

УДК 553.86+539.219.1+553.2+552.321.6

МИНЕРАЛОГИЯ ТВЕРДОФАЗНЫХ МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ В ЦИРКОНАХ ИЗ РЕСТИТОГЕННЫХ УЛЬТРАМАФИТОВ ШАМАНСКОГО МАССИВА (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ) В СВЯЗИ С ПРОБЛЕМОЙ ИХ U-Pb ИЗОТОПНОГО ДАТИРОВАНИЯ



Ф.П. Леснов, В.Н. Королюк

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

Изучен фазовый состав микровключений, обнаруженных в цирконах из реститогенных ультрамафитов Шаманского массива (кварц, слюда, хлорит, кальцит, плагиоклаз, рутил, ксенотим). Все зерна цирконов, которые характеризуются округленной формой, шероховатой поверхностью, микротрещиноватостью, низкой интенсивностью катодолюминесцентного свечения, нарушенной осцилляторной зональностью, а также значительными вариациями изотопного возраста (3050–502 млн лет), рассматриваются в качестве реликтовой фазы. Минералы из микровключений были образованы при инфильтрации флюидов, привнесивших в зерна циркона редкоземельные элементы, U, Th и др. Предполагается, что это обусловило геохимическую неоднородность цирконов, а также нарушило изначальный баланс U и радиогенных изотопов Pb, что стало одной из причин их полихронности.

Ключевые слова: циркон, микровключения, эпигенетические минералы, реститогенные ультрамафиты, Шаманский массив, Восточное Забайкалье

Введение

Циркон является одним из сравнительно мало распространенных, но весьма информативных акцессорных минералов как магматических, так и метаморфических и осадочных пород. Сведения о морфологии, структуре, макро- и микроэлементном составе и различных дефектах кристаллов циркона представляют интерес при проведении их U-Pb изотопного датирования. К числу дефектов кристаллов циркона, присутствие которых необходимо учитывать при их датировании, относятся микровключения различных минералов.

В последние десятилетия U-Pb изотопным методом, наряду с цирконами из магматических пород кислого и среднего состава, в ограниченном количестве были продатированы цирконы и из пород мафит-ультрамафитового состава. Среди последних были выделены четыре генетических типа: реликтовый, ксеногенный, сингенетический и эпигенетический [Леснов, 2015]. Цирконы из первых двух типов очень часто имеют округленную форму, пониженную интенсивность катодолюминесцентного свечения до полного его отсутствия, нарушенную осцилляторную зональность, геохимическую неоднородность, иногда содержат микровключения различных минералов, а также отличаются очень широкими вариациями изотопного возраста. Полихронность была выявлена не только в цирконах из разных пород изучаемых массивов, но и в отдельных их образцах. Причины, которыми были обусловлены указанные особенности цирконов из мафит-ультрамафитовых массивов, особенно их полихронность и присутствие микровк-

ключений различных минералов, пока остаются недостаточно изученными.

Состояние изученности проблемы

К настоящему времени получены ограниченные данные, касающиеся распространенности, морфологии, минерального состава и условий образования микровключений минералов в кристаллах цирконов из магматических пород. Это связано, главным образом, с ограниченной распространенностью как самих цирконов, так и находящихся в них микровключений, которые обычно имеют субмикроскопические размеры.

Приведем несколько примеров, касающихся этого вопроса. В цирконах из гранитных пегматитов Северной Карелии были описаны многочисленные микровключения ксенотима и оксида урана размером менее 5 мкм [Ляпина, Юдинцев, 1999]. В цирконах из эклогитов Кагханской долины (Пакистан) были изучены микровключения мусковита, биотита, альбита и кварца [Rehman et al., 2013]. При исследованиях цирконов из сиенитов Великовыковского сиенитового массива (Украинский щит) А.А. Кульчицкая и соавт. [2019] обнаружили в них микровключения фторапатита, калишпата, альбита, кварца, халькопирита, REE-карбонатов, фторбритолита-(Ce), монацита-(Ce), а также микровключения алюминий-железистой силикатной фазы. В цирконах из щелочных и мафитовых пород Эльетозерского комплекса (Северная Карелия) были встречены микровключения торита, барита, иттриалита и ряда других минералов [Шарков и др., 2015].

По заключению этих авторов исследованные ими цирконы подверглись воздействию жидкостей (?), содержавших примеси F, Th, Y U, Nb, Ta, Ba, Fe, Ti и Ca.

В редких случаях микровключения были обнаружены в цирконах из пород мафит-ультрамафитовых комплексов. Так, в работе [Ибрагимова и др., 2015] описаны единичные микровключения кварца, находившиеся в микротрещине зерна циркона из дунитов ультрамафитового массива Инагли. Н.С. Бортников и соавт. [2008] представили данные о микровключениях пироксенов и плагиоклаза из зерен циркона, найденных в габброидах, образцы которых были драгированы во впадине Маркова (Срединно-Атлантический хребет). Л.Я. Аранович и соавт. [2020] описали микровключения ксенотима, а также оксидов и силикатов U и Th в преобразованных под воздействием высокотемпературных флюидов цирконах из образцов габброидов, драгированных в Срединно-Атлантическом хребте. В цирконах из габбро-диоритов, диоритов и кварцевых диоритов из Березовского мафит-ультрамафитового массива (о. Сахалин) микровключения были представлены кальцитом, калишпатом, альбитом, кварцем, слюдой, гроссуляром, сидеритом и оксидом железа [Леснов, Королук, 2019].

Актуальность исследований состава и других свойств минералов из микровключений в цирконах из пород мафит-ультрамафитовых массивов обусловлена, прежде всего, необходимостью выяснения того, в какой мере процессы образования микровключений могли нарушить баланс U и Pb в зернах реликтовых, а также ксеногенных цирконов и тем самым обусловить часто наблюдаемые в них широкие вариации изотопного возраста.

Постановка задачи

В предлагаемой статье на примере полихронных реликтовых цирконов из реститогенных ультрамафитов Шаманского массива основное внимание уделено вопросам морфологии, минерального состава и возможных условий образования, обнаруженных в них микровключений различных минералов, а также вопросу о том, в какой мере образование этих микровключений могло повлиять на геохимическую неоднородность цирконов и послужить причиной широких вариаций их изотопного возраста. Необходимость в постановке таких исследований связана, во-первых, с тем, что, как было отмечено выше, микровключения в цирконах из пород ультрамафитового состава пока недостаточно изучены; во-вторых, с тем, что при U-Pb изотопном датировании цирконов из Шаманского массива [Леснов, 2015], как, впрочем, и из многих других подобных ему массивов, было установлено, что значения возраста реликто-

вых цирконов в них варьируют в очень широких пределах, причины чего остаются невыясненными. Так, например, для цирконов из дунитов Сахаринского и Восточно-Хабарнинского массивов (Урал) получены значения в интервале 2808–374 млн лет [Ферштатер и др., 2009]; из дунитов Нижнетагильского массива (Урал) – 2852–585 млн лет [Малич и др., 2009]; из дунитов Кондерского массива (Алданский щит) – 2473–143 млн лет [Баданина, Малич, 2012]; из дунитов, гарцбургитов и метабазитов массива Баекдонг (Южная Корея) – 2522–856 млн лет [Oh et al., 2012]; из ультрамафитов и габброидов Срединно-Атлантического хребта – 2715–420 млн лет [Сколотнев и др., 2009]; из ультрамафитов и габброидов Березовского массива (о. Сахалин) – 3100–65 млн лет [Леснов и др., 2010; Леснов, 2015]; из ультрамафитов и габброидов Шикотанского массива (Курильские острова) – 2775–63 млн лет [Объяснительная записка..., 2006].

