогии и металлогении остаются открытыми и требуют уточнения. Одним из наиболее информативных минералов-индикаторов условий формирования магматических пород является циркон [8], изучение особенностей морфологии и химического состава последнего в целом позволит установить физико-химические условия формирования таких крупных многофазовых структур и их возможную геохимическую специализацию.

Геологическое положение и строение массивов. *Медведевский массив* расположен в центральной части Нимырского блока Алданского щита к северу от руч. Медведевка, правого притока р. Малый Нимыр. Массив интрузирует толщу докембрийских кристаллических пород, представляющих собой пакет чередующихся, согласных, субпараллельных, контрастных по составу линейных пластообразных тел, сложенных гиперстеновыми и глиноземистыми гнейсами нимырской свиты, породами медведевского комплекса и биотитовыми гранитами субщелочного и нормального составов. Породы массива относятся к монзонит-сиенитовой формации сиенитовой серии умеренно-щелочного ряда верхнеселигдарского гипабиссального комплекса. По минеральному составу это авгит-роговообманковые и роговообманковые сиенит-порфиры [3].

Юхтинский массив так же, как и Медведевский, локализован в центральной части Нимырского блока и представляет собой крупный многофазовый массив

позднеюрского–раннемелового (146–157 млн. лет) возраста [11]. Штоки, лакколиты, пластовые тела и дайки интрузивных пород массива интрузируют образования докембрийского кристаллического фундамента, венд-нижнекембрийские карбонатные породы и нижнеюрские терригенные отложения осадочного чехла. По периферии массива, на контакте с карбонатными породами, развиты многочисленные апофизы щелочно-полевошпатовых сиенитов и сиенит-порфиры. На северо-западе массива преобладают массивные крупнокристаллические разновидности, а на остальной площади развиты порфировидные граносиениты с мелко-, среднезернистой основной массой и таблитчатыми более крупными выделениями калишпата [11].

Джелтулинский массив пространственно расположен в северо-восточной части Тыркандинской зоны тектонического меланжа, с периодом формирования 138–109 млн. лет [10]. Массив приурочен к зоне пересечения двух крупных разломов северо-восточного и северо-западного простирания. Вмещающими породами массива являются докембрийские породы фундамента – гнейсы и кристаллосланцы. В строении массива выделяются шесть групп пород: 1 – пуласкиты (лейкократовые щелочные сиенит-порфиры и сиениты) краевой части, 2 – субщелочные сиенит-порфиры и сиениты центральной части, 3 – лаурвикиты (штоки щелочных меланократовых сиенит-порфиры), 4 – гранодиориты, 5 – дайки щелочных и субщелочных сиенитов, 6 – трахиты [10].

Методы исследования. С учетом вкрапленности минералов в породах и необходимости раскрытия их от взаимного срастания, степень измельчения проб на щековой дробилке определялась отсеиванием монофракции диаметром $d=0,5$ мм, с последующим разделением минералов в бромформе для выделения легкой и тяжелой фракций. Для выделения кристаллов циркона использовался раствор Клеричи плотностью $\rho=3,2$ г/см³. С помощью электромагнитной установки из проб были выделены две электромагнитные 25V, 50V и неэлектромагнитная фракции. Отбор, описание морфологии и фотографирование 186 кристаллов циркона производилось под бинокулярном МБС-1, МПСУ-1, Микромед МС-2 zoom с фото-приставкой Levenhuk. Определение химического состава цирконов производилось на установке Camebax-micro в ИГАБМ СО РАН (аналитик Н.В. Христофорова), с параметрами $U=20$ кВ, $I=10$ нА, диаметр пучка $d=0,5$ микрон. Для определения морфотипов цирконов и выявления условий кристаллизации использовалась классификация Ж.Пюпина [14], установившего изменчивость форм кристаллов циркона в зависимости от условий образования. На этой основе предложена классификация главных типов и подтипов форм циркона в зависимости от температуры (индекс I.T.) и отношения щелочность/глиноземистость среды минералообразования (индекс I.A.). Первый отражает скорость кристаллизации и содержание

