

УДК 550.42+552.3

ВОЗРАСТ ЩЁЛОЧНО-УЛЬТРАОСНОВНЫХ ТРУБОК ВЗРЫВА ЧАПИНСКОГО КОМПЛЕКСА (ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ)

© 2024 г. Ю. В. Данилова^{1,*}, И. С. Шарыгин¹, Е. А. Гладкочуб¹,
Е. И. Николенко², Н. В. Брянский^{1,5}, С. Ю. Скузоватов³, А. С. Гладков¹,
А. В. Иванов¹, Д. А. Кошкарёв⁴, Академик РАН Ф. А. Летников¹

Поступило 20.03.2024 г.

После доработки 25.05.2024 г.

Принято к публикации 31.05.2024 г.

Определён возраст формирования трубок взрыва чапинского комплекса в Чингасанском магматическом поясе на севере Енисейского кряжа. U–Pb-датирование мегакристов циркона из щёлочно-ультраосновных пород установило значения 657.7 ± 13.4 и 647.6 ± 9.7 млн лет для трубок Натальинская и № 3 соответственно. Внедрение щёлочно-ультраосновных трубок взрыва чапинского комплекса соответствует времени проявления ультраосновного щелочного магматизма по южному и юго-западному краю Сибирского кратона.

Ключевые слова: U–Pb-датирование, трубки взрыва, чапинский ультраосновной щелочной комплекс, Енисейский кряж, Сибирский кратон

DOI: 10.31857/S2686739724100024

На юго-западе Сибирского кратона (Енисейский кряж) выделяют несколько крупных магматических этапов развития рифтогенных структур и внутримитного магматизма: мезопротерозойский (1.6–1.05 млрд лет), ранний (1.05–0.8 млрд лет) и поздний неопротерозойский (0.8–0.6 млрд лет) [1]. Только на позднем неопротерозойском этапе прослеживаются четыре эпохи плагиоориодацит-базальтового, риолит-базальтового, трахибазальт-трахитового и щёлочно-пикритового магматизма на рубежах 780, 750, 700, 670–650 млн лет [2]. На севере Енисейского кряжа, широко распространены проявления гранитоидного и щелочного магматизма, на рубеже 725–550 млн лет здесь происходило формирование субщелочных, щелочных пород и карбонатитов

захребетнинского, среднетатарского и пенчегинского комплексов [3, 4].

Проявления щёлочно-ультраосновных пород в северном сегменте Енисейского кряжа группируются в магматическом поясе северо-западного простирания, расположенном на границе Панибинского антиклинория и Кордо-Лебяжинского синклинория в пределах Ишимбинской разломной зоны (Чингасанский пояс). В бассейне среднего течения рр. Чапы и Нойбы, при выполнении специализированных алмазопроисковых работ (1960 г.), установлены серии трубок взрыва, дайки, штоки и силлы щёлочно-ультраосновного состава, позднее объединённые в чапинский (УЩК) комплекс (рис. 1). Породы составляющие трубки взрыва были диагностированы как слюдяные кимберлиты [5], кроме того, выделены щелочные пикриты и их туфы, авгититы, лимбургиты, и их туфы, щелочные трахиты.

Единственное определение возраста пород чапинского УЩК с интервалом 670–668 млн лет получено по валовым пробам и биотиту даек щелочных пикритов K–Ar-методом [6]. В данном контексте требуют дополнительно рассмотрения вопросы времени проявления

¹Институт земной коры Сибирского отделения Российской Академии наук, Иркутск, Россия

²СП «АЛРОСА» (Зимбабве)(Приват) Лимитед, Хараре, Зимбабве

³Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской Академии наук, Иркутск, Россия