Ю.А. Костицын и др. [2015] представили данные о результатах U-Pb изотопного датирования цирконов из образцов ультрамафитов и габброидов, драгированных в пределах Срединно-Атлантического хребта. Они показали, что эти цирконы характеризуются широкими вариациями возраста, а также отличаются по условиям образования. Они также подчеркнули, что цирконы очень устойчивы в коровых магматических процессах, особенно при пониженной активности щелочей, однако при попадании в условия температур верхней мантии (1 300–1 500 °C) очень быстро диффузионным путем теряют радиогенный свинец. В итоге Ю.А. Костицын с соавт. пришли к выводу о том, что «омоложение» цирконов может быть обусловлено, главным образом, термическим воздействием на них, а также тем, что инородный, захваченный циркон в расплавах основного и ультраосновного состава должен растворяться, при этом его находки в таких породах, скорее всего, указывают на отсутствие равновесия.

Вопросы полихронности цирконов из ультрамафитов и габброидов, в том числе природа содержащихся среди них зерен с аномально высокими значениями возраста, обсуждались нами на примере их кристаллов из полигенного Березовского мафит-ультрамафитового массива (о. Сахалин) [Леснов, 2015], а также Шаманского ультрамафитового массива [Леснов, 2018а, б; Леснов, 2019а, б; Леснов и др., 2010]. Исследования цирконов из пород Березовского массива показали, что значительные вариации их U-Pb изотопного возраста (3049–502 млн лет) могли быть обусловлены, по меньшей мере, двумя факторами: а) неравномерным «омоложением» U-Pb изотопных систем цирконов из реститогенных ультрамафитов в результате термического воздействия при частичном плавлении верхнемантийного протолита; б) заведомо более поздней кристаллизацией

цирконов из ортомагматических габброидов, интрузив которых прорвал ультрамафитовую протрузию. Также было показано, что цирконы из ультрамафитов и габброидов этого массива в той или иной мере отличаются не только по изотопному возрасту, но и по морфологии и оптическим свойствам зерен, что свидетельствует об их гетерогенности. При этом цирконы из реститогенных ультрамафитов (гарцбургиты, лерцолиты, дуниты) и из гибридных ультрамафитов (верлиты, пироксениты), обычно имеющие округленную форму и шероховатую поверхность, рассматривались в качестве реликтовой фазы. В свою очередь, цирконы из гибридных габброидов (оливиновые габброиды, троктолиты) рассматривались в качестве ксеногенной фазы, захваченной мафитовыми расплавами при просачивании сквозь реститогенные ультрамафиты.

При постановке задачи для данного исследования на примере реликтовых цирконов из реститогенных ультрамафитов Шаманского массива предполагалось выявить дополнительные свидетельства причинно-следственных связей между процессами образования минеральных микровключений в зернах циркона и свойственными этому минералу геохимической неоднородностью и полихронностью.

Геологическое строение Шаманского массива

Шаманский ультрамафитовый массив, в цирконах из которого были обнаружены и исследованы микровключения ряда минералов, расположен на правом берегу р. Витим ($55^{\circ}81'39''$ с.ш., $111^{\circ}09'17''$ в.д.). Он входит в состав восточной ветви Байкало-Муйского офиолитового пояса [Леснов и др., 2016]. Массив представляет собой удлиненную в север-северо-западном направлении субвертикальную протрузию, линзовидное тело которой размером 6×25 км обнажается на площади порядка 110 км^2 . С вмещающими метаморфическими образованиями архей-протерозойского возраста массив граничит вдоль круто наклоненных навстречу друг другу разломов. У его западного тектонического контакта обнажаются мраморы и микросланцы муйской серии (нижний протерозой), у восточного тектонического контакта – метапесчаники, метаалевропесчаники, метаконгломераты и мраморизованные известняки самодуровской серии (средний–верхний рифей) [Долгушин и др., 2019]. Массив сложен в различной мере серпентинизированными гарцбургитами и подчиненными им дунитами. Петроструктурным методом в ультрамафитах массива и слагающих их оливинах были выявлены свидетельства пластического деформирования [Пугачева, 1988; Гончаренко, 1989], а также концентрическая динамометаморфическая зональность [Пугачева, 1996; Чернышов, 1999]. На незначи-

тельном удалении к востоку от массива обнажаются интрузивы габброидов и гранитоидов.

Этот массив относится к числу потенциально хромитоносных объектов. В его пределах выделены три разобщенных участка вкрапленно-прожилковой хромитовой минерализации: Северо-Шаманский, Центральный и Южно-Шаманский. Хромовое оруденение относится к типу сложных жилообразных залежей (жилы, столбы, линзы, гнезда). Оруденение характеризуется значительными вариациями морфоструктурных параметров, а также изменчивостью содержания хромшпинели – от низкого до среднего [Лоскутов, Асосков, 2010; Долгушин и др., 2019; Чернышов и др., 2020].

Материалы и методы исследований

Цирконы. Из композитной пробы образцов гарцбургитов и дунитов массой около 4 кг было выделено 31 зерно циркона, их преобладающий размер составил 100–150 мкм [Леснов, 2018а, б; Леснов, 2019а, б]. Все зерна характеризуются округленной в результате резорбирования формой и шероховатой поверхностью (рис. 1).

В большинстве случаев они имели очень низкую интенсивность катодолюминесцентного свечения до полного его отсутствия, а также нерегулярную осцилляторную зональность. Значения изотопного возраста цирконов изменяются в интервале 3049–502 млн лет. По результатам исследования Lu-Hf изотопной системы этих цирконов установлено, что стандартные отклонения значений параметра $\epsilon_{\text{Hf}}(T)$ в них увеличиваются в ряду от их наиболее древних зерен к наиболее молодым, причем значение этого параметра в наиболее древнем зерне циркона (3049 млн лет) почти соответствует его значению для универсального хондритового резервуара (CHUR) [Леснов и др., 2019].

Изотопный возраст цирконов определен U-Pb методом (SIMS, SHRIMP II) в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург) по опубликованной методике [Schuth et al., 2012]. Расчеты проведены на основе значений параметра $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, по [Леснов, 2018б].

Микровключения минералов. Изучение минералов из микровключений в цирконах из ультрамафитового массива выполнено в Институте геологии и минералогии (г. Новосибирск) методом электронно-зондового микроанализа и растровой электронной микроскопии на микроанализаторе JEOL JXA-8100 (Центр коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН). На начальном этапе исследований плоскости срезов зерен циркона просматривали в режиме COMPOSITION, при котором изображение в обратно рассеянных электронах отражает фазовый состав микровключения на поверхности образца.