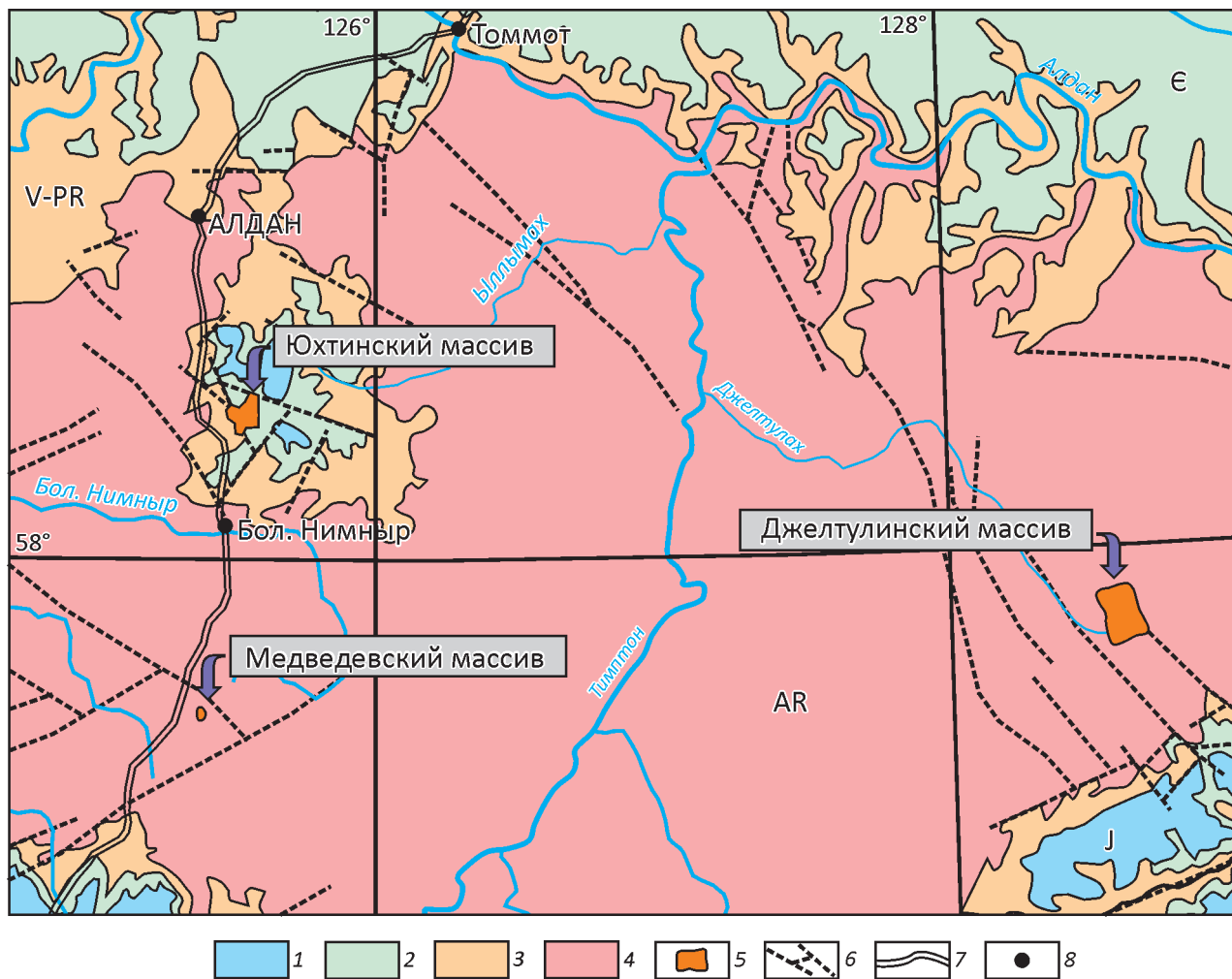


Рис. 1. Схема расположения изученных щелочных массивов. По материалам И.Д.Ворона и др. 1970 [2]:

1 – юрские терригенные отложения, J; 2 – кембрийские карбонатные толщи, €; 3 – венд-протерозойские толщи, V-PR; 4 – архейские комплексы кристаллического фундамента, AR; 5 – щелочные массивы мезозойской тектономагматической активизации; 6 – основные региональные разломы; 7 – федеральная автомобильная дорога А-360 «Лена»; 8 – населенные пункты

летучих в расплаве, второй – неоднородность среды и эволюцию ее химизма [14].

Результаты кристаллооптических исследований.

Во время проведения кристаллооптических исследований было установлено, что циркон в магматических щелочных породах Медведевского, Юхтинского и Джелтулинского массивов весьма разнообразен. Изменение его морфологических особенностей, по-видимому, связано с генезисом, процессами кристаллизации расплавов и зависит от различных параметров, в частности, как отмечалось С.М.Кравченко [5], от щелочности последних.

По морфологическим особенностям в породах сиенит-порфиров Медведевского массива выделяются четыре морфотипа цирконов. Первый преобладающий

тип (58 об. %) цирконов – средне- и длиннопризматические кристаллы (коэффициент удлинения более 2, до 4), с развитием граней (100) в меньшей степени (110) в сочетании с равноразвитыми гранями пирамиды – (101) и (211). Кристаллы имеют бледно-розовые и бледно-желтые оттенки, неровные грани с мелкоямчатой поверхностью, нередко несут в себе микровключения темноцветных минералов. По типологической диаграмме они отнесены к морфотипу S_{23} с температурой кристаллизации 850°C.

Второй тип (13 об. %) – кристаллы короткопризматического габитуса с развитием граней призмы (100) и подчиненной (110), пирамида сформирована сочетанием граней (101) и (211) с преобладанием последней. Кристаллы характеризуются коэффициентом

Массив	Морфотип по [6, 14]	Элементы примеси	T °C формир. по [14]	Схема по [14]	Цирконы общий вид
Медведевский	S ₂₃	HfO ₂	850		
	S ₂₁	HfO ₂	850		
	Q ₃	HfO ₂	750		
	Гранулит	HfO ₂	-		
Юхтинский	S ₂₃	HfO ₂	850		
	A	ThO ₂ , UO ₂ , Y ₂ O ₃ , HfO ₂	500		
Желтулинский	D	ThO ₂ , Y ₂ O ₃ , HfO ₂ , Yb ₂ O ₃	900		
	S ₅	HfO ₂	650		

Рис. 2. Кристаллооптические и вещественные характеристики цирконов из массивов:

масштабная линейка – 0,1 мм

удлинения 1,5, розовым и светло-желтым оттенками, ровными и неровными гранями. Зачастую корродированные кристаллы циркона несут в себе микровключения темноцветных минералов. Описанные индивиды авторы отнесли к морфотипу S₂₁ с температурой кристаллизации 850°C (рис. 2).

