

Опτικο-спекτροσκοπические и изотопно-геохимические характеристики цирконов алмазодносных россыпей Якутии как индикаторов коренных источников алмазов

А. М. Агашев^{1,4}, М. В. Червяковская², С. Л. Вотяков², Р. Ю. Желонкин³, В. С. Червяковский²,
Е. А. Панкрушина², А. Л. Земнухов³, Н. П. Похиленко¹

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3

²Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург,
ул. Академика Вонсовского, 15, e-mail: zaitseva.mv1991@gmail.com

³АО Алмазы Анабара, 677000, г. Якутск, ул. Кирова, 18

⁴АК АПРОСА ПАО, 678175, г. Мирный, ул. Ленина, 6

Поступила в редакцию 21.12.2023 г., принята к печати 05.02.2024 г.

Объект исследования. Зерна циркона из алмазных россыпей рр. Молодо и Эбелях Якутской Арктики. **Цель.** Исследование индикаторных характеристик циркона для определения возраста коренных источников алмазов и путей их миграции в россыпи; анализ оптико-спекτροσκοπических и изотопно-геохимических параметров зерен циркона, их микропримесного, U-Pb и Lu-Hf изотопного состава. **Материалы и методы.** ЛА-ИСП-МС анализ U-Pb изотопного и микроэлементного состава циркона проведен на масс-спекτροметре NexION 300S с приставкой NWR 213, анализ Lu-Hf изотопной системы – на масс-спекτροметре Neptune Plus с приставкой NWR 213, размещенных в помещении класса чистоты 7 ИСО в ЦКП “Геоаналитик” (ИГТ УрО РАН, г. Екатеринбург). Спектры КРС получены с использованием конфокального спекτροметра LabRAM HR800 Evolution, спектры КЛ – на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM6390LV, оборудованном приставкой Horiba H-CLUE iHR500. **Результаты.** Определены локальные оптико-спекτροσκοπические характеристики (спектры комбинационного рассеяния света и католуминесценции) зерен циркона, что позволило обосновать вывод об их высокой кристалличности и гомогенности (монохронности), а также провести выбор международных стандартов циркона с близкими характеристиками для использования при ЛА-ИСП-МС-анализе для обеспечения сходных условий испарения вещества и параметров фракционирования элементов U и Pb. В работе приведены ЛА-ИСП-МС-данные микропримесного, U-Pb и Lu-Hf изотопного состава зерен цирконов из алмазных россыпей, значения дозы их автооблучения. **Выводы.** Полученные U-Pb-датировки помогают воссоздать историю, характер и последовательность проявления кимберлитового магматизма, тектонических процессов и путей миграции кимберлитового материала и алмазов на Сибирском кратоне, в рамках Якутской кимберлитовой провинции.

Ключевые слова: лазерная абляция, зерна циркона, возраст U-Pb, изотопный состав Lu-Hf, спектры комбинационного рассеяния света, католуминесценция

Источник финансирования

Результаты получены в ЦКП “Геоаналитик” ИГТ УрО РАН в рамках госзадания № 123011800012-9. Полевые работы проведены по государственному заданию ИГМ СО РАН (№ 122041400157-9)

Optical-spectroscopic and isotope-geochemical characteristics of zircons from diamond-bearing placers in Yakutia as indicators of diamond ore bodies

Aleksey M. Agashev^{1,4}, Maria V. Chervyakovskaya², Sergei L. Votyakov², Roman Yu. Zhelonkin³,
Vasily S. Chervyakovskiy², Elizaveta A. Pankrushina², Aleksey L. Zemnukhov³, Nikolai P. Pokhilenko¹

Для цитирования: Агашев А.М., Червяковская М.В., Вотяков С.Л., Желонкин Р.Ю., Червяковский В.С., Панкрушина Е.А., Земнухов А.Л., Похиленко Н.П. (2024) Оптико-спекτροσκοπические и изотопно-геохимические характеристики цирконов алмазодносных россыпей Якутии как индикаторов коренных источников алмазов. *Литосфера*, 24(2), 284-299. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2024-24-2-284-299>

For citation: Agashev A.M., Chervyakovskaya M.V., Votyakov S.L., Zhelonkin R.Yu., Chervyakovskiy V.S., Pankrushina E.A., Zemnukhov A.L., Pokhilenko N.P. (2024) Optical-spectroscopic and isotope-geochemical characteristics of zircons from diamond-bearing placers in Yakutia as indicators of diamond ore bodies. *Lithosphere (Russia)*, 24(2), 284-299. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2024-24-2-284-299>

© А.М. Агашев, М.В. Червяковская, С.Л. Вотяков, Р.Ю. Желонкин, В.С. Червяковский, Е.А. Панкрушина, А.Л. Земнухов, Н.П. Похиленко, 2024

¹V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, 3 Academician Koptyug av., Novosibirsk 630090, Russia
²A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st., Ekaterinburg 620110, Russia,
e-mail: zaitseva.mv1991@gmail.com

³JSC Almazny Anabara, 18 Kirov st., Yakutsk 677000, Russia

⁴AK ALROSA PJSC, 6 Lenin st., Mirny 678175, Russia

Received 21.12.2023, accepted 05.02.2024

Research subject. Zircon grains from diamond placers of the Molodo and Ebelyakh rivers of the Yakut Arctic. **Aim.** To study the indicator characteristics of zircon to determine sources of diamonds and ways of their transfer to placers; to analyze optical-spectroscopic and isotope-geochemical parameters of zircon grains, their microelemental, U-Pb, and Lu-Hf isotope composition. **Materials and methods.** A LA-ICP-MS analysis of the U-Pb isotopic and trace element composition of zircon was carried out using a NexION 300S mass spectrometer with an NWR 213 attachment. An analysis of the Lu-Hf isotope system was carried out using a Neptune Plus mass spectrometer with an NWR 213 attachment, located in a room of cleanliness class 7 ISO at the Geoanalitik Center for Collective Use (IGG Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg). Raman spectra were obtained using a LabRAM HR800 Evolution confocal spectrometer. CL spectra were obtained using a Jeol JSM6390LV scanning electron microscope equipped with a Horiba H-CLUE iHR500 attachment. **Results.** The local optical spectroscopic characteristics (Raman spectra and catholuminescence) of zircon grains were established, which made it possible to substantiate the conclusion about their high crystallinity and homogeneity (monochrony), as well as to select international zircon standards with similar characteristics for use in LA-ICP-MS analysis to ensure similar conditions for evaporation of the substance and fractionation parameters of the U and Pb elements. LA-ICP-MS data on the microimpurity, U-Pb and Lu-Hf isotopic composition of zircon grains from diamond placers, as well as the dose values of their self-irradiation, are presented. **Conclusions.** The obtained U-Pb dating contributes to reconstructing a more precise history, character, and sequence of manifestation of kimberlite magmatism, tectonic processes, and migration routes of kimberlite material and diamonds across the Siberian craton, within the Yakut kimberlite province.

Keywords: laser ablation, zircon grains, U-Pb age, Lu-Hf isotopic composition, Raman spectra, catholuminescence

Funding information

The research was supported by the state assignment of the “Geoanalitik” shared research facilities of IGG UB RAS (No. 123011800012-9). Field work was carried out according to the state assignment of the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (No. 122041400157-9)

Acknowledgements

The authors express their gratitude to JSC Almazny Anabara for the materials provided.

ВВЕДЕНИЕ

Циркон – минерал-индикатор кимберлита и основа для установления коренных источников алмаза. Хорошо известны работы о контейнерной роли цирконов для микровключений алмазов (Соболев и др., 1994), позволяющей рассматривать их как надежные спутники алмаза в кимберлитах. В работах (Краснобаев, 1986; Краснобаев и др., 2003) показана уникальность минералого-геохимических и спектроскопических параметров цирконов сибирской, архангельской и тиманской алмазоносных провинций. Результаты спектроскопии привлекались для обоснования “цирконового метода” при решении дискуссионного вопроса о коренных источниках алмазов, что открывало новые возможности при прогнозно-поисковых работах. В работе (Краснобаев и др., 2003) детально проанализированы люминесцентные свойства цирконов из алмазоносных осадочных комплексов Урала в связи с проблемой их коренных источников. Известно, что в россыпях Урала многие годы ведется промышленная добыча алмазов, но до сих пор неизвестны их коренные источники, и все попытки решить эту проблему до сих пор не дали положительных

результатов. Для реализации новых подходов при поисках алмазов авторами настоящей работы привлечена индикаторная информация по рентгено- и термостимулированной люминесценции циркона-спутника алмаза, полученная с использованием объемных (интегральных) методик, основанных на анализе значимых по массе (более 10 мг) навесок относительно гомогенных зерен циркона. Следует отметить, что цирконы, как и другие минералы-индикаторы кимберлита, полигенны; зерна могут различаться условиями посткристаллизационной эволюции, степенью механической и химической абразии в аллювии, и их сонахождение с алмазами в россыпях не несет прямой информации о коренных источниках алмазов и тем более уровне их алмазоносности. Факт обнаружения цирконов в алмазоносных комплексах без дополнительных специальных исследований не дает возможности сделать какие-либо генетические выводы. Решение данной проблемы для исследователей заключается в детальном комплексном изучении свойств цирконов на локальном уровне, определении микроэлементного состава и изотопном датировании с использованием современных микроаналитических методик для установления природы этих цирконов и уста-

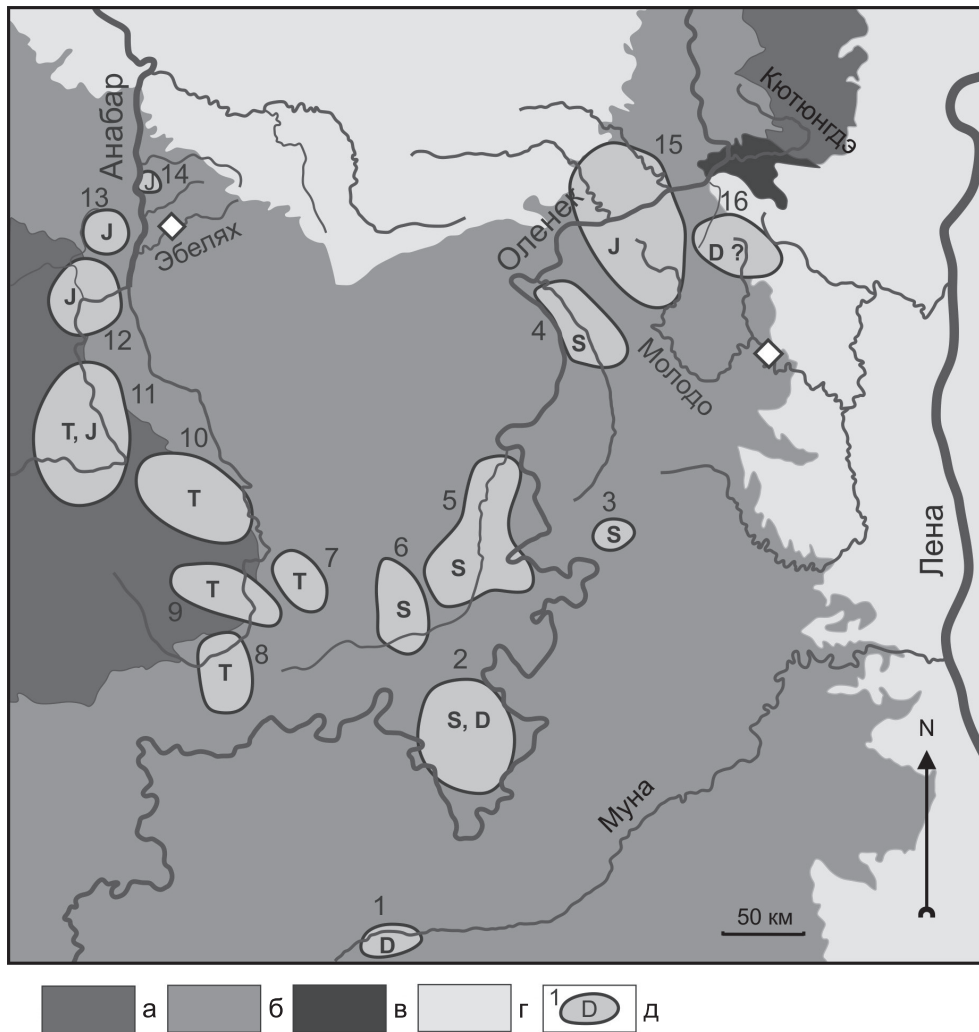


Рис. 1. Карта схема севера ЯАП.