⁴АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Саха Якутия, Россия

⁵Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

*E-mail: jdan@crust.irk.ru

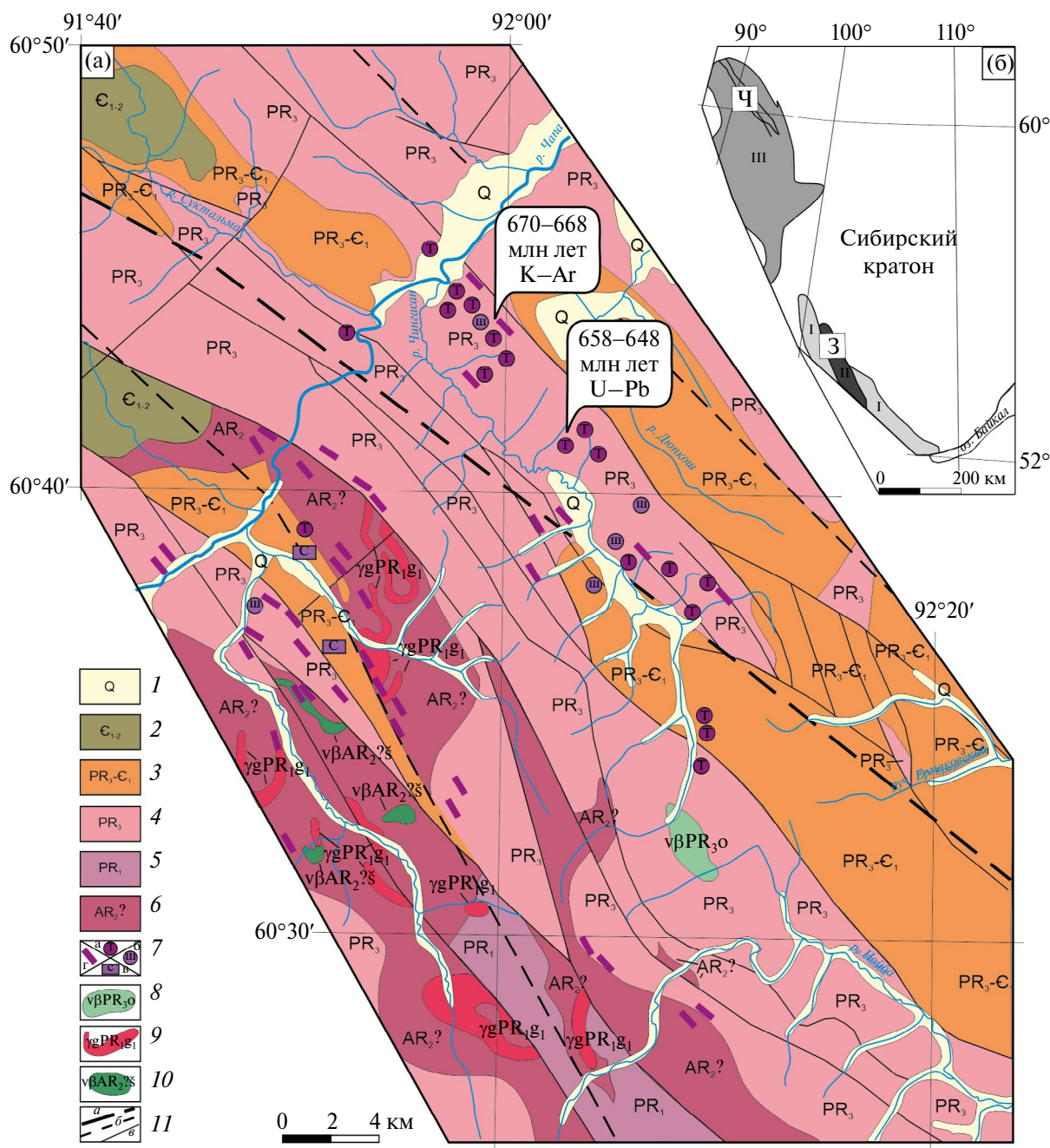


Рис. 1. Схема геологического строения чапинского ультраосновного щелочного комплекса в структуре Енисейского кряжа. (а): 1 – аллювиальные отложения; 2 – раннепалеозойские осадочные отложения; 3 – вулканогенно-осадочные отложения чапской серии; 4 – неопротерозойские терригенные и вулканогенно-терригенные комплексы; 5 – раннепротерозойские метаморфизованные карбонатно-терригенные отложения; 6 – архейские нерасчленённые метаморфические комплексы. 7–10 магматические образования: 7 – чапинский УЩК: трубки взрыва (а), штоки (б), силлы (в), дайки (г) (вне масштаба); 8 – орловский субвулканический комплекс базальт-андезит-риолитового состава; 9 – гаревский ультраметаморфический комплекс гранит-гранитоидов; 10 – шумихинский метапикрит-базальтовый субвулканический комплекс. 11 – разломы: Ишимбинский глубинный разлом (а), второстепенные разломы (б), тектонические нарушения (в). На врезке (б) крайние структуры южной и юго-западной окраин Сибирского крата: I – Присянский выступ фундамента; II – Урикско-Ийский грабен, включающий зиминский УЩК (3); III – Енисейский кряж, включающий чапинский УЩК (Ч).

