

УДК 550.42

DOI: 10.24930/1681-9004-2023-23-4-603-621

U-Pb (LA-ICP-MS) возраст детритовых цирконов из песчаников кратерной части кимберлитовой трубки им. В. Гриба и магматического объекта KL-01, Архангельская алмазоносная провинция (север Восточно-Европейской платформы)

Е. В. Агашева

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3,
e-mail: shchukinalena@igm.nsc.ru

Поступила в редакцию 27.04.2023 г., принята к печати 10.07.2023 г.

Объект исследования. Обломочные цирконы из песчаников, не содержащих какую-либо примесь магматического (туфогенного) материала, отобранных из кратерных частей высокоалмазоносной кимберлитовой трубки им. В. Гриба и магматического объекта KL-01. Оба объекта расположены на севере Восточно-Европейской платформы, в пределах Архангельской алмазоносной провинции, на расстоянии ≈ 100 км друг от друга. **Цель.** Получить первые данные по составу U-Pb изотопной системы обломочных цирконов из песчаников магматических объектов Архангельской алмазоносной провинции для возрастных оценок их источников сноса и установления корреляций с известными тектонотермальными событиями в континентальной коре региона. **Материалы и методы.** Методом LA-ICP-MS получены данные по составу U-Pb изотопной системы 52 зерен цирконов из песчаников трубки им. В. Гриба и 143 зерен цирконов из песчаников объекта KL-01. **Результаты.** Для изученных цирконов установлены разновозрастные источники сноса – от архейских до неопротерозойских, но с преобладанием мезопротерозойских, которым отвечают 63 и 65% зерен из трубки им. В. Гриба и объекта KL-01 соответственно. Для цирконов из песчаников трубки им. В. Гриба отмечается большее количество зерен мезо- и неоархейского ($\approx 15\%$) и меньшее палеопротерозойского ($\approx 14\%$) возраста по сравнению с таковыми из объекта KL-01 (≈ 7 и 20% соответственно). Для двух объектов установлено отсутствие цирконов, возраст которых соответствует интервалу 900–700 млн лет. Минимальный возраст цирконов из песчаников кратера трубки им. В. Гриба (557 ± 9 млн лет) и объекта KL-01 (609 ± 9 млн лет) согласуется с определенным возрастом формирования вендских песчаников в районе трубок Архангельской алмазоносной провинции. **Выводы.** Полученные U-Pb возрастные оценки для изученных обломочных цирконов в целом коррелируют с выявленными ранее этапами тектонотермальных событий в континентальной коре северных территорий Восточно-Европейской платформы, за исключением мезопротерозойского периода 1.7–1.4 и 1.3–1.0 млрд лет назад, которому соответствует преобладающая часть U-Pb возрастных значений изученных цирконов.

Ключевые слова: кимберлитовая трубка, кратер, Восточно-Европейская платформа, песчаник, циркон, континентальная кора, магматизм, седиментация

Источник финансирования

Все аналитические работы выполнены при поддержке Российского научного фонда, грант № 20-77-10018. Отбор образцов песчаников из кратерной части кимберлитовой трубки им. В. Гриба и магматического объекта KL-01 выполнен по государственному заданию ИГМ СО РАН (№ 122041400157-9)

U-Pb (LA-ICP-MS) age of detrital zircons from sandstones of the crater part of the V. Grib kimberlite pipe and KL-01 magmatic object, Arkhangelsk diamondiferous province (north of the East European Platform)

Elena V. Agasheva

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, 3 Academician Koptyug av., Novosibirsk 630090, Russia,
e-mail: shchukinalena@igm.nsc.ru

Received 27.04.2023, accepted 10.07.2023

Для цитирования: Агашева Е.В. (2023) U-Pb (LA-ICP-MS) возраст детритовых цирконов из песчаников кратерной части кимберлитовой трубки им. В. Гриба и магматического объекта KL-01, Архангельская алмазоносная провинция (север Восточно-Европейской платформы). *Литосфера*, 23(4), 603-621. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-4-603-621>

For citation: Agasheva E.V. (2023) U-Pb (LA-ICP-MS) age of detrital zircons from sandstones of the crater part of the V. Grib kimberlite pipe and KL-01 magmatic object, Arkhangelsk diamondiferous province (north of the East European Platform). *Lithosphere (Russia)*, 23(4), 603-621. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-4-603-621>

© Е.В. Агашева, 2023

Research subject. Detrital zircons from sandstones that contain no admixtures of magmatic material, sampled from the crater parts of the highly diamondiferous V. Grib kimberlite pipe and KL-01 magmatic object. Both objects are located in the north of the East European Platform, within the Arkhangelsk diamondiferous province, at a distance of ≈ 100 km from each other. *Aim.* To obtain the first data on the composition of the U-Pb isotope system of detrital zircons from sandstones of magmatic objects of the Arkhangelsk diamondiferous province in order to evaluate the ages of their sources and reveal correlations with known tectono-thermal events in the continental crust of the region. *Materials and methods.* Using the LA-ICP-MS method, data were obtained on the composition of the U-Pb isotopic system of 52 zircon grains from the sandstones of the V. Grib pipe and 143 zircon grains from the KL-01 sandstones. *Results.* Sources of various ages from Archean to Neoproterozoic were established for the studied zircons. However, the majority zircons have Mesoproterozoic age, namely 63 and 65% of grains from the V. Grib pipe and KL-01 object, respectively. The sandstones of the V. Grib pipe contain a larger amount of Meso- and Neo-Archean zircons ($\approx 15\%$) and a smaller amount of Paleoproterozoic grains ($\approx 14\%$) compared to those from the KL-01 object ≈ 7 and 20% , respectively. The population of zircons with the U-Pb ages of $900\text{--}700$ Ma is absent in the two objects. The minimum age of zircons from sandstones of the crater of the V. Grib pipe (557 ± 9 Ma) and KL-01 object (609 ± 9 Ma) is consistent with that of formation of the Vendian sandstones in the area of the pipes of the Arkhangelsk diamondiferous province. *Conclusions.* The obtained U-Pb age for the studied detrital zircons generally correlate with the previously identified stages of tectono-thermal events in the continental crust of the northern territories of the East European Platform, with the exception of the Mesoproterozoic period $1.7\text{--}1.4$ and $1.3\text{--}1.0$ Ga ago, which corresponds to the predominant part U-Pb age values of the studied zircons.

Keywords: kimberlite pipe, crater part, East European platform, sandstone, zircon, continental crust, magmatism, sedimentation

Funding information

All analytical works were supported by the Russian Science Foundation (grant No. 20-77-10018, <https://rscf.ru/project/20-77-10018>). Sampling of sandstones from the crater parts of the V. Grib kimberlite pipe and the KL-01 magmatic object was carried out due to the state assignment of IGM SB RAS (No. 122041400157-9)

ВВЕДЕНИЕ

Кратоны – это древнейшие (более 2.5 млрд лет) участки континентальной коры с подстилающей литосферной мантией мощностью ≥ 150 км, с минимальными проявлениями тектономагматической активности с конца мезопротерозойской эры (более 1 млрд лет) (Pearson et al., 2021). Считается, что образование большей части кратонной литосферной мантии и континентальной коры (КК) происходило одновременно в результате крупномасштабного тектономагматического события (Pearson, Wittig, 2014; Moyné et al., 2017) с последующими этапами их преобразования (Rudnick, Gao, 2014). Выявление этапов образования и преобразования кратонной КК и литосферной мантии и определение их соответствия или несоответствия (Foley, 2008; Lee et al., 2011; Moyné et al., 2017; Shatsky et al., 2019) играет ключевую роль не только в реконструкции тектонической эволюции кратона в региональном масштабе, но и в определении связи с коренной алмазонасностью региона (Божко и др., 2021).

Породы КК на северных территориях Восточно-Европейской платформы, где расположена Архангельская алмазонасная провинция (ААП), включающая в себя около 100 магматических объектов основного и ультраосновного состава и два крупных коренных месторождений алмазов (им. М.В. Ломоносова и им. В. Гриба), перекрыты толщами осадочных пород вендского, каменноугольного и пермского возраста мощностью от 500 м до более 1 км (Богатилов и др., 1999). Данные о составе и возрас-

те КК в этом регионе могут быть получены только на основании изучения ксенолитов КК, извлеченных из магматических объектов ААП или по породам КК из керна глубоких скважин. К настоящему времени данные по составу и возрастным оценкам пород КК ААП очень ограничены и получены по результатам исследования ксенолитов нижне- и среднекоровых пород из кимберлитовых трубок им. В. Гриба (Скублов и др., 2012; Koreshkova et al., 2014; Shchukina et al., 2018) и № 688 (Markwick, Downes, 2000), а также пород поверхности фундамента, вскрытых сериями скважин в центральной и южной частях ААП (Самсонов и др., 2009). В работе (Самсонов и др., 2009) сделан вывод о возрастном гетерогенности пород КК в пределах ААП: исключительно палеопротерозойский возраст КК в центральной части ААП, где расположены все высокоалмазонасные кимберлитовые трубки, и архейский (2.8–2.7 млрд лет) – в южной и северной частях ААП. На основании изучения U-Pb изотопного состава цирконов из нижнекоровых ксенолитов кимберлитовой трубки им. В. Гриба (Koreshkova et al., 2014; Shchukina et al., 2018) выделено как минимум два главных тектонотермальных этапа в нижней коре: архейский (≈ 2.7 млрд лет) и палеопротерозойский (1.9–1.7 млрд лет), и установлен факт значительной проработки более древних коровых пород в период 1.9–1.7 млрд лет назад, что могло быть связано с этапом палеопротерозойской субдукции (Shchukina et al., 2018), коррелирующей по времени с этапом коллизии Кольского и Карельского кратонов (Божко и др., 2021). Учи-

тывая слабую степень изученности ксенолитов КК ААП и тот факт, что в большинстве магматических объектов ксенолиты КК сильно изменены вторичными процессами, реконструкция тектонотермальных событий КК ААП могла бы быть более эффективна проведена на основании интерпретации данных по составу U-Pb изотопной системы в цирконах, представленных в виде ксенокристов в магматических породах (Kostrovitsky et al., 2016). К настоящему времени опубликованы только результаты U-Pb датирования 33 зерен ксенокристов цирконов из кимберлита трубки им. В. Гриба (Петров и др., 2006), которые показали следующее соотношение возрастных групп цирконов: 2.8–2.6 млрд лет – 9%, 2.6–2.4 млрд лет – 15%, 2.0–1.8 млрд лет – 30%, 1.6–0.9 млрд лет – 46%. Тем не менее данные результаты интерпретированы по-разному: 1) согласно (Петров и др., 2006), возраст цирконов 2.8–2.4 млрд лет свидетельствует об архейском возрасте КК в районе трубки им. В. Гриба, а возрасты 2.1–0.9 млрд лет оцениваются как полученные за счет детритовых цирконов из терригенной фракции пород осадочного чехла; 2) согласно (Самсонов и др., 2009), преобладающий возраст цирконов 2.0–1.8 млрд лет (Петров и др., 2006) подтверждает палеопротерозойский возраст КК в районе трубки им. В. Гриба.

Очевидная проблема в интерпретации результатов U-Pb датирования ксенокристов цирконов как из кимберлита трубки им. В. Гриба (Петров и др., 2006), так и из пород других магматических объектов ААП заключается в возможном присутствии фрагментов вмещающих осадочных пород непосредственно в самих магматических породах, слагающих трубку взрыва (Agasheva, 2021), материал которых используется для дальнейшего измельчения и выделения монофракции цирконов. Полученные возрастные оценки для таких цирконов могут указывать как на возраст пород, являющихся источниками сноса для детритовых цирконов, и, соответственно, отражать этапы седиментации вмещающих трубки пород (Гладкочуб и др., 2013), так и на этапы тектонотермальных событий в КК в районе изучаемого объекта при условии четкого определения, что изучаемые цирконы являются фрагментами пород КК (Kostrovitsky et al., 2016). Первоочередное и обязательное условие для корректной интерпретации данных по U-Pb датированию ксенокристов цирконов из магматических объектов ААП – тип и качество исследуемой магматической породы, которая в дальнейшем будет использована для измельчения и выборки зерен цирконов. Для получения данных по этапам тектонотермальных событий в КК ААП исходная порода должна представлять собой абсолютно “чистый” образец магматической породы ААП, достоверно без какой-либо примеси терригенного осадочного материала. Такое условие не может

быть выполнено для всех магматических объектов ААП, так как жерловые части трубок взрыва ААП могут быть представлены ксенотуфобрекчей, т. е. в самой магматической породе предполагается присутствие материала терригенных вмещающих пород (Agasheva, 2021). Для получения данных по этапам седиментации вмещающих трубки ААП пород должны быть использованы образцы осадочных пород, отобранные или за пределами магматического объекта, или из кратерных частей трубок при условии абсолютного отсутствия магматического (туфогенного) материала в таких образцах. К настоящему времени результаты изучения цирконов из осадочных пород ААП отсутствуют, что не позволяет при интерпретации результатов U-Pb датирования ксенокристов цирконов из магматических объектов ААП выделять возрастные группы цирконов, которые могут не отражать этапы тектонотермальных событий в КК в районе изучаемого магматического объекта.