Третий тип (9 об. %) цирконов представлен идиоморфными короткопризматическими кристаллами с равнозначным развитием граней призмы (100), (110)

и пирамиды (211), коэффициент удлинения 1,5. Кристаллы прозрачные, иногда светло-желтого и бледно-розового оттенков. Индивиды имеют ровные грани и хорошо сохранившиеся элементы огранки, изредка отмечаются микровключения. Температура кристаллизации выделенного морфотипа Q₃ 750°C.

Четвертый тип цирконов (20 об. %) представлен двумя разновидностями. Первая разновидность – округлые, прозрачные кристаллы, розоватого и желтоватого

оттенков, обычно с неровной, бугорчатой поверхностью, с редкими микровключениями. Вторая разновидность имеет практически округлую, часто изометричную (шаровидную) форму. Поверхность кристаллов гладкая, блестящая. Подобные цирконы впервые были описаны А.А.Краснобаевым [6] и отнесены им к «гранулитовому» типу.

В сиенит-порфирах и граносиенитах *Юхтинского массива* выделяются два морфотипа цирконов. Первый тип (5 об. %) представлен кристаллами среднепризматического габитуса с развитием граней (100), в меньшей степени (110), в сочетании с гранями пирамиды (101) и (211). Кристаллы этого типа прозрачные и полупрозрачные, с коэффициентом удлинения 2, с неровными гранями и корродированной поверхностью, несут микровключения темноцветных минералов. Эта разновидность относится к морфотипу S_{23} с температурой кристаллизации 850°C (см. рис. 2).

Второй тип, не характерный для щелочноземельных сиенитов [5], но значительно более развитый (95 об. %) в пределах рассматриваемого массива. Данный тип цирконов характеризуется дипирамидальным короткопризматическим габитусом (101) без развитой призмы, как с неровными, так и с четкими очертаниями граней. Кристаллы полупрозрачные и непрозрачные, несут в себе микровключения темноцветных минералов. Эти цирконы отнесены авторами к морфотипу А с температурой кристаллизации 500°C .

В наименее измененных разностях лаурвикитов и пуласкитов *Джелтулинского массива* авторы выделили два морфотипа цирконов. Первый – наиболее распространенный (64 об. %) морфотип представлен кристаллами светло-желтых оттенков с развитием граней призмы (100) и пирамиды (101), коэффициент удлинения более 2. Грани кристаллов неровные с корродированной поверхностью, в них фиксируются многочисленные газовой-жидкие микровключения и темноцветные минералы. Авторы отнесли их к морфотипу D с температурой кристаллизации 900°C .

Второй тип (35%) представлен молочно-бело-кремового цвета среднепризматическими непрозрачными кристаллами с неровными гранями (100), преобладающей (110) и гранями пирамиды (211) с подчиненной (101), коэффициент удлинения больше 2. Этот тип циркона отнесен авторами к морфотипу S_5 с температурой кристаллизации 650°C (см. рис. 2). Внешний облик кристаллов обусловлен метамиктным распадом, разрушением кристаллической решетки и переходом кристаллов в аморфное состояние при сохранении первоначального внешнего облика [7]. Этот процесс по данным И.М.Липовой [7] обусловлен ионизирующим излучением UO_2 и ThO_2 , входящих в структуру минерала в виде изоморфных примесей, и при активном участии летучих.

Результаты микронзондовых исследований. Все типы цирконов сиенит-порфиров *Медведевского*

массива характеризуются обедненностью элементами-примесями. В изученных кристаллах отмечается примесь HfO_2 (0,9–1,84 вес. %), Yb_2O_3 (до 0,1%). Соотношение $\text{ZrO}_2/\text{HfO}_2$ в исследуемых кристаллах изменяется в диапазоне от 35,2 до 61,8 при среднем значении 44. В цирконах «гранулитового» типа отношение изменяется в более широком интервале – от 40,3 до 75,3 и в среднем составляет 53,5 (см. таблицу).

В сиенит-порфирах и граносиенитах *Юхтинского массива* установлено присутствие двух морфотипов кристаллов циркона. Высокотемпературный морфотип S_{23} также обеднен элементами-примесями, определена примесь HfO_2 (0,87–1,15%). Отношение содержаний $\text{ZrO}_2/\text{HfO}_2$ в кристаллах данного морфотипа в среднем составляет 65,8.

Набор элементов-примесей в зернах низкотемпературного морфотипа А более обширен. Наблюдается обогащение следующими элементами (в %): UO_2 0,19–1,9, ThO_2 0,12–4,73, Yb_2O_3 до 0,35, Y_2O_3 до 1,2, HfO_2 0,61–1,43, CeO_2 до 0,2 (см. таблицу). Содержание HfO_2 в кристаллах циркона данного морфотипа в среднем составляет 0,88%. Благодаря пониженному содержанию примеси HfO_2 отношение $\text{ZrO}_2/\text{HfO}_2$ значительно возрастает и в среднем составляет 76,3.