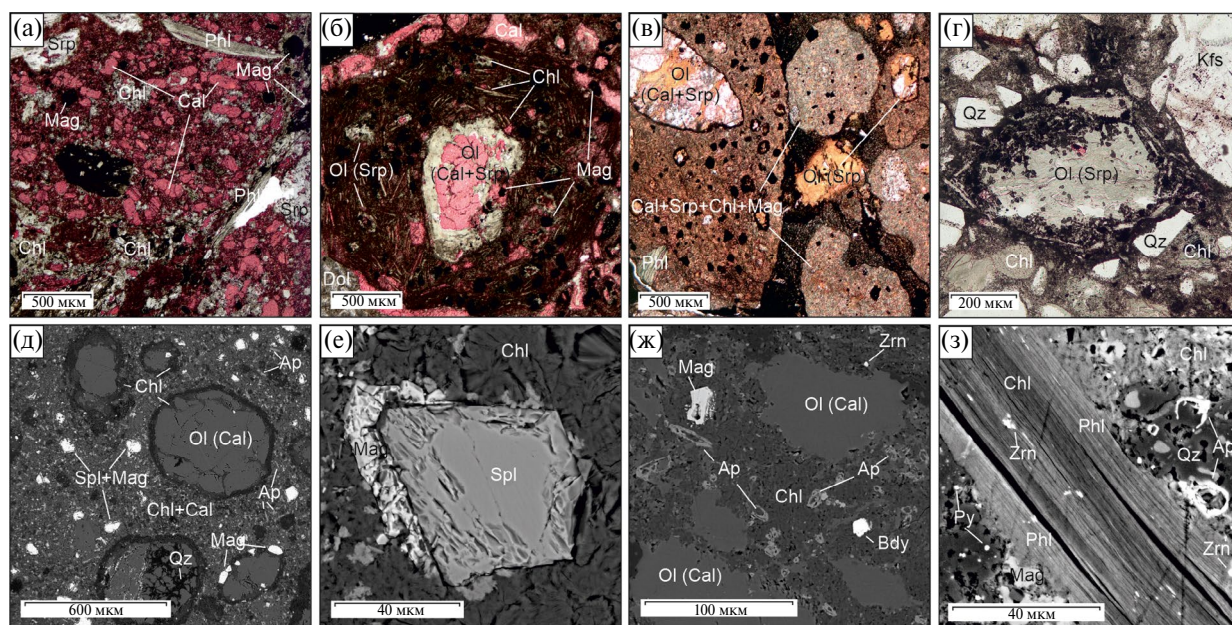


Рис. 2. Взаимоотношения минералов в породах трубок Натальинская, № 3, Глубокая. Фотографии шлифов (а–г), изображения в обратно рассеянных электронах (д–з). Символы минералов: Ap – апатит, Bdy – бадделеит, Cal – кальцит, Chl – хлорит, Dol – доломит, Mag – магнетит, Ol – оливин, Phl – флогопит, Py – пирит, Qz – кварц, Spl – шпинель, Srp – серпентин, Zrn – циркон.

щёлочно-ультраосновного магматизма на севере Енисейского кряжа и сходстве мантийного расплава, способствующего формированию чапинского УЩК с монокхронными щёлочно-ультраосновными магмами, эволюционировавшими в краевых структурах Сибирского кратона.