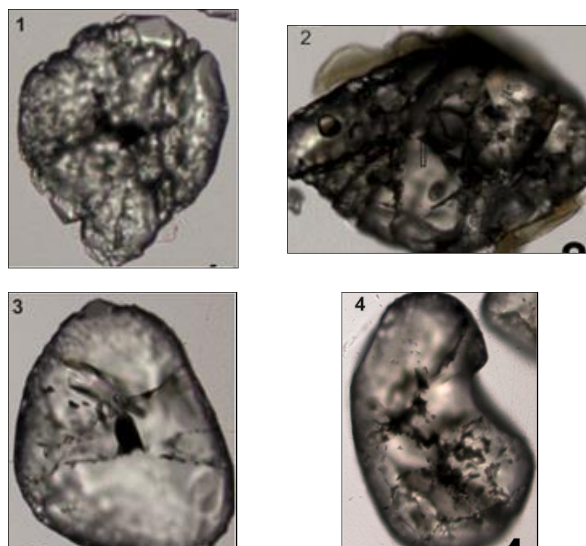


Рис. 1. Морфология представительных зерен циркона, их номера, изотопный возраст и названия минералов из микровключений, которые в них обнаружены

1 – зерно 03(14), 2350 млн лет (кварц); 2 – зерно 02(19), 1741 млн лет (биотит и кварц); 3 – зерно 02(16), 607 млн лет (кальцит); 4 – зерно 03(6) 602 млн лет (андезин). $\times 900$

Fig. 1. Morphology of representative zircon grains, their numbers, isotopic ages and names of minerals from microinclusions that were found in them

1 – grain 03(14), 2350 Ma (quartz); 2 – grain 02(19), 1741 Ma (biotite and quartz); 3 – grain 02(16), 607 Ma (calcite); 4 – grain 03(6) 602 Ma (andesine). $\times 900$

При этих наблюдениях фиксировались координаты тех микровключений, вскрытый минимальный размер которых превышал 1–2 мкм, поскольку, начиная с этого размера, появлялась возможность определять химический состав и идентифицировать минеральную фазу с достаточной точностью. Отметим, что размеры большинства обнаруженных микровключений находились в интервале 2–10 мкм. Затем положение места проведения микроанализа уточняли при наблюдениях в режиме растрового микроскопа с соблюдением таких условий, при которых видимая поверхность изучаемой фазы в наибольшей мере попадала в область возбуждения рентгеновского излучения. После этого при увеличении в 300 тыс. проводили измерения интенсивностей, так что анализ микровключения осуществлялся практически в «точке».

Такой прием позволил избежать некоторого смещения электронного зонда, которое возникало при переходе от просмотрового режима к точечному. Анализ проводили при ускоряющем напряжении 20 кВ и силе тока зонда 30–50 нА. Он выполнялся по «силикатной» схеме, включающей определение концентраций Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K и Sr. Добавим, что анализ микровключений ксенотима осуществлен по специально подобранной схеме. Пересчет измеренных интенсивностей в содержание окислов проведен методом ZAF из программного

обеспечения микроанализатора. При расчете состава водных минералов и кальцита учитывалось присутствие в них H_2O и CO_2 соответственно. В качестве образцов сравнения (стандартов) использованы кристаллы ряда природных фаз (альбит, ортоклаз, диопсид, гранаты различного состава), а также Ti-содержащее синтетическое стекло состава диопсида.

Результаты исследований минералов из микровключений

По результатам 68 анализов определен химический состав минералов из микровключений в 20 представительных зернах циркона (табл. 1), причем для 14 зерен определен их U-Pb изотопный возраст (табл. 2).

В большинстве случаев микровключения располагались как во внутренних, так и во внешних зонах зерен циркона. Они имели субизометричную, прожилковидную или неправильную форму. Иногда наблюдались линейно-струйчатые скопления нескольких микровключений. Отдельные микровключения представляли собой эпитактические сростки, расположенные у округленной поверхности зерен циркона.

Характер расположения микровключений в зернах циркона, а также их морфология отражены на микрофотографиях представительных зерен (рис. 2). В проанализированных микровключениях в зернах

исследованных цирконов были диагностированы следующие минералы (в скобках – частота встречаемости в % к количеству проанализированных микровключений): кварц (52,3), слюда (15,2), хлорит (13), кальцит (6,6), плагиоклаз (4,3), рутил (4,3), ксенотим (4,3). В отдельно взятом зерне циркона чаще всего присутствовал какой-то один минерал, реже – от 2 до 6. Рассмотрим некоторые особенности распространения, морфологии и химического состава отдельных минералов.

Кварц. Он присутствовал примерно в 40 микровключениях, которые находились на разных участках среза зерен циркона и имели удлиненную,

прожилковидную, субизометричную или неправильную форму и неровные края. Размер большинства из них не превышал 10 мкм; единичные микровключения, образующие эпитахисические сростки с округленной поверхностью зерен циркона, достигали 100 мкм в поперечнике. В некоторых зернах циркона кварц присутствовал в виде нескольких субпараллельных прожилков, по-видимому, «залечивших» образованные при хрупких деформациях микротрещины в зерне минерала-хозяина. В одном из зерен циркона микровключения кварца соседствовали с микровключениями слюды, хлорита, рутила и ксенотима.

Таблица 1

Химический состав минералов из микровключений в представительных зернах циркона, мас. %

Table 1

Chemical composition of minerals from microinclusions in representative zircon grains, wt. %

№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO _{общ}	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	H ₂ O _{теор}	Сумма	–
П.о.	0,03	0,01	0,02	0,01	0,009	0,03	0,09	0,04	0,006	0,01	–	–	–
<i>Слюда</i>													F [#] , %
02(19-36)	36,65	3,09	13,96	20,22	0,088	10,58	< П.о.	0,27	9,19	< П.о.	4,5	98,55	51,7
02(19-3a)	37,08	3,25	14,30	20,85	0,113	11,03	< П.о.	0,15	9,31	< П.о.	4,5	100,58	51,5
<i>Хлорит</i>													F [#] , %
02(8-1)	26,78	0,06	22,26	14,13	0,053	23,31	< П.о.	0,11	< П.о.	0,07	12	98,77	25,3
03(5-2)	29,05	0,07	22,03	14,66	0,056	22,86	< П.о.	< П.о.	< П.о.	< П.о.	12	100,73	26,5
03(5-3)	29,89	0,06	20,31	16,96	0,055	19,37	0,09	< П.о.	0,016	0,05	12	98,80	32,9
<i>Плагиоклаз</i>													Ab, %
02(2-3)	56,89	< П.о.	23,38	0,068	< П.о.	0,05	7,11	7,32	0,17	0,02	–	–	64,4
03(6-1)	56,66	0,06	23,49	0,049	< П.о.	< П.о.	7,02	7,12	0,057	< П.о.	–	–	64,5

Примечание. F[#], % = 100 × Fe/(Fe+Mg) – формульные единицы. Ab, % = Na / (Na + K + Ca) – формульные единицы. < П.о. – содержание компонента ниже пределы его обнаружения для одностороннего 1σ-критерия (статистическая достоверность обнаружения 84 %). Содержания H₂O приведены исходя из теоретических формул минералов

Note. F[#], % = 100 × Fe/(Fe+Mg) – formula units. Ab, % = Na / (Na + K + Ca) – formula units. < П.о. – the content of the component is below the limits of its detection for the one-sided 1σ-test (statistical reliability of detection is 84 %). The contents of H₂O are given based on the theoretical formulas of minerals.

Таблица 2

Минеральный состав микровключений из представительных зерен циркона и их U-Pb изотопный возраст

Table 2

Mineral composition of microinclusions from representative zircon grains and their U-Pb isotopic age

Номер зерна	Минералы, слагающие микровключения	Возраст, млн лет
02(5.1)	Кварц, кальцит, флогопит, ксенотим	3049
03(14.1)	Кварц	2881
02(12.1)	Кварц, флогопит, хлорит	2726
03(11.1)	Кварц	2426
02(8.1)	Кварц, флогопит, хлорит	2370
03(5.1)	Хлорит	2068
03(8.1)	Кварц	1878
02(19.1)	Кварц, биотит	1736
02(16.1)	Кальцит	640
03(1.1)	Кварц	623
03(6.1)	Андезин	619
03(9.1)	Кварц	612
02(15.1)	Кварц	596
02(14.1)	Кварц	502

Примечание. Изотопный возраст рассчитан на основе значений параметра ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb, по [Леснов, 2018б].