В настоящей работе представлены первые данные по U-Pb изотопному составу детритовых цирконов из песчаников кратерной части кимберлитовой трубки им. В. Гриба и магматического объекта КЛ-01, которые расположены в центральной и юго-восточной частях ААП на расстоянии ≈ 100 км друг от друга. Для настоящего исследования использованы песчаники без какой-либо примеси магматического (туфогенного) материала, отобранные из кратерных частей объектов, что позволяет интерпретировать полученные результаты только в качестве свидетельств возраста источников сноса для изученных цирконов в разных частях ААП.

КРАТКИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Высокоалмазонасная (до 1.27 кар/т (Устинов и др., 2021)) кимберлитовая трубка им. В. Гриба (376 ± 3 млн лет (Ларионова и др., 2016)) расположена в центральной части ААП (рис. 1), в пределах Верхотинского поля (Богатиков и др., 1999). Трубка прорывает слаболифтицированные осадочные породы вендского возраста, представленные преимущественно песчаниками, и перекрыта толщами осадочных пород (песчаниками, известняками, доломитами) среднекаменноугольного возраста и рыхлых четвертичных отложений, общая мощность которых составляет около 70 м (Пенделяк и др., 2019). В строении трубки им. В. Гриба выделены кратерная и диатремовая фации. Кратерная часть мощностью от ≈ 70 до ≈ 150 м (Пенделяк и др., 2019), представлена разнообразными вулканогенно-осадочными (туфопесчаниками, туфами, туффитами) и осадочными (песчаниками без примеси магматического (туфогенного) материала) породами. Диатремовая часть состоит из ксенотуфобрекчи, развитой в южной части диатремы, и собственно кимберлита.

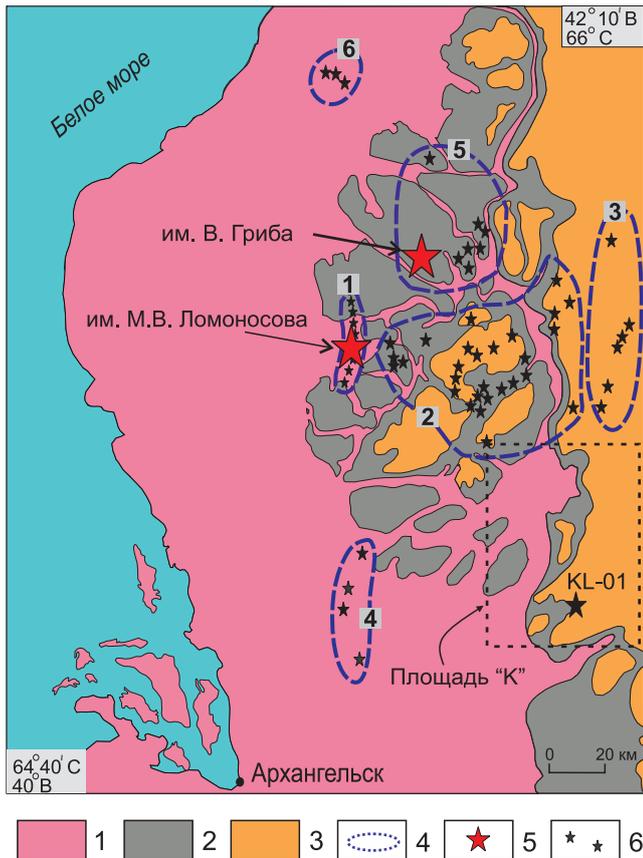


Рис. 1. Геологическая карта Архангельской алмазодонной провинции.

1 – верхний венд, 2 – средний карбон, 3 – пермь, 4 – магматические поля, 5 – месторождения алмазов, 6 – магматические объекты ультраосновного и основного состава. 1–6 в светлых квадратиках на карте: 1 – Золотитское поле кимберлитов, 2 – Кепинское поле кимберлитов и оливиновых мелилититов/пикритов, 3 – Турьинское поле базальтов, 4 – Ижмозерское поле оливиновых мелилититов/пикритов, 5 – Верхотинское поле кимберлитов и оливиновых мелилититов/пикритов, 6 – Мельское поле карбонатитов и кимберлитов.

Fig. 1. Geological map of the Arkhangelsk diamondiferous province.

1 – Upper Vendian, 2 – Middle Carboniferous, 3 – Permian, 4 – magmatic fields, 5 – diamond deposits, 6 – igneous objects of ultrabasic and basic composition. 1–6 in light squares on the map: 1 – Zolotitsa field of kimberlite, 2 – Kepingo field of kimberlite and olivine melilitite/picrite, 3 – Turyino field of basalt, 4 – Izhmozero field of olivine melilitite/picrite, 5 – Verkhotina field of kimberlite and olivine melilitite/picrite, 6 – Mela field of carbonatite and kimberlite.

Магматический объект KL-01 расположен в юго-восточной части ААП, и к настоящему времени его локализация не привязана к какому-либо ранее выделенному магматическому полю ААП (см. рис. 1). Объект KL-01 обнаружен на территории ААП в 2017 г. в пределах поисковой площа-

ди “К” (Agasheva, 2021), которая граничит на севере с Кепинским полем кимберлитов и оливиновых мелилититов/пикритов (Богатиков и др., 1999; Голубев и др., 2010) и Турьинским полем базальтов (см. рис. 1). Объект KL-01 идентифицируется как аномалия 12–13 нТл в локальном магнитном поле по данным наземной магнитной съемки (Agasheva, 2021). Интерпретация геофизических данных и результаты глубинного бурения позволили установить, что объект KL-01 имеет строение трубки, т. е. является геологическим телом с более широкой приповерхностной частью, сужающейся с глубиной. К настоящему времени объект KL-01 опробован тремя скважинами до глубины 150–300 м в центральной (скв. №1), северной (скв. № 2) и южной (скв. № 3) частях аномалии. Результаты комплексного минералого-петрографического и геохимического изучения пород из двух скважин (№ 1 и 2; Agasheva, 2021), представленных песчаниками с варьирующимся модалным количеством магматического (туфогенного) материала (от <1 до 10 об. % в образцах из скв. № 1 и от 10 до 30 об. % в образцах из скв. № 2), позволили установить, что исследуемые песчаники являются составляющими кратерной части магматического объекта, а тип магматической (туфогенной) компоненты определен как кимберлитовый (Agasheva, 2021).

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы песчаников из кимберлитовой трубки им. В. Гриба отобраны из керна одной заверочной скважины (интервал 70–174 м от поверхности), пробуренной в центральной части трубки, а также непосредственно из карьера трубки. Образцы песчаников из магматического объекта KL-01 отобраны из керна заверочной скв. №1 (Agasheva, 2021). Для настоящего исследования отобраны только песчаники без видимой примеси магматического (туфогенного) материала (рис. 2).

Песчаники из кимберлитовой трубки им. В. Гриба представлены образцами от светло- до бурокоричневого цвета, от почти рыхлых до хорошо сцементированных (см. рис. 2). Они состоят из преобладающего кварца и в подчиненном количестве калиевого полевого шпата с частыми акцессорными минералами, такими как слюда, гематит, циркон, рутил, и редкими амфиболом и плагиоклазом. Вторичные минеральные фазы представлены каолинитом, хлоритом, доломитом и редко кальцитом и иллитом. Песчаники из магматического объекта KL-01 от светло- до буро-коричневого цвета, слабосцементированные (см. рис. 2). Они сложены кварцем и калиевым полевым шпатом с частыми акцессорными минералами, такими как циркон, рутил, брукит/анатаз, ильменит, биотит, барит, гематит, магнетит, титаномагнетит и редко амфибол, апатит, монацит, мусковит, перовскит и сульфиды.



Рис. 2. Фотографии представительных образцов песчаников из кратерных частей кимберлитовой трубки им. В. Гриба (а) и магматического объекта KL-01 (б).

Fig. 2. Photographs of representative samples of sandstone from the crater parts of the V. Grib kimberlite pipe (a) and KL-01 magmatic object (b).

фиды. Основная масса песчаников состоит из смеси тех же минералов меньших размеров и содержит обильные выделения вторичных фаз, такие как кальцит, хлорит, доломит, каолинит и редко иллит. Более детальная информация по петрографии, минералогии и валовому составу песчаников представлена в работе (Agasheva, 2021).

Все аналитические работы выполнены в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск). Песчаники из трубки им. В. Гриба (50 кг) и из объекта KL-01 (100 кг) раздроблены и обработаны методами магнитной сепарации и разделения в тяжелых жидкостях. Методика включала в себя следующие этапы: 1) выделение фракции сильномагнитных минералов с помощью ручного магнита РМЧ; 2) разделение минералов немагнитной фракции на неэлектромагнитную и электромагнитную с помощью роликового сепаратора 138Т-СЭМ; 3) разделение минералов неэлектромагнитной и электромагнитной фракций на тяжелый и легкий концентрат с использованием тяжелой жидкости (CH_2Br_2 , $\rho = 2.89 \text{ г/см}^3$). Зерна цирконов отобраны вручную из концентрата тяжелой неэлектромагнитной фракции $-0.3 + 0.1 \text{ мм}$. Из образцов песчаников кратерной части кимберлитовой трубки им. В. Гриба выбраны все диагностируемые зерна цирконов, количество которых состави-

ло 90 шт. Из образцов песчаников магматического объекта KL-01 отобрано 600 зерен цирконов, из которых для дальнейших исследований использовано 143 зерна. Зерна цирконов были залиты эпоксидной смолой и отполированы.

Исследование внутреннего строения цирконов проводилось на электронном сканирующем микроскопе LEO 1430VP с помощью детектора Centaurus при силе тока 10 нА и напряжении 20 кВ, время съемки – 90 с.

Определение состава U-Pb изотопной системы проведено на масс-спектрометре высокого разрешения с индуктивно связанной плазмой Thermo Scientific Element XR, соединенном с системой лазерной абляции Analyte Excite фирмы Teledyne Cetac Technologies на основе ультрафиолетового эксимерного Ar-F лазера с длиной волны 193 нм. Параметры масс-спектрометра оптимизировали для получения максимальной интенсивности сигнала ^{208}Pb при минимальном значении $^{248}\text{ThO}^+ / ^{232}\text{Th}^+$ (менее 2%), используя стандарт NIST SRM612. Все измерения выполняли по массам ^{202}Hg , $^{204}(\text{Pb} + \text{Hg})$, ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{238}U . Съемка проводилась в режиме E-scan. Детектирование сигналов осуществлялось в режиме счета (counting) для всех изотопов, кроме ^{238}U и ^{232}Th (режим triple). Диаметр лазерного луча составлял 25 мкм, частот-

та повторения импульсов 5 Гц, плотность энергии лазерного излучения 2.3 Дж/см². Данные масс-спектрометрических измерений обрабатывали с помощью программы “Glitter” (GEMOC; Griffin et al., 2008). U-Pb изотопные отношения нормализовали на соответствующие значения изотопных отношений стандартных цирконов Temora (Black et al, 2004), Plesovice (Slama et al., 2008). Изотопные соотношения ²⁰⁷Pb/²³⁵U рассчитывались исходя из природного соотношения ²³⁸U/²³⁵U = 137.88. Погрешности единичных анализов изотопных отношений и возрастов приведены на уровне 1σ. В 31 зерне цирконов из объекта KL-01 и 4 зернах цирконов из трубки им. В. Гриба данные получены для центральных и краевых частей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цирконы из песчаников кратерной части кимберлитовой трубки им. В. Гриба представлены бесцветными и бледно-желтыми идиоморфными зернами размером от 50 до 100 мкм (единичные – до 200 мкм). Большинство цирконов представлены зернами округлой формы и их обломками (рис. 3), и лишь единичные сохранили удлиненно-призматические и дипирамидальные очертания (см. рис. 3). Особенности внутреннего строения по катодолюминесцентным (КЛ) изображениям свидетельствуют о том, что большинство изученных цирконов характеризуются осцилляторным (43% зерен) или секториальным (50%) типами зональности, и только единичные зерна (7%) однородны по КЛ изображениям (см. рис. 3). Ни в одном зерне не обнаружены реликтовые ядра, и лишь в трех зернах идентифицируются светлые оболочки шириной <20 мкм (№ 15, 26, 29).