а–г – возраст пород: а – докембрийский, б – кембрийский, в – каменноугольные отложения Кютюнгинского грабена с алмазодержащей Нючча-Юрегинской свитой в основании, г – пермь–мел; д – кимберлитовые поля силурийского (S), девонского (D), триасового (T) и юрского (J) возрастов: 1 – Верхне-Мунское, 2 – Чомурдахское, 3 – Моторчунское, 4 – Мерчимденское, 5 – Восточно-Укукитское, 6 – Западно-Укукитское, 7 – Лучаканское, 8 – Куранахское, 9 – Берегиндинское, 10 – Дюкенское, 11 – Ары-Мастахское, 12 – Старореченское, 13 – Орто-Ыаргынское, 14 – Эбеляхское, 15 – Молодо-Куойкское, 16 – Толоупское. Ромбы – места отбора цирконов из алмазных россыпей рр. Молодо и Эбелях.

Fig. 1. Map diagram of the north of the Yakut diamondiferous province.

а–г – age of rocks: а – Precambrian, б – Cambrian, в – coal deposits of the Kyutyungdinsky graben with the diamond-bearing Nyuchcha-Yureginsky formation at the base, г – Permian-Cretaceous; д – kimberlite fields of Silurian (S), Devonian (D), Triassic (T) and Jurassic (J) ages: 1 – Verkhne-Munskoe, 2 – Chomurdakhskoe, 3 – Motorchunskoe, 4 – Merchimdenskoe, 5 – East-Ukukitskoe, 6 – West Ukukitskoe, 7 – Luchakanskoe, 8 – Kuranakhskoe, 9 – Beregindinskoe, 10 – Dukenskoe, 11 – Ary-Mastakhskoe, 12 – Starorechenskoe, 13 – Orto-Yargynskoe, 14 – Ebelyakhskoe, 15 – Molodo-Kuoikskoe, 16 – Toluopskoe. Rhombus for sampling zircons from diamond placers of the Molodo and Ebelyakh rivers.

новления их кимберлитового (или иного) происхождения.

Кимберлитовый магматизм на Сибирской платформе представлен четырьмя этапами (рис. 1), соответствующими силурийскому, девонскому, триасовому и юрскому возрастам (Дэвис и др., 1980; Agashev et al., 2016, 2020; Sun et al., 2018). Все промышленно значимые кимберлиты имеют девон-

ский возраст и расположены на юге Якутской алмазодержащей провинции (ЯАП). Уровень алмазодержимости постдевонских кимберлитовых тел северо-востока Сибирской платформы крайне низкий, и они не могут быть основными поставщиками алмазов в многочисленные уникальные древние и современные россыпи. Исключение составляет посттрапповая (раннемезозойская) трубка Малокуо-

намская, расположенная в верховьях р. Малая Куо-намка (Соболев и др., 2015), имеющая околопромышленные содержания алмазов.

На арктических территориях Якутии (север Сибирской платформы) известно много россыпей с высоким содержанием алмазов. Многие из них являются объектами промышленной добычи, однако коренные источники этих алмазов до сих пор неизвестны, поэтому в настоящее время остро стоит проблема прогнозирования коренных источников алмазоносности Якутской Арктики; она актуальна как с фундаментальной, так и практической точки зрения (Larín et al., 2007a, b; Sobolev et al., 2018). Циркон – широко распространенный минерал-спутник алмазов в россыпях Якутии; в отличие от других индикаторных минералов кимберлитов он имеет высокую абразивную устойчивость и может транспортироваться вместе с алмазами на большие расстояния. Это свойство позволяет использовать циркон в качестве трассера при реконструкции путей миграции алмазов от первоисточников в современные россыпи. Датировки цирконов, ассоциированных с аллювиальными алмазами, открывают возможность определения возраста прогнозируемых первичных источников алмазов россыпей, что имеет первостепенное значение при поисках коренных источников алмазов (Соболев и др., 2015; Sobolev et al., 2018). В частности, это может локализовать поисковые работы стратиграфически, поскольку значительная часть Сибирского кратона покрыта мощными толщами осадочных формаций.

Цель работы заключается в исследовании индикаторных характеристик циркона из алмазных россыпей бассейнов рр. Молодо и Эбелях Якутской алмазоносной провинции в целях определения возраста их коренных источников и путей миграции в россыпи; анализ оптико-спектроскопических и изотопно-геохимических параметров зерен циркона, их микропримесного, U-Pb и Lu-Hf изотопного состава с использованием современных микроаналитических методик с высоким пространственным разрешением: масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и лазерной абляцией (ЛА-ИСП-МС), а также спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) и катодolumинесценции (КЛ), оценки значения дозы автооблучения, U-Pb датирование зерен, расчеты параметра $\epsilon_{\text{Hf}(t)}$ и модельного возраста источника T_{DM} .

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследованы цирконы из промышленных алмазоносных россыпей бассейнов рр. Молодо и Эбелях (всего 97 и 87 зерен соответственно) с произвольной ориентацией, стекляннопозрачные, бесцветные или со слабой розоватой или желтоватой окраской, крупные (более 1 мм), сохраняющие фрагменты исходной огранки. Зерна монтиро-

вались в блоки (“шашки”) эпоксидной смолой; пробоподготовка включала в себя шлифовку и полировку алмазными порошками крупностью 20, 5, 3 и 1 мкм.

ЛА-ИСП-МС-анализ микроэлементного состава зерен циркона проведен на масс-спектрометре NexION 300S с ЛА-приставкой NWR 213 (длина волны излучения 213 нм, плотность энергии 10.5–11.5 Дж/см², диаметр кратера 50 мкм, частота повторения импульсов 10 Гц) (Червяковская и др., 2022). Обработка результатов проводилась в программе GLITTER V4.4. с использованием внутреннего стандарта – содержания SiO₂ 33 мас. % в пробе циркона; в качестве внешнего первичного стандарта использовалось стандартное стекло NIST SRM 610, в качестве вторичного – NIST SRM 612; для них погрешность определения PЗЭ 1σ составляла 3.5–6.5 и 4.4–9.3% соответственно.

Анализ U-Pb изотопного состава цирконов выполнялся также на масс-спектрометре NexION 300S с приставкой NWR 213 по методике, изложенной в работе (Щапова и др., 2020). В качестве стандартов использовались международные образцы сравнения (ОС) циркона GJ-1 (Jackson et al., 2004), 91500 (Wiedenbeck et al., 2004), Plesovice (Slama et al., 2008). Обработка результатов проводилась в программе GLITTER V4.4, корректировка на общий Pb – в программе ComPbCorr, построение конкордии – в макросе Excel Isoplot v.4.15. Неопределенность единичного измерения 1σ изотопных отношений ²⁰⁶Pb/²³⁸U и ²⁰⁷Pb/²³⁵U составляла для перечисленных ОС 1.5–5 и 3–18% соответственно.

Анализ Lu-Hf изотопного состава выполнен на многоколлекторном масс-спектрометре Neptune Plus с ЛА-приставкой NWR 213 (Червяковская и др., 2021). В качестве ОС использованы GJ-1, 91500 и Plesovice; неопределенность единичного измерения 2σ изотопного отношения ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf для ОС циркона составила 0.007–0.015%.

Спектры КРС в области относительного волнового числа 900–1100 см⁻¹ получены с использованием конфокального спектрометра LabRAM HR800 Evolution с дифракционной решеткой 1800 штр/мм при возбуждении He-Ne-лазером (633 нм) вблизи тех же точек в зернах, в которых был выполнен ЛА-ИСП-МС-анализ. Сигнал КРС собирался объективами микроскопа Olympus 100× (NA = 0.9) и 50× (NA = 0.7) в геометрии 180° с пространственным разрешением ≈1 мкм.

Спектры КЛ в диапазоне 200–800 нм получены на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM6390LV, оборудованном приставкой Horiba H-CLUE iHR500, при ускоряющем напряжении 10 кВ с пространственным разрешением 1–3 мкм; нормирование спектров на функцию передачи приемного тракта не проводилось. Глубина возбуждения КЛ при использованном напряжении составляла для высококристаллических цирконов ≈5 мкм.

Анализ спектров КЛ проводился их аппроксимацией лоренцевыми контурами (программа PeakFit v.4.11).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Опико-спектроскопические характеристики зерен циркона. Спектры КРС. На спектрах цирконов из россыпей в области значений рамановского сдвига $950\text{--}1060\text{ см}^{-1}$ фиксируются две узкие интенсивные колебательные моды 975 и 1008 см^{-1} (рис. 2). В работах (Dawson, 1971; Syme, 1977; Kolesov, 2001; Palenik, 2003) показано, что на спектрах высококристаллических цирконов проявляется ряд мод разной интенсивности при $202, 214, 225, 356, 395, 439, 975, 1008$, а также при $266, 546, 641$ и 923 см^{-1} . Авторами работ выполнена их физическая интерпретация, они обусловлены как либрационными или решеточными колебаниями, так и внутренними колебаниями SiO_4 -тетраэдров, к числу последних относятся валентные симметричные и асимметричные моды – $\nu_1(\text{SiO}_4) A_{1g}$ и $\nu_3(\text{SiO}_4) B_{1g}$ при 975 и 1008 см^{-1} (см. рис. 2). С ростом степени радиационного повреждения и метамиктизацией циркона наблюдается смещение большинства мод в низкоэнергетическую область и рост их ширины, что связано с нарушением ближнего порядка и расширением элементарной ячейки минерала. Показано,

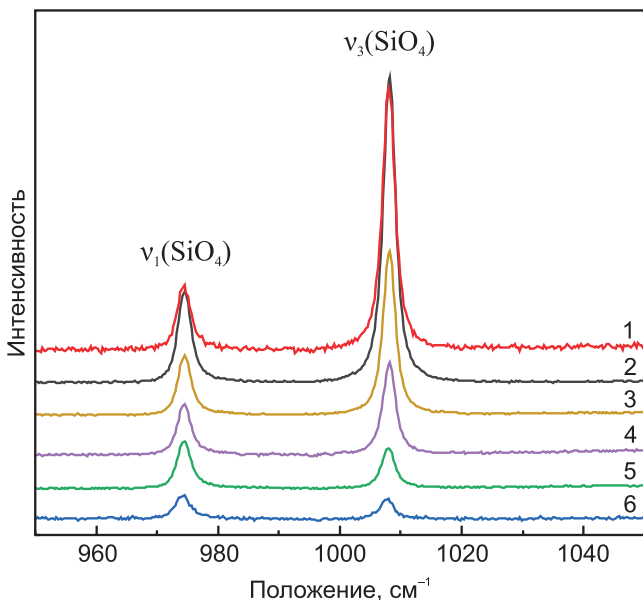


Рис. 2. Фрагменты типичных спектров КРС зерен циркона из алмазоносных россыпей рр. Молодо (1, 2, 6 – зерна 4, 1, 6) и Эбелях (3, 4, 5 – зерна 12, 11, 4).