Note. The isotopic age was calculated based on the values of the ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb parameter, after [Lesnov, 2018b].

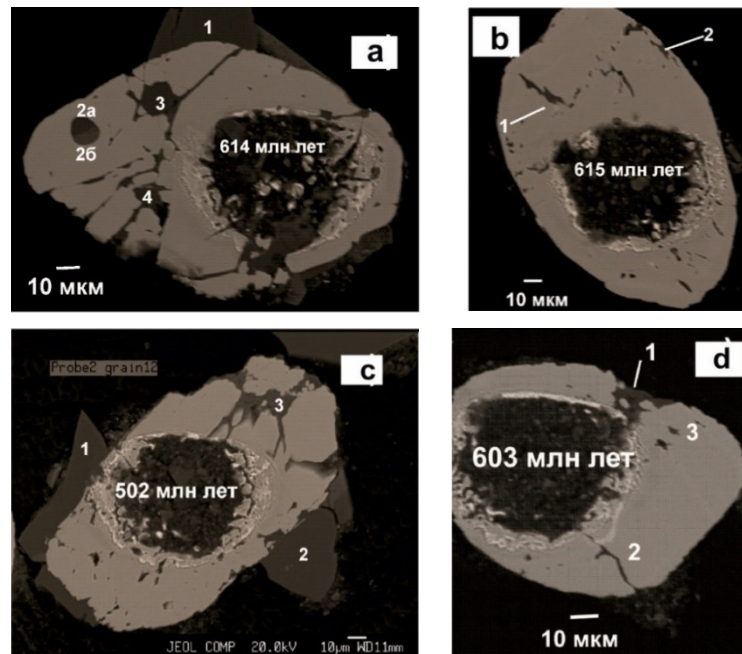


Рис. 2. Морфология представительных зерен циркона с микровключениями. В центре зерен циркона находятся кратеры, возникшие при U-Pb изотопном датировании, а также полученные при этом значения изотопного возраста

Названия минералов из микровключений и номера их анализов (по данным табл. 2): а – зерно 02(19-1) (1 и 2а – кварц, 2б – биотит, 3 и 4 – кварц); б – зерно 02(3-4) (1 – кварц, 2 – биотит); с – зерно 02(14) (1, 2, 3 – кварц); d – зерно 02(9-1) (1 – кварц, 2 – жилка кварца, 3 – биотит)

Fig. 2. Morphology of representative zircon grains with microinclusions. In the center of zircon grains, there are craters formed during U-Pb isotopic dating, as well as the obtained values of isotopic ages

The names of minerals from microinclusions and their analysis numbers are given (according to Table 2): a – grain 02(19) (1 and 2a – quartz, 2b – biotite, 3 and 4 – quartz); b – grain 02(3) (1 – quartz, 2 – biotite); c – grain 02(14) (1, 2, 3 – quartz); d – grain 02(9) (1 – quartz, 2 – quartz vein, 3 – biotite)

Слюда. Ее микровключения, встречаясь намного реже, чем микровключения кварца, располагались на разных участках среза зерен циркона и имели размер 5–15 мкм, субизометричную или неправильную форму, а также извилистые края. В одном случае наблюдался эпитактический сросток слюды с округленной поверхностью зерна циркона. Содержание K_2O в слюде несколько превышало 9 мас. %, что позволяло отличить ее выделения от выделений хлорита.

Хлорит. Микровключения этого минерала располагались преимущественно на внешних участках срезов зерен циркона, имея линзовидную, прожилковидную или неправильную форму. Их размер в большинстве случаев не превышал 10 мкм. Несмотря на внешнее сходство с выделениями слюды, выделения хлорита отчетливо отличались от них не только по содержанию K_2O , но и по содержаниям SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , MgO и $FeO_{общ.}$. Значение параметра $F^\#$ в хлоритах находилось в интервале 25,3–37,5 %, что меньше, чем в слюдах.

Кальцит. Его микровключения также располагались по всей площади срезов зерен циркона. Минерал

диагностирован на основании присутствия в нем очень высоких концентраций CaO при отсутствии других компонентов из «силикатной» схемы микроанализа. При этом диагностика этой фазы по рентгеновскому спектру показала отсутствие в ней фосфора, что позволило исключить принадлежность ее к апатиту. Одно из микровключений кальцита размером около 10 мкм, содержавшее CaO в количестве 58,5 мас. %, имело субизометричную форму и извилистые очертания. Оно было окружено каймой ксенотима шириной около 1 мкм. В другом зерне циркона микровключения кальцита были представлены двумя короткопризматическими кристаллами размером около 10 мкм, в которых содержание CaO составило 61,2 и 61,3 мас. %, при этом в них отсутствовала примесь других компонентов.

Плагиоклаз. Микровключения этой фазы, располагавшиеся во внутренней части двух зерен циркона, имели субизометричную и линзовидную форму при размере менее 10 мкм. Содержание альбитового минерала (Ab) в обоих микровключениях составило 64,6 %, что позволило определить минерал как андезин.

Рутил. Его микровключения размером около 10 мкм, обнаруженные в двух зернах циркона и имевшие треугольное сечение, располагались в виде эпитактических сростков в контакте с округленной поверхностью зерен циркона.

Ксенотим. Микровключения этого минерала встречены в двух зернах циркона. В одном случае он слагал узкую кайму, окружавшую микровключения кварца и кальцита. В другом случае призматические микрокристаллы ксенотима длиной около 15 мкм располагались в микротрещине на периферии зерна циркона, причем одной из своих торцевых граней они контактировали с эпитактическим сростком рутила. Ксенотим был диагностирован на том основании, что согласно его рентгеновским спектрам он содержал Y_2O_3 (29–37 мас. %) и P_2O_5 (23–29 мас. %).

Таковы основные особенности минералов, слагающие микровключения в зернах циркона. Как можно видеть, все эти минералы, прежде всего кварц, являются эпигенетическими фазами, не имеющими прямого отношения к реститогенным ультрамафитам.

Обсуждение результатов исследований

Результаты выполненных исследований микровключений из реликтовых цирконов, обнаруженных в реститогенных ультрамафитах Шаманского массива, а также опубликованные ограниченные материалы по микровключениям из других объектов свидетельствуют о том, что присутствие разнообразных по минеральному составу микровключений в цирконах – достаточно распространенное явление. Как следует из представленных выше данных, в цирконах из ультрамафитов Шаманского массива микровключения чаще всего представлены кварцем, намного реже – слюдой, хлоритом, плагиоклазом (андезином), кальцитом, рутилом и ксенотимом. Для сравнения укажем, что во многом похожие по минеральному составу ассоциации микровключений были обнаружены в цирконах из дунитов массива Инагли (кварц), из диоритов Березовского массива (кальцит, калишпат, альбит, кварц, слюда, сидерит, гроссуляр), из габброидов Срединно-Атлантического хребта (плагиоклаз, пироксен, ксенотим, оксиды U и Th), из эклогитов Пакистана (мусковит, биотит, альбит, кварц), из сиенитов Украинского щита (флюорит, калишпат, альбит, кварц, карбонат, монацит, халькопирит), из гранит-пегматитов Карелии (ксенотим, оксид U).