Результаты определения U-Pb изотопного состава 52 зерен цирконов из песчаников кратерной части кимберлитовой трубки им. В. Гриба представлены в табл. 1. Гистограммы и кривые относительной вероятности по отношению ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb показаны на рис. 4а. Диаграммы с конкордией для цирконов представлены на рис. 5а. Все проанализированные зерна цирконов показали конкордантность на уровне ±10% (см. табл. 1).

Изученные цирконы из песчаников кратерной части кимберлитовой трубки им. В. Гриба показывают широкий диапазон U-Pb возраста, от мезоархея до неопротерозоя: возраст наиболее древних цирконов определен как 3053 ± 33 и 3018 ± 31 млн лет, а наиболее молодой составляет 557 ± 9 млн лет. Большая часть полученных возрастных значений соответствует интервалам 1.7–1.4 (36% зерен) и 1.3–1.0 (27%) млрд лет. Представительное количество зерен демонстрируют значения возраста, отвечающие интервалу 2.8–2.7 млрд лет (13%). Наименьшее количество зерен характеризуются значениями возраста в интервалах 2.2–2.0 (7%) и 1.9–1.8

(5%) млрд лет. Необходимо отметить отсутствие цирконов, возраст которых соответствует интервалу 900–600 млн лет (см. рис. 4а, 5а). Значения возраста, полученные в центральной и краевой частях четырех зерен цирконов, не показали существенных различий (см. рис. 3, табл. 1).

Цирконы из песчаников магматического объекта KL-01 представлены бесцветными и бледно-желтыми идиоморфными зернами размером от 80 до 150 мкм. Большинство цирконов – это зерна округлой и овально-вытянутой формы (70%), но 30% зерен сохранили удлиненно-призматические очертания (см. рис. 3). На основании КЛ изображений установлено преобладание зерен с секториальным (57%) и осцилляторным (27%) типами зональности, подобно цирконам из кратерной части трубки им. В. Гриба, но с большим количеством зерен, имеющих однородное строение (16%). Ни в одном зерне не обнаружены ни реликтовые ядра, ни обрамляющие оболочки.

Результаты определения U-Pb изотопного состава 143 зерен цирконов из песчаников магматического объекта KL-01 представлены в табл. 2. Гистограммы и кривые относительной вероятности по отношению ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb показаны на рис. 4б. Диаграммы с конкордией для цирконов представлены на рис. 5б. Из проанализированных 174 зерен 170 показали конкордантность на уровне ±10% (см. табл. 2).

Значения возраста, полученные для изученных зерен цирконов из песчаников магматического объекта KL-01, варьируются от мезоархея до неопротерозоя: наиболее древние – 3052 ± 32 млн лет, наиболее молодые – 640 ± 9, 621 ± 8 и 609 ± 9 млн лет. Преобладающее количество возрастных значений соответствует интервалам 1.3–1.0 (40% зерен) и 1.7–1.4 (25%) млрд лет. Представительное количество зерен демонстрируют значения возраста, отвечающие интервалу 1.9–1.8 млрд лет (12%), и меньшее, но равное количество – интервалам 2.8–2.7 (6%) и 2.5–2.4 (6%) млрд лет. Необходимо отметить отсутствие цирконов, возраст которых соответствует интервалам 2.9–2.8, 2.2–2.1 млрд лет и 900–700 млн лет (см. рис. 4б). Значения возраста в центральной и краевой частях 31 зерна цирконов не показали существенных различий (см. рис. 3, табл. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные по U-Pb возрасту детритовых цирконов из песчаников кратерной части кимберлитовой трубки им. В. Гриба и магматического объекта KL-01, расположенных в разных частях ААП на расстоянии ≈100 км друг от друга, позволяют выявить сходство и различия в возрасте их источников сноса в районе двух изученных магматических объектов и сопоставить полученные ре-

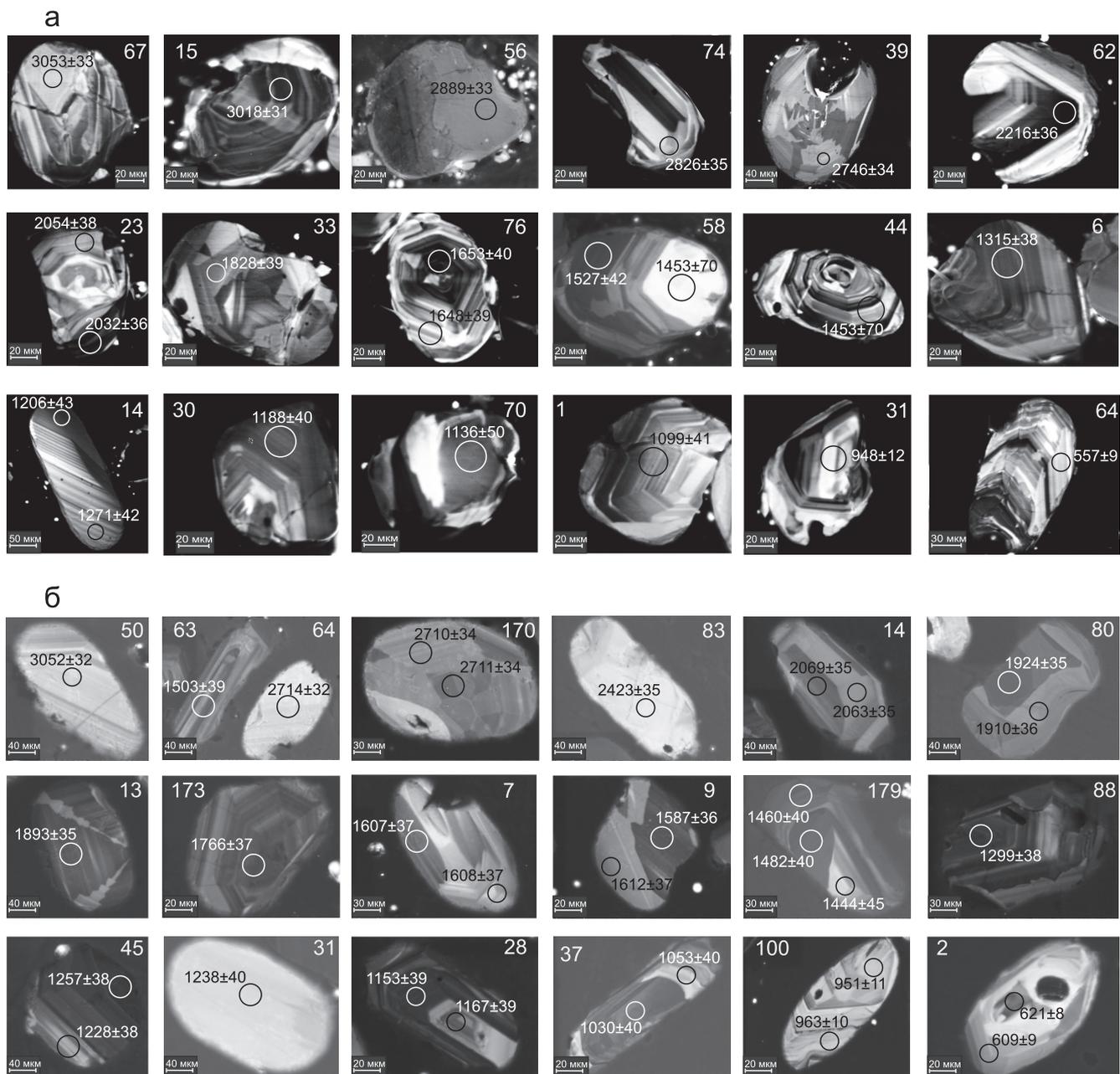


Рис. 3. Катодолуминесцентные изображения представительных зерен детритовых цирконов из песчаников кратерных частей кимберлитовой трубки им. В. Гриба (а) и магматического объекта KL-01 (б) с указанием значений U-Pb возраста (Pb-Pb >1 млрд лет и U-Pb для <1 млрд лет).

Кружком показано место абляционного кратера. Номера в угловой части каждой фотографии соответствуют номеру зерна.

Fig. 3. Cathodoluminescent images of representative grains of detrital zircons from sandstones of the crater parts of the V. Grib kimberlite pipe (a) and KL-01 magmatic object (b) with indication of U-Pb ages (Pb-Pb >1 Ga and U-Pb for <1 Ga).

The circular area shows the location of the ablation crater. The numbers indicated in the corner of each photo correspond to the grain number.

зультаты с данными по тектонотермальным событиям в КК региона, которые выявлены ранее по результатам исследований пород КК ААП.

Для детритовых цирконов из песчаников кратерной части трубки им. В. Гриба и объекта KL-01 установлены разновозрастные источники сноса –

Таблица 1. U-Pb оценки возраста детритовых цирконов из песчаников кратерной части кимберлитовой трубки им. В. Гриба**Table 1.** U-Pb age estimates for detrital zircons from sandstones of the crater part of the V. Grib kimberlite pipe

Номер зерна	Возраст, млн лет									
	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	D, %
1	1.00	1099	41	1068	10	1054	14	1129	15	4.2
2	0.30	1235	43	1204	13	1189	16	1371	25	3.9
3	0.28	1051	49	1036	13	1030	14	1081	25	2.0
4	0.28	1046	42	1036	11	1033	14	1045	17	1.3
5	1.14	1591	44	1590	16	1591	21	1616	25	0.0
6	0.21	1315	38	1323	11	1329	17	1394	19	-1.1
7	0.36	1530	37	1529	12	1530	19	1624	22	0.0
10	0.32	1090	41	1094	11	1098	14	1131	17	-0.7
11	0.49	2723	32	2722	14	2725	31	2706	36	-0.1
12	0.27	1313	41	1321	12	1328	17	1446	25	-1.1
13	0.30	1177	41	1184	11	1190	15	1189	19	-1.1
14 темный край	0.28	1206	43	1214	13	1220	16	1155	22	-1.1
14 светлый край	0.20	1271	42	1214	12	1184	16	1245	25	7.4
15	0.56	3018	31	3024	14	3037	34	3165	40	-0.6
16	0.42	1182	42	1189	12	1195	16	1166	19	-1.1
17	0.35	1565	40	1571	14	1577	20	1579	27	-0.8
18	0.43	1828	36	1821	13	1817	22	1927	27	0.6
20	0.52	2663	33	2667	14	2676	31	2631	37	-0.5
23 центр	1.37	2054	38	2032	15	2013	25	1978	29	2.1
23 край	0.36	2032	36	2025	14	2020	25	1905	29	0.6
24	0.40	1454	41	1454	14	1456	19	1451	26	-0.1
25	0.33	1532	39	1527	13	1526	19	1506	25	0.4
26	1.29	2724	33	2719	15	2716	32	2659	37	0.3
28	0.44	1226	43	1204	12	1194	16	1319	22	2.7
30	0.32	1188	40	1194	11	1199	15	1242	18	-1.0
31	0.38	940	48	948	12	952	13	1029	20	-1.3
33	0.92	1828	39	1818	14	1812	23	1734	27	0.9
34	0.61	1661	41	1630	15	1608	21	1633	28	3.3
35	0.47	1500	39	1503	13	1508	19	1556	24	-0.5
38	0.68	1655	39	1652	13	1651	21	1730	26	0.3
39	0.54	2746	34	2741	15	2738	32	2802	45	0.3
40	0.40	2346	37	2271	15	2191	27	2356	44	7.1
41	0.26	1801	37	1807	13	1815	22	1818	28	-0.8
42	0.57	1558	41	1540	14	1529	20	1546	27	1.9
44	0.51	1498	42	1487	14	1480	19	1425	26	1.2
46	1.03	1524	39	1510	13	1501	19	1512	23	1.5
47	0.67	1599	40	1585	14	1577	20	1633	27	1.4
48	0.15	1608	39	1583	13	1566	20	1551	30	2.7
51	0.56	1620	38	1623	13	1626	20	1609	25	-0.4
52	0.62	2056	36	2051	14	2049	25	2148	33	0.3
55	0.48	1024	55	970	15	948	14	988	23	8.1
56	0.84	2889	33	2845	15	2787	32	2752	42	3.7
57	0.93	1621	39	1620	13	1621	20	1603	26	0.0
58 светлый край	2.28	1453	70	1480	27	1500	26	1353	31	-3.1
58 темный край	2.62	1527	42	1513	14	1506	20	1423	23	1.4
62	0.48	2216	36	2200	15	2186	27	2167	36	1.4
64	0.55	575	53	557	9	553	8	547	11	4.0
65	0.54	2523	35	2522	15	2523	30	2594	45	0.0
67	0.38	3053	33	3036	16	3015	35	3039	54	1.2
69	0.31	2782	34	2764	16	2744	32	2731	50	1.4
70	0.24	1136	50	1144	15	1149	16	1278	33	-1.1
72	1.50	2799	34	2767	16	2727	32	2524	43	2.7
73	0.75	1770	41	1729	15	1697	22	1610	30	4.3
74	0.51	2826	35	2822	17	2820	34	2817	55	0.2
76 центр	0.90	1648	39	1640	14	1636	21	1747	30	0.7
76 край	0.71	1653	40	1637	14	1626	21	1630	30	1.6

Примечание. D – дискордантность.