Fig. 2. Fragments of typical Raman spectra of zircon grains from the diamond-bearing placers Molodo (1, 2, 6 – grains 4, 1, 6) and Ebelyakh (3, 4, 5 – grains 12, 11, 4).

что сдвиг и ширина колебательной моды $\nu_3(\text{SiO}_4)$ обусловлены степенью радиационных повреждений, которые отражают содержание U и зависят от возраста минерала. В цирконах, не испытывавших в процессе эволюции термического восстановления поврежденной структуры, ширина моды $\nu_3(\text{SiO}_4)$ линейно коррелирует с накопленной дозой D_α при значениях последней не выше $1.4 \cdot 10^{18}$ α -расп/г. Для циркона, испытавшего термическое восстановление структуры, по ширине моды $\nu_3(\text{SiO}_4)$ на половине ее высоты FWHM может быть определена так называемая эквивалентная доза $D_\alpha^{\text{эк}}$, которую имели бы образцы с данной шириной моды, но без термического восстановления структуры, согласно выражению $D_\alpha^{\text{эк}} = -\ln\left(\frac{A_1 - \text{FWHM}}{A_2}\right) / B$, где $A_1 = 34.96$ и $A_2 = 33.16\text{ см}^{-1}$; $B = 5.32 \cdot 10^{-19}$ α -расп/г – это эмпирические константы (Palenik et al., 2003; Váczi, Nasdala, 2017).

Для цирконов из россыпей установлено, что положение и ширина моды $\nu_3(\text{SiO}_4)$ практически не меняются по зернам и составляют $1007.7\text{--}1008.2$ и $1.92\text{--}2.5\text{ см}^{-1}$ соответственно; рассчитанное значение эквивалентной дозы $D_\alpha^{\text{эк}}$ лежит в интервале $0.007\text{--}0.04 \cdot 10^{18}$ α -расп/г (табл. 1). Все изученные зерна по значению $D_\alpha^{\text{эк}}$ могут быть отнесены к высококристаллическим (слабоповрежденным) разновидностям с низкой степенью метамиктности (низким содержанием U); пробы соответствуют начальной стадии радиационного разупорядочения структуры минерала. Наиболее близки к исследуемым образцам из россыпей международные ОС циркона 91500 и Mud Tank, что позволяет рекомендовать их для использования при ЛА-ИСП-МС-анализе циркона из россыпей бассейнов рр. Молодо и Эбелях в целях обеспечения близких условий испарения вещества и параметров фракционирования элементов U и Pb .

Спектры КЛ. Зерна циркона из россыпей интенсивно люминесцируют; интегральная яркость свечения варьируется по пробам более чем на порядок; спектры носят сложный суперпозиционный характер (рис. 3). Выделяется большое число составляющих, которые могут быть объединены в три группы широких полос в ближней УФ (A_i), сине-зеленой (B_i) и желтой областях спектра (C_i); относительные площади полос представлены в табл. 2. Полосы C_i соответствуют широко известной желтой люминесценции минерала; они имеют радиационную природу и обусловлены кислородными вакансиями и дивакансиями. Согласно работе (Краснобаев и др., 1988), полосы A_i и B_i типичны для высококристаллических цирконов; появление полос B_i в синтетических цирконах связано с входением в решетку примеси Ti . Кроме описанных широких полос, на спектрах КЛ фиксируются также узкие линии излучения примесей Dy^{3+} , Gd^{3+} и др., замещающих Zr в структуре минерала.

Таблица 1. Содержание U, Th (г/г), U-Pb-возраст (млн лет), степень его конкордантности Con (%), значение накопленной авторадикационной D_α и эквивалентной дозы $D_\alpha^{эк}$ ($\times 10^{18}$, α -расп/г), рамановский сдвиг и ширина FWHM колебательной моды $\nu_3(\text{SiO}_4)$ (cm^{-1}) для серии типичных точек зерен циркона из россыпей Молодо и Эбелях

Table 1. Contents of U, Th (ppm), U-Pb age (Ma), the degree of its concordance Con (%), the value of the accumulated autoradiation D_α and the equivalent dose $D_\alpha^{эк}$ ($\times 10^{18}$, α -dec/g), Raman shift and width of the FWHM vibrational mode $\nu_3(\text{SiO}_4)$ (cm^{-1}) for a series of typical points of zircon grains from the Molodo and Ebelyakh placers

Зерно, точка	U	Th	Возраст ¹	Con	σ	D_α (σ)	Рамановский сдвиг ² (σ)	FWHM ³ (σ)	$D_\alpha^{эк}$ (σ)
Россыпь Молодо									
1	3	1	138	61	26	0.0021(2)	1008.15(1)	1.94(3)	0.0079(1)
4	10	10	176	69	10	0.0106(5)	1008.11(7)	1.96(4)	0.009(3)
6	84	63	157	100	7	0.073(3)	1007.68(1)	2.5(2)	0.04(1)
17	26	10	177	101	11	0.024(1)	1007.92(3)	2.3(3)	0.03(2)
24	45	24	166	101	9	0.040(2)	1007.88(7)	2.4(2)	0.03(1)
Россыпь Эбелях									
2	55	25	202	100	17	0.058(4)	1007.98(2)	2.20(3)	0.0228(2)
9	15	20	177	91	20	0.0167(9)	1008.04(1)	2.04(4)	0.014(2)
19	14	4	241	100	9	0.017(1)	1008.14(9)	2.3(1)	0.028(7)
28	18	7	248	100	16	0.024(2)	1008.05(5)	2.1(1)	0.017(8)
4	14	5	235	77	12	0.018(2)	1008.14(1)	2.13(3)	0.0190(2)
11	15	6	228	98	19	0.018(2)	1008.12(2)	2.04(1)	0.0137(1)
12	8	6	193	102	40	0.0090(8)	1007.98(1)	1.92(3)	0.007(2)

Примечание. ¹Возраст по изотопному отношению $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$; ^{2,3}среднее по трем измерениям.

Note. ¹Age based on the isotope ratio $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$; ^{2,3}average of three dimensions.

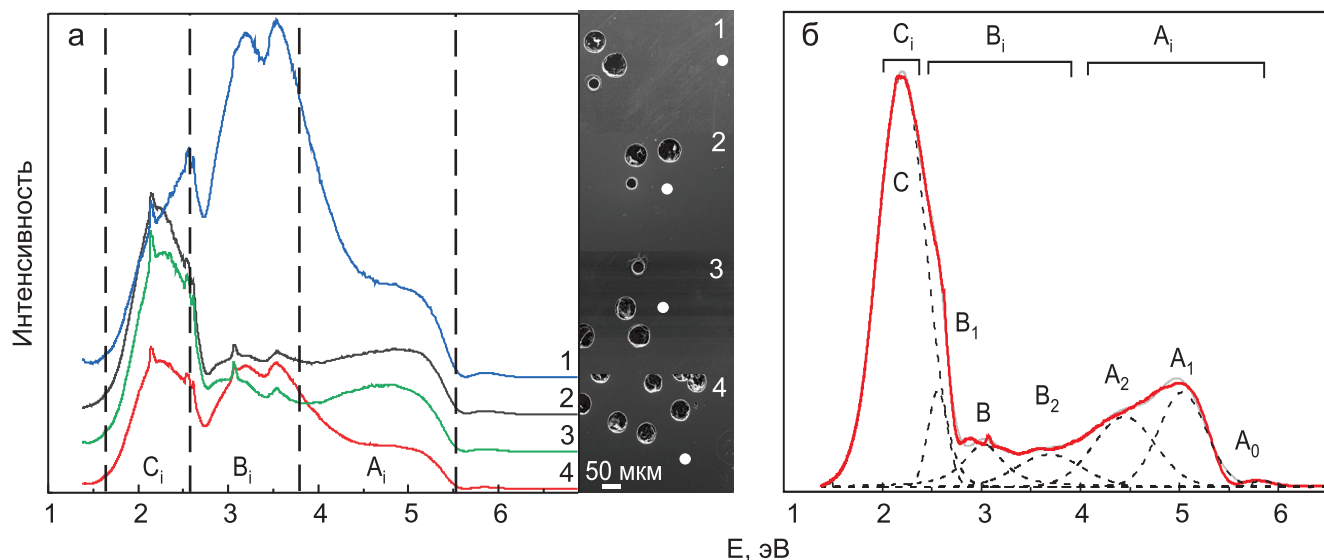


Рис. 3. Типичные спектры КЛ и BSE-изображения зерен циркона с кратерами абляции из россыпей Молодо (2, 4 – зерна 1, 4), Эбелях (1, 3 – зерна 12, 19) (а) и разложение типичного спектра ОС циркона Mud Tank на составляющие компоненты A_i - B_i - C_i (б).

Белая точка на BSE-изображении – место регистрации спектров КРС и КЛ.

Fig. 3. Typical CL spectra and BSE images of zircon grains with ablation craters from the Molodo (2, 4 – grains 1, 4), Ebelyakh (1, 3 – grains 12, 19) placers (a) and decomposition of the typical spectrum of the Mud Tank zircon reference sample into constituent components A_i - B_i - C_i (b).

The white dot in the BSE image is the location where the Raman and CL spectra were recorded.

Следуя работе (Вотьяков и др., 2022), для сопоставления зерен циркона из россыпей по люминесцентным свойствам с таковыми у ОС цирко-

на мы использовали тройную A_i - B_i - C_i диаграмму (рис. 4); на ней точки, соответствующие разным зернам из россыпей, образуют выделенную штрих-

Таблица 2. Площади полос A_i – B_i – C_i (%) на спектрах КЛ в различных аналитических точках зерен циркона из россыпей бассейнов рр. Молодо и Эбелях

Table 2. Areas of the A_i – B_i – C_i (%) on the CL spectra at various analytical points of zircon grains from the Molodo and Ebelyakh placers

Зерно, точка	Площадь полосы		
	A_i	B_i	C_i
Россыпь Молодо			
1_01	30	22	47
1_02	33	22	44
4_01	9	72	20
4_02	16	58	27
4_03	29	45	26
6	13	24	63
17	20	17	63
24_01	23	16	61
24_02	23	14	63
24_03	23	11	66
Россыпь Эбелях			
2	31	14	55
2_01	32	20	48
19_01	36	28	36
19-1_01	28	25	48
19-1_02	30	31	39
19-1_03	25	31	45
28	25	19	57
4_01	31	16	53
11_01	35	21	44
12_01	28	56	17
12_02	30	55	15

пунктиром протяженную зону II в центре. Она частично перекрывается с зоной I для ОС циркона, что может служить эмпирическим критерием выбора ОС, близкого по спектру, для ЛА-ИСП-МС-анализа: КЛ большинства исследованных цирконов из россыпей близка к таковой у ОС Temora-2 и Mud Tank; у части цирконов из россыпи р. Молодо КЛ близка к таковой у ОС GJ-1.

