

Научная статья

УДК 550.93:552.3/.4"616"(571.56)

doi:10.52349/0869-7892_2025_102_44-61

Новые данные о возрасте и сохранности архейского блока фундамента под Накынским кимберлитовым полем, Республика Саха (Якутия)**М. Н. Голобурдина^{1✉}, С. А. Граханов^{1, 2},
А. И. Дак³, Т. Н. Зубова¹,
В. Г. Мальковец^{3, 4}, В. Ф. Проскурнин¹,
А. В. Тарасов⁵**¹Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия, Marina_Goloburdina@karpinskyinstitute.ru ✉²АЛМАР — алмазы Арктики, Якутск, Россия³Акционерная компания «АЛРОСА», Мирный, Россия⁴Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия⁵Федеральное агентство по недропользованию, Москва, Россия**Ключевые слова:** Тюнгский террейн, Восточно-Сибирская алмазоносная провинция, мегакристаллы циркона, U-Pb возраст, SIMS SHRIMP-II, микроэлементы, алмазоносность**Финансирование:** отбор и первичное изучение коллекции кристаллов циркона проводились за счет средств гранта РНФ № 22-27-00724.**Для цитирования:** Новые данные о возрасте и сохранности архейского блока фундамента под Накынским кимберлитовым полем, Республика Саха (Якутия) / М. Н. Голобурдина [и др.] // Региональная геология и металлогения. 2025. Т. 32, № 2. С. 44–61. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2025_102_44-61

Аннотация. Установлен архейский (2643 ± 43 млн лет) и протерозойский (1804 ± 15 млн лет) возраст мегакристаллов циркона из кимберлитов тр. Нюрбинская, рассмотрены их типоморфные особенности. Для архейской популяции циркона характерно отсутствие позднекарельских возрастных зон, повышенные содержания иттрия ($Y > 100$ г/т), редкоземельных элементов ($\Sigma P3Э > 100$ г/т; $Lu/Gd > 1$) относительно раннепротерозойской популяции циркона ($Y < 100$ г/т; $\Sigma P3Э < 50$ г/т; $Lu/Gd < 1$). Полученные данные свидетельствуют о принадлежности исследованных кристаллов к метаморфическим породам, образующим отдельные совмещенные разновозрастные блоки или метаморфические зоны, что указывает на сохранность архейских пород. Приведены сведения о деформациях в кристаллах, которые могут представлять собой морфологические признаки внедрения глубинного расплава. Получены новые доказательства сохранности архейского блока фундамента Тюнгского террейна, подтверждающие правило Клиффорда-Дженса: промышленно алмазоносные кимберлитовые тела Накынского поля расположены в пределах архейского блока. Наличие позднекарельских краевых зон на архейских цирконах из ксенолитов фундамента из алмазоносных кимберлитов Центрально-Сибирской алмазоносной субпровинции свидетельствует о неравномерном масштабном тектоно-термальном преобразовании фундамента Тюнгского террейна в период 1,8–2,1 млрд лет, вероятно влияющем на продуктивность кимберлитовых полей либо месторождений.

Original article

UDC 550.93:552.3/.4"616"(571.56)

doi:10.52349/0869-7892_2025_102_44-61



© М. Н. Голобурдина, С. А. Граханов, А. И. Дак, Т. Н. Зубова, В. Г. Мальковец, В. Ф. Проскурнин, А. В. Тарасов, 2025

New data on the age and preservation of the Archean basement block under the Nakyn kimberlite field, Republic of Sakha (Yakutia)**M. N. Goloburdina^{1✉}, S. A. Grakhanov^{1, 2},
A. I. Dak³, T. N. Zubova¹,
V. G. Malkovets^{3, 4}, V. F. Proskurnin¹,
A. V. Tarasov⁵**

¹All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky,
Saint Petersburg, Russia, Marina_Goloburdina@karpinskyinstitute.ru[✉]
²ALMAR — diamonds of the Arctic, Yakutsk, Russia
³ALROSA, Mirny, Russia
⁴V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia
⁵Federal Subsoil Resources Management Agency, Moscow, Russia

Keywords: *Tyung terrane, East Siberian diamond-bearing province, zircon megacrystals, U-Pb age, SIMS SHRIMP-II, trace elements, diamond potential*

Funding: the Russian Science Fund (grant no. 22-27-00724) supported selection and primary study of zircon crystals.

For citation: New data on the age and preservation of the Archean basement block under the Nakyn kimberlite field, Republic of Sakha (Yakutia) / M. N. Goloburdina [et al.]. *Regional Geology and Metallogeny*. 2025; 32 (2): 44–61. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2025_102_44-61

Abstract. The paper establishes the Archean (2643 ± 43 Ma) and Proterozoic (1804 ± 15 Ma) ages of zircon megacrystals from the Nyurba kimberlite pipe, as well as analyzes their typomorphic features. The Archean zircons are characterized by the lacking Late Karelian overgrowth zones, elevated concentrations of yttrium ($Y > 100$ ppm), rare earth elements ($\Sigma REE > 100$ ppm), and heavy rare earth elements ($Lu/Gd > 1$) compared to the Late Proterozoic zircons ($Y < 100$ ppm; $\Sigma REE < 50$ ppm; $Lu/Gd < 1$). The obtained data suggest that these zircons originate from metamorphic rock units located in separate blocks or metamorphic zones, which indicates preservation of the Archean formations. The study evidences deformation in zircon crystals, which may serve as key morphological markers of deep-seated melt emplacement. Novel findings confirm preservation of the Archean block of the Tyung terrane basement, which support the Clifford-Janse rule: commercial diamondiferous kimberlite bodies of the Nakyn field are confined within the Archean block. The presence of the Late Karelian overgrowths on the Archean zircons from the xenolith basement of diamondiferous kimberlites in the Central Siberian diamond-bearing province demonstrates a large-scale uneven tectono-thermal transformation of the Tyung terrane for 1.8–2.1 Ga, which should influence the productivity of kimberlite fields or individual deposits.