Note. D – discordance.

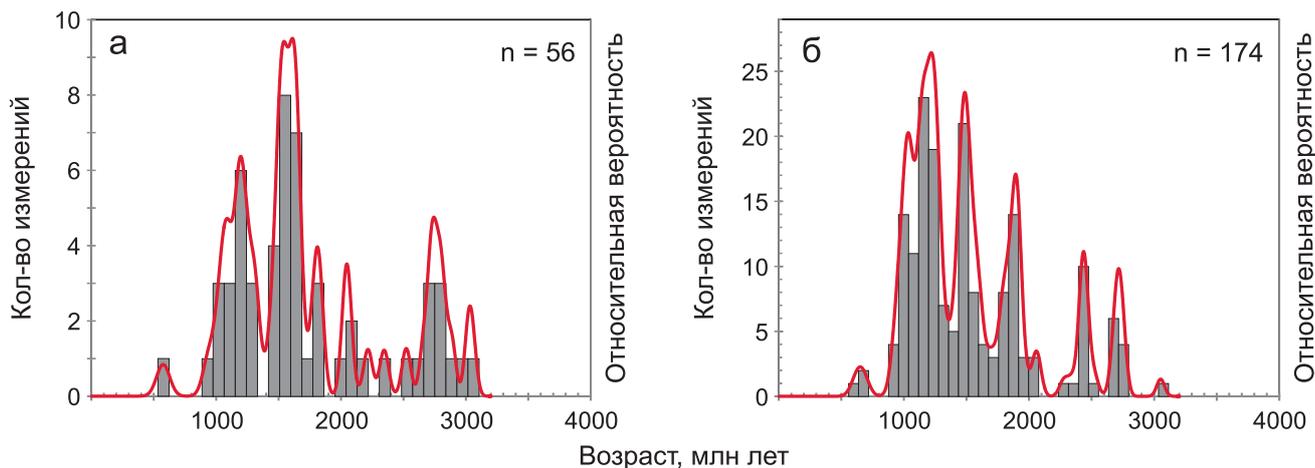


Рис. 4. Pb-Pb гистограммы и кривые относительной вероятности возраста детритовых цирконов из песчаников кратерных частей кимберлитовой трубки им. В. Гриба (а) и магматического объекта KL-01 (б).

Fig. 4. Pb-Pb histograms and relative probability curves for the age of detrital zircons from sandstones of the crater parts of the V. Grib kimberlite pipe (a) and KL-01 magmatic object (b).

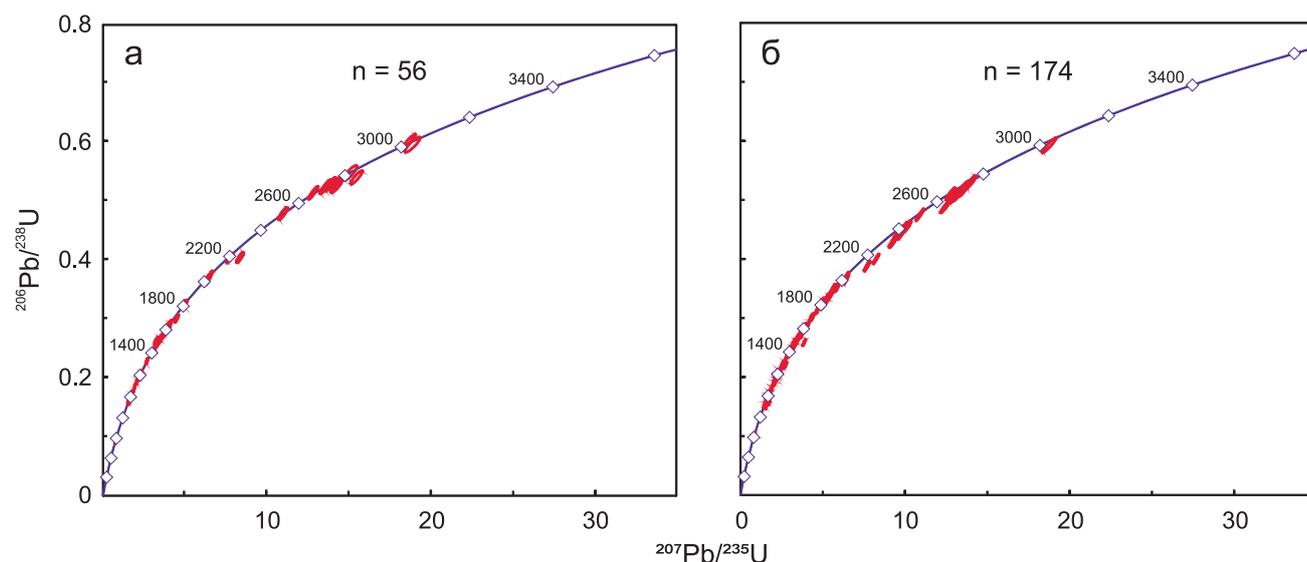


Рис. 5. Диаграммы с конкордией для детритовых цирконов из песчаников кратерных частей кимберлитовой трубки им. В. Гриба (а) и магматического объекта KL-01 (б).

Fig. 5. Concordia diagrams for detrital zircons from sandstones of the crater parts of the V. Grib kimberlite pipe (a) and KL-01 magmatic object (b).

от архейских до неопротерозойских, но с преобладанием мезопротерозойского возраста источников. Для цирконов из песчаников трубки им. В. Гриба отмечается большее количество зерен мезо- и неархейского возраста ($\approx 15\%$) и меньшее количество зерен палеопротерозойского возраста ($\approx 14\%$) по сравнению с таковыми из объекта KL-01 (≈ 7 и 20% соответственно). Для двух объектов установлено отсутствие цирконов, возраст которых соответствует интервалу 900–700 млн лет. Отсутствие

данных по концентрациям редких элементов в цирконах не позволяет точно определить состав материнской породы (Belousova et al., 2002; Griffin et al., 2006; Маслов и др., 2016), но на основании внутреннего строения цирконов по КЛ изображениям и значениям Th/U (см. табл. 1, 2) можно предполагать в качестве источников сноса для двух объектов преимущественно магматические породы. Минимальный возраст цирконов из песчаников кратера трубки им. В. Гриба (557 ± 9 млн лет) и объекта

Таблица 2. U-Pb оценки возраста детритовых цирконов из песчаников кратерной части магматического объекта KL-01

Table 2. U-Pb age estimates for detrital zircons from sandstones of the crater part of the KL-01 magmatic pipe

Номер зерна	Возраст, млн лет									
	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	D, %
1 центр	0.45	1043	41	1020	9.8	1011	13	985	14	3.2
1 край	0.39	1033	39	1023	9.2	1020	13	988	12	1.2
2 край	0.79	625	49	609	8.6	605.6	8.2	598.0	9.0	0.6
2 центр	1.23	686	46	621	7.8	604.3	8.0	589.8	7.7	2.8
3 центр	1.78	1779	36	1606	12	1480	18	1527	19	20.2
3 край	1.65	1476	37	1465	11	1459	18	1386	17	1.2
4	0.38	1034	40	1021	9.7	1016	13	983	13	1.8
5	0.43	1163	39	1145	10	1137	14	1097	14	2.3
7 светлый край	0.65	1608	37	1577	12	1556	19	1526	20	3.4
7 темный край	0.99	1607	37	1573	12	1549	19	1504	19	3.7
8 центр	0.97	1087	44	1040	12	1018	13	987	14	6.8
8 край	0.68	1040	40	1021	9.7	1013	13	986	13	2.7
9 светлый край	0.78	1612	37	1575	12	1550	19	1532	19	3.9
9 темный край	0.87	1587	36	1564	12	1549	19	1512	18	2.4
10	0.29	1238	39	1221	11	1214	15	1185	17	1.9
12	0.34	1121	39	1115	9.8	1113	14	1097	14	0.6
13	0.49	1893	35	1864	12	1841	22	1793	22	2.8
14 темный край	1.18	2069	35	2035	13	2004	24	1995	24	3.3
14 светлый край	0.96	2063	35	2032	13	2005	24	1969	25	2.9
15	0.94	1021	39	1001	9.2	994	13	993	12	2.8
17	0.71	1410	38	1386	11	1372	17	1393	18	2.8
19	0.62	1477	37	1441	11	1419	18	1425	17	4.1
20	0.43	1226	38	1197	10	1182	15	1174	15	3.7
21 центр	1.26	1875	35	1840	12	1811	22	1850	22	3.5
21 край	0.85	1892	35	1863	12	1840	22	1839	22	2.8
23	0.87	2342	34	2258	13	2168	26	2351	29	8.0
25	0.36	1691	36	1666	12	1648	20	1684	21	2.6
26	0.61	1896	35	1877	12	1862	22	1925	24	1.9
27	0.77	2429	33	2382	13	2330	27	2392	29	4.2
29	0.36	1565	36	1550	11	1541	19	1616	20	1.5
28 центр	0.42	1167	39	1163	10	1163	15	1221	16	0.3
28 край	0.32	1153	39	1156	10	1160	15	1165	15	-0.6
30	0.30	1042	40	1024	9.7	1017	13	1020	14	2.5
31	0.76	1238	40	1203	11	1185	15	1179	16	4.4
33	0.01	1836	40	1813	15	1796	23	3543	510	2.2
34	0.80	1449	39	1454	12	1460	18	1484	20	-0.7
35	0.38	1289	38	1238	11	1210	15	1259	17	6.6
36	0.45	925	42	913	9.4	909	12	903	13	1.8
37 центр	0.58	1030	40	1020	9.7	1017	13	1035	13	1.2
37 край	0.65	1053	40	1029	9.9	1019	13	1034	14	3.3
38	0.33	1174	39	1173	10	1175	15	1242	17	-0.1
39	0.93	2753	32	2724	14	2688	31	2738	33	2.4
40	0.30	1234	38	1220	10	1214	15	1231	16	1.7
41	0.29	1218	38	1215	10	1215	15	1266	17	0.2
42	0.94	1118	40	1099	10	1091	14	1111	14	2.5
43	0.73	1622	36	1618	12	1618	20	1705	21	0.3
44	0.31	1024	42	1017	11	1016	13	1042	17	0.7
45 светлый край	0.70	1228	38	1215	10	1209	15	1235	16	1.6
45 темный край	0.70	1257	38	1247	10	1242	16	1280	16	1.2
46	1.00	2527	33	2515	14	2504	29	2527	31	0.9
47	0.58	1143	39	1153	10	1160	15	1166	15	-1.4
48 край	0.28	1199	38	1173	10	1161	15	1173	15	3.3
48 центр	0.29	1179	40	1173	11	1171	15	1184	18	0.6
49	0.78	1273	40	1274	12	1276	16	1311	18	-0.2
50	0.56	3052	32	3030	15	3000	34	2959	42	1.7
51 темный край	0.47	2432	33	2407	13	2381	28	2353	29	2.1
51 светлый край	0.75	2433	33	2395	14	2354	28	2339	30	3.4
52	0.54	1358	38	1347	11	1342	17	1300	18	1.2