Изучен материал керна и элювий трубок взрыва Натальинская, № 3 и Глубокая, в среднем течении реки Чингасана. Породы трубки Натальинская и трубки № 3 имеют порфировую и обломочную структуры (рис. 2 а–г), доля вкрапленников магматических минералов варьируется в пределах 10–40 об. %. Вкрапленники оливина, флогопита, шпинелидов и / или магмакласты ультраосновного состава, в свою очередь состоящие из вкрапленников и цемента, погружены в мелкокристаллический серпентин-карбонатный матрикс. Различные по величине магмакласты часто характеризуются округлыми формами и флюидалным расположением микролитовой массы, огибающей макрокристаллы оливина, полностью замещённого серпентином и кальцитом. В составе трубок присутствуют ксенолиты и обломки минералов вмещающих осадочных пород, которые иногда преобладают над магматическими. Коровые ксенолиты представлены мусковит-углистыми сланцами, песчаниками, аргиллитами, доломитом, кварцем, полевым шпатом.

Образцы из трубки Глубокая в изобилии содержат коровый обломочный материал, остроугольные или оплавленные обломки кварца и полевого шпата составляют 50% и более объёма породы, а их размеры варьируют от 0.1 мм до 2.5 см. Магмакласты представлены вкрапленниками мантийных минералов: оливина, шпинелидов, слюд и мелкокристаллическим стекловатым цементом с обильной вкрапленностью рудных минералов. Породы интенсивно выветрены и пропитаны гидроокислами.

Минералы (рис. 2 д–з) изученных трубок имеют высокую степень позднематматических и гидротермальных изменений. Оливин и менее распространённый пироксен полностью замещены кальцитом, серпентином, хлоритом, магнетитом. Флогопит присутствует во вкрапленниках и в основной микролитовой массе. В магматическом цементе флогопит почти полностью замещён хлоритом и магнетитом. Апатит в большинстве образцов представляет собой реликты, состоящие из фторапатита и кальцита (рис. 2 ж). Карбонат присутствует во вкрапленниках и в основной мелкозернистой массе, кроме того, обособляется в прожилках мощностью 2–5 см. Вклад карбоната может составлять 50 и более % от объёма породы. Во всех трубках содержится переменное количество шпинелидов, рутила, сульфидов (пирит, галенит,

смизит). Шпинелиды часто представлены титано-магнетитом с центром, выполненным магнезиохромитом, реже, хромистой шпинелью. Редко присутствуют ильменит, пикроильменит, титанит. Прочие минералы представлены баритом, гётитом, монацитом-(Ce). В образцах из трубок взрыва обнаружены циркон и бадделеит.

Трубки взрыва Натальинская и № 3 содержат мегакристы циркона. Мелкие включения циркона субмикронного размера фиксировались и во вкрапленниках флогопита и в серпентин-карбонатном цементе при исследовании химического состава минералов на электронном сканирующем микроскопе LEO-1430VP с энергодисперсионным анализатором INCAEnergy 350 в Геологическом институте СО РАН (Улан-Удэ). Внутреннее строение мегакристов циркона исследовано методом катодолюминесценции с использованием электронного сканирующего микроскопа TESCAN MIRA 3 LMU в ЦКП “Изотопно-геохимических исследований” ИГХ СО РАН (Иркутск). Морфологические характеристики и внутреннее строение исследованных мегакристов соответствуют мантийному циркону, типичному для кимберлитов и иных щелочных магм [7].

U–Pb-геохронологические исследования циркона выполнены в ЦКП “Геодинамика и геохронология” Института земной коры СО РАН (Иркутск) методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией (LA-ICP-MS), используя масс-спектрометр Agilent 7900 с эксимерным лазером Analyte Excite и ячейкой двойного объёма HeEx II. Диаметр “пучка” лазера составлял 35 мкм, энергия лазера – 3.51 Дж/см² при частоте 10 Гц. Абляция осуществлялась в потоке гелия (0.5 л/мин несущий газ, 0.2 л/мин через второй объём ячейки), который смешивался на выходе из ячейки в кварцевой трубке Т-образной формы оригинальной конструкции с аргоном (1.03 л/мин), после чего смесь газов поступала в плазменную горелку масс-спектрометра. Каждый анализ начинался измерением холостого сигнала в течение 20 с, затем выполнялась абляция в течение 40 с. Цикл измерения состоял из 20 с – фон, 40 с – накопление сигнала, 60 с – продувка перед следующим циклом. Во время сессии через каждые 10 измерений образца анализировались аттестованные стандарты циркона: Harvard 91500 [8], Plesovice [9] и R33 [10]. Аналитические сигналы редуцированы при помощи программы Iolite 4.0 [11] с использованием циркона Harvard 91500 в качестве первичного стандарта. Цирконы Plesovice и R33

анализировались как неизвестные образцы с целью контроля качества производимых измерений; для каждого из них были получены конкордантные оценки возраста, согласующиеся с результатами датирования методом ID-TIMS. Для оценки возраста трубок были использованы только значения, которые пересекаются с конкордией в пределах погрешности 2σ [12].