Фазовый состав и морфология микровключений в цирконах из Шаманского массива, особенно прожилки кварца, не оставляют сомнений в том, что они являются эпигенетическими фазами, образованными в процессе инфильтрации флюидов, обогащенных такими компонентами, как Si, Na, K, Ca, Al, U, Th и

ряд других. При этом обнаружение микровключений ксенотима в некоторых цирконах свидетельствуют о том, что эпигенетические флюиды содержали фосфор. Напомним, что к выводу о том, что образование микровключений различных минералов в цирконах произошло в результате инфильтрации флюидов, обогащенных различными элементами (F, Th, Y, U, Nb, Ta, Ba, Fe, Ti и Ca), пришли Е.В. Шарков и соавт. [2015], а также Л.Я. Аранович и соавт. [2020].

Наряду с названными элементами при инфильтрации флюидов в ультрамафиты и содержащиеся в них зерна циркона приносились редкоземельные элементы (РЗЭ). Свидетельством этому служит тот факт, что, как было отмечено выше, ультрамафиты Шаманского массива аномально обогащены легкими РЗЭ, что не согласуется с представлением об их реститогенной природе. Аномальная обогащенность легкими РЗЭ свойственна ультрамафитам из многих мафит-ультрамафитовых массивов [Леснов, 2007], а также из глубинных ксенолитов в щелочных базальтах [Леснов и др., 2009]. Эти наблюдения показали, что РЗЭ находятся в ультрамафитах, главным образом, в виде неструктурной примеси, сосредоточенной в межзерновом пространстве и в микротрещинах, секущих зерна минералов, в том числе цирконов.

Мы пришли к выводу о том, что привнос различных легкоподвижных микроэлементов в процессе инфильтрации эпигенетических флюидов был важной причиной наблюдаемой геохимической неоднородности цирконов. В этом же контексте особого внимания заслуживают результаты наблюдений, свидетельствующие о присутствии в цирконах микровключений, содержащих соединения U и Th. Вполне очевидно, что привнесенные при инфильтрации флюидов «добавочные» количества этих элементов могут обусловить нарушения в их изначальном балансе с радиогенными изотопами Pb, тем самым создав определенные «помехи» при U-Pb датировании цирконов и повлечь за собой неравномерное «омоложение» их возраста.

Здесь следует добавить, что помимо повышения содержания U в реликтовых цирконах при инфильтрации эпигенетических флюидов, особенно выделяемых гранитоидными расплавами, более существенной причиной широких вариаций значений изотопного возраста реликтовых цирконов является разная по масштабу потеря радиогенных изотопов Pb диффузионным путем ювенильными цирконами при их отжиге в процессе частичного плавления верхнемантийного протолита. Напомним, что, по мнению Ю.А. Костицына и др. [2015] циркон при попадании в условия температур верхней мантии (1500–1300 °C) быстро теряет радиогенный Pb диффузионным путем.

Исходя из имеющихся данных о том, что значения U-Pb изотопного возраста некоторых зерен до-

стигают 3 млрд лет, можно предположить, что изначально в верхнемантийном протолите могли присутствовать ювенильные цирконы с возрастом более 3 млрд лет. При частичном плавления протолита и образовании ультрамафитовых реститов ювенильные цирконы подверглись высокотемпературному отжигу и химическому резорбированию. При этом в их U-Pb изотопных системах произошли нарушения, связанные с частичной потерей радиогенных изотопов Pb диффузионным путем. В итоге ювенильные цирконы были преобразованы в неравномерно «омоложенные» реликтовые цирконы, которым свойственны значительные вариации изотопного возраста.

Заключение

С учетом имеющихся данных о полихронности реликтовых цирконов из пород многих мафит-ультрамафитовых массивов, а также в связи с присутствием в них микровключений различных эпигенетических минералов можно заключить следую-

щее. При U-Pb изотопном датировании реликтовых цирконов из таких массивов необходимо принимать во внимание то обстоятельство, что выявленный широкий разброс значений изотопного возраста таких цирконов может быть обусловлен, по меньшей мере, двумя факторами: во-первых, нарушениями в U-Pb системах ювенильных цирконов из-за частичной потери ими радиогенных изотопов Pb при отжиге в процессе частичного плавления верхнемантийного протолита; во-вторых, более поздним привнесением в ультрамафитовые реститы и в содержащиеся в них реликтовые цирконы дополнительной примеси U, а также Th, P3Э и других элементов-примесей при инфильтрации выделявшихся гранитоидными и мафитовыми расплавами флюидов, которая сопровождалась образованием микровключений эпигенетических минералов в цирконах.

Работа выполнена в Институте геологии и минералогии СО РАН в рамках государственного задания № 03030-2016-0014.

ЛИТЕРАТУРА

- Аранович Л.Я., Бортников Н.С., Борисов А.А. Океанический циркон как петрогенетический индикатор // Геология и геофизика. 2020. Т. 61, № 5–6. С. 685–700.
- Баданина И.Ю., Малич К.Н. Полихронный возраст цирконов в дунитах из Кондерского массива (Алданская провинция, Россия) // Геохронометрические изотопные системы, методы их изучения, хронология геологических процессов : материалы конф. М. : ИГЕМ РАН, 2012. С. 49–52.
- Бортников Н.С., Шарков Е.В., Богатиков О.А., Зингер Т.Ф., Лепехина Е.Н., Антонов А.В., Сергеев С.А. Находки молодых и древних цирконов в габброидах впадины Маркова, Срединно-Атлантический хребет, 5°30.6'–5°32.4' (результаты SHRIMP-II U-Pb-датирования): значение для понимания глубинной геодинамики современных океанов // Доклады Академии наук. 2008. Т. 421, № 2. С. 240–248.
- Гончаренко А.И. Деформация и петроструктурная эволюция альпинотипных гипербазитов. Томск: Томский госуниверситет. 1989. 400 с.
- Долгушин С.С., Жабин В.В., Лоскутов И.Ю., Садур О.Г. Перспективы создания базы хромового сырья Сибири (в пределах Сибирского федерального округа). Новосибирск: СНИИГиМС, 2019. 239 с.
- Ибрагимова Э.К., Радьков А.В., Молчанов А.В., Шатова Н.В., Шатов В.В., Лепехина Е.Н., Антонов А.В., Толмачева Е.В., Соловьев О.Л., Терехов А.В., Хорохорина Е.И. Результаты U-Pb (SHRIMP II) датирования цирконов из дунитов массива Инагли (Алданский щит) и проблема генезиса концентрически-зональных комплексов // Региональная геология и металлогения. 2015. № 62. С. 64–78.
- Костицын Ю.А., Белоусова Е.А., Силантьев С.А., Бортников Н.С., Аносова М.О. Современные проблемы геохимических и U-Pb геохронологических исследований циркона в океанических породах // Геохимия. 2015. № 9. С. 771–800.
- Кульчицкая А.А., Герасимец И.Н., Вишневский А.А., Бельский В.Н. Минеральные включения в кристаллах циркона из Великовыковского сиенитового массива (Украинский щит) // Минералогический журнал. 2019. Т. 41, № 2. С. 34–44.
- Леснов Ф.П. Редкоземельные элементы в ультрамафитовых и мафитовых породах и их минералах. Новосибирск : ГЕО, 2007. Кн. 1. 403 с.
- Леснов Ф.П. Петрология полигенных мафит-ультрамафитовых массивов Восточно-Сахалинской офиолитовой ассоциации. Новосибирск : ГЕО, 2015. 240 с.
- Леснов Ф.П. Изотопный возраст цирконов из ультрамафитов Шаманского массива (Восточное Забайкалье) // Методы и геологические результаты изучения изотопных геохронометрических систем минералов и пород. М. : ИГЕМ РАН, 2018а. С. 191–193.
- Леснов Ф.П. U-Pb изотопное датирование цирконов из ультрамафитовых реститов Шаманского массива (Восточное Забайкалье) // Геосферные исследования. 2018б. № 1. С. 6–16.
- Леснов Ф.П. Архей-протерозойские цирконы из ультрамафитовых реститов Шаманского массива и их петрогенетическое значение (Восточное Забайкалье) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского складчатого пояса: от океана к континенту. Иркутск : Институт земной коры СО РАН, 2019а. С. 157–159.
- Леснов Ф.П. Петрология Шаманского ультрамафитового массива (Восточное Забайкалье, Россия). Саарбрюкен : Lambert, 2019б. 96 с.
- Леснов Ф.П., Королюк В.Н. Состав микровключений в цирконах из пород Березовского мафит-ультрамафитового массива (Восточно-Сахалинская офиолитовая ассоциация) // Геосферные исследования. 2019. № 3. С. 35–41.
- Леснов Ф.П., Чернышов А.И., Пугачева Е.Е. Геохимия редких, редкоземельных и платиновых элементов в породах Шаманского ультрамафитового массива (Восточное Забайкалье) // Литосфера. 2016. № 4. С. 30–53.