Таблица 2. Продолжение

Table 2. Continuation

Номер зерна	Возраст, млн лет									
	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	D, %
53	0.35	1133	39	1124	10	1120	15	1112	15	1.1
55	1.53	1486	38	1465	12	1452	19	1464	19	2.3
56	0.36	953	42	921	9.7	909	12	886	13	4.7
58	0.42	995	46	994	12	995	14	1003	19	-0.1
59	0.59	2277	34	2196	14	2112	26	2384	34	7.8
61 темный край	0.51	1140	39	1123	10	1115	15	1117	15	2.3
61 светлый край	0.41	1190	40	1142	11	1119	15	1133	17	6.3
62	1.17	1476	38	1461	12	1453	18	1422	19	1.6
63	0.85	1503	39	1501	13	1502	19	1527	22	0.1
64	1.06	2714	32	2681	14	2642	31	2653	35	2.7
66	0.50	950	41	925	9.6	915	12	915	13	3.8
68	1.05	2700	33	2639	14	2565	30	2654	36	5.3
69	0.34	1052	39	1057	9.9	1060	14	1044	14	-0.8
72	0.50	1012	40	998	9.8	992	13	986	14	2.0
74	0.37	1490	38	1466	12	1452	19	1374	21	2.6
75	0.19	1147	41	1150	11	1153	15	1045	20	-0.5
77 центр	0.80	1913	35	1906	13	1901	23	1895	25	0.6
77 край	0.74	1901	35	1901	13	1903	23	1864	25	-0.1
79	0.25	1382	39	1318	12	1280	17	1304	22	8.0
80 темный край	0.40	1924	35	1909	13	1899	23	1868	26	1.3
80 светлый край	0.19	1910	36	1903	14	1900	24	1815	33	0.5
83	0.73	2423	35	2364	15	2299	29	2243	36	5.4
84 край	0.30	1285	40	1283	12	1283	17	1240	20	0.1
84 центр	0.60	1283	38	1281	11	1282	17	1240	17	0.1
85	0.54	1438	38	1426	12	1420	18	1372	20	1.2
87	0.40	1513	38	1496	12	1484	18	1439	19	1.9
88	0.38	1299	38	1300	10	1301	16	1343	16	-0.1
90	0.80	1466	38	1453	11	1443	17	1393	17	1.6
91	0.42	1043	44	1023	11	1013	13	1002	16	3.0
93	0.44	1254	39	1247	10	1242	15	1214	15	0.9
94 серый край	1.17	1845	37	1827	13	1811	21	1793	22	1.9
94 светлый край	1.33	1834	37	1826	13	1819	21	1791	22	0.8
95 край	0.78	1495	39	1490	12	1486	18	1463	19	0.6
95 центр	0.71	1495	42	1458	14	1432	18	1451	23	4.4
96	0.45	2666	33	2662	13	2657	29	2631	31	0.3
97	0.59	1354	38	1359	11	1362	16	1365	16	-0.6
98	0.24	1143	39	1150	10	1154	14	1153	15	-0.9
99 центр	1.09	1569	38	1570	12	1570	19	1564	19	-0.1
99 край	0.85	1554	38	1561	12	1567	19	1574	19	-0.8
100 край	0.46	974	44	963	10	958	12	947	14	1.7
100 центр	0.48	982	45	951	11	938	12	929	15	4.7
101	0.78	1686	37	1691	12	1694	20	1774	21	-0.5
102	1.18	1490	41	1483	13	1478	18	1451	20	0.8
103	0.66	1797	36	1812	12	1825	21	1817	22	-1.5
104	0.49	1725	37	1712	12	1701	20	1877	23	1.4
105	0.96	1199	59	1016	17	934	13	732	17	28.4
106 край	0.67	2418	35	2394	14	2365	27	2383	35	2.2
106 центр	0.37	2426	34	2396	13	2360	26	2367	30	2.8
108	0.47	2472	35	2448	14	2418	28	2428	37	2.3
109	1.53	1122	40	1120	10	1119	14	1116	13	0.3
111	0.54	1029	42	1015	10	1009	13	1005	13	2.0
112	0.53	1904	36	1921	12	1937	22	1958	23	-1.7
113	0.39	1438	38	1463	11	1480	18	1478	18	-2.8
114 светлый край	0.36	1240	41	1225	11	1216	15	1226	19	1.9
114 темный край	0.39	1226	39	1223	11	1220	15	1210	16	0.5
115	0.56	964	47	962	12	961	12	964	16	0.3
116 светлый край	2.54	1471	42	1480	13	1486	18	1511	19	-1.0
116 темный край	0.98	1519	39	1497	12	1481	18	1503	19	2.6

Таблица 2. Окончание
Table 2. Ending

Номер зерна	Возраст, млн лет									
	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	D, %
117	0.60	1144	40	1158	10	1165	14	1182	15	-1.8
118	0.50	1796	36	1806	12	1814	21	1837	23	-1.0
119	0.71	2446	34	2408	14	2363	27	2401	32	3.5
120	0.39	946	44	933	10	928	12	942	14	1.9
121	0.28	1250	39	1230	11	1219	15	1270	17	2.5
122	1.18	1810	36	1811	12	1812	21	1804	22	-0.1
123	0.34	1239	39	1228	11	1222	15	1241	16	1.4
124	0.34	1558	37	1562	12	1565	19	1579	20	-0.4
125	0.42	1506	41	1494	13	1486	18	1535	25	1.4
126 светлый край	0.58	1910	36	1891	13	1873	22	1928	25	2.0
126 темный край	0.78	1907	36	1907	13	1907	22	1918	24	0.0
127	0.66	1234	40	1227	11	1222	15	1231	16	1.0
128	0.56	2450	35	2431	15	2408	28	2487	37	1.7
129	0.31	1137	41	1154	11	1163	14	1204	17	-2.2
130	0.28	1922	36	1920	13	1918	23	1983	28	0.2
131	0.88	1029	42	1033	10	1035	13	1073	14	-0.6
134 темный край	0.25	1183	40	1141	10	1120	14	1199	16	5.7
134 светлый край	0.52	1184	41	1166	11	1156	14	1198	17	2.4
135	0.39	1560	38	1541	12	1527	18	1545	20	2.2
136 центр	0.72	1863	37	1859	13	1855	22	1870	25	0.4
136 край	0.67	1880	37	1876	13	1871	22	1894	25	0.5
139	0.63	2453	35	2411	15	2360	27	2436	35	3.9
141	0.50	1247	41	1233	12	1225	15	1292	19	1.8
142	0.23	2755	33	2750	14	2742	30	2738	38	0.5
143	0.66	1003	42	976	10	963	12	960	13	4.1
144	0.44	997	47	993	12	991	13	999	18	0.6
145	0.83	1253	40	1233	11	1221	15	1194	16	2.7
146	0.76	2047	36	2038	13	2029	24	2017	27	0.9
148	0.40	1517	38	1524	12	1529	19	1510	20	-0.8
149	0.42	1126	41	1133	11	1136	14	1102	15	-0.8
151	0.73	1464	39	1451	12	1442	18	1450	19	1.5
153	0.52	1215	40	1186	11	1170	15	1178	16	3.9
154	0.46	1524	39	1516	13	1510	19	1519	22	0.9
156	2.79	1968	38	1955	14	1942	23	1897	25	1.3
157	0.53	1874	37	1866	13	1859	22	1837	25	0.8
158	0.34	1198	40	1210	11	1216	15	1202	17	-1.5
161	0.41	1165	40	1161	11	1159	14	1139	16	0.5
163	0.41	1219	41	1215	11	1212	15	1148	17	0.6
164 центр	0.73	1074	45	1039	12	1022	13	999	16	5.1
164 край	0.91	1087	43	1053	11	1037	13	1022	15	4.8
165	0.57	1280	46	1220	14	1187	16	1177	21	7.9
166	0.41	1127	42	1116	11	1111	14	1074	16	1.5
168	1.09	1072	46	946	11	893	12	913	14	20.0
169 центр	1.10	2732	34	2720	15	2704	30	2669	35	1.0
169 край	1.45	2726	34	2693	15	2648	30	2623	34	3.0
170 светлый центр	1.19	2710	34	2678	15	2636	30	2671	36	2.8
170 темный центр	1.34	2711	34	2680	15	2639	30	2599	35	2.7
171	0.77	642	48	641	8.6	640.5	8.5	633.6	9.8	0.1
172 центр	0.37	1280	41	1264	12	1254	16	1256	18	2.0
172 край	0.45	1430	39	1341	12	1285	16	1459	21	11.3
173	0.41	1766	37	1761	13	1757	21	1792	25	0.5
174	0.56	2697	34	2673	15	2642	30	2616	36	2.1
175	0.61	1811	37	1814	13	1817	22	1793	25	-0.3
176 центр	0.53	1496	39	1487	12	1480	18	1434	20	1.1
176 край	0.31	1522	40	1496	13	1478	18	1442	23	3.0
179 темный край	0.93	1460	40	1452	13	1446	18	1376	20	1.0
179 темный центр	0.95	1482	40	1451	13	1430	18	1393	20	3.6
179 светлый центр	1.64	1444	45	1442	15	1440	19	1407	22	0.3

Примечание. D – дискордантность.

Note. D – discordance.

KL-01 (621 ± 8 млн лет) согласуется с определенным возрастом формирования вендских песчаников в районе трубок ААП (Popov et al., 2002, 2005; Маслов и др., 2018), являющимися вмещающими для трубок породами (Пенделяк и др., 2019; Agasheva, 2021).

При интерпретации данных по результатам U-Pb датирования детритовых цирконов наибольший интерес представляет сопоставление полученных возрастных оценок с известными и зафиксированными в КК района изучаемых объектов тектонотермальными событиями, этапами магматизма и метаморфизма (Griffin et al., 2006; Агашев и др., 2008; Гладкочуб и др., 2013; Маслов и др., 2016). U-Pb возрастные оценки цирконов, отобранных из проб осадочных пород при поисково-разведочных работах на алмазы, в том числе из осадочных коллекторов, где циркон может быть обнаружен вместе с минералами-индикаторами кимберлитов (Агашев и др., 2008), позволяет не только получать данные по этапам тектонотермальных событий в КК исследуемого региона, но и оценивать возраст кимберлитовых трубок (Агашев и др., 2008), в том числе еще не обнаруженных, но при условии четкого определения по геохимическим признакам, что такой циркон является кимберлитовым (Belousova et al., 2002; Agashev et al., 2020). В рамках данной работы установлено, что ни одно зерно циркона не имеет значения U-Pb возраста, соответствующего этапам кимберлитового магматизма ААП: 410–380 и 375–340 млн лет назад (Божко и др., 2021). К настоящему времени данные об этапах тектонотермальных событий в КК региона получены на основании изучения очень ограниченного материала: 1) результатов U-Pb датирования цирконов из 7 образцов нижнекорковых гранулитов, пироксенитов (Скублов и др., 2012; Koreshkova et al., 2014; Shchukina et al., 2018) и 2 образцов мантийных эклогитов (Скублов и др., 2012; Shchukina et al., 2018) из кимберлитовой трубки им. В. Гриба; 2) состава изотопной системы Sr в клинопироксенах из 4 образцов эклогитов кимберлитовой трубки им. В. Гриба (Shchukina et al., 2019); 3) результатов изучения изотопного состава Sr и Nd 4 образцов нижнекорковых гранулитов из кимберлитовой трубки № 688 (Markwick, Downes, 2000); и 4) Sm-Nd изотопных данных для 3 ксенолитов КК из кимберлитовой трубки им. В. Гриба и 14 образцов пород поверхности фундамента, отобранных из скважин в районах Верхотинского, Золотицкого, Кепинского и Ижмозерского полей ААП (8 обр.) и карьера Покровский и Мятозеро (6 обр.), расположенных к югу от Онежского полуострова (Самсонов и др., 2009).

Наиболее древние значения U-Pb возраста для детритовых цирконов из песчаников кратера трубки им. В. Гриба и объекта KL-01, отвечающие мезоархею (≈ 3.05 млрд лет), ранее не были зафиксированы в исследованных породах КК региона. Од-

нако наиболее древние U-Pb возрасты для детритовых цирконов из песчаников западного склона Южного Урала также соответствуют этим значениям (≈ 3.07 млрд лет (Маслов и др., 2012)). Между тем палео- и мезоархейские тектонические события в интервалах между ≈ 3.5 и ≈ 2.8 млрд лет установлены в Кола-Карельском регионе и отвечают этапам (> 3.0 , 3.00–2.93, 2.8–2.7 млрд лет) объединения нескольких микроконтинентов, на границах которых были сформированы зеленокаменные пояса, породы последних образовались в океанических и островодужных обстановках и включены в сутурные зоны при коллизиях микроконтинентов 3.05–2.85, 2.88–2.84, 2.88–2.78 и 2.84–2.74 млрд лет назад (Mints, Dokukina, 2020; Mints et al., 2010, 2015). Популяция цирконов со значениями U-Pb возраста 2.8–2.7 млрд лет обнаружена в породах и трубке им. В. Гриба (13%) и объекта KL-01 (6%). Эти возрастные оценки также получены для пород КК региона (Самсонов и др., 2009; Koreshkova et al., 2014; Shchukina et al., 2018) и мантийных эклогитов субдукционного генезиса из трубки им. В. Гриба (Shchukina et al., 2019). Период 2.8–2.7 млрд лет назад широко проявлен в породах Кола-Карельского региона. Этому периоду соответствует образование Беломорского подвижного пояса (Бибикова и др., 2004), для которого выделены этапы субдукции и связанного с ней образования тоналит-гранодиоритовой ассоциации и пород умеренно-барической (ранней) стадии метаморфизма 2.82 млрд лет назад, коллизии и связанного с ней метаморфизма высоких давлений 2.73–2.71 млрд лет назад с последующими этапами магматизма и мигматизации до 2.61 млрд лет (Бибикова и др., 2004). Этап архейской субдукции в период ≈ 2.8 млрд лет назад зафиксирован в ААП по образцам крупнозернистых эклогитов из трубки им. В. Гриба, что соответствует времени формирования Беломорской эклогитовой провинции, включающей в себя эклогиты Салма и эклогитизированные дайки Гридино (Mints et al., 2014; Mints, Dokukina, 2020). Согласно (Koreshkova et al., 2014; Shchukina et al., 2018), на период ≈ 2.7 млрд лет назад КК ААП уже была сформирована.