Таким образом, оптико-спектроскопические характеристики цирконов из россыпей позволяют обосновать выбор ОС циркона с близкими характеристиками, что может быть использовано при ЛА-ИСП-МС-анализе проб.

Изотопно-геохимические характеристики зерен циркона. Микроэлементный состав. Россыпь Молодо. Определен микроэлементный состав 20 зерен циркона (20 определений-кратеров, диаметр кратера 50 мкм). Геохимические особенности цирконов (рис. 5, 6, табл. 3) – низкие концентрации U, Th и тяжелых РЗЭ, положительная Се-аномалия, слабая (или полное отсутствие) Еu-аномалии – согласуются с мантийной природой изученных проб циркона (Belousova et al., 2002; Agashev et al., 2020); содержание тяжелых РЗЭ находится в пределах 0.3–32.3, легких РЗЭ – 0.01–2.6, U – 5.5–26.7, Th – 1.3–11.9 г/т.

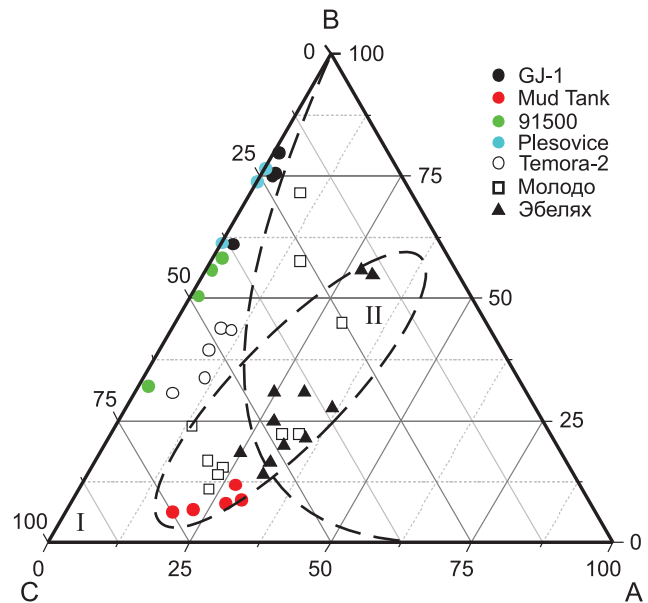


Рис. 4. Соотношение площадей полос A_i – B_i – C_i в спектрах КЛ зерен циркона из россыпей бассейнов рр. Молодо и Эбелях и международных ОС циркона.

Fig. 4. Ratio of the areas of the A_i – B_i – C_i bands in the CL spectra of zircon grains from the Molodo and Ebelyakh placers and zircon reference samples.

Россыпь Эбелях. Определен микроэлементный состав 39 зерен циркона (39 определений-кратеров, диаметр кратера 50 мкм). Геохимические особенности цирконов (см. рис. 5, 6, табл. 3) – низкие содержания U, Th и тяжелых РЗЭ, находящиеся на верхней границе кимберлитовых цирконов (Belousova et al., 2002), положительная Се-аномалия, слабая (или полное отсутствие) Еu-аномалия – также согласуются с мантийной природой изученных проб циркона. Содержание тяжелых РЗЭ находится в пределах 0.2–136, легких – 0.01–17.5, U – 5.3–166, Th – 0.5–320 г/т. Наблюдаются систематические различия в геохимии цирконов юрского и триасового возрастов россыпи р. Эбелях. Прежде всего, это повышенные содержания Ti, U и Th и высокие Th/U отношения в почти трети цирконов юрского возраста по сравнению с триасовыми (см. рис. 6). Эти цирконы также имеют содержания Ta > 3 г/т, что может свидетельствовать об их карбонатитовой природе.

U-Pb-изотопия. Диаметр кратера 50 мкм; первичный ОС – GJ-1, вторичный ОС – 91500, Plesovice. **Россыпь Молодо.** Определен U-Pb изотопный состав 97 зерен циркона. По данным U-Pb датирования (рис. 7, табл. 4), 81 зерно (81%) имеет юрский возраст (145–198 млн лет; при максимуме распределения 165 млн лет); 11 зерен (11%) – триасовый (201–239 млн лет); 1 зерно – силурийский (444 ± 13 млн лет); 1 зерно – пермский (257 ± 7 млн лет) и

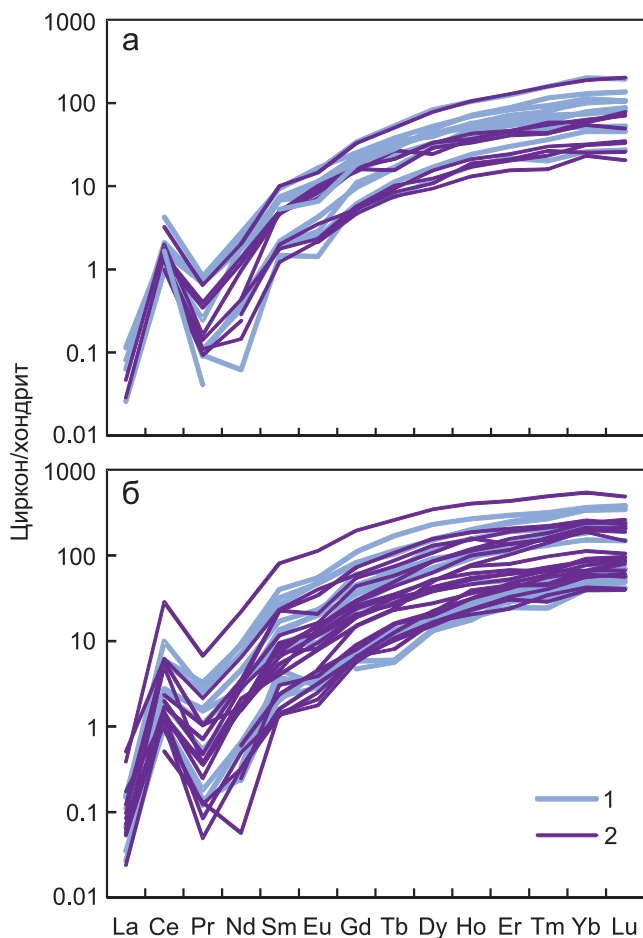


Рис. 5. Типичные распределения РЗЭ, нормированные по хондритовому резервуару, в цирконах россыпей Молодо (а) и Эбелях (б) юрского (1) и триасового (2) возраста.

Fig. 5. Typical REE distributions, normalized to the chondritic reservoir, in zircons from the Molodo (a) and Ebelyakh (б) placers of Jurassic (1) and Triassic (2) age.

3 зерна – меловой. Различий по геохимии между зернами юрского и триасового возрастов не наблюдается (см. рис. 5, 6).

Россыпь Эбелях. Определен U-Pb изотопный состав 87 зерен циркона По данным U-Pb-датирования (см. рис. 7, табл. 4), 57 зерен (66%) циркона имеют триасовый возраст (202–248 млн лет; при максимуме распределения 228 млн лет); 27 зерен (31%) – юрский возраст (146–193 млн лет); 2 зерна – пермский (258–261 млн лет); 1 зерно – протерозойский (1.7 млрд лет) (дискордантные данные составляют 36%).¹ Эти определения отличаются от получен-

¹ Появление дискордантных возрастных данных обусловлено высокой погрешностью (низкой точностью) измерения изотопного отношения $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ вследствие низкого содержания радиогенных изотопов ^{207}Pb

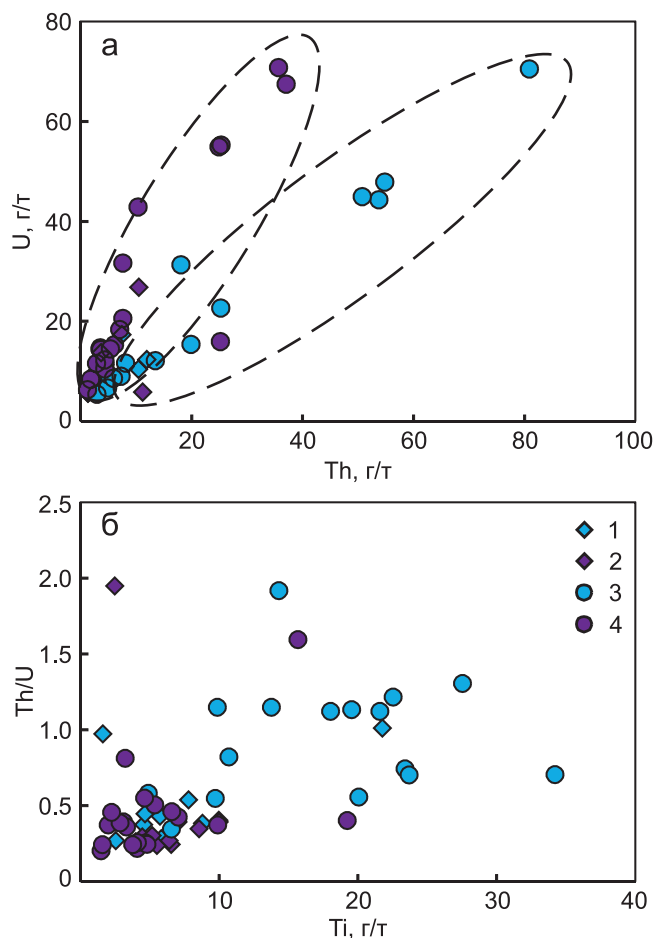


Рис. 6. Соотношение содержаний U–Th (а) и Th/U–Ti (б) в цирконах россыпей Молодо (1, 2) и Эбелях (3, 4) юрского (1, 3) и триасового (2, 4) возраста.

Fig. 6. Ratio of U–Th (a) and Th/U–Ti (б) in zircons from the Molodo (1, 2) and Ebelyakh (3, 4) placers of Jurassic (1, 3) and Triassic (2, 4) age.

ных ранее результатов по небольшой (30 зерен) выборке цирконов из нижнего течения р. Эбелях, где триасовые цирконы составляли 30% выборки (Агашев и др., 2019). Различия в геохимии цирконов разного возраста россыпи Эбелях свидетельствуют о различии в составе протокимберлитового расплава, из которого кристаллизовались цирконы, и, возможно, о карбонатитовой природе части юрских цирконов.

По содержанию U, Th и U-Pb-датировкам зерен циркона из россыпей выполнен расчет накопленной авторадикационной дозы D_α (α -расп/г)

(и ^{206}Pb), обусловленного общим низким содержанием U; для ^{207}Pb – на пределе чувствительности ЛА-ИСП-МС-метода (для ^{206}Pb – менее 1.5 г/г).