Из тяжёлой фракции трубок Натальинская и № 3 выделено 190 зёрен циркона размером >0.5 мм (самое крупное – 3.5 мм). По-видимому, эти зёрна являются фрагментами более крупных кристаллов (рис. 3 а, б; табл. 1S; дополнительные материалы размещены в электронном виде по DOI статьи и на сайте редакции). В трубке Глубокая минералы пригодные для датирования отобрать не удалось. Изотопы U и Pb определены в 70 зёрнах циркона. Фильтр 2σ прошло 34 анализа – 21 для трубки Натальинская и 13 для трубки № 3. Средневзвешенные оценки возраста составили 657.7 ± 2.3 и 647.6 ± 1.8 млн лет для трубок Натальинская и № 3 соответственно (рис. 3 г, д; табл. 1S; дополнительные материалы размещены в электронном виде по DOI статьи и на сайте редакции). Погрешности в определении возраста оценены статистически, предполагая, что погрешность уменьшается как квадратный корень из числа определений. Возраст конкордии рассчитан в программе IsoplotR [13]. Такая оценка погрешности допустима, если все точки находятся на конкордии, а разброс измерений связан исключительно с аналитическими проблемами. Учитывая достаточно большую погрешность индивидуальных измерений, последнее допущение о конкордантности невозможно проверить. По этой причине, погрешности при определении возраста трубок Натальинская и № 3 более консервативно можно оценить из средних значений индивидуальных погрешностей измерений возраста, определяемого по $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -отношениям, а именно как 657.7 ± 13.4 и 647.6 ± 9.7 млн лет.

Новые данные о возрасте трубок взрыва в среднем течении р. Чингасана координируются с результатами, полученными по дайкам щелочных пикритов в нижнем течении р. Чингасана [6]. В крупной тектонической структуре контролируемой Татарско-Ишимбинской системой глубинных разломов многократно проявился щелочно-ультраосновной магматизм, в ходе которого порции расплава поступали по трещинным каналам и формировали трубки взрыва и дайково-жильные серии. Изотопный возраст даек щелочных пикритов, определённый K–Ar-методом

составляет: по биотиту — 670 ± 17 млн лет, по валовым пробам — 668 ± 24 млн лет [6]. Вероятно, в чапинском УЩК образование даек ультрабазитов предшествовало внедрению кимберлитоподобных магм и формированию эруптивных брекчий в интервале 658–648 млн лет и означает, что щелочно-ультраосновной магматизм северной части Енисейского кряжа продлился от 10 до 30 млн лет и временами проявлял эксплозивный характер. Следует учитывать, что возраст полученный К–Аг-методом по дайкам щелочных пикритов содержит величину погрешности измерения в интервале 17–24 млн лет. Таким образом формирование трубок взрыва и дайковых серий происходило синхронно.

Возраст формирования чапинского комплекса хорошо согласуется с возрастом других проявлений щелочно-ультраосновного и карбонатитового магматизма на юге Сибирского кратона. Наиболее близким по возрасту является Белозиминский карбонатитовый массив, генетически связанный с ультраосновными щелочными сериями даек и трубкой Южной в Урикско-Ийском грабене. Возраст зиминского комплекса, по разным оценкам составляет от 646 до 621 млн лет [14–17]. Развитие щелочно-ультраосновного магматизма на данных территориях в период 725–630 млн лет связывается с распадом лавразийской части суперконтинента Родиния [18].