Популяция цирконов со значениями U-Pb возраста 2.5–2.4 млрд лет не обнаружена в песчаниках кратера трубки им. В. Гриба, в песчаниках объекта KL-01 составляет 6%. Этот возрастной интервал зафиксирован в образцах нижнекорковых гранулитов из трубки им. В. Гриба (Koreshkova et al., 2014; Shchukina et al., 2018), он указывает на этап потери Pb более древними (2.7 млрд лет) цирконами. Установлено (Бибикова и др., 2004; Глебовицкий, 2005; Божко и др., 2021), что период 2.5–2.4 млрд лет назад соответствует обширному магматизму в обстановке рифтогенеза в пределах Беломорского подвижного пояса с внедрением интрузий габбро-норит-анортозитового состава.

Популяция цирконов со значениями U-Pb возраста 2.0–1.7 млрд лет составляет 7% для трубки им. В. Гриба и 15% для объекта KL-01, не являясь самой многочисленной возрастной группой в обоих объектах. Тем не менее именно этот палеопротерозойский тектонотермальный этап наиболее часто идентифицируется по образцам КК ААП (Markwick, Downes, 2000; Самсонов и др., 2009; Скублов и др., 2012). Согласно (Koreshkova et al., 2014), U-Pb возраст цирконов 1.81–1.84 млрд лет из нижнекорковых гранулитов трубки им. В. Гриба фиксирует последнюю стадию метаморфизма гранулитовой фации. Согласно (Shchukina et al., 2018, 2019), в период 1.9–1.7 млрд лет назад происходила интенсивная переработка более древних пород нижней коры в районе трубки им. В. Гриба, что было связано с этапом палеопротерозойской субдукции, идентифицированной по образцам мелкозернистых цирконов, содержащих эклогитов (Shchukina et al., 2018). Периоду 2.0–1.9 млрд лет назад соответствует главная и завершающая стадия формирования гранулитогнейсовых и умеренно-метаморфизованных осадочно-вулканогенных поясов Карело-Кольского региона (Mints, Dokukina, 2020). Согласно (Маслов и др., 2012), преобладающее большинство детритовых цирконов в песчаниках западного склона Среднего Урала имеют палеопротерозойский U-Pb возраст ($\approx 60\%$) при подчиненном количестве зерен мезопротерозойского ($\approx 26\%$) и мезо- и неоархейского ($\approx 15\%$) возраста.

Популяции цирконов со значениями U-Pb возраста в интервалах 1.7–1.4 и 1.3–1.0 млрд лет самые многочисленные в обоих изученных объектах: 36 и 27% соответственно для трубки им. В. Гриба и 25 и 40% соответственно для объекта KL-01. Данным возрастным периодам отвечают датировки трех зерен цирконов (1.47, 1.32 и 1.2 млрд лет) и каймы зонального зерна (1.73 млрд лет – в центре и 1.24 млрд лет – в кайме) из мелкозернистого эклогита трубки им. В. Гриба (Shchukina et al., 2018), а также нескольких зерен цирконов (≈ 1.4 млрд лет) из гранулита трубки им. В. Гриба (Koreshkova et al., 2014). Согласно (Koreshkova et al., 2014; Shchukina et al., 2018), полученные мезоархейские U-Pb возраста цирконов свидетельствуют об этапах потери Pb в результате более ранних тектонотермальных событий. В Кола-Карельском регионе в период ≈ 1.7 –1.5 млрд лет назад отмечается проявление магматизма в виде внедрений массивов гранитов-рапакиви вдоль зоны глубинного разлома, опоясывающей Балтийский щит с юга (Тугаринов, Бибилова, 1980; Глебовицкий, 2005). Последний этап (≈ 1 млрд лет) магматической активизации проявлен уже локально в пределах южной Норвегии (Тугаринов, Бибилова, 1980; Глебовицкий, 2005). Согласно (Nikishin et al., 1996), в период 1.65–1.35 млрд лет назад на Восточно-Европейской платформе были проявлены последовательные крупные ороген-

ные циклы, приведшие к амальгамации континентальных и орогенных террейнов, а периоды 1.35–1.05, 1.05–0.65 и 0.65–0.54 млрд лет назад – этапы рифтогенеза. Однако известные проявления магматизма этих периодов на территории Восточно-Европейской платформы единичны (Lubnina et al., 2014). Тем не менее U-Pb возрасты детритовых цирконов из песчаников кратера трубки им. В. Гриба и магматического объекта KL-01 свидетельствуют именно о преобладании мезопротерозойского возраста их источников. Значительное количество детритовых цирконов, имеющих мезопротерозойский U-Pb возраст, обнаружены в метапесчаниках Ишеримского антиклинария на Северном Урале (Петров и др., 2015): ≈ 1.5 млрд лет (24% зерен) и ≈ 1.4 –1.1 млрд лет (20% зерен).

Единичные зерна цирконов из песчаников трубки им. В. Гриба (1 зерно) и объекта KL-01 (3 зерна) имеют неопротерозойский U-Pb возраст: 557 ± 9 млн лет – для зерна из трубки им. В. Гриба и 640 ± 9 , 621 ± 8 и 609 ± 9 млн лет – из объекта KL-01. В породах КК ААП такие возрастные периоды не были зафиксированы. Магматические породы неопротерозойского возраста известны на севере Тиманского кряжа (Andreichev et al., 2020; Андреевич и др., 2021). Неопротерозойский U-Pb возраст цирконов также установлен для вулканических туфов Среднего Урала: 567 ± 3.9 млн лет (Гражданкин и др., 2011), 557 ± 13 млн лет (Ронкин и др., 2006), 547 ± 3.8 млн лет (Levashova et al., 2013). На территории ААП этому периоду соответствует только одно проявление поздневендского (570 ± 8 млн лет) щелочного вулканизма, идентифицированного по находкам покровов лав и туфов лампрофиров на северо-западе ААП (Шукин и др., 2002).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты изучения U-Pb изотопного состава обломочных цирконов из песчаников кратерной части кимберлитовой трубки им. В. Гриба и магматического объекта KL-01, расположенных в центральной и юго-восточной частях ААП на расстоянии ≈ 100 км друг от друга, позволили установить разновозрастные источники сноса – от архейских до неопротерозойских, но с преобладанием мезопротерозойских: доля цирконов мезопротерозойского U-Pb возраста (1.7–1.4 и 1.3–1.0 млрд лет) составляет 63% для трубки им. В. Гриба и 65% для объекта KL-01. Для цирконов из песчаников трубки им. В. Гриба отмечается большее количество зерен мезо- и неоархейского ($\approx 15\%$) и меньшее количество зерен палеопротерозойского ($\approx 14\%$) возраста по сравнению с таковыми из объекта KL-01 (≈ 7 и 20% соответственно). Минимальный возраст цирконов из песчаников кратера трубки им. В. Гриба (557 ± 9 млн лет) и объекта KL-01 (609 ± 9 млн лет) согласуется с определенным возрастом фор-

мирования вендских песчаников, являющихся вмещающими для трубок породами, в районе ААП. По КЛ изображениям внутреннего строения цирконов можно предполагать в качестве источников сноса для двух объектов преимущественно магматические породы. Для двух объектов отмечено отсутствие зерен цирконов с U-Pb возрастом в интервале 900–700 млн лет. Ни одно зерно циркона не имеет значения U-Pb возраста, соответствующего этапам кимберлитового магматизма ААП. Полученные U-Pb возрастные оценки для изученных обломочных цирконов в целом коррелируют с выявленными ранее этапами тектонотермальных событий в континентальной коре северных территорий Восточно-Европейской платформы. Исключение составляет мезопротерозойский период – 1.7–1.4 и 1.3–1.0 млрд лет назад, которому соответствует преобладающая часть U-Pb возрастных значений изученных цирконов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агашев А.М., Кулигин С.С., Оришаши Ю., Похиленко Н.П., Вавилов М.А., Кларк Д. (2008) Цирконы из осадочного коллектора долины реки Блюфиш (северо-западные территории Канады) и возможный возраст кимберлитового магматизма площади Лена-Вест. *Докл. АН*, **421**(1), 76-79.
- Андреичев В.Л., Соболева А.А., Удоратина О.В., Ронкин Ю.Л. (2021) Цирконология сиенитов Северного Тимана. *Вестн. геонаук*, **6**(318), 16-27.
- Бибикова Е.В., Богданов С.В., Глебовицкий В.А., Клайссон С., Шельд Т. (2004) Этапы эволюции Беломорского подвижного пояса по данным U-Pb цирконовой геохронологии (ионный микрозонд NORDSIM). *Петрология*, **12**(3), 227-244.
- Богатиков О.А., Гаранин В.К., Кононова В.А., Кудрявцева Г.П., Васильева Е.Р., Вержак В.В., Веричев Е.М., Парсаданян К.С., Посухова Т.В. (1999) Архангельская алмазоносная провинция. М.: Изд-во Моск. ун-та, 524 с.
- Божко Н.А., Прусакова Н.А., Громцев К.В. (2021) Особенности тектонического строения Лапландско-Беломорского гранулит-гнейсового пояса и перспективы его коренной алмазоносности. *Отчет. геология*, (6), 45-64.
- Гладкочуб Д.П., Станевич А.М., Мазукабзов А.М., Донская Т.В., Писаревский С.А., Николь Г., Мотова З.Л., Корнилова Т.А. (2013) Ранние этапы развития палеоазиатского океана: данные по LA-ICP-MS датированию детритовых цирконов из позднекембрийских толщ южного фланга Сибирского кратона. *Геология и геофизика*, **54**(10), 1472-1490.
- Глебовицкий В.А. (2005) Ранний докембрий Балтийского щита. СПб.: Наука, 711 с.
- Голубев Ю.К., Прусакова Н.А., Голубева Ю.Ю. (2010) Кепинские кимберлиты, Архангельская область. *Руды и металлы*, (1), 38-45.
- Гражданкин Д.В., Марусин В.В., Меерт Дж., Крупенин М.Т., Маслов А.В. (2011) Котлинский горизонт на Южном Урале. *Докл. АН*, **440**(2), 201-206.
- Ларионова Ю.О., Сазонова Л.В., Лебедева Н.М., Носова А.А., Третьяченко В.В., Травин А.В., Каргин А.А., Юдин Д.С. (2016) Возраст кимберлитов Архангельской провинции: Rb-Sr, ⁴⁰Ar/³⁹Ar изотопно-геохронологические и минералогические данные для флогопита. *Петрология*, **24**(6), 607-639.
- Маслов А.В., Вовна Г.М., Киселев В.И., Ронкин Ю.Л., Крупенин М.Т. (2012) U-Pb систематика обломочных цирконов из отложений Серебрянской серии Среднего Урала. *Литология и полез. ископаемые*, (2), 180-196.
- Маслов А.В., Мизенс Г.А., Вовна Г.М., Киселев В.И., Ронкин Ю.Л. (2016) Обломочные цирконы из песчаников нижнего триаса Бельской впадины Предуральского прогиба: LA-ICP-MS U-Pb изотопные возрасты и распределение редких и рассеянных элементов. *Литосфера*, (1), 7-28.
- Маслов А.В., Подковыров В.Н., Гражданкин Д.В., Колесников А.В. (2018) Верхний венд востока, северо-востока и севера Восточно-Европейской платформы: процессы осадконакопления и эволюции биоты. *Литосфера*, **18**(4), 520-542. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-4-520-542>
- Пенделяк Р.Н., Морозова А.В., Могутова В.А. (2019) Геологическое строение трубки им. В. Гриба и ее индикаторные особенности в геофизических полях. *Отчет. геология*, (5), 53-59.
- Петров О.В., Лохов К.И., Шевченко С.С., Сергеев С.А., Богомолов Е.С., Антонов А.В., Лепехина Е.Н., Саблуков С.М. (2006) Изотопные исследования во ВСЕГЕИ: перспективы использования результатов в целях прогноза и поисков месторождений алмазов. *Регион. геология и металлогения*, (27), 158-167.
- Петров Г.А., Ронкин Ю.Л., Гердес А., Маслов А.В. (2015) Первые результаты U-Pb (LA-ICP-MS)-датирования обломочных цирконов из метапесчаников Ишеримского антиклинория (Северный Урал). *Докл. АН*, **464**(5), 589-593. <https://doi.org/10.7868/S086956521529023X>
- Ронкин Ю.Л., Гражданкин Д.В., Маслов А.В., Мизенс Г.А., Матуков Д.И., Крупенин М.Т., Петров Г.А., Лепехина О.П., Корнилова А.Ю. (2006) U-Pb (SHRIMP-II)-возраст цирконов из пепловых туфов чернокаменной свиты сыльвицкой серии венда (Средний Урал). *Докл. АН*, **411**(3), 354-359.
- Самсонов А.В., Носова А.А., Третьяченко В.В., Ларченко В.А., Ларионова Ю.О. (2009) Коллизионные швы в раннекембрийской коре как фактор локализации алмазоносных кимберлитов (север Восточно-Европейского кратона). *Докл. АН*, **424**(6), 796-801.
- Скублов С.Г., Никитина Л.П., Марин Ю.Б., Левский Л.К., Гусева Н.В. (2012) U-Pb возраст и геохимия цирконов из ксенолитов кимберлитовой трубки им. В. Гриба Архангельской алмазоносной провинции. *Докл. АН*, **444**(1), 77-82.
- Тугаринов А.И., Бибикова Е.В. (1980) Геохронология Балтийского щита по данным цирконометрии. М.: Наука, 133 с.
- Устинов В.Н., Неручев С.С., Загайный А.К., Анташук М.Г., Лобкова Л.П., Микоев И.И., Николаева Э.В., О'Брайан Х., Пелтонен П., Пенделяк Р.Н. (2021) Алмазоносность севера Восточно-Европейской платформы. СПб.: Наука, 409 с.
- Щукин В.С., Саблуков С.М., Саблукова Л.И., Белосова Е.А., Гриффин В.Л. (2002) Поздневендский