Таблица 3. Микроэлементный состав зерен циркона из россыпей рр. Молодо и Эбелях

Table 3. Trace element composition of typical zircon grains from the Molodo and Ebelyakh placers

Элемент	Россыпь Молодо, зерно, точка				Россыпь Эбелях, зерно, точка							
	2М-2_2	2М-11	2М-32	2М-33	1_9	1_19	1_22	1_31_2	2_14	3_8	3_15	3_26
Ca	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.
Sc	310	337	279	275	270	294	311	252	744	291	556	325
Ti	10.0	1.6	6.5	4.0	27.6	4.1	13.8	20	3.2	9.7	Н. о.	27
V	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0.17	Н. о.	0.174	Н. о.	Н. о.
Cr	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.
Ni	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.
Sr	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0.072	0.046	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0.133	Н. о.
Y	58	149	20	23	138.1	51.6	217	34	546	30	870	49
Nb	6.2	3.1	2.5	2.2	1	1	2	0.65	36	0.84	8.4	2.2
Mo	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0.07	Н. о.	Н. о.	0.25
La	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0.01	Н. о.	Н. о.	0.09	Н. о.	Н. о.	0.09
Ce	1.8	2.6	0.60	0.67	1.48	0.834	2.01	0.46	17	0.61	9.1	5.9
Pr	Н. о.	0.08	0.01	0.01	0.1	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0.62	Н. о.	0.66	Н. о.
Nd	0.20	1.3	0.11	0.03	1.36	0.274	Н. о.	0.26	10	Н. о.	9.8	1.2
Sm	0.75	1.4	Н. о.	0.22	1.4	0.35	1.8	0.30	12	Н. о.	13	1.7
Eu	0.51	0.87	0.12	0.08	0.7	0.26	1.2	0.24	6.3	Н. о.	8.3	0.48
Gd	3.0	6.7	0.9	1.2	7.5	1.6	12	1.5	39	0.93	55	4.7
Tb	1.0	1.9	0.27	0.27	2	0.56	2.4	0.41	9.3	0.20	14	0.74
Dy	6	20.3	2.3	2.9	15.9	4.8	29.9	4.8	85	3.2	136	6.9
Ho	2	5.7	0.72	1.0	5.1	1.7	8.5	1.2	22	0.96	34	1.8
Er	7.2	20	2.5	3.5	21.2	7.6	30.1	5.1	69	4.89	116	4.5
Tm	1.1	3.9	0.39	0.50	4	1.5	5	1.1	12	0.92	18	0.71
Yb	9.6	32	3.7	4.2	29.4	12.3	40.1	8.9	88	7.8	128	7.0
Lu	1.9	4.8	0.51	0.66	5.9	2.1	5.4	1.4	12	1.4	20	1.0
Hf	9527	7744	13081	11198	11181	9704	9435	12475	9545	12748	13864	14874
Ta	3.9	3.9	2.5	3.0	1.4	1.4	3	1.1	15	1.4	0.02	0.4
W	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.
²⁰⁶ Pb	4.7	1.3	0.78	1.1	1.4	2.1	7.1	0.33	23	0.67	Н. о.	11.02
Th	11	12	1.3	2.5	19.9	3.6	80.9	3.0	134	5.0	320	0.54
U	27	12	5.5	9.5	15.3	14.3	70.5	5.3	166	9.2	Н. о.	10
Th/U	0.39	0.97	0.24	0.26	1.31	0.25	1.15	0.56	0.81	0.55	Н. о.	0.05

Примечание. Н. о. – не обнаружено.

Note. Н. о. – not detected.

$$\text{по соотношению } D_{\alpha} = 8 \times U \left[\exp\left(\frac{t}{\tau_{238}}\right) - 1 \right] + 7 \times U \left[\exp\left(\frac{T}{\tau_{235}}\right) - 1 \right] + 6 \times \text{Th} \left[\exp\left(\frac{T}{\tau_{232}}\right) - 1 \right], \text{ где } {}^{238}\text{U},$$

²³⁵U, ²³²Th, τ_{238} , τ_{235} , τ_{232} – содержание и периоды полураспада соответствующих изотопов; T – возраст минерала (Murakami et al., 1991). Полученные данные (см. табл. 1) свидетельствуют о том, что цирконы из россыпей относятся к высококристаллическим разностям со значением $D_{\alpha} = 0.002\text{--}0.058 \cdot 10^{18}$ α-расп/г. Отмечено, что во всех зернах циркона из россыпей значения доз D_{α} и $D_{\alpha}^{\text{ЭК}}$ близки, т. е. термические преобразования структуры этих цирконов малозначимы. Корреляции значений доз D_{α} и $D_{\alpha}^{\text{ЭК}}$ со степенью дискордантности возрастных данных, оцененной как различие возрастов по изотопным отношениям ²⁰⁷Pb/²³⁵U и ²⁰⁶Pb/²⁸⁵U, не фиксируется.

В целом установлено, что датировки цирконов из россыпей Молодо и Эбелях различаются между собой, причем полученные значения согласуются с результатами, представленными в работе (Sun et al., 2018). Датировки отражают многоэтапность кимберлитового магматизма Якутии и этап юрско-го карбонатитового магматизма, зафиксированного среди источников, питавших россыпь р. Эбелях. Изученные моногенные и монокронные пробы циркона из россыпей могут быть использованы при ЛА-ИСП-МС-анализе как внутрилабораторные ОС при изучении высококристаллических проб.

Lu-Hf-изотопия. Диаметр кратера 50 мкм; ОС – GJ-1, 91500, Plesovice *Россыпь Молодо*. Определен Lu-Hf изотопный состав 15 зерен циркона (15 определений-кратеров). По изотопным отношениям ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf, ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf выполнены расчеты параметра $\epsilon_{\text{Hf}(t)}$, который составляет +4.3...+7.4 для зерен циркона юрского возраста, +5.0...+9.5 для

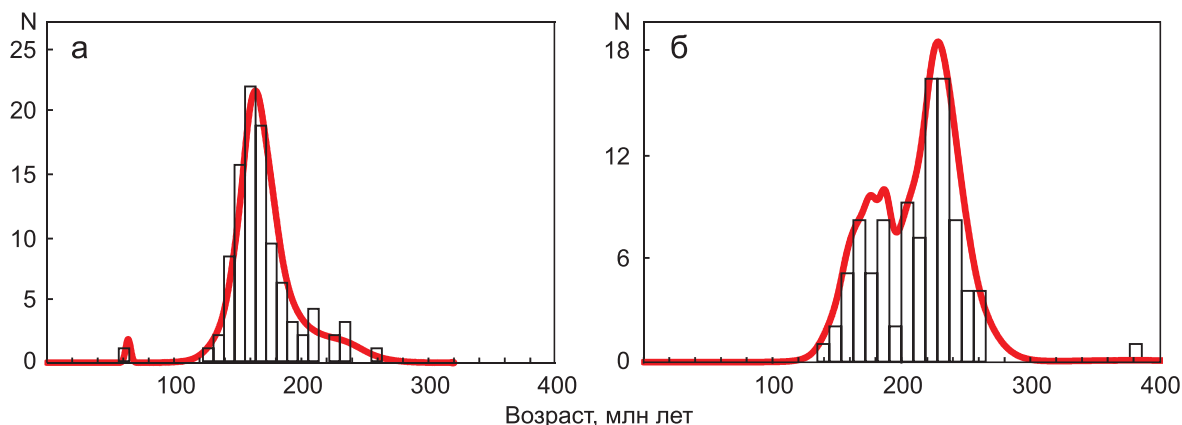


Рис. 7. Гистограммы распределения значений U/Pb-возраста зерен циркона россыпей Молодо (а) и Эбелях (б).

N – количество определений.

Fig. 7. Histograms of the distribution of U/Pb age values of zircon grains from the Molodo (a) and Ebelyakh (б) placers.

N – number of definitions.

Таблица 4. Содержание ^{206}Pb , Th, U (г/т), значения изотопных отношений $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и возраста (млн лет) зерен циркона из россыпей Молодо и Эбелях

Table 4. Contents of ^{206}Pb , Th, U (ppm), values of isotope ratios $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ and age (Ma) of zircon grains from the Molodo and Ebelyakh placers

Зерно, точка	Содержание			Изотопные отношения				Возраст, млн лет			
	^{206}Pb	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
Россыпь Молодо											
2М-1	–	–	–	0.25	0.11	0.022	0.003	228	91	138	20
2М-2_1	–	–	–	0.27	0.05	0.038	0.002	243	40	239	12
2М-2_2	–	–	–	0.30	0.03	0.041	0.001	263	23	257	7
2М-3	–	–	–	0.17	0.02	0.025	0.001	160	22	161	6
2М-4	–	–	–	0.29	0.04	0.028	0.001	255	34	176	8
2М-6	–	–	–	0.17	0.01	0.025	0.001	157	11	157	4
2М-7	–	–	–	0.26	0.04	0.024	0.001	232	35	152	8
2М-11	–	–	–	0.28	0.03	0.028	0.001	253	27	176	7
2М-12	–	–	–	0.63	0.06	0.071	0.002	496	37	444	13
2М-17	–	–	–	0.19	0.02	0.028	0.001	176	19	177	6
2М-20_1	–	–	–	0.27	0.04	0.029	0.001	244	33	184	9
2М-21	–	–	–	0.26	0.06	0.025	0.002	232	50	160	12
2М-32	–	–	–	0.23	0.09	0.033	0.002	211	72	208	15
2М-33	–	–	–	0.31	0.06	0.031	0.002	272	47	196	13
2М-46	–	–	–	0.37	0.09	0.03305	0.00255	320	64	210	16
Россыпь Эбелях											
1_1_2	1.4	4.1	12.0	0.46	0.10	0.031	0.003	385	72	195	19
1_2	7.8	27.2	63.4	0.22	0.04	0.032	0.002	201	33	202	10
1_9	1.4	16.8	12.7	0.21	0.05	0.028	0.002	195	41	177	11
1_17_1	11.0	54.0	81.1	0.25	0.02	0.035	0.001	225	13	224	5
1_19	5.6	11.2	38.3	0.27	0.03	0.038	0.001	241	21	241	7
1_20_1	1.6	3.3	10.1	0.33	0.06	0.041	0.002	290	43	260	13
1_22	6.0	55.2	57.4	0.20	0.02	0.027	0.001	185	16	173	5
1_28	2.7	6.3	17.7	0.28	0.05	0.039	0.002	248	37	248	12
1_32	1.7	2.5	10.6	0.28	0.07	0.041	0.003	252	53	258	17
3_4	2.0	5.5	14.0	0.35	0.06	0.037	0.002	306	46	235	13
3_11	1.9	3.9	13.8	0.26	0.05	0.036	0.002	233	44	228	14
3_12	0.7	4.6	6.5	0.20	0.08	0.030	0.003	189	71	193	18
3_17	7.3	98.2	78.3	0.23	0.02	0.025	0.001	207	18	158	5
3_27	0.6	4.4	6.2	0.46	0.11	0.026	0.003	382	74	167	17
3_28	1.5	4.3	9.6	0.30	0.07	0.042	0.003	265	52	264	17

зерен циркона триасового возраста и +3.6 для зерна циркона силурийского возраста, а также модельного возраста источника T_{DM} ; последний варьируется в интервале 539–644 млн лет для зерен циркона юрского возраста, 489–688 млн лет – для зерен циркона триасового возраста и 903 млн лет – для зерна циркона силурийского возраста (табл. 5, рис. 8).