В лаурвикитах и пуласкитах *Джелтулинского массива* установлено присутствие двух морфотипов циркона – D и S_5 . Микронзондовым анализом помимо основных компонентов в кристаллах морфотипа D определены элементы-примеси (в %): Y_2O_3 0,8–2,47, HfO_2 1,06–1,76, Yb_2O_3 до 0,35, CeO_2 0,44–2,84, ThO_2 до 4,27. Благодаря высокому содержанию HfO_2 в кристаллах данного морфотипа отношение $\text{ZrO}_2/\text{HfO}_2$ относительно невысоко и в среднем составляет 42,3 для всей группы.

В качестве элемента-примеси в кристаллах морфотипа S_5 присутствует HfO_2 1,25–2,71% и UO_2 до 0,24%, также отмечаются следы других элементов: Y_2O_3 , Yb_2O_3 , CeO_2 , ThO_2 . Однако их содержание не выходит за пределы погрешности микронзондового анализа (см. таблицу). Отношение $\text{ZrO}_2/\text{HfO}_2$ в цирконах данного морфотипа практически идентично с данными по морфотипу D и составляет 42,7.

Обсуждение результатов. Авторы установили, что для сиенит-порфиров *Медведевского массива* основной объем популяции цирконов представлен морфотипами: S_{21} , S_{23} , Q_3 , образование которых происходило при параметрах $T=850\text{--}750^{\circ}\text{C}$ и $I.A.=400\text{--}100$ (рис. 3), то есть в высокотемпературных условиях и неоднородной среде. Температура образования морфотипов S_{21} и S_{23} – 850°C , завершалась кристаллизация популяции цирконов, с выделением позднемагматического морфотипа Q_3 при $T=750^{\circ}$ в условиях высокой глиноземистости остаточного расплава (см. рис. 3). Значение $\text{ZrO}_2/\text{HfO}_2$ в среднем составляет 44, по данным В.В.Ляховича [8] подобные значения характерны для коровых фанерозойских гранитов.

Представительные анализы химического состава цирконов из магматических пород Медведевского, Юхтинского и Джелтулинского массивов

№ п/п	Массив	Морфотип	ZrO ₂	Y ₂ O ₃	Yb ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	SiO ₂	HfO ₂	ThO ₂	CeO ₂	UO ₂	Сумма	ZrO ₂ /HfO ₂	ZrO ₂ /HfO ₂ среднее
1			67,19	-	0,062	-	32,29	1,58	-	-	-	101,2	42,53	
2			69,9	-	-	-	32,7	1,13	-	-	-	100,81	61,86	
3			66,81	-	-	-	32,61	1,55	-	-	-	101,04	43,10	
4			66,85	-	-	-	32,3	1,84	-	-	-	101,08	36,33	
5			64,96	0,194	0,074	-	32,45	1,19	-	-	-	98,87	54,59	
6		S ₂₃	65,28	-	0,031	-	32,32	1,26	-	-	-	98,88	51,81	47,62
7			64,49	-	0,086	-	32,46	1,48	-	-	-	98,51	43,57	
8			65,33	-	-	-	32,55	1,1	-	-	-	98,97	59,39	
9			65,14	-	0,002	-	32,29	1,43	-	-	-	98,86	45,55	
10			64,45	-	0,022	-	32,42	1,59	-	-	-	98,49	40,53	
11			64,52	-	0,1	-	32,39	1,45	-	-	-	98,45	44,50	
12			64,4	-	0,015	-	32,44	1,83	-	-	-	98,69	35,19	40,87
13	Медведеский	S ₂₁	65,62	-	0,036	-	32,39	1,41	-	-	-	99,45	46,54	
14			64,99	-	-	-	32,27	1,33	-	-	-	98,68	48,86	
15		Q ₃	64	-	0,052	-	32,41	1,57	-	-	-	98,04	40,76	43,51
16			65,01	-	0,027	-	32,3	1,59	-	-	-	98,92	40,89	
17			67,02	-	-	-	32,26	1,22	-	-	-	100,57	54,93	
18			66,56	-	-	-	32,22	1,01	-	-	-	99,86	65,90	
19			66,97	-	-	-	32,59	1,15	-	-	-	100,79	58,23	
20			67,74	-	-	-	32,21	1,34	-	-	-	100,38	50,55	
21			66,91	-	-	-	32,21	1,29	-	-	-	100,54	51,87	53,48
22		Гранулитовый	67,57	-	-	-	32,53	0,897	-	-	-	101,07	75,33	
23			65,15	-	0,064	-	32,32	1,23	-	-	-	98,76	52,97	
24			65,37	-	-	-	32,32	1,73	-	-	-	99,42	37,79	
25			65,36	-	0,024	-	32,58	1,62	-	-	-	99,58	40,35	
26			64,79	-	0,027	-	32,46	1,33	0,017	-	-	98,62	48,71	
27			67,09	-	-	-	32,18	1,3	-	-	-	100,63	51,61	
28			64,62	0,201	-	-	31,93	0,805	2,52	0,058	-	100,21	80,27	
29			66,42	0,054	-	-	32,46	1,03	0,366	0,046	-	100,47	64,49	
30			66,13	0,202	0,133	-	32,1	0,888	1,06	0,111	-	100,73	74,47	
31			64,09	0,677	0,277	-	31,53	0,585	1,36	-	0,587	99,1	109,56	
32		A	64,73	0,163	0,092	-	32,51	1,04	0,177	-	0,06	98,77	62,24	76,31
33			64,12	0,336	0,211	-	32,37	1,02	0,295	-	0,194	98,54	62,86	
34			66,16	0,031	0,074	-	32,16	1,43	0	-	0,142	99,99	46,27	
35			63,82	0,346	0,191	-	31,8	0,855	0,148	-	0,055	98,21	74,64	