- аэральный щелочной вулканизм рифтогенного типа в Зимнебережном кимберлитовом районе (Архангельская алмазоносная провинция). *Глубинный магматизм, его источники и плюмы*. Тр. II Междунар. семинара. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 160-175.
- 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**, 105508.
- Agasheva E.V. (2021) Magmatic Material in Sandstone Shows Prospects for New Diamond Deposits within the Northern East European Platform. *Minerals*, **11**(4), 339.
- Andreichev V.L., Soboleva A.A., Udoratina O.V., Ronkin Yu.L., Coble M.A., Miller E.L. (2020) Granites of the Northern Timan – probable indicators of Neoproterozoic stages of Rodinia breakup. *Geodynamics & Tectonophysics*, **11**(2), 201-218.
- Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. (2002) Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **143**, 602-622.
- Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., Davis D.W., Aleinikoff J.N., Valley J.W., Mundfil R., Campbell I.H., Korcsh R.J., Williams I.S., Foudoulis C. (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**, 115-140.
- Foley S.F. (2008) Rejuvenation and erosion of the cratonic lithosphere. *Nat. Geosci.*, **1**, 503-510.
- Griffin W.L., Powell W.J., Pearson N.J., O'Reilly S.Y. (2008) GLITTER: Data reduction software for laser ablation ICP-MS. *Sylvester P. (ed.) Laser Ablation ICP-MS in the Earth Sciences: Current practices and outstanding issues. Mineralogical Association of Canada, Short Course Series*, **40**, 307-311.
- Griffin W.L., Belousova E.A., Walters S.G., O'Reilly S.Y. (2006) Archaean and Proterozoic crustal evolution in the Eastern Succession of the Mt Isa district, Australia: U-Pb and Hf-isotope studies of detrital zircons. *Austral. J. Earth Sci.*, **53**, 125-149.
- Jackson S.E., Pearson N.J., Griffin W.L., 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.
- Koreshkova M.Yu., Downes H., Glebovitsky V.A., Rodionov N.V., Antonov A.V., Sergeev S.A. (2014) Zircon trace element characteristics and ages in granulite xenoliths; a key to understanding the age and origin of the lower crust, Arkhangelsk kimberlite province, Russia. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **167**, 973.
- Kostrovitsky S.I., Skuzovatov S.Yu., Yakovlev D.A., Sun J., Nasdala L., Wu F-Yu. (2016) Age of the Siberian craton crust beneath the northern kimberlite fields: Insights to the craton evolution. *Gondw. Res.*, **39**, 365-385.
- Lee C.A., Luffi P., Chin E.J. (2011) Building and destroying continental mantle. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **39**, 59-90.
- Levashova N.M., Bazhenov M.L., Meert J.G., Kuznetsov N.B., Golovanova I.V., Danukalov K.N., Fedorova N.M. (2013) Paleogeography of Baltica in the Ediacaran: paleomagnetic and geochronological data from the clastic Zigan Formation, South Urals. *Precamb. Res.*, **236**, 16-30.
- Lubnina N.V., Pisarevsky S.A., Puchkov V.N., Kozlov V.I., Sergeeva N.D. (2014) New paleomagnetic data from Late Neoproterozoic sedimentary successions in Southern Urals, Russia: implications for the Late Neoproterozoic paleogeography of the Iapetan realm. *Int. J. Earth Sci.*, **103**, 1317-1334.
- Markwick A.J.W., Downes H. (2000) Lower crustal granulite xenoliths from the Arkhangelsk kimberlite pipes: petrological, geochemical and geophysical results. *Lithos*, **51**, 135-151.
- Mints M.V., Belousova E.A., Konilov A.N., Natapov L.M., Shchipansky A.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Dokukina K.A., Kaulina T.V. (2010) Mesoarchean subduction processes: 2.87 Ga eclogites from the Kola Peninsula, Russia. *Geology*, **38**(8), 739-742.
- Mints M.V., Dokukina K.A., Konilov A.N., Philippova I.B., Zlobin V.L., Babayants P.S., Belousova E.A., Blokh Yu.I., Bogina M.M., Bush W.A., Dokukin P.A., Kaulina T.V., Natapov L.M., Piip V.B., Stupak V.M., Suleimanov A.K., Trusov A.A., Van K.V., Zamozhniaya N.G. (2015) East European Craton: Early Precambrian history and 3D Models of Deep Crustal Structure. *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper*, **510**, 433 p.
- Mints M.V., Dokukina K.A. (2020) The Belomorian eclogite province (eastern Fennoscandian Shield, Russia): Mesoproterozoic or Late Paleoproterozoic? *Geodynamics & Tectonophysics*, **11**(1), 151-200.
- Mints M.V., Dokukina K.A., Konilov A.N. (2014) The Meso-Neoproterozoic Belomorian eclogite province: Tectonic position and geodynamic evolution. *Gondw. Res.*, **25**(2), 561-584.
- Moyen J.-F., Paquette J.-L., Ionov D.A., Gannoun A., Korsakov A.V., Golovin A.V., Moine B.N. (2017) Paleoproterozoic rejuvenation and replacement of Archaean lithosphere: evidence from zircon U-Pb dating and Hf isotopes in crustal xenoliths at Udachnaya, Siberian craton. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **457**, 149-159.
- Nikishin A.M., Ziegler P.A., Stephenson R.A., Cloetingh S.A.P.L., Furne A.V., Fokin P.A., Ershov A.V., Bolotov S.N., Korotaev M.V., Alekseev A.S., Gorbachev V.I., Shipilov E.V., Lankreijer A., Bembinova E.Yu., Shalimov I.V. (1996) Late Precambrian to Triassic history of the East European Craton: dynamics of sedimentary basin evolution. *Tectonophysics*, **268**, 23-63.
- Pearson D.G., Scott J.M., Liu J., Schaeffer A., Wang L.H., van Hunen J., Szilas K., Chacko T., Kelemen P.B. (2021) Deep continental roots and cratons. *Nature*, **96**, 199-210.
- Pearson D., Wittig N. (2014) The formation and evolution of cratonic mantle lithosphere: evidence from mantle xenoliths. *Treat. Geochem.*, **2**, 255-292.
- Popov V., Iosifidi A., Khramov A., Tait J., Bachtadse V. (2002) Paleomagnetism of upper Vendian sediments from the Winter Coast, White Sea region, Russia: implications for the paleogeography of Baltica during Neoproterozoic times. *J. Geophys. Res.*, **107**(B11), 2315.
- Popov V., Khramov A., Bachtadse V. (2005) Palaeomagnetism, magnetic stratigraphy, and petromagnetism of the Upper Vendian sedimentary rocks in the sections of the Zolotitsa River and in the Verkhotina Hole, Winter Coast of the White Sea, Russia. *Russ. J. Earth Sci.*, **7**(2), 1-29.

- Rudnick R.L., Gao S. (2014) Composition of the continental crust. (Eds H.D. Holland, D. Heinrich, K.K. Turekian). *Treatise of Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 1-51.
- Shatsky V.S., Wang Q., Skuzovatov S. Yu. Ragozin A.L. (2019) The crust-mantle evolution of the Anabar tectonic province in the Siberian Craton: Coupled or decoupled? *Precamb. Res.*, **332**, 105388.
- Shchukina E.V., Agashev A.M., Soloshenko N.G., Streletskaya M.V., Zedgenizov D.A. (2019) Origin of V. Grib pipe eclogites (Arkhangelsk region, NW Russia): Geochemistry, Sm-Nd and Rb-Sr isotopes and relation to regional Precambrian tectonics. *Mineral. Petrol.*, **113**, 593-612.
- Shchukina E.V., Agashev A.M., Zedgenizov D.A. (2018) Origin of zircon-bearing mantle eclogites entrained in the V. Grib kimberlite (Arkhangelsk region, NW Russia): evidence from mineral geochemistry and the U-Pb and Lu-Hf isotope compositions of zircon. *Mineral. Petrol.*, **112**(1), 85-100.
- Slama J., Kosler J., Condon D.J., Crowley J.L., Gerdes A., Hancher J.M., Horstwood M.S.A., Morris G.A., Nasdala L., Norberg N., Schaltegger U., Schoene N., Tubrett M.N., Whitehouse M.J. (2008) Plesovice zircon – a new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chem. Geol.*, **249**(1-2), 1-35.
- 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., Kuligin S.S., Orihashi Yu., Pokhilenko N.P., Vavilov M.A., Clarke D. (2008) Ages of Zircons from Jurassic Sediments of Bluefish River Slope, NWT Canada, and the Possible Age of Kimberlite Activity on the Lena West Property. *Dokl. Earth Sci.*, **421**(5), 751-754 (translated from *Dokl. Akad. Nauk*, **421**(1), 76-79).
- Agasheva E.V. (2021) Magmatic Material in Sandstone Shows Prospects for New Diamond Deposits within the Northern East European Platform. *Minerals*, **11**(4), 339.
- Andreichev V.L., Soboleva A.A., Udoratina O.V., Ronkin Yu.L. (2021) Zirconology of syenites of the Northern Timan. *Vestn. Geonauk*, **6**(318), 16-27. (In Russ.)
- Andreichev V.L., Soboleva A.A., Udoratina O.V., Ronkin Yu.L., Coble M.A., Miller E.L. (2020) Granites of the Northern Timan – probable indicators of Neoproterozoic stages of Rodinia breakup. *Geodynamics & Tectonophysics*, **11**(2), 201-218.
- Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. (2002) Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **143**, 602-622.
- Bibikova E.V., Bogdanova S.V., Glebovitsky V.A., Claesson S., Skiold T. (2004) Evolution of the Belomorian Belt: NORDSIM U-Pb zircon dating of the Chupa paragneisses, magmatism, and metamorphic stages. *Petrology*, **12**(3), 195-210.
- Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., Davis D.W., Aleinikoff J.N., Valley J.W., Mundfil R., Campbell I.H., Korsh R.J., Williams I.S., Foudoulis C. (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**, 115-140.
- Bogatikov O.A., Garanin V.K., Kononova V.A., Kudryavceva G.P., Vasil'eva E.R., Verzhak V.V., Verichev E.M., Parsadanyan K.S., Posuhova T.V. (1999) Arkhangelsk Diamondiferous Province. Moscow, Moscow State University Publ., 521 p. (In Russ.)
- Bozhko N.A., Prusakova N.A., Gromtsev K.V. (2021) Features of the tectonic structure of the Lapland-White Sea granulite-gneiss belt and prospects of its native diamond bearing. *Otech. Geologiya*, (6), 45-64. (In Russ.)
- Foley S.F. (2008) Rejuvenation and erosion of the cratonic lithosphere. *Nat. Geosci.*, **1**, 503-510.
- Gladkochub D.P., Stanevich A.M., Mazukabzov A.M., Donskaya T.V., Pisarevsky S.A., Nicoll G., Motova Z.L., Kornilova T.A. (2013) Early evolution of the Paleasian ocean: LA-ICP-MS dating of detrital zircon from Late Precambrian sequences of the southern margin of the Siberian craton. *Russ. Geol. Geophys.*, **54**(10), 1150-1163.
- Glebovitsky V.A. (2005) Early Precambrian of the Baltic Shield. St.Petersburg, Nauka Publ., 711 p. (In Russ.)
- Golubev Yu.K., Prusakova N.A., Golubeva Yu.Yu. (2010) Kepino kimberlites, Arkhangelsk region. *Rudy i Metall.*, (1), 38-45. (In Russ.)
- Grazhdankin D.V., Marusin V.V., Meert Dzh., Krupenin M.T., Maslov A.V. (2011) Kotlin regional stage in the South Urals. *Dokl. Earth Sci.*, **440**(1), 1222-1226 (translated from *Dokl. Akad. Nauk*, **440**(2), 201-206).
- Griffin W.L., Powell W.J., Pearson N.J., O'Reilly S.Y. (2008) GLITTER: Data reduction software for laser ablation ICP-MS. (Ed. P. Sylvester). *Laser Ablation ICP-MS in the Earth Sciences: Current practices and outstanding issues: Mineralogical Association of Canada, Short Course Series*, **40**, 307-311.
- Griffin W.L., Belousova E.A., Walters S.G., O'Reilly S.Y. (2006) Archaean and Proterozoic crustal evolution in the Eastern Succession of the Mt Isa district, Australia: U-Pb and Hf-isotope studies of detrital zircons. *Austral. J. Earth Sci.*, **53**, 125-149.
- Jackson S.E., Pearson N.J., Griffin W.L., 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.
- Koreshkova M.Yu., Downes H., Glebovitsky V.A., Rodionov N.V., Antonov A.V., Sergeev S.A. (2014) Zircon trace element characteristics and ages in granulite xenoliths; a key to understanding the age and origin of the lower crust, Arkhangelsk kimberlite province, Russia. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **167**, 973.
- Kostrovitsky S.I., Skuzovatov S.Yu., Yakovlev D.A., Sun J., Nasdala L., Wu F-Yu. (2016) Age of the Siberian craton crust beneath the northern kimberlite fields: Insights to the craton evolution. *Gondw. Res.*, **39**, 365-385.
- Larionova Y.O., Sazonova L.V., Lebedeva N.M., Nosova A.A., Tretyachenko V.V., Kargin A.V. (2016) Kimberlite Age in the Arkhangelsk Province, Russia: Isotopic Geochronologic Rb-Sr and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Mineralogical Data on Phlogopite. *Petrology*, **24**, 562-593 (translated from *Petrologiya*, **24**(6), 607-639).
- Lee C.A., Luffi P., Chin E.J. (2011) Building and destroying continental mantle. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **39**, 59-90.