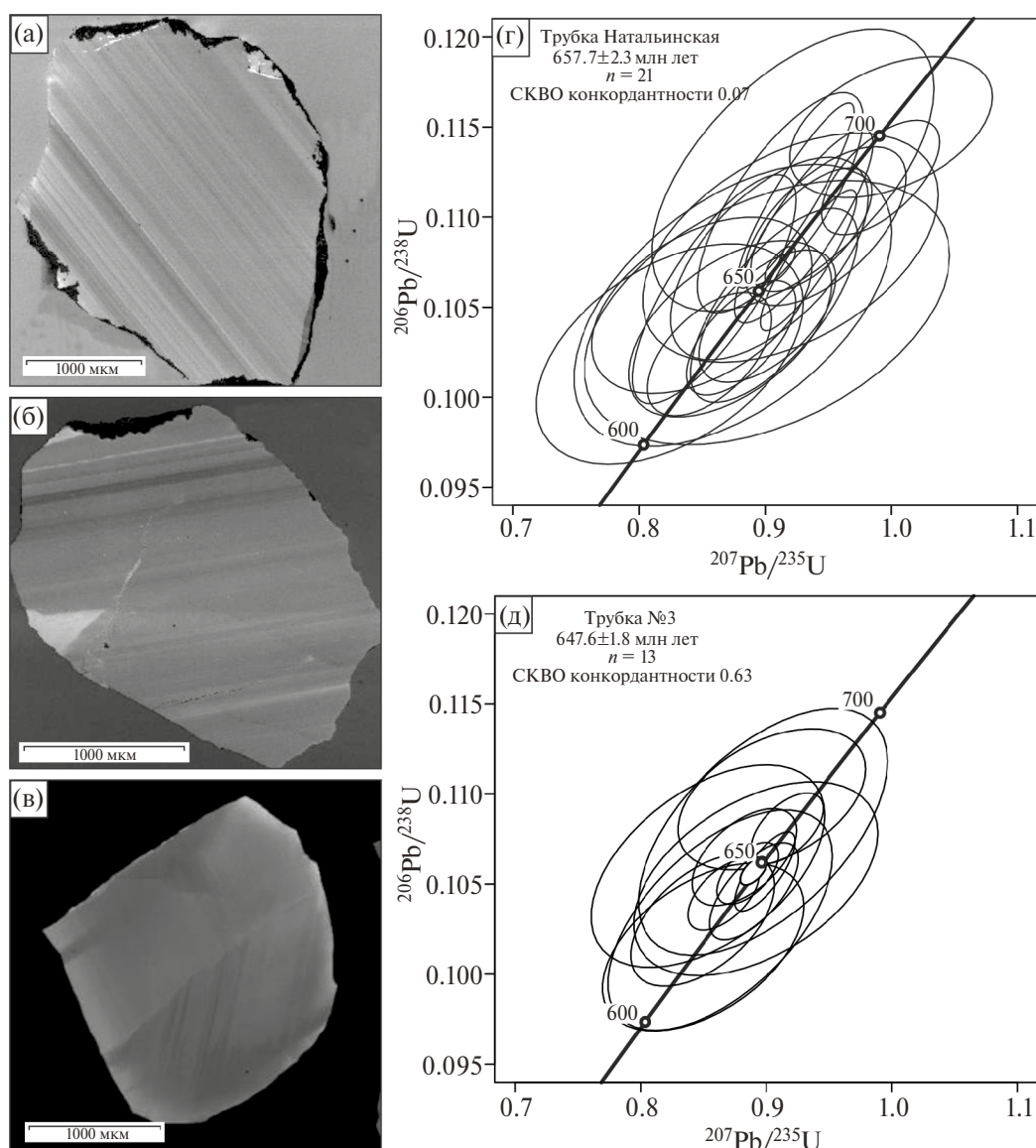


Рис. 3. U–Pb-возраст мегакристов циркона из трубок взрыва чапинского УЩК поля. Катодолуминесцентные изображения: а – трубка Натальинская; б – трубка № 3; в – кимберлит [13], г и д – диаграммы с конкордией для мегакристов циркона.

Ультраосновной щелочной магматизм в неопротерозое затрагивал краевые части, разделившихся суперконтинентов. На рубеже 670–550 млн лет вдоль северной и восточной окраин Лаврентийского кратона также формировались магматические комплексы кимберлитов, щелочно-ультраосновных пород и карбонатитов по многим параметрам сопоставимые с щелочно-ультраосновными комплексами Сибирского кратона [19].