Продолжение таблицы

№ п/п	Массив	Морфотип	ZrO ₂	Y ₂ O ₃	Yb ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	SiO ₂	HfO ₂	TiO ₂	CeO ₂	UO ₂	Сумма	ZrO ₂ /HfO ₂	ZrO ₂ /HfO ₂ среднее
36			64,13	1,07	0,351	-	31,5	0,742	1,17	-	0,804	99,76	86,43	
37			64,46	0,584	0,135	-	31,23	0,732	1,19	-	1,13	99,46	88,06	
38			63,27	0,726	0,157	-	31,33	0,857	1,62	-	1,33	99,29	73,83	
39			63,45	0,638	0,17	-	31,09	0,934	1,52	-	1,21	99,01	67,93	
40			64,15	0,163	0,092	-	31,85	1,17	0,92	-	0,723	99,06	54,83	
41			62,96	0,871	0,246	-	31,28	0,88	1	-	1,11	98,34	71,55	
42			63,61	0,329	0,128	-	31,77	0,807	0,707	-	1,01	98,36	78,82	
43			63,51	0,593	0,177	-	31,79	0,921	1,18	-	0,879	99,05	68,96	
44			63,3	0,814	0,166	-	31,17	0,678	0,885	-	0,943	98,95	93,36	
45			61,88	0,789	0,238	-	31,05	0,715	2,41	-	1,5	98,6	86,55	
46			65,49	0,236	0,029	-	32,07	1,07	0,395	-	0,353	99,65	61,21	
47			65,09	0,142	0,144	-	32,39	0,804	0,482	-	0,539	99,59	80,96	
48			62,45	0,47	0,151	-	31,65	0,886	1,82	-	1,24	98,67	70,49	
49			61,69	0,864	0,201	-	30,77	0,746	2,78	-	1,68	98,73	82,69	
50			61,65	0,748	0,233	-	31,29	0,905	2,38	-	1,43	98,64	68,12	
51			61,93	0,861	0,248	-	30,97	0,876	2,11	-	1,6	98,6	70,70	76,31
52			61,56	0,79	0,177	-	30,69	0,568	3,15	-	1,91	98,84	108,38	
53			62,09	1,2	0,298	-	31,26	0,91	1,62	-	1,22	98,61	68,23	
54			63,9	0,433	0,15	-	31,55	0,821	1,3	-	1,05	99,2	77,83	
55			62,03	0,723	0,199	-	30,95	0,61	2,72	-	1,58	98,81	101,69	
56			62,72	0,717	0,275	-	31,39	0,703	1,81	-	1,48	99,11	89,22	
57			63,5	0,52	0,114	-	31,64	0,908	1,51	-	1,05	99,24	69,93	
58			63,93	0,492	0,147	-	31,13	0,92	1,49	-	1,1	99,22	69,49	
59			62,72	0,542	0,137	-	31,21	0,959	1,98	-	1,26	98,81	65,40	
60			63,17	0,69	0,212	-	31,78	0,749	1,24	-	1,13	98,97	84,34	
61			62,01	0,777	0,189	-	31,28	1,06	1,99	-	1,57	98,88	58,50	
62			64,3	0,413	0,086	-	31,82	0,978	1,25	-	0,826	99,67	65,75	
63			61,51	0,586	0,003	-	30,97	0,977	4,73	0,2	1,39	100,44	62,96	
64			59,9	0,673	0,133	-	31,1	0,662	5,4	0,107	1,55	100,6	90,48	
65			64,02	0,654	0,261	-	31,83	0,882	1,43	-	1,26	100,41	72,59	
66			64,04	0,666	0,247	-	32,37	0,915	0,31	-	0,192	98,74	69,99	
67			64,6	0,124	0,151	-	32,39	1,33	0,124	-	0,051	98,76	48,57	
68			67,18	-	-	-	32,7	1,15	-	-	-	101,1	58,42	65,83
69			67,15	-	-	-	32,58	1,07	-	-	-	100,77	62,76	
70			67,45	-	-	-	32,43	1,02	-	-	-	101,01	66,13	
71			66,14	-	0,062	-	32,04	0,87	0,018	-	0	99,13	76,02	