Россыпь Эбелях. Определен Lu-Hf изотопный состав 49 зерен циркона (49 определений-кратеров). Рассчитан параметр $\epsilon Hf(t)$; он составляет +4.7...+10.2 для зерен циркона триасового возраста, +4.6...+9.0 – для юрского возраста. Модельный возраст источника T_{DM} варьируется в интервале 463–655 для зерен циркона триасового возраста, в интервале 447–636 – для юрского (см. табл. 5). Таким образом, величина $\epsilon Hf(t)$ и модельный возраст T_{DM} источника цирконов из россыпей рр. Молодо и Эбелях значительно варьируются; они фик-

сируют вариации Lu-Hf изотопного состава мантии либо различную степень ассимиляции материала литосферной мантии протокимберлитовыми астеносферными расплавами. Характеристики Lu-Hf изотопной системы цирконов из россыпей, определенные в настоящей работе, в пределах неопределенности согласуются с данными по подобным зернам мантийных цирконов из россыпей, представленными в работах (Griffin, 2000; Sun et al., 2018). Во второй из цитированных работ для цирконов из алмазной Эбелях установлено, что соотношение $^{206}Pb/^{238}U = 223.9 \pm 4.3$ млн лет, $\epsilon Hf(t) = +8.5$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Россыпь Молодо. Ближайшие к этой россыпи Молодо-Куойкское, Толуопское и Мерчимденское кимберлитовые поля имеют юрский, девонский и

Таблица 5. Значения изотопных отношений $^{176}Yb/^{177}Hf$, $^{176}Lu/^{177}Hf$, $^{176}Hf/^{177}Hf$, $^{176}Hf/^{177}Hf$, параметра $\epsilon(Hf)$ и модельного возраста T_{DM} (млн лет) зерен циркона из россыпей рр. Молодо и Эбелях

Table 5. Values of isotope ratios $Yb/^{177}Hf$, $^{176}Lu/^{177}Hf$, $^{176}Hf/^{177}Hf$, $^{176}Hf/^{177}Hf$, parameter $\epsilon(Hf)$ and model age T_{DM} (Ma) of zircon grains from the Molodo and Ebelyakh placers

Зерно, точка	Возраст, млн лет	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	ϵHf_0	$^{176}Hf/^{177}Hf$	$\epsilon Hf(t)$	T_{DM}
Россыпь Молодо									
2М-2_2	257	0.0008	0.00003	0.28276	0.00003	-0.5	0.282757	5.0	688
2М-3	161	0.0012	0.000038	0.282792	0.000021	0.7	0.282792	4.3	635
2М-4	176	0.0011	0.00004	0.28278	0.00002	0.4	0.282784	4.4	644
2М-7	152	0.0011	0.00004	0.28282	0.00003	1.5	0.282815	5.1	595
2М-12	444	0.0014	0.00005	0.28260	0.00002	-6.1	0.282599	3.6	903
2М-20	184	0.0010	0.00004	0.28284	0.00002	2.2	0.282835	6.3	575
5117-55	232	0.0005	0.000016	0.282897	0.000020	4.4	0.282897	9.5	489
5117-56	193	0.0006	0.000018	0.282866	0.000023	3.3	0.282866	7.4	539
Россыпь Эбелях									
1_1_2	195	0.0006	0.000019	0.282891	0.000015	4.2	0.282891	8.5	498
1_6	187	0.0035	0.00011	0.28279	0.00002	0.7	0.282792	4.8	636
1_9	177	0.0021	0.000071	0.282872	0.000020	3.5	0.282872	7.4	528
1_11	238	0.0020	0.00006	0.28291	0.00002	4.9	0.282912	10.2	470
1_19	241	0.0010	0.000033	0.282895	0.000017	4.4	0.282895	9.7	488
1_22	173	0.0026	0.000080	0.282818	0.000020	1.6	0.282818	5.4	602
1_29	203	0.0006	0.00002	0.28278	0.00002	0.3	0.282779	4.7	652
1_31-1	164	0.0005	0.00002	0.28280	0.00002	1.0	0.282801	4.6	620
1_32	258	0.0004	0.000012	0.282884	0.000014	3.9	0.282884	9.6	508
3_2	160	0.0019	0.00007	0.28293	0.00003	5.5	0.282926	9.0	447
3_6	251	0.0003	0.00001	0.28277	0.00002	0.1	0.282774	5.6	655
3_7	214	0.0007	0.00002	0.28292	0.00002	5.1	0.282916	9.8	463
3_11	228	0.0008	0.000023	0.282804	0.000014	1.1	0.282804	6.1	619
3_17	158	0.0075	0.000215	0.282835	0.000016	2.2	0.282834	5.7	578

Примечание. Возраст – по изотопному отношению $^{206}Pb/^{238}U$, млн лет. $^{176}Hf/^{177}Hf$ – первичное отношение изотопов Hf, пересчитанное на $^{206}Pb/^{238}U$ -возраст циркона; ϵHf_0 – отклонение измеренного изотопного отношения $^{176}Hf/^{177}Hf$ от изотопного отношения $^{176}Hf/^{177}Hf$ в CHUR, ‰; ϵHf_t – отклонение измеренного изотопного отношения $^{176}Hf/^{177}Hf$ от изотопного отношения $^{176}Hf/^{177}Hf$ в CHUR за время t, ‰; T_{DM} – модельный возраст источника, рассчитанный с учетом выплавления магмы из деплетированной мантии.

Note. $^{176}Hf/^{177}Hf$ – primary Hf isotope ratio, recalculated to $^{206}Pb/^{238}U$ -zircon age; ϵHf_0 – deviation of the measured $^{176}Hf/^{177}Hf$ isotope ratio from the $^{176}Hf/^{177}Hf$ isotope ratio in CHUR, ‰; ϵHf_t – deviation of the measured $^{176}Hf/^{177}Hf$ isotope ratio from the $^{176}Hf/^{177}Hf$ isotope ratio in CHUR for time t, ‰; T_{DM} is the model age of the source, calculated taking into account the melting of magma from the depleted mantle.

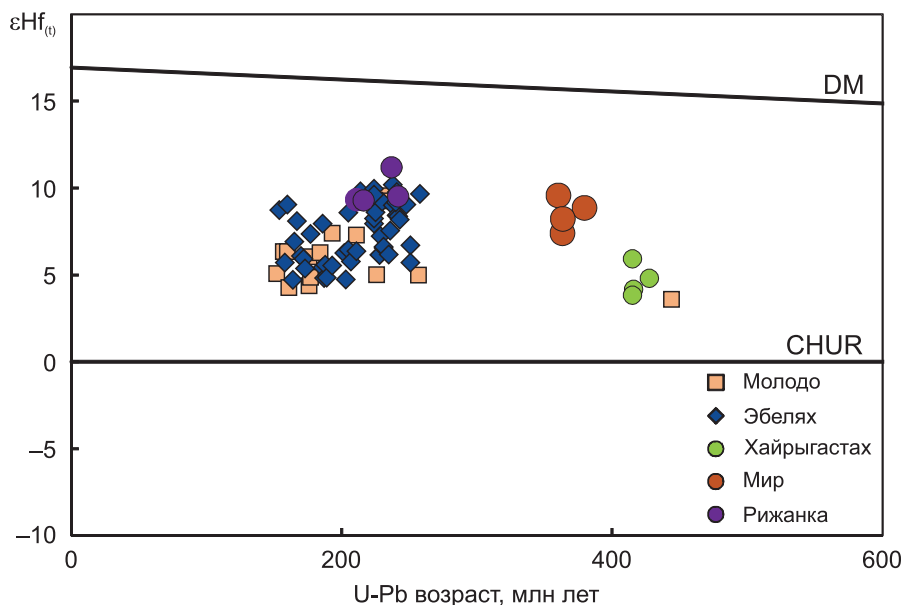


Рис. 8. Значения $\epsilon Hf(t)$ для цирконов из россыпей Молодо и Эбелях, рассчитанное в соответствии с U-Pb возрастом.

Для сравнения приведены данные по цирконам из трубок Мир, Хайрыгастах и Рижанка по данным (Agashev et al., 2020).

Fig. 8. $\epsilon Hf(t)$ values for zircons from the Molodo and Ebelyakh placers calculated in accordance with U-Pb age.

For comparison, bottom zircons from the Mir, Khairygastakh and Rizhanka pipes are shown according to (Agashev et al., 2020).

силурийский возрасты соответственно. Наибольшее количество кимберлитовых тел (около 100) сосредоточено в Молодо-Куойкском поле (Зайцев, Смелов, 2010). Толуопское поле содержит 15 кимберлитовых тел и граничит с Молодо-Куойкским полем на востоке, вследствие чего возраст этого поля требует уточнения. В соответствии с распределением возрастов, основным источником цирконов в россыпи р. Молодо является Молодо-Куойкское поле. Цирконы триасового возраста свидетельствуют о поступлении материала из кимберлитов южного прианабарья, находящегося на значительном удалении к западу от россыпи р. Молодо. Поскольку большинство кимберлитовых тел перечисленных полей неалмазоносны, возникает вопрос о соответствии источников цирконов и алмазов аналогам в россыпях. Тем не менее при эрозионном срезе кимберлитов на этой территории в 200 м и более даже низкоалмазоносные кимберлиты Молодо-Куойкского поля могут дать ресурсы алмазов, сопоставимые с россыпью Молодо. Это минимальная оценка, так как эрозионный срез может быть и значительнее, а алмазоносность, как и вещественный состав кимберлитов, может варьироваться в пределах одного кимберлитового тела с глубиной (Брагхфогель, 1984; Lapin et al., 2007a, b). В то же время алмазы из мезозойских кимберлитов значительно уступают по качеству алмазам рос-

сыпи р. Молодо, и это различие настолько велико, что не может быть следствием только естественной сортировки алмазов при формировании россыпей. Поэтому мезозойские кимберлиты не могут быть единственным источником россыпи. На данный момент вопрос о возрасте коренных источников алмазов ЯАП остается дискуссионным, поскольку вполне возможно наложение в одной россыпи алмазов и цирконов из гетерогенных и гетерохронных источников. Теоретически источником алмазов для Молодинской россыпи могли быть каменноугольные гравелиты нючча-юрегинской свиты (Соболев и др., 1981) Кютюнгинского грабена и питавшие их прогнозируемые кимберлиты девонского возраста (Sobolev et al., 2018). В выборке цирконов из этих гравелитов обнаружено одно зерно циркона девонского возраста (Граханов и др., 2015). Также несколько цирконов девонского возраста обнаружено нами при изучении проб из аллювия р. Кютюнгдэ (Nikolenko et al., 2023).