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

U–Pb-измерения проводились в ИЗК СО РАН (Иркутск) с использованием оборудования ЦКП “Геодинамика и геохронология”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метелкин Д. В., Верниковский В. А., Казанский А. Ю. Неопротерозойский этап эволюции Родинии в свете новых палеомагнитных данных по западной окраине Сибирского кратона // Геология и геофизика, 2007. Т. 48. № 1. С. 42–59. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2006.12.004>
2. Ножкин А. Д., Туркина О. М., Баянова Т. Б., Бережная Н. Г., Ларионов А. Н., Постников А. А., Травин А. В., Эрнст Р. Е. Неопротерозойский рифтогенный и внутриплитный магматизм Енисейского кряжа как индикатор процессов распада Родинии // Геология и геофизика, 2008. Т. 49. № 7. С. 666–688. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.06.007>
3. Vernikovskaya A. E., Datsenko V. M., Vernikovskiy V. A., Matushkin N. Yu., Laevsky Yu. M., Romanova I. V., Travin A. V., Voronin K. V., Lepekhiina E. N. Magmatism evolution and carbonatite-granite association in the neoproterozoic active continental margin of the Siberian craton: Thermochronological reconstructions // Doklady Earth Sciences. 2013. V. 448. № 2. P. 161–167. <https://doi.org/10.1134/S1028334X13020177>
4. Vrublevskii, V. V., Reverdatto, V. V., Izokh A. E., Gertner I. F., Yudin D. S., Tishin, P. A. Neoproterozoic carbonatite magmatism of the Yenisei Ridge, Central Siberia: Ar/Ar geochronology of the Penchenga rock complex // Doklady Earth Sciences. 2011. V. 437. № 2. P. 443–448. <https://doi.org/10.1134/S1028334X11040088>
5. Карпинский Р. Б. О находке жильных кимберлитов в Енисейском кряже / Материалы по геологии и полезным ископаемым Красноярского края. Красноярск, 1962. С. 235–237.
6. Динер А. Э., Качевская Г. И., Качевский Л. К. Эталон чапинского комплекса щелочных пикритов (Енисейский кряж). Красноярск: Красгео, 2000. 78 с.
7. Sun J., Tappe S., Kostrovitsky S. I., Liu C., Skuzovatov S. Yu., Wu F. Mantle sources of kimberlites through time: A U–Pb and Lu–Hf isotope study of zircon megacrysts from the Siberian diamond fields // Chemical Geology, 2018. V. 479. P. 228–240. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.01.013>
8. Wiedenbeck M., Alle P., Corfu F., Griffin W. L., Meier M., Oberli F., Von Quadt A., Roddick J. C., Spiegel W. Three Natural Zircon Standards for U–Th–Pb, Lu–Hf, Trace Element and REE Analyses // Geostandards and Geoanalytical Research. 1995. V. 19. № 1. P. 1–23. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.1995.tb00147.x>
9. Slama J., Kosler J., Condon D. J., Crowley J. L., Gerdes A., Hanchar J. M., Horstwood M. S. A., Morris G. A., Nasdala L., Norberg N., Schaltegger U., Schoene B., Tubrett M. N., Whitehouse M. J. Plesovice Zircon – A New Natural Reference Material for U–Pb and Hf Isotopic Microanalysis // Chemical Geology. 2008. V. 249. № 1–2. P. 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>
10. Black L. P., Kamo S. L., Allen C. M., Davis D. W., Aleinikoff J. N., Valley J. W., Mundil R., Campbell I. H., Korsch R. J., Williams I. S., Foudoulis C. 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 // Chemical Geology. 2004. 205. V. 1–2. P. 115–140. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.01.003>
11. Paton Ch., Hellstrom J. C., Paul P., Woodhead J. D., Hergt J. M. Iolite: Freeware for the Visualisation and Processing of Mass Spectrometric Data // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2011. V. 26. P. 2508–2518. <https://doi.org/10.1039/C1JA10172B>
12. Powerman V. I., Buyantuev M., Ivanov A. V. A Review of Detrital Zircon Data Treatment, and Launch of a New Tool “Dezirteer” along with the Suggested Universal Workflow // Chemical Geology. 2021. V. 583. Art. № 120437. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120437>
13. Vermeesch P. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology // Geoscience Frontiers. 2018. V. 9. P. 1479–1493. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.001>
14. Doroshkevich A. G., Veksler I. V., Izbrodin I. A., Ripp G. S., Khromova E. A., Posokhov V. F., Travin A. V., Vladykin N. V. Stable isotope composition of minerals in the Belaya Zima plutonic complex, Russia: Implications for the sources of the parental magma and metasomatizing fluids // Journal Asian Earth Sciences. 2016. V. 26. P. 81–96. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.11.011>
15. Savelyeva V. B., Danilova Yu. V., Academician of the Russian Academy of Sciences Letnikov F. A., Demon-