Продолжение таблицы

№ п/п	Массив	Морфотип	ZrO ₂	Y ₂ O ₃	Yb ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	SiO ₂	HfO ₂	ThO ₂	CeO ₂	UO ₂	Сумма	ZrO ₂ /HfO ₂	ZrO ₂ /HfO ₂ среднее
72			67,52	—	0,033	—	32,29	1,56	—	—	—	101,48	43,28	
73			65,74	—	0,07	—	31,96	1,56	—	—	—	99,4	42,14	
74			59,56	0,86	0,064	—	31,05	1,23	4,27	2,34	—	99,45	48,42	
75			61,77	1,85	0,219	—	31,88	1,37	1,22	0,44	—	98,81	45,09	
76			60,52	0,884	0,108	—	31,56	1,56	2,27	1,77	—	98,75	38,79	
77			59,97	0,95	0,192	1,65	30,87	1,3	1,39	2,6	—	99,02	46,13	
78			59,85	1,31	0,225	1,32	31,39	1,26	1,02	2,33	—	98,8	47,50	
79			59,55	2,17	0,348	1,42	31,54	1,38	0,861	1,32	—	98,68	43,15	
80			67,05	—	0,018	0,053	32,28	1,55	—	—	—	101,02	43,26	
81			59,34	2,14	0,255	0,562	30,99	1,06	3,68	0,875	—	98,98	55,98	
82			60,26	2,47	0,305	0,744	31,37	1,37	1,02	0,674	—	98,314	43,99	
83			59,76	1,51	0,139	1,4	30,74	1,73	0,768	2,41	—	98,56	34,54	
84			66,93	—	0,014	—	32,47	1,74	—	0,004	—	101,25	38,47	
85			60,92	1,2	0,161	0,694	31,38	1,42	0,344	2,42	—	98,634	42,90	
86	Джелтулин-ский		60,21	0,95	0,148	1,27	31,84	1,76	0,028	2,75	—	99,05	34,21	
87			60,47	0,995	0,157	1,36	31,42	1,51	—	2,84	—	98,85	40,05	
88			66,89	—	0,013	0,094	32,26	1,54	—	—	—	100,894	43,44	
89			60,31	0,808	0,127	0,858	31,37	1,64	1,29	2,1	—	98,598	36,77	
90			60,14	0,95	0,152	1,01	31,64	1,69	1,08	2,2	—	98,98	35,59	
91			66,63	—	0,05	—	32,5	1,73	—	—	—	100,95	38,51	
92			67,16	—	0	—	32,68	1,25	—	—	—	101,17	53,73	
93			64,93	—	0,049	—	31,71	1,49	0,013	0,031	—	98,3	43,58	
94			67,08	—	0	—	32,23	1,29	—	0,005	—	100,66	52,00	
95			65,59	—	0	—	32,76	1,38	—	—	—	99,79	47,53	
96		S ₃	64,93	—	0,033	—	32,53	1,32	0,019	—	—	98,83	49,19	
97			63,08	0,096	0,089	—	32,52	2,71	0,009	—	0,236	98,73	23,28	
98			64,6	—	0,03	—	32,6	1,38	—	—	—	98,6	46,81	
99			64,7	—	0,005	—	32,7	1,55	—	—	—	98,95	41,74	
100			65	—	0,022	—	32,68	2,13	—	—	—	99,83	30,52	42,69

Примечание. Определение химического состава цирконов производилось на установке Camebax-пигто в ИГАБМ СО РАН Н.В.Христовой; предел обнаружения (в %): ThO₂ 0,102; UO₂ 0,159; Y₂O₃ 0,147; HfO₂ 0,564; Yb₂O₃ 0,201; CeO₂ 0,162; Nd₂O₃ 0,126; ZrO₂ 0,144; SiO₂ 0,06.









I.T	T° формир.	I.A	100	200	300	400	500	600	700	800
			Пирамида Призма	(211)	(101)<<(211)	(101)<(211)	(101)=(211)	(101)>(211)	(101)>>(211)	(101)
100	±50° 500° 550° C	0 призма							2 	
200	600°C	(110)								
300	650°C	(100)<<(110)						3 		
400	700°C	(100)<(110)								
500	750°C	(100)=(110)	1 							
600	800°C	(100)>(110)								
700	850°C	(100)>>(110)		1 		1,2 				
800	900°C	(100)		1 		1 		3 		

Рис. 3. Основные типы и подтипы типоморфной классификации цирконов исследованных массивов и соответствующая им геотермическая шкала:

T – температура кристаллизации цирконов; «призма» – грани призм кристаллов циркона; «пирамида» – грани пирамид кристаллов циркона; индекс I.T – температура и содержание летучих в расплаве (100 – минимальное содержание, 800 – максимальное); индекс I.A – глиноземистость (100) и щелочность (800) среды минералообразования по работе [14]; морфотипы цирконов из массивов: 1 – Медведевского, 2 – Юхтинского, 3 – Джелтулинского

В кристаллах циркона «гранулитового» типа ZrO_2/HfO_2 в среднем составляет 53,5, что характерно для цирконов метаморфических пород амфиболитовой фации [8]. Таким образом, не характерный облик выделений и повышенное значение ZrO_2/HfO_2 позволяют с достаточной степенью уверенности говорить о захвате данных кристаллов из вмещающих метаморфических пород кристаллизующимися расплавами Медведевского комплекса.