Леснов Ф.П., Капитонов И.Н., Сергеев С.А. Lu-Hf изотопная систематика реликтовых цирконов из реститогенных ультрамафитов Шаманского массива (Восточное Забайкалье) // Геосферные исследования. 2019. № 3. С. 42–49.

Леснов Ф.П., Гальверсен В.Г., Цимбалит В.Г., Титов А.Т. Первые данные об U-Pb изотопном датировании и коренной платиноносности Березовского полигенного мафит-ультрамафитового массива (о. Сахалин) // Доклады Академии наук. 2010. Т. 433, № 6. С. 792–795.

Леснов Ф.П., Палесский С.В., Николаева И.В., О.А. Козьменко, Кучкин А.М., Королюк В.Н. Детальные минералого-геохимические исследования крупного ксенолита шпинелевых лерцолитов из щелочных базальтов палеовулкана Шаварын-Царам (Монголия) // Геохимия. 2009. № 1. С. 21–44.

Лоскутов И.Ю., Асосков В.М. Оценка потенциальной хромитоносности Шаманского гипербазитового массива // Руды и металлы. 2010. № 6. С. 32–36.

Ляпина М.И., Юдинцев С.В. Исследование природных циркон-ксенотимовых комплексов для оценки устойчивости форм актинидных отходов // Научные основы обращения с ядерными отходами. XXII : материалы симп. Научно-исследовательского общества. 1999. Вып. 56. С. 21–24.

Малич К.Н., Ефимов А.А., Ронкин Ю.Л. Архейский U-Pb-изотопный возраст циркона дунитов Нижне-Тагильского массива (Платиноносный пояс Урала) // Геохимия. 2009. Т. 427, № 1. С. 101–105.

Объяснительная записка. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. 2-е издание. Серия Курильская. Лист К-55-III (Малокурильское) / авт.-сост. Ю.В. Рыбак-Франко, В.Г. Гальверсен, В.В. Удодов. СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2006. 157 с.

Пугачева Е.Е. Внутренняя деформационная структура Шаманского гипербазитового массива // Актуальные вопросы геологии Сибири. Томск : Томский госуниверситет, 1988. С. 122–123.

Пугачева Е.Е. Петрология гипербазитов Шаманского массива (Среднеивитимская горная страна) : дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск : Томский госуниверситет, 1996. 334 с.

Сколотнев С.Г., Бельтнев В.Е., Лепехина Е.Н., Ипатьева И.С. Молодые и древние цирконы из пород океанической литосферы в Центральной Атлантике, геотектонические следствия // Геология морей и океанов : материалы 18-й Междунар. науч. конф. по морской геологии. М. : ГЕОС, 2009. Вып. 5. С. 251–255.

Ферштатер Г.Б., Краснобаев А.А., Беа Ф., Монтеро П., Левин В.Я., Холоднов В.В. Изотопно-геохимические особенности и возраст цирконов из дунитов уральских массивов платиноносного типа, петрогенетические следствия // Петрология. 2009. Т. 17, № 5. С. 539–558.

Чернышов А.И. Петроструктурный анализ и петрология ультрамафитов различных формационных типов : дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Новосибирск : Институт геологии и минералогии СО РАН, 1999. 420 с.

Чернышов А.И., Лоскутов И.Ю., Пугачева Е.Е. Прогнозная оценка хромитоносности ультрамафитов Байкало-Муйского офиолитового пояса, Северо-Восточное Прибайкалье // Руды и металлы. 2020. № 1. С. 12–21.

Шарков Е.В., Беляцкий Б.В., Богина М.М. и др. Кристаллогенезис и возраст циркона из щелочных и мафитовых пород Элетозерского комплекса Северной Карелии // Петрология. 2015. Т. 23, № 3. С. 285–307.

Rehman H.U., Kobayashi K., Tatsuki Tsujimori T. et al. Ion microprobe U-Th-Pb geochronology and study of micro-inclusions in zircon from the Himalayan high- and ultrahigh-pressure eclogites, Kaghan Valley of Pakistan // Journal of Asian Earth Sciences. 2013. V. 63, № 15. P. 179–196.

Oh C.W., Seo J., Choi S.G., Rajesh V.J., Lee J.H. U-Pb SHRIMP zircon geochronology, petrogenesis, and tectonic setting of the Neoproterozoic Baekdong ultramafic rocks in the Hongseong Collision Belt, South Korea // Lithos. 2012. V. 128–131. P. 100–112.

Schuth S., Gornyy V.I., Berndt J., Shevchenko S.S., Sergeev S.A., Karpuzov A.F., Mansfeldt T. Early Proterozoic U-Pb Zircon Ages from Basement Gneiss at the Solovetsky Archipelago, White Sea, Russia // International Journal of Geosciences. 2012. V. 3, № 2. P. 289–296.

Авторы:

Леснов Феликс Петрович, доктор геолого-минералогических наук, академик РАН, ведущий научный сотрудник, лаборатория геодинамики и магматизма, Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: felix@igm.nsc.ru; lesnovfp@list.ru

Королюк Владимир Николаевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория рентгеноспектральных методов исследований, Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: camebax@igm.nsc.ru

Geosphere Research, 2021, 3, 56–66. DOI: 10.17223/25421379/20/4

F.P. Lesnov, V.N. Koroliuk

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

MINERALOGY OF SOLID-PHASE MICROINCLUSIONS IN ZIRCONS FROM RESTITOTGENIC ULTRAMAFIC ROCKS OF THE SHAMAN MASSIF (EASTERN TRANSBAIKALIA) IN CONNECTION WITH THE PROBLEM OF THEIR U-Pb ISOTOPE DATING

To carry out U-Pb isotope dating of relict zircons, 31 grains were isolated from a composite sample of relictogenic ultramafic rocks of the Shaman massif (Eastern Transbaikalia) weighing about 4 kg. All of them were characterized by a rounded shape, rough surface and micro-fracturing, a very low intensity of cathodoluminescent glow up to its complete absence, disturbed oscillatory zoning, as well as very wide variations in the isotopic age (3050–502 Ma). The study of the entire collection of zircons by the electron probe method showed that 20 of them contain suitable size (from the first microns to 10 μm , in some cases – up to 100 μm) for the analysis by this method of morphologically different microinclusions of minerals that are not characteristic of ultramafic restites (rel. %): quartz (52.3), mica (15.2), chlorite (13), calcite (6.6), plagioclase (andesine) (4.3), rutile (4.3), xenotime (4.3). The chemical composition of minerals from microinclusions and their phase composition were studied based on the results of 68 analyzes performed by the above method.