Россыпь Эбелях. Ближайшие к россыпям бассейна р. Эбелях кимберлитовые поля Старореченское, Орто-Баргынское и Эбеляхское имеют юрский возраст. Поля триасового возраста расположены значительно южнее, вдоль долины р. Малая Куонамка (Куранахское, Лучаканское, Ары-Мастахское). Река Эбелях протекает исключительно по осадочным породам кембрийского возраста, хотя на водораздельных участках в ее бассей-

не фрагментарно сохранились реликты гравелитов, содержащих алмазы, предположительно, каменноугольного возраста. Преобладающий источник поступления цирконов в район р. Эбелях – кимберлитовые поля триасового возраста, расположенные на восточном склоне Анабарского щита значительно южнее р. Эбелях. Второстепенный источник сноса – кимберлитовые поля юрского возраста, расположенные западнее р. Анабар. Прежде чем попасть в современный аллювий р. Анабар и ее притоков цирконы, как и алмазы, прошли через несколько этапов переотложения во вторичных коллекторах. Вопрос о возрасте коренных источников алмазов для россыпи р. Эбелях также остается открытым, поскольку количество и качество алмазов в россыпях не соответствуют таковым в кимберлитах мезозойского возраста. Во всех изученных объектах отсутствуют цирконы продуктивного девонского цикла кимберлитового магматизма, который проявлен на юге ЯАП. Это позволяет сделать вывод, что алмазы северных россыпей имеют местный источник и поступления кимберлитового материала с юга ЯАП на север в постдевонское время не было. Последнее, принимая во внимание ограниченность изученной выборки цирконов, не исключает присутствия кимберлитов среднепалеозойского возраста на севере ЯАП. Так, датированное включение рутила в алмазе из россыпи р. Эбелях (Афанасьев и др., 2009) имеет возраст 356 млн лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено комплексное изучение физико-химических характеристик цирконов из алмазных россыпей Якутии (бассейны рр. Молодо и Эбелях), различающихся условиями посткристаллизационной эволюции, степенью механической и химической абразии в аллювии. Приведены их локальные оптико-спектроскопические характеристики (спектры КРС и КЛ), что позволило обосновать вывод об их высокой кристалличности и гомогенности (монохронности), а также провести выбор международных стандартов циркона с близкими характеристиками для использования при ЛА-ИСП-МС-анализе в целях обеспечения сходных условий испарения вещества и параметров фракционирования элементов U и Pb.

Получены ЛА-ИСП-МС-данные микропримесного, U-Pb и Lu-Hf изотопного состава зерен цирконов из алмазных россыпей, значения дозы их автооблучения. Для определения возможного возраста коренных источников алмазов и путей их миграции в россыпи выполнено U-Pb-датирование зерен циркона, расчеты параметра $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$ и модельного возраста источника T_{DM} .

Установлено, что среди полученных U-Pb-возрастов резко преобладают триасовые и юрские. В россыпи р. Молодо преобладают цирконы юр-

ского возраста (81%), а в россыпи р. Эбелях – триасового (66%). Геохимические особенности цирконов позволяют однозначно отнести их к кимберлитовым (мантийным) разностям, за исключением трети зерен юрского возраста бассейна р. Эбелях, которые могут быть карбонатитовыми.

Таким образом, датировки цирконов из алмазных россыпей бассейнов рр. Молодо и Эбелях соответствуют возрастам внедрения кимберлитов Севера Якутской алмазонасной провинции. Некоторое количество алмазов россыпей, возможно, как и цирконов, происходят из известных в районе кимберлитов, но количество и, прежде всего, качество алмазов в россыпях свидетельствуют о наличии в регионе неизвестных продуктивных коренных источников алмазов – кимберлитов среднепалеозойского возраста.

Благодарности

Авторы выражают благодарность АО “Алмазы Анабара” за предоставленные материалы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агашев А.М., Серов И.В., Орихаши Ю., Толстов А.В., Николенко Е.И., Похиленко Н.П. (2019) U-Pb датирование цирконов из аллювия рек и вторичных коллекторов Якутской алмазонасной провинции. *Руды и металлы*, (2), 67-73.
- Афанасьев В.П., Агашев А.М., Орихаши Ю., Похиленко Н.П., Соболев Н.В. (2009) Палеозойский U-Pb-возраст включения рутила в алмазе V-VII разновидности из россыпей северо-востока Сибирской платформы. *Докл. АН*, **428**(2), 228-232.
- Брагхфогель Ф.Ф. (1984) Геологические аспекты кимберлитового магматизма Северо-Востока Сибирской платформы. Якутск: Изд-во ЯО АН СССР, 98 с.
- Вотьяков С.Л., Червяковская М.В., Щапова Ю.В., Панкрушина Е.А., Михалевский Г.Б., Червяковский В.С. (2022) Катодоллюминесценция и спектроскопия комбинационного рассеяния света как основа для выбора референсных образцов при ЛА-ИСП-МС-анализе циркона. *Геодинамика и тектонофизика*, **13**(2s), 0603. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0603>
- Граханов С.А., Зинчук Н.Н., Соболев Н.В. (2015) Возраст прогнозируемых коренных источников алмазов на северо-востоке сибирской платформы. *Докл. АН*, **465**(6), 715-719.
- Дэвис Г.Л., Соболев Н.В., Харьков А.Д. (1980) Новые данные о возрасте кимберлитов Якутии, полученные U-Pb методом по цирконам. *Докл. АН СССР*, **254**, 175-179.
- Зайцев А.И., Смелов А.П. (2010) Изотопная геохронология пород кимберлитовой формации Якутской провинции. Якутск: ИГАБМ СО РАН, 107 с.
- Краснобаев А.А. (1986) Циркон как индикатор геологических процессов. М.: Наука, 152 с.
- Краснобаев А.А., Вотьяков С.Л., Крохалев В.Я. (1988) Спектроскопия цирконов. Свойства, геологические приложения. М.: Наука, 150 с.
- Краснобаев А.А., Вотьяков С.Л., Левин В.Я., Анфило-

- гов В.Н. (2003) Цирконы алмазоносных комплексов Урала и проблема их коренных источников. *Литосфера*, (3), 25-40.
- Соболев Н.В., Белик Ю.П., Похиленко Н.П., Лаврентьев Ю.Г., Кривонос В.Ф., Поляков В.Н., Соболев В.С. (1981) Хромсодержащие пиропы в нижнекаменноугольных отложениях кютюнгдинского прогиба. *Геология и геофизика*, **22**(3), 153-157.
- Соболев Н.В., Соболев А.В., Томиленко А.А., Батанова В.Г., Толстов А.В., Логвинова А.М., Кузьмин Д.В. (2015) Уникальные особенности состава вкрапленников оливина посттрапповой алмазоносной кимберлитовой трубки Малокуонамская, Якутия. *Докл. АН*, **463**(5), 587.
- Соболев Н.В., Шацкий В.С., Вавилов М.А., Горяйнова С.В. (1994) Циркон высокобарических метаморфических пород складчатых областей как уникальный контейнер включений алмаза, коэсита и сосуществующих минералов. *Докл. РАН*, **334**(4), 488-492.
- Червяковская М.В., Вотяков С.Л., Червяковский В.С. (2021) Изучение Lu/Hf изотопного состава цирконов с помощью многоколлекторного масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой Neptune Plus и приставки для лазерной абляции NWR 213. *Аналитика и контроль*, **25**(3), 212-221.
- Червяковская М.В., Червяковский В.С., Вотяков С.Л. (2022) Локальный анализ микроэлементного состава силикатных минералов на масс-спектрометре NexION 300S С ЛА приставкой NWR 213: методические аспекты. *Геодинамика и тектонофизика*, **13**(2s), 0605. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0605>
- Щапова Ю.В., Вотяков С.Л., Замятин Д.А., Червяковская М.В., Панкрушина Е.А. (2020) Минералы-концентраторы d- и f- элементов: локальные спектроскопические и ЛА-ИСП-МС исследования состава, структуры и свойств, геохронологические приложения. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 427 с.
- Agashev A.M., Chervyakovskaya M.V., Serov I.V., Tolstov A.V., Agasheva E.V., Votyakov S.L. (2020) Source rejuvenation vs. re-heating: Constraints on Siberian kimberlite origin from U/Pb and Lu/Hf isotope compositions and geochemistry of mantle zircons. *Lithos*, **364-365**, 105508.
- Agashev A.M., Orihashi Y., Pokhilenko N.P. et al. (2016) Age of Mirny Field Kimberlites (Siberia) and application of Rutile and Titanite for U–Pb dating of kimberlite emplacement by LA-ICP-MS. *Geochem. J.*, **50**, 431-438.
- Belousova E., Griffin W., O'Reilly S.Y., Fisher N. (2002) Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **143**, 602-622.
- Black L.P., Gulson B.L. (1978) The age of the Mud Tank carbonatite, Strangways Range, Northern Territory. *J. Aust. Geol. Geophys.*, **3**, 227-232.
- Black L.P., Kamo S.L., Allen Ch.L., Davis D.W., Aleinikoff J.N., Valley J.W., Mundif R., Campbell I.H., Korsch R.J., Williams I.S., Foudoulis Ch. (2004) Improved ²⁰⁶Pb/²³⁸U microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element-related matrix effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards. *Chem. Geol.*, **205**(1-2), 115-140.
- Dawson P., Hargreave M.M., Wilkinson G.R. (1971) The vibrational spectrum of zircon (ZrSiO₄). *J. Phys. C: Solid St. Phys.*, **4**(2), 240-256.
- Griffin W.L., Pearson N.J., Belousova E.A., Jackson S.E., O'Reilly S.Y., Achterberg E.Van, Hee S.R. (2000) The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **64**, 133-147.
- Jackson S.E., Norman J.P., William L.G., Belousova E.A. (2004) The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chem. Geol.*, **211**, 47-69.
- Kolesov B.A., Geiger C.A., Armbruster T. (2001) The dynamic properties of zircon studied by single-crystal X-ray diffraction and Raman spectroscopy. *Europ. J. Mineral.*, **13**(5), 939-948.
- Lapin A.V., Tolstov A.V., Antonov A.V. (2007) Sr and Nd isotopic compositions of kimberlite and associated rocks of the Siberian craton. *Dokl. Earth Sci.*, **414**(1), 557-560.
- Lapin A.V., Tolstov A.V., Vasilenko V.B. (2007) Petrogeochemical characteristics of the kimberlites from the middle Markha region with application to the problem of the geochemical heterogeneity of kimberlites. *Geochem. Int.*, **45**(12), 1197-1209.
- Murakami T., Chakoumakos B.C., Ewing R.C., Lumpkin G.R., Weber W.J. (1991) Alpha-decay event damage in zircon. *Amer. Miner.*, **76**(9-10), 1510-1532.
- Nikolenko E.I., Agashev A.M., Tychkov N.S., Nikolenko A., Zhelonkin R.Y., Ragozin A.L., Afanasiev V.P., Pokhilenko N.P. (2023) In search for primary sources of placer diamonds of northeast Siberian craton: Evidence from the U–Pb ages and geochemistry of alluvial zircons. *Resour. Geol.*, **73**(1), e12317.
- Palenik C.S., Nasdala L., Ewing R.C. (2003) Radiation damage in zircon. *Amer. Miner.*, **88**, 770-781.
- Slama J., Košler J., Condon D., Crowley J., Gerdes A., Hanchar J., Horstwood M., Morris G., Nasdala L., Norberg N., Schaltegger U., Schoene B., Tubrett M., Whitehouse M. (2008) Plesovice zircon – A new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chem. Geol.*, **249**, 1-35.
- Sobolev N.V., Tomilenko A.A., Kuz'min D.V., Logvinova A.M., Bul'bak T.A., Fedorova E.N., Nikolenko E.I., Reutskii V.N., Sobolev A.V., Batanova V.G., Grakhanov S.A., Kostrovitskii S.I., Yakovlev D.A., Anastasenko G.F., Tolstov A.V. (2018) Prospects of search for diamondiferous kimberlites in the northeastern Siberian platform. *Russ. Geol. Geophys.*, **59**(10), 1365-1379.
- Sun J., Tappe S., Kostrovitsky S.I., Liu Ch-Zh, Skuzovtsov S.Yu., Wu F-Y. (2018) Mantle sources of kimberlites through time: A U-Pb and Lu-Hf isotope study of zircon megacrysts from the Siberian diamond fields. *Chem. Geol.*, **479**, 228-240.
- Syme R.W.G., Lockwood D.J., Kerr H.J. (1977) Raman spectrum of synthetic zircon (ZrSiO₄) and thorite (ThSiO₄). *J. Phys. C: Solid St. Phys.*, **10**(8), 1335.
- Váci T., Nasdala L. (2017) Electron-beam-induced annealing of natural zircon: a Raman spectroscopic study. *Phys. Chem. Min.*, **44**(6), 389-401.
- Wiedenbeck M., Hanchar J.M., Peck W.H., Sylvester P., Valley J., Whitehouse M., Franchi I. (2004) Further characterisation of the 91500 zircon crystal. *Geostand. Geoanal. Res.*, **28**(1), 9-39.