В щелочноземельных сиенитах Юхтинского массива авторами выделены два морфотипа цирконов. Кристаллизация минерала происходила в относительно контрастных условиях при параметрах $T=850^{\circ}-550^{\circ}C$ и $I.A.=700-400$. Наименее распространенными являются кристаллы, отнесенные авторами к морфотипу S_{23} , с параметрами кристаллизации: $T=850^{\circ}C$, $I.A.=400$ и $I.T.=700$, указывающими на то, что они сформировались первыми. Кристаллизация проходила в условиях

пониженной щелочности при относительно высокой температуре. Однако, судя по малому распространению кристаллов данного типа (5 об. % популяции) и небольшим размерам (0,1–0,2 мм), кристаллизация продолжалась весьма ограниченное время. Затем произошло понижение температуры до 500°–550°С при повышении щелочности среды до $I.A.=700$ на фоне снижения летучих компонентов в расплаве $I.T.=100$ и формирование морфотипа А. Кристаллы данного морфотипа являются доминирующими (95 об. % популяции) и имеют по отношению к другим выделенным морфотипам сравнительно крупные размеры (0,25–0,6 мм), что указывает на продолжительное время кристаллизации в относительно стабильных условиях. Также стоит отметить повышенное, не характерное для рассмотренных ранее популяций содержание радиоактивных элементов в кристаллах данного морфотипа (UO_2 , ThO_2). Изменение условий кристаллизации, в частности – повышение щелочности, увеличение длительности процесса кристаллизации, обогащение радиоактивными компонентами предположительно обусловлено привнесением материала из долгоживущего источника основного состава. Возрастание щелочности от первой фазы к третьей в породах Юхтинского массива отмечалось также М.Ф.Страховым [11]. Предположение о взаимодействии с источником основного состава подкрепляется высокими значениями ZrO_2/HfO_2 до 109,6. Близкие показатели данного параметра по В.В.Ляховичу [8] до 86,9 характерны для источников основного и ультраосновного состава.

Образование кристаллов циркона в породах Желтулинского массива происходило в широком температурном диапазоне – 900°–650°С, при повышенной щелочности минералообразующих расплавов $I.A.=700–600$. Предположительно, первыми кристаллизовались высокотемпературные цирконы морфотипа D в условиях низкой глиноземистости среды и при высокой роли летучих компонентов (см. рис. 3). Параметры образования: $T=900^{\circ}C$, $I.A.=700$ и $I.T.=800$. На заключительной стадии кристаллизации массива формировались метамиктные цирконы морфотипа S_5 при температуре $T=650^{\circ}C$ и низкой активности летучих компонентов $I.T.=300$.

Высокие концентрации элементов-примесей (ThO_2 , SeO_2 , Y_2O_3) в цирконах морфотипа D, по всей видимости, объясняются высокой температурой кристаллизации последнего и первичным обогащением субстрата этими элементами (см. рис. 3). Обогащение более позднего морфотипа S_5 радиоактивными и редкоземельными элементами произошло в связи с началом кристаллизации монацита, ксенотима и перераспределением их «в пользу» этих минералов. Последние были обнаружены при исследовании магматических пород Желтулинского массива и более подробно описаны в работе [4]. Стоит отметить, что в кристаллах цирконов этого массива, в отличие от рассмотренных ранее популяций, наблюдается повышенное содержание ThO_2 до 4,27%.

Примечательно, что по данным масс-спектрометрического анализа с индуктивно связанной плазмой в некоторых разновидностях магматических пород Желтулинского массива содержится значительное количество этого элемента – до 212 г/т (анализы выполнены на LA ISP-MS в ИГМ СО РАН, г. Новосибирск, под руководством А.В.Травина). В аналогичных магматических породах Эльконского рудного узла обнаружены цирконы с высоким содержанием UO_2 до 0,69% и ThO_2 до 0,17% [12].

Цирконы, близкие по облику к таковым Юхтинского массива (Самолазовское месторождение), были установлены авторами в аллювиальных отложениях Макылганского переката в среднем течении р. Алдан, где также были обнаружены весовые концентрации благородных металлов, минералов-концентраторов редких и радиоактивных элементов, которые могут служить индикаторами комплексных рудоносных объектов в данном районе [13]. Здесь золото и платина сопровождаются лёллингитом, ферберитом, шеелитом, касситеритом, цирконом, бадделеитом, монацитом с включениями торита и другими рудными минералами. По химическому составу железистая платина с Макылганского проявления характеризуется высоким содержанием иридия до 10,7%, подобно изоферроплатине из россыпи Инаглинского массива. Однако в отличие от последнего макылганская платина обладает неупорядоченной гранцентрированной структурой, указывающей на иные условия ее образования, чем изоферроплатина в Инаглинском массиве.

Таким образом, в заключение отметим, что изученные авторами в рассматриваемых объектах цирконы различаются по морфологическим признакам и химическому составу. Это указывает на различные физико-химические условия формирования данных массивов, а также на возможную металлогеническую специализацию несущих их пород, на основании чего можно сделать основные выводы:

Цирконы даек сиенит-порфиоров Медведевского массива формировались в относительно стабильных условиях постепенной кристаллизации пород массива, на что указывает присутствие четырех разновидностей цирконов, с характерными хорошо образованными, кристаллографически правильными формами, а также присутствие зерен с коэффициентом удлинения больше 4. Приуроченность округленных цирконов к породам гранулитовой фации позволяет считать такие цирконы образованными за счет высокотемпературного метаморфизма, а, следовательно, релитивными для мезозойских сиенитов.