- Levashova N.M., Bazhenov M.L., Meert J.G., Kuznetsov N.B., Golovanova I.V., Danukalov K.N., Fedorova N.M. (2013) Paleogeography of Baltica in the Ediacaran: paleomagnetic and geochronological data from the clastic Zigan Formation, South Urals. *Precamb. Res.*, **236**, 16-30.
- Lubnina N.V., Pisarevsky S.A., Puchkov V.N., Kozlov V.I., Sergeeva N.D. (2014) New paleomagnetic data from Late Neoproterozoic sedimentary successions in Southern Urals, Russia: implications for the Late Neoproterozoic paleogeography of the Iapetan realm. *Int. J. Earth Sci.*, **103**, 1317-1334.
- Markwick A.J.W., Downes H. (2000) Lower crustal granulite xenoliths from the Arkhangelsk kimberlite pipes: petrological, geochemical and geophysical results. *Lithos*, **51**, 135-151.
- Maslov A.V., Mizens G.A., Vovna G.M., Kiselev V.I., Ronkin Yu.L. (2016) Detrital zircons from Lower Triassic sandstones, Belsky depression, Pre-Uralian foredeep: LA-ICP-MS U-Pb isotopic ages and distribution of rare and trace elements. *Lithosphere (Russia)*, (1), 7-28. (In Russ.)
- Maslov A.V., Podkovyrov V.N., Grazhdankin D.V., Kolesnikov A.V. (2018) Upper Vendian in the east, northeast and north of East European Platform: Depositional processes and biotic evolution. *Lithosphere (Russia)*, **18**(4), 520-542. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-4-520-542>
- Maslov A.V., Vovna G.M., Kisel'gov V.I., Ronkin Ju.L., Krupenin M.T. (2012) U-Pb detrital zircon systematics of deposits Serebrjankaseries of the Middle Urals. *Litologiya i Polez. Iskopaemye*, (2), 180-196. (In Russ.)
- Mints M.V., Belousova E.A., Konilov A.N., Natapov L.M., Shchipansky A.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Dokukina K.A., Kaulina T.V. (2010) Mesoarchean subduction processes: 2.87 Ga eclogites from the Kola Peninsula, Russia. *Geology*, **38**(8), 739-742.
- Mints M.V., Dokukina K.A. (2020) The Belomorian eclogite province (eastern Fennoscandian Shield, Russia): Mesoproterozoic or Late Paleoproterozoic? *Geodynamics & Tectonophysics*, **11**(1), 151-200.
- Mints M.V., Dokukina K.A., Konilov A.N. (2014) The Mesoproterozoic Belomorian eclogite province: Tectonic position and geodynamic evolution. *Gondw. Res.*, **25**(2), 561-584.
- Mints M.V., Dokukina K.A., Konilov A.N., Philippova I.B., Zlobin V.L., Babayants P.S., Belousova E.A., Blokh Yu.I., Bogina M.M., Bush W.A., Dokukin P.A., Kaulina T.V., Natapov L.M., Piip V.B., Stupak V.M., Suleimanov A.K., Trusov A.A., Van K.V., Zamozhniaya N.G. (2015) East European Craton: Early Precambrian history and 3D Models of Deep Crustal Structure. *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper*, **510**, 433.
- Moyen J.-F., Paquette J.-L., Ionov D.A., Gannoun A., Korsakov A.V., Golovin A.V., Moine B.N. (2017) Paleoproterozoic rejuvenation and replacement of Archaean lithosphere: evidence from zircon U-Pb dating and Hf isotopes in crustal xenoliths at Udachnaya, Siberian craton. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **457**, 149-159.
- Nikishin A.M., Ziegler P.A., Stephenson R.A., Cloetingh S.A.P.L., Furne A.V., Fokin P.A., Ershov A.V., Bolotov S.N., Korotaev M.V., Alekseev A.S., Gorbachev V.I., Shipilov E.V., Lankreijer A., Bembinova E.Yu., Shalimov I.V. (1996) Late Precambrian to Triassic history of the East European Craton: dynamics of sedimentary basin evolution. *Tectonophysics*, **268**, 23-63.
- Pearson D.G., Scott J.M., Liu J., Schaeffer A., Wang L.H., van Hunen J., Szilas K., Chacko T., Kelemen P.B. (2021) Deep continental roots and cratons. *Nature*, **96**, 199-210.
- Pearson D., Wittig N. (2014) The formation and evolution of cratonic mantle lithosphere: evidence from mantle xenoliths. *Treat. Geochem.*, **2**, 255-292.
- Pendelyak R.N., Morozov A.V., Mogutova V.A. (2019) Geological structure of the tube V. Griba and its display features in geophysical fields. *Otech. Geologiya*, (5), 53-59. (In Russ.)
- Petrov O.V., Lokhov K.I., Shevchenko S.S., Sergeev S.S., Bogomolov E.S., Antonov A.V., Lepehina E.N., Sablukov S.M. (2006) Isotope Research at VSEGEI: Prospects for Using the Results for Predicting and Searching for Diamond Deposits. *Region. Geologiya i Metallogeniya*, (27), 158-167. (In Russ.)
- Petrov G.A., Ronkin Yu.L., Gerdes A., Maslov A.V. (2015) First results of U-Pb dating of detrital zircons from metasandstones of the Isherim anticlinorium (Northern Urals). *Dokl. Earth Sci.*, **464**(2), 1010-1014 (translated from *Dokl. Akad. Nauk*, **464**(5), 589-593). <https://doi.org/10.1134/S1028334X15100165>
- Popov V., Iosifidi A., Khramov A., Tait J., Bachtadse V. (2002) Paleomagnetism of upper Vendian sediments from the Winter Coast, White Sea region, Russia: implications for the paleogeography of Baltica during Neoproterozoic times. *J. Geophys. Res.*, **107**(B11), 2315.
- Popov V., Khramov A., Bachtadse V. (2005) Palaeomagnetism, magnetic stratigraphy, and petromagnetism of the Upper Vendian sedimentary rocks in the sections of the Zolotitsa River and in the Verkhotina Hole, Winter Coast of the White Sea, Russia. *Russ. J. Earth Sci.*, **7**(2), 1-29.
- Ronkin Yu.L., Grazhdankin D.V., Maslov A.V., Mizens G.A., Matukov D.I., Krupenin M.T., Petrov G.A., Lepikhina O.P., Kornilova A.Yu. (2006) U-Pb (SHRIMP II) age of zircons from ash tuffs of the Upper Vendian Chernyi Kamen formation (Sylvitsa Group, Middle Urals). *Dokl. Earth Sci.*, **411A**(9), 1341-1345 (translated from *Dokl. Akad. Nauk*, **411**(3), 354-359).
- Rudnick R.L., Gao S. (2014) Composition of the continental crust. (Eds H.D. Holland, D. Heinrich, K.K. Turekian). *Treatise of Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 1-51.
- Samsonov A.V., Nosova A.A., Tretyachenko V.V., Larchenko V.A., Larionova Y.O. (2009) Collisional sutures in the early precambrian crust as a factor responsible for localization of diamondiferous kimberlites in the northern East European Platform. *Dokl. Earth Sci.*, **425**, 226-230 (translated from *Dokl. Akad. Nauk*, **424**(6), 796-801). <https://doi.org/10.1134/S1028334X09020111>
- Shatsky V.S., Wang Q., Skuzovatov S.Yu., Ragozin A.L. (2019) The crust-mantle evolution of the Anabar tectonic province in the Siberian Craton: Coupled or decoupled? *Precamb. Res.*, **332**, 105388.
- Shchukin V.S., Sablukov S.M., Sablukova L.I., Belousova E.A., Griffin V.L. (2002) Late Vendian rift-type aerial alkaline volcanism in the Zimniberezhny kimberlite region (Arkhangelsk diamondiferous province). *Deep magmatism, its sources and plumes*. Proceedings of the II International Seminar. Irkutsk, Publishing House IrSTU, 160-175.

- Shchukina E.V., Agashev A.M., Soloshenko N.G., Streletskaya M.V., Zedgenizov D.A. (2019) Origin of V. Grib pipe eclogites (Arkhangelsk region, NW Russia): Geochemistry, Sm-Nd and Rb-Sr isotopes and relation to regional Precambrian tectonics. *Mineral. Petrol.*, **113**, 593-612.
- Shchukina E.V., Agashev A.M., Zedgenizov D.A. (2018) Origin of zircon-bearing mantle eclogites entrained in the V. Grib kimberlite (Arkhangelsk region, NW Russia): evidence from mineral geochemistry and the U-Pb and Lu-Hf isotope compositions of zircon. *Mineral. Petrol.*, **112**(1), 85-100.
- Skublov S.G., Nikitina L.P., Marin Yu.B., Levskii L.K., Guseva N.S. (2012) U-Pb age and geochemistry of zircons from xenoliths of the V. Grib kimberlitic pipe, Arkhangelsk Diamond Province. *Dokl. Earth Sci.*, **444**(1), 595-600 (translated from *Dokl. Akad. Nauk*, **444**(1), 77-82). <https://doi.org/10.1134/S1028334X12050066>
- 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 N., Tubrett M.N., Whitehouse M.J. (2008) Plesovice zircon – a new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chem. Geol.*, **249**(1-2), 1-35.
- Tugarinov A.I., Bibikova E.V. (1980) Geochronology of the Baltic Shield according to zirconometric data. Moscow, Nauka Publ., 133 p. (In Russ.)
- Ustinov V.N., Neruchev S.S., Zagainy A.K., Antashchuk M.G., Lobkova L.P., Mikoev I.I., Nikolaeva E.V., O'Bryan H., Peltonen P., Pendelak R.N. Diamonds in the north of the East European Platform. St.Petersburg, Nauka Publ., 410 p. (In Russ.)