Quartz microinclusions were predominantly irregular, sub-isometric, or vein-like; segregations of other minerals sometimes had crystallographic faceting. Some microimpurities of quartz were in the form of linear-streaky accumulations or epitaxial intergrowths located on the rounded surface of zircon grains. Microinclusions were located both in the inner and outer zones of the zircon grains. Studies of the composition and properties of minerals from microimpurities allowed us to conclude that they are of epigenetic nature. Their formation was due to the infiltration of fluids released by later granitoid melts. Fluids introduced into ultramafic rocks and relict zircons in them, both some mineral-forming elements and trace elements, such as REE, U, Th and others, which were deposited in microimpurities and other deformation defects of zircon grains. The uneven distribution of these impurities has led to the geochemical heterogeneity of zircons. The U introduced in this case caused the disturbance of its initial balance with the radiogenic Pb isotopes in zircons, which is supposed to be one of the reasons for the observed wide variations in the values of their isotopic age.

Keywords: zircon, microinclusions, epigenetic minerals, restitogenic ultramafic rocks, Shaman massif, Eastern Transbaikalian region

References

- Aranovich L.Ya., Bortnikov N.S., Borisov A.A. Oceanic Zircon as a Petrogenetic Indicator // *Russian Geology and Geophysics*. 2020. V. 61. Iss. 5–6, pp. 559–570.
- Badanina I.Yu., Malich K.N. *Polikhronnij vozrast tsirkonov v dunitakh iz Kondjorskogo massiva (Aldanskaja provintsija, Rossia)* [Polychronous age of zircons in dunites from the Konder massif (Aldan province, Russia)] // *Geochronometricheskie isotopnye sistemy, metody ikh izucheniya, khronologiya geologicheskikh processov. Materialy konferentsii* [Geochronometric isotope systems, methods of their study, chronology of geological processes. Conference material]. Moscow: IGEM RAN. 2012, pp. 49–52. In Russian
- Bortnikov N.S., Sharkov E.V., Bogatkov O.A., Zinger T.F., Lepekhina E.N., Antonov A.V., Sergeev S.A. Finds of young and ancient zircons in gabbros of the Markov Deep, Mid-Atlantic Ridge, 5°54'–5°02.2' N (Results of SHRIMP-II U-Pb Dating): Implication for deep geodynamics of modern oceans // *Doklady Earth Sciences*. V. 421. Iss. 2. pp. 859–866.
- Goncharenko A.I. *Deformatsiya i petrostrukturnaya evolyutsiya a'lpinotipnykh giperbazitov* [Deformation and petrostructural evolution of alpine-type hyperbasites]. Tomsk: Tomsk State University. 1989. 400 p. In Russian
- Dolgushin S.S., Zhabin V.V., Loskutov I.Yu., Sadur O.G. *Perspektivy sozdaniya bazy khromovogo syr'ya Sibiri (v predelakh Sibirskogo federal'nogo okruga)* [Prospects for creating a base of chrome raw materials in Siberia (within the Siberian Federal District)]. Novosibirsk: SNIIGiMS. 2019. 239 p. In Russian
- Ibragimova E.K., Radkov A.V., Molchanov A.V., Shatova N.V., Shatov V.V., Lepekhina E.N., Antonov A.V., Tolmacheva E.V., Soloviev O.L., Terekhov A.V., Horokhorina E.I. *Rezultaty U-Pb (SHRIMP II) datirovaniya tsirkonov iz dunitov massiva Inagli (Aldanckiy schit) i problema genezisa kontsentriruyemykh kompleksov* [Results of U-Pb (SHRIMP II) dating of zircons from dunites of the Inagli massif (Aldan shield) and the problem of the genesis of concentric-zonal complexes] // *Regional'naya geologiya i metallogeniya* [Regional Geology and Metallogeny]. 2015. V. 62. pp. 64–78. In Russian
- Kostitsyn Yu.A., Belousova E.A., Silant'ev S.A., Bortnikov N.S., Anosova M.O. Modern problems of geochemical and U–Pb geochronological studies of zircon in oceanic rocks // *Geochemistry International*. 2015. V. 53, Iss. 9. pp. 759–785.
- Kulchitskaya A.A., Gerasimets I.N., Vishnevsky A.A., Belsky V.N. *Mineral'nye vklucheniya v kristallakh tsirkona iz Velikovykovskogo sienitovogo massiva (Ukrainskij schit)* [Mineral inclusions in zircon crystals from the Velikovykovsky syenite massif (Ukrainian shield)] // *Mineralogicheskij jurnal* [Mineralogical journal]. 2019. V. 41. No 2, pp. 34–44. In Russian
- Lesnov F.P. Rare Earth Elements in Ultramafic and Mafic Rocks and their Minerals. Main types rocks. Rock-forming minerals. Taylor & Francis Group, London, UK. CRC Press/Balkema. Leiden. The Netherlands. 2010. 580 p.
- Lesnov F.P. Petrology of Polygenic Mafic-Ultramafic Massifs of the East Sakhalin Ophiolite Association. Taylor & Francis Group, London, UK. CRC Press/Balkema. Leiden. The Netherlands. 2017. 300 p.
- Lesnov F.P. *Izotopnyy vozrast tsirkonov iz ul'tramafitov Shamanskogo massiva (Vostochnoe Zabaykal'e)* [Isotope age of zircons from ultramafic rocks of the Shaman massif (Eastern Transbaikalia)] // *Metody i geologicheskie rezul'taty izucheniya izotopnykh geokhronometricheskikh sistem mineralov i porod* [Methods and geological results of studying isotopic geochronometric systems of minerals and rocks]. Moscow: IGEM RAN. 2018a. pp. 191–193. In Russian
- Lesnov F.P. U-Pb isotope dating of zircons from ultramafic restites of the Shamansky massif (Eastern Transbaikalia) // *Geosfernie issledovaniya* [Geosphere research]. 2018b. No 1. pp. 6–16. In Russian
- Lesnov F.P. *Arkheo-proterozoyzkie tsirkony iz ul'tramafitovykh restitov Shamanskogo massiva (Vostochnoe Zabaykal'e)* [Archean-Proterozoic zircons from ultramafic restites of the Shaman massif and their petrogenetic significance (Eastern Transbaikalia)] // *Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentral'noaziatskogo skladchatogo pojasa: ot okeana k kontinentu* [Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian fold belt: from ocean to continent]. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS. 2019a. pp. 157–159. In Russian
- Lesnov F.P. *Petrologiya Shamanskogo ul'tramafitovogo massiva (Vostochnoe Zabaykal'e, Rossia)* [Petrology of the Shaman ultramafic massif (Eastern Transbaikalia, Russia)]. Saarbrücken: Lambert. 2019b. 96 p. In Russian
- Lesnov F.P., Korolyuk V.N. Composition of microinclusions in zircons from rocks of the Berezovsky mafic-ultramafic massif (East Sakhalin ophiolite association) // *Geosfernie issledovaniya* [Geosphere research]. 2019. No 3. pp. 35–41. In Russian
- Lesnov F.P., Chernyshov A.I., Pugacheva E.E. *Geochemiya redkikh, redkozemel'nykh i platinovykh elementov v porodakh Shamanskogo ul'tramafitovogo massiva (Vostochnoe Zabaykal'e)* [Geochemistry of rare, rare-earth and platinum elements in the rocks of the Shaman ultramafic massif (Eastern Transbaikalia)] // *Litosfera*. 2016. No 4. pp. 30–53. In Russian
- Lesnov F.P., Kapitonov I.N., Sergeev S.A. Lu–Hf isotope systematics of relict zircons from restitogenic ultramafic rocks of the Shaman massif (Eastern Transbaikalia) // *Geosfernie issledovaniya* [Geosphere research]. 2019. No 3, pp. 42–49. In Russian
- Lesnov F.P., Galversen V.G., Tsimbalist V.G., Titov A.T. The first data on U–Pb isotopic dating and original platinum content of the Berezovskii polygenic mafic-ultramafic massif (Sakhalin Island) // *Doklady Earth Sciences*. 2010. V. 433. pp. 1104–1107.
- Lesnov F.P., Palesskiy S.V., Nikolaeva I.V., Kozmenko O.A., Kuchkin A.M., Korolyuk V.N. *Detal'nye mineralo-geochemicheskie issledovaniya krupnogo ksenolita shpinelevykh lertsolitov iz schelochnykh bazal'tov paleovulkana Shavaryn-Tsaram (Mongolia)* [Detailed mineralogical and geochemical studies of a large xenolith of spinel lherzolites from alkaline basalts of the Shavaryn Tsaram paleovolcano (Mongolia)] // *Geochemistry International*. 2009. No 1. pp. 18–40.