Неровные грани и корродированная поверхность первичных, высокотемпературных цирконов в породах Юхтинского массива, а также присутствие низкотемпературных, обогащенных радиоактивными, редкими и редкоземельными элементами (UO_2 , ThO_2 , Y_2O_3 , HfO_2) разновидностей указывает на длительное формирование

поздней генерации циркона за счет привноса дополнительного тепла и флюидов из долгоживущего источника основного состава.

Повышенные содержания ThO_2 , CeO_2 , Y_2O_3 , Yb_2O_3 и морфология кристаллов Джелтулинского массива указывают на обогащение этими элементами первичного субстрата и весьма высокие температуры формирования последнего. Обеднение более позднего морфотипа S_5 элементами – ThO_2 , CeO_2 , Y_2O_3 , Yb_2O_3 произошло в связи с началом кристаллизации монацита, ксенотима и перераспределения этих элементов в их «пользу».

При повышенном содержании UO_2 в цирконах Юхтинского массива отмечаются значительно более низкие концентрации ThO_2 , подобные соотношения наблюдается в цирконах из близких по составу пород Эльконского рудного узла. Противоположная закономерность установлена в цирконах Джелтулинского массива, обогащенных ThO_2 . В целом, такая зависимость в распределении UO_2 и ThO_2 также находит свое отражение в несущих циркон магматических породах указанных массивов. Таким образом, типоморфизм цирконов, по-видимому, отражает специфику составов включающих их магматических пород и геохимическую специализацию последних.

В рассматриваемом районе циркон нередко встречается совместно с такими минералами, как леллингит, ферберит, шеелит, касситерит, бадделейт, монацит с включением торита, минералами платиновой группы. Подобная ассоциация минералов характерна для сложных щелочных рудно-магматических комплексов, выявление которых требует всестороннего подхода как площадных топоминералогических исследований, так и целенаправленного изучения типоморфных особенностей минералов из предполагаемых коренных источников искомым полезным компонентов.

Статья подготовлена по результатам проекта «Стратегически важные виды минерально-сырьевых ресурсов и особенности геологического строения инвестиционно привлекательных территорий Республики Саха (Якутия): металлогения, тектоника, магматизм, геоэкология, совершенствование поисковых и прогнозных технологий» Программы комплексных научных исследований в Республике Саха (Якутия), направленных на развитие ее производственных сил и социальной сферы на 2016–2020 годы, частично по проекту НИР ИГАБМ СО РАН 0381-2016-0003 и гранту РФФИ № 17-05-00390.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Билибин Ю.А. Петрография Алдана. Послеюрские интрузии Алданского района // Избр. труды. – М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1958. Т. 1.
2. Ворона И.Д. и др. Геологическая карта южной части Якутской АССР масштаба 1:1500000. – Л.: Ленинградская картфабрика ВАГТ, 1972.
3. Ворона И.Д., Реутов Л.М. Объяснительная записка к геологической карте СССР масштаба 1:200 000 Серия Алданская, Лист О-51-XXIV. – М.: ГНТИЛ по геологии и охране недр, 1963.
4. Журавлев А.И., Округин А.В., Кравченко А.А. Сравнительная характеристика монацитов из россыпей проявлений и магматических образований Тыркандинского рудного района // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции. – Якутск: Изд. дом СВФУ, 2016. С. 56–60.
5. Кравченко С.М., Власова Е.В. Щелочные породы Центральной Алдана. – М.: Изд-во АН СССР, 1962.
6. Краснобаев А.А. Циркон как индикатор геологических процессов. – М.: Наука, 1986.
7. Липова И.М. Природа метамиктных цирконов. – М.: Атомиздат, 1972.
8. Ляхович В.В., Вишевский А.А. Цирконий и гафний в цирконе Рапакиви в связи с проблемой генезиса овоидов // Геохимия. 1990. С. 1075–1083.
9. Максимов Е.П. Опыт формационного анализа мезозойских магматических образований Алданского щита // Изв. АН СССР: Серия геологическая. 1975. № 4. С. 16–32.
10. Особенности состава и возраст формирования мезозойских интрузий Тыркандинского рудного района Алданостанового щита / А.А.Кравченко, А.И.Иванов, И.Р.Проккопьев и др. // Отечественная геология, 2014. С. 43–53.
11. Страхов М.Ф. Петрология и рудоносность Юхтинского граносиенитового массива (центральная часть Алданского щита) // Известия Сибирского отделения. Секции наук о Земле РАЕН. 2012. № 1 (40). С. 25–37.
12. Терехов А.В. Рудоносность гидротермально-метасоматических образований Эльконского золотоуранового узла (Южная Якутия) // Автореф. ... дис. канд. геол.-минер. наук. – С-Пб, 2012.
13. Топоминералогическая проекция эндогенной минерализации благородных металлов, редких и радиоактивных элементов Центрально-Алданской магматогенной системы (Алданский щит, Россия) / А.В.Округин, А.И.Журавлев, Г.В.Мохначевский, К.З.Ибрагимов // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 3. Ч. 2. С. 23–27.
14. Pupin J.P. Zircon and granite petrology // Contrib. Miner. Petrol. 1980. 73. Pp. 207–220.