- terova E. I., Yudin D. S., Bazarova E. P., Danilov B. S., Sharygin I. S.* Age and Melt Sources of Ultramafic Dykes and Rocks of the Bolshetagninskii Alkaline Carbonatite Massif (Urik-Iya Graben, SW Margin of the Siberian Craton) // *Doklady Earth Sciences*. 2022. V. 505. № 1. P. 452–458. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22070169>
16. *Ashchepkov I., Zhmodik S., Belyanin D., Kiseleva O., Medvedev N., Travin A., Yudin D., Karmanov N. S., Downes H.* Aillikites and Alkali Ultramafic Lamprophyres of the Beloziminsky Alkaline Ultrabasic-Carbonatite Massif: Possible Origin and Relations with Ore Deposits // *Minerals*. 2020. V. 10. 404. <https://doi.org/10.3390/min10050404>
17. *Ярмолюк В. В., Коваленко В. И., Сальникова Е. Б., Никифоров А. В., Котов А. Б., Владыкин Н. В.* Позднерифейский рифтогенез и распад Лавразии: данные геохронологических исследований щелочно-ультраосновных комплексов южного обрамления Сибирской платформы // *ДАН*. 2005. Т. 404. № 3. С. 400–406. https://elibrary.ru/download/elibrary_9155252_77974831.pdf
18. *Kuzmin M. I., Yarmolyuk V. V.* Mantle plumes of Central Asia (Northeast Asia) and their role in forming endogenous deposits // *Russian Geology and Geophysics*. 2014. V. 55. P. 120–143. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.01.002>
19. *Tappe S., Foley S. F., Stracke A., Romer R. L., Kjarsgaard B. A., Heaman L. M., Joyce N.* Craton reactivation on the Labrador Sea margins: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age and Sr-Nd-Hf-Pb isotope constraints from alkaline and carbonatite intrusives // *Earth and Planetary Science Letters*. 2007. 256. P. 433–454. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.01.036>

AGE OF ALKALINE ULTRAMAFIC EXPLOSION PIPES OF THE CHAPINSKY COMPLEX (YENISEI RIDGE)

Yu. V. Danilova^{a, #}, I. S. Sharygin^a, I. A. Gladkochub^a, E. I. Nikolenko^b, N. V. Bryansky^{a, e}, S. Yu. Skuzovator^c, A. S. Gladkov^a, A. V. Ivanov^a, D. A. Koshkarev^d, Academician of the RAS F. A. Letnikov^a

^a*Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation*

^b*ALROSA (ZIMBABWE)(PRIVATE) LIMITED, Harare, Zimbabwe*

^c*Vinogradov Institute of Geochemistry Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation*

^d*ALROSA, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation*

^e*Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation*

[#]*E-mail: jdan@crust.irk.ru*

The age of formation of explosion pipes of the Chapinsky complex in the Chingasan magmatic belt in the north of the Yenisei Ridge was determined. U-Pb dating of zircon megacrysts from alkaline-ultramafic rocks established values of 657.7 ± 13.4 and 647.6 ± 9.7 Ma for the Natalyinskaya and № 3 pipes, respectively. The intrusion of alkaline-ultramafic explosion pipes of the Chapinsky complex corresponds to the time of manifestation of ultramafic alkaline magmatism along the southern and southwestern margin of the Siberian craton.

Keywords: U-Pb dating, explosion pipes, Chapinsky ultramafic alkaline complex, Yenisei Ridge, Siberian Craton