REFERENCES

- Afanas'ev V.P., Agashev A.M., Orikhishi Y., Pokhilenko N.P., Sobolev N.V. (2009) Paleozoic U-Pb age of rutile inclusion in diamond of varieties V-VII from placers of the north-east of the Siberian Platform. *Dokl. Akad. Nauk*, **428**(2), 228-232. (In Russ.)
- Agashev A.M., Chervyakovskaya M.V., Serov I.V., Tolstov A.V., Agasheva E.V., Votyakov S.L. (2020) Source rejuvenation vs. re-heating: Constraints on Siberian kimberlite origin from U/Pb and Lu/Hf isotope compositions and geochemistry of mantle zircons. *Lithos*, **364-365**, 105508.
- Agashev A.M., Orihashi Y., Pokhilenko N.P. et al. (2016) Age of Mirny Field Kimberlites (Siberia) and application of Rutile and Titanite for U-Pb dating of kimberlite emplacement by LA-ICP-MS. *Geochem. J.*, **50**, 431-438.
- Agashev A.M., Serov I.V., Orihashi Y., Tolstov A.V., Nikolenko E.I., Pokhilenko N.P. (2019) U-Pb dating of zircons from alluvium of rivers and secondary reservoirs of the Yakut diamond-bearing province. *Ores Met.*, (2), 67-73. (In Russ.)
- Belousova E., Griffin W., O'Reilly S.Y., Fisher N. (2002) Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **143**, 602-622.
- Black L.P., Gulson B.L. (1978) The age of the Mud Tank carbonatite, Strangways Range, Northern Territory. *J. Aust. Geol. Geophys.*, **3**, 227-232.
- Black L.P., Kamo S.L., Allen Ch.L., Davis D.W., Aleinikoff J.N., Valley J.W., Mundif R., Campbell I.H., Korsch R.J., Williams I.S., Foudoulis Ch. (2004) Improved $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element-related matrix effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards. *Chem. Geol.*, **205**(1-2), 115-140.
- Bragkhfogel' F.F. (1984) Geological aspects of kimberlite magmatism of the North-East Siberian Platform. Yakutsk, Publishing house of the Yakut Branch of the AS of the USSR, 98 p. (In Russ.)
- Chervyakovskaya M.V., Chervyakovskii V.S., Votyakov S.L. (2022) Local analysis of the trace element composition of silicate minerals on a NexION 300S mass spectrometer with NWR 213 LA attachment: methodological aspects. *Geodynam. Tectonophys.*, **13**(2s), 0605. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0605>
- Chervyakovskaya M.V., Votyakov S.L., Chervyakovskii V.S. (2021) Study of the Lu/Hf isotopic composition of zircons using a Neptune Plus multicollector inductively coupled plasma mass spectrometer and an NWR 213 laser ablation attachment. *Analitika i Kontrol'*, **25**(3), 212-221. (In Russ.)
- Dawson P., Hargreave M.M., Wilkinson G.R. (1971) The vibrational spectrum of zircon (ZrSiO_4). *J. Phys. C: Solid St. Phys.*, **4**(2), 240-256.
- Devis G.L., Sobolev N.V., Khar'kiv A.D. (1980) New data on the age of Yakutia kimberlites obtained by the U-Pb method on zircons. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **254**, 175-179. (In Russ.)
- Grakhanov S.A., Zinchuk N.N., Sobolev N.V. (2015) Age of predicted bedrock sources of diamonds in the northeastern Siberian platform. *Dokl. Akad. Nauk*, **465**(6), 715-719. (In Russ.)
- Griffin W.L., Pearson N.J., Belousova E.A., Jackson S.E., O'Reilly S.Y., Achterberg E.Van, Hee S.R. (2000) The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **64**, 133-147.
- Jackson S.E., Norman J.P., William L.G., Belousova E.A. (2004) The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chem. Geol.*, **211**, 47-69.
- Kolesov B.A., Geiger C.A., Armbruster T. (2001) The dynamic properties of zircon studied by single-crystal X-ray diffraction and Raman spectroscopy. *Europ. J. Mineral.*, **13**(5), 939-948.
- Krasnobaev A.A. (1986) Zircon as an indicator of geological processes. Moscow, Nauka Publ., 152 p. (In Russ.)
- Krasnobaev A.A., Votyakov S.L., Krokhaliev V.Ya. (1988) Spectroscopy of zircons. Properties, geological applications. Moscow, Nauka Publ., 150 p. (In Russ.)
- Krasnobaev A.A., Votyakov S.L., Levin V.Ya., Anfilogov V.N. (2003) Zircons of diamond-bearing complexes of the Urals and the problem of their primary sources. *Lithosphere (Russia)*, (3), 25-40. (In Russ.)
- Lapin A.V., Tolstov A.V., Antonov A.V. (2007a) Sr and Nd isotopic compositions of kimberlite and associated rocks of the Siberian craton. *Dokl. Earth Sci.*, **414**(1), 557-560.
- Lapin A.V., Tolstov A.V., Vasilenko V.B. (2007b) Petrogeochemical characteristics of the kimberlites from the middle Markha region with application to the problem of the geochemical heterogeneity of kimberlites. *Geochem. Int.*, **45**(12), 1197-1209.
- Murakami T., Chakoumakos B.C., Ewing R.C., Lumpkin G.R., Weber W.J. (1991) Alpha-decay event damage in zircon. *Amer. Miner.*, **76**(9-10), 1510-1532.
- Nikolenko E.I., Agashev A.M., Tychkov N.S., Nikolenko A., Zhelonkin R.Y., Ragozin A.L., Afanasiev V.P., Pokhilenko N.P. (2023) In search for primary sources of placer diamonds of northeast Siberian craton: Evidence from the U-Pb ages and geochemistry of alluvial zircons. *Resour. Geol.*, **73**(1), e12317.
- Palenik C.S., Nasdala L., Ewing R.C. (2003) Radiation damage in zircon. *Amer. Miner.*, **88**, 770-781.
- Shchapova Yu.V., Votyakov S.L., Zamyatin D.A., Chervyakovskaya M.V., Pankrushina E.A. (2020) D- and f-element concentration minerals: local spectroscopic and LA-ICP-MS studies of composition, structure and properties, geochronological applications. Novosibirsk, Publishing house of the SB RAS, 427 p. (In Russ.)
- Slama J., Košler J., Condon D., Crowley J., Gerdes A., Hancher J., Horstwood M., Morris G., Nasdala L., Norberg N., Schaltegger U., Schoene B., Tubrett M., Whitehouse M. (2008) Plesovice zircon – A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chem. Geol.*, **249**, 1-35.
- Sobolev N.V., Belik Yu.P., Pokhilenko N.P., Lavrent'ev Yu.G., Krivonos V.F., Polyakov V.N., Sobolev V.S. (1981) Chromium-containing pyropes in the Lower Carboniferous sediments of the Kyutyungda trough. *Geol. Geophys.*, **22** (3), 153-157. (In Russ.)
- Sobolev N.V., Shatskii V.S., Vavilov M.A., Goryaynova S.V. (1994) Zircon from high-pressure metamorphic rocks of folded areas as a unique container of inclusions of diamond, coesite and coexisting minerals. *Dokl. RAN*, **334**(4), 488-492. (In Russ.)
- Sobolev N.V., Sobolev A.V., Tomilenko A.A., Batano-

- va V.G., Tolstov A.V., Logvinova A.M., Kuzmin D.V. (2015) Unique compositional features of olivine phenocrysts from the post-trap diamondiferous kimberlite pipe Malokuonamskaya, Yakutia. *Dokl. Akad. Nauk*, **463**(5), 587. (In Russ.)
- Sobolev N.V., Tomilenko A.A., Kuz'min D.V., Logvinova A.M., Bul'bak T.A., Fedorova E.N., Nikolenko E.I., Reutskii V.N., Sobolev A.V., Batanova V.G., Grakhanov S.A., Kostrovitskii S.I., Yakovlev D.A., Anastasenko G.F., Tolstov A.V. (2018) Prospects of search for diamondiferous kimberlites in the northeastern Siberian platform. *Russ. Geol. Geophys.*, **59**(10), 1365-1379.
- Sun J., Tappe S., Kostrovitsky S.I., Liu Ch-Zh, Skuzovtov S.Yu., Wu F-Y. (2018) Mantle sources of kimberlites through time: A U-Pb and Lu-Hf isotope study of zircon megacrysts from the Siberian diamond fields. *Chem. Geol.*, **479**, 228-240.
- Syme R.W.G., Lockwood D.J., Kerr H.J. (1977) Raman spectrum of synthetic zircon ($ZrSiO_4$) and thorite ($ThSiO_4$). *J. Phys. C: Solid St. Phys.*, **10**(8), 1335.
- Váczi T., Nasdala L. (2017) Electron-beam-induced annealing of natural zircon: a Raman spectroscopic study. *Phys. Chem. Min.*, **44**(6), 389-401.
- Votyakov S.L., Chervyakovskaya M.V., Shchapova Yu.V., Pankrushina E.A., Mikhalevskii G.B., Chervyakovskii V.S. (2022) Cathodoluminescence and Raman spectroscopy as a basis for reference sample selection in LA-ICP-MS analysis of zircon. *Geodynam. Tectonophys.*, **13**(2s), 0603. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0603>
- Wiedenbeck M., Hanchar J.M., Peck W.H., Sylvester P., Valley J., Whitehouse M., Franchi I. (2004) Further characterisation of the 91500 zircon crystal. *Geostand. Geoanalyt. Res.*, **28**(1), 9-39.
- Zaitsev A.I., Smelov A.P. (2010) Isotope geochronology of rocks of the kimberlite formation of the Yakut province. Yakutsk, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS Publ., 107 p. (In Russ.)