Loskutov I.Yu., Asoskov V.M. *Otsenka potentsial'noj khromitonosnosti Shamanskogo giperbazitovogo massiva* [Assessment of the potential chromite content of the Shamanskiy hyperbasite massif] // *Rudy i metally* [Ores and metals]. 2010. No 6. pp. 32–36. In Russian.

Lyapina M.I., Yudinsev S.V. *Issledovanie prirodnykh tsirkon-ksenotimovykh kompleksov dlja otsenki ustoychivosti form aktinidnykh otkhodov* [Investigation of natural zircon-xenotime complexes for assessing the stability of forms of actinide waste] // *Nauchnye osnovy obrascheniya s s jadernymi otkhodami. XXII* [Scientific bases of nuclear waste management. XXII. Materials of the symposium of the Scientific Research Society]. 1999. Iss. 56. pp. 21–24. In Russian

Malich K.N., Efimov A.A., Ronkin Yu.L. Archean U-Pb isotope age of zircon in dunites of the Nizhne-Tagil massif (Platinum-bearing belt of the Urals) // *Doklady Earth Sciences*. 2009. V. 427. Iss. 1. pp. 851–855.

Objasnitel'naya zapiska (2006). *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoj Federatsii masshtaba 1:200 000. 2-e izdanie. Seriya Kuril'skaja. List K-55-III (Malokuril'skoe). Avtory-sostaviteli; Yu.V. Rybak-Franko, V.G. Gal'versen, V.V. Udodov* [Explanatory note for State geological map of the Russian Federation at a scale of 1: 200 000. 2nd edition. Kuril series. Sheet K-55-III (Malokuril'skoe). Authors-compilers Yu.V. Rybak-Franko, V.G. Gal'versen, V.V. Udodov]. St. Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory. 2006. 157 p. In Russian.

Pugacheva E.E. *Vnutrennaja deformatsionnaja struktura Shamanskogo giperbazitovogo massiva* [Internal deformation structure of the Shaman hyperbasite massif] // *Aktual'nye problem geologii Sibiri* [Actual problems of geology of Siberia]. Tomsk: Tomsk State University. 1988. pp. 122–123. In Russian

Pugacheva E.E. *Petrologija giperbazitov Shamanskogo massiva (Srednevitimskaja gornaja strana)* [Petrology of hyperbasites of the Shaman massif (Middle Vitim mountainous country)] // *Avtoref. dis. kand. geol.-min. nauk.* Tomsk: Tomsk State University. 1996. 334 p. In Russian

Skolotnev S.G., Beltenev V.E., Lepekhina E.N., Ipatieva I.S. *Molodye i drevnie tsirkony iz porod okeanicheskoy litosfery v Tsentral'noj Atlantike, geotektonicheskie sledstviya* [Young and ancient zircons from rocks of the oceanic lithosphere in the Central Atlantic, geotectonic consequences] // *Geologija morej i okeanov. Materialy 18-oj mejdunarodnoj konferentsii po morskoy geologii* [Geology of seas and oceans. Materials of the 18th International Scientific Conference on Marine Geology]. Moscow: GEOS. 2009. Is. 5. pp. 251–255. In Russian

Fershtater G.B., Krasnobaev A.A., Bea F., Montero P., Levin V.Ya., Kholodnov V.V. Isotope-geochemical features and age of zircons from dunites of the Ural massifs of platinum-bearing type, petrogenetic consequences // *Petrology*. 2009. V. 17. No 5. pp. 503–520.

Chernyshov A.I. *Petrostrukturnyj analiz i petrologija ul'tramafitov razlichnykh formatsionnykh tipov* [Petrostructural analysis and petrology of ultramafic rocks of various formational types]. Avtoref. dis. dokt. geol.-min. nauk.. Novosibirsk: Institute of Geology and Mineralogy SB RAS. 1999. 420 p. In Russian

Chernyshov A.I., Loskutov I.Yu., Pugacheva E.E. *Prognoznaja otsenka khromitonosnosti ul'tramafitov Bajkalo-Mujskogo ofiolitovogo pojasa, Severo-Vostochnoe Pribajkal'e* [Predictive assessment of chromite content of ultramafic rocks of the Baikal-Muya ophiolite belt, North-Eastern Baikal region] // *Rudy i metally* [Ores and metals]. 2020. No 1. pp. 12–21. In Russian

Sharkov E.V., Belyatskiy B.V., Bogina M.M. et al. Genesis and age of zircon from alkaline and mafic rocks of the El'etozero complex of North Karelia // *Petrology*. 2015. V. 23. No 2, pp. 285–307.

Rehman H.U., Kobayashi K., Tatsuki Tsujimori T. et al. Ion microprobe U–Th–Pb geochronology and study of micro-inclusions in zircon from the Himalayan high- and ultrahigh-pressure eclogites, Kaghan Valley of Pakistan // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2013. V. 63. No 15, pp. 179–196.

Oh C.W., Seo J., Choi S.G., Rajesh V.J., Lee J.H. U-Pb SHRIMP zircon geochronology, petrogenesis, and tectonic setting of the Neoproterozoic Baekdong ultramafic rocks in the Hongseong Collision Belt, South Korea // *Lithos*. 2012. V. 128–131, pp. 100–112.

Schuth S., Gornyy V.I., Berndt J., Shevchenko S.S., Sergeev S.A., Karpuzov A.F., Mansfeldt T. Early Proterozoic U-Pb Zircon Ages from Basement Gneiss at the Solovetsky Archipelago, White Sea, Russia // *International Journal of Geosciences*. 2012. V. 3. No 2, pp. 289–296.

Author's:

Lesnov Felix P., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Academician RANS, Leading Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, laboratory of geodynamics and magmatism, Novosibirsk, Russia.

E-mail: felix@igm.nsc.ru; lesnovfp@list.ru

Koroliuk Vladimir N., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, laboratory of X-ray spectral research methods, Novosibirsk, Russia.

E-mail: camebax@igm.nsc.ru