ВВЕДЕНИЕ

Возраст фундамента является важным фактом при реконструкции истории формирования геоблоков земной коры, контролирующих различные минерогенические провинции и субпровинции. Тектонические критерии в ряду прогнозно-поисковых факторов коренных месторождений алмазов занимают одно из ведущих мест [1–16].

При прогнозировании таксономических единиц ранга субпровинция и район наиболее часто используется «правило Т. Клиффорда», в 1966 г. предложившего оригинальную гипотезу [11], о том что промышленные месторождения алмазов приурочены к древним кратонам, стабильным в течение последних 1800 ± 250 млн лет, а непродуктивные кимберлиты находятся и в областях более молодых платформ. Позднее А. Дженс, после анализа распределения коренных месторождений алмазов мира, усовершенствовал данное правило, введя понятия «архонов» (архейских кратонов, породы которых испытали последние деформации и метаморфизм не позднее 2,4 млрд лет назад), «протонов» (кратонов в диапазоне 1,8–2,4 млрд лет) и «тектонов» (более молодых кратонов) [12; 13], и заключил, что промышленные кимберлиты встречаются исключительно на архонах. Именно эта точка зрения доминирует среди российских специалистов-алмазников как «правило Клиффорда», хотя сам автор под стабильными блоками подразумевал архейские и раннепротерозойские кратоны, не испытавшие масштабную активизацию позднее 1,8 млрд лет.

В работе Н. А. Божко [14; 15], где рассмотрены тектонические обстановки проявления алмазоносного кимберлитового магматизма, противоречащие

правилу Т. Клиффорда, подтверждается, что архейский кратон является важнейшим элементом и тектоническим критерием алмазоносности, поскольку под ним создаются наиболее благоприятные условия для кристаллизации и сохранности алмаза, о чем свидетельствуют геотермические построения, указывающие на наличие под архейскими кратонами области пород с аномальными свойствами, так называемыми «алмазоносными мантийными корнями», ограниченными по вертикали графит-алмаз — литосфера-астеносфера [16]. Исследователь также отмечает, что отсутствует теория локализации алмазоносных кимберлитовых полей внутри архонов и пока не объясним различный уровень их промышленной алмазоносности, неясно влияние степени переработки архейских кратонов на первоначальный алмазный потенциал и не установлено, коррелирует ли возрастание алмазоносности коренных тел с удревнением фундамента.

В пределах Сибирской платформы все коренные месторождения алмазов расположены в границах архонов и, частично, протонов: Мирнинское поле (трубки Мир, Интернациональная, им. XXIII Партсъезда, Дачная) на Магано-Вилуйском архейском кратоне (террейне по А. П. Смелову и др., 2001); Алакит-Мархинское (трубки Айхал, Сытыканская, Юбилейная, Комсомольская), Далдынское (трубки Удачная, Зарница), Верхне-Мунское (трубки Заполярная, Новинка, Поисковая, Комсомольская-Магнитная) и Накыньское поля (трубки Нюрбинская, Ботубинская, дайка Майская) на Тунгском архейско-раннепротерозойском террейне [8]. Любопытно, что в пределах мобильного (орогенного) Хапчанского пояса, который по правилу Клиффорда-Дженса расположен в пределах протона с возрастом 1,9–2,1 млрд лет

[8; 17], даже в единой Далдыно-Оленёнской минерогенической зоне, контролирующей промышленную алмазоносность Алакит-Мархинского, Далдынского и Верхне-Мунского полей, нет ни одного потенциально промышленного коренного месторождения алмазов. Данный факт косвенно свидетельствует о влиянии на алмазоносность раннепротерозойских тектоно-термальных процессов, проходивших при формировании фундамента.

Поскольку Тюнгский террейн включает большую часть различных по алмазоносности кимберлитовых полей, а в настоящее время опубликован многочисленный материал по детальным исследованиям циркона из ксенолитов фундамента этого террейна из алмазоносных кимберлитов, то предлагается с учетом новых данных по циркону из тр. Нюрбинская рассмотреть возможную корреляцию алмазоносности кимберлитов с возрастом и степенью перекристаллизации нижней коры в пределах названной территории.

В рамках изучения кимберлитового циркона в ФГБУ «Институт Карпинского» для исследования были выбраны мегакристаллы из кимберлитов тр. Нюрбинская, по размеру сопоставимые с кимберлитовыми, но имеющие различную морфологию, в том числе преобладающую ксеноморфную. Представленная работа посвящена результатам U-Pb датирования и изотопно-геохимического исследования данных кристаллов, сопоставлению с ранее полученными возрастными и оценке взаимосвязи алмазоносности кимберлитов с тектоно-термальными раннепротерозойскими преобразованиями фундамента Тюнгского террейна.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Коллекция кристаллов циркона из кимберлитов тр. Нюрбинская любезно предоставлена АК «АЛРОСА» (ПАО). Для исследования выбран 21 кристалл, различающийся по морфологии и цвету. Кристаллы были имплантированы в эпоксидную смолу с зернами цирконовых стандартов Temora-2 и 91500 и шлифованы. Участки датирования определялись по оптическим и катодолюминесцентным изображениям.

U-Pb датирование и изотопно-геохимические измерения (REE + Y, Ti, Hf, U, Th) проведены на ионном микрозонде SHRIMP-II в Центре изотопных исследований ФГБУ «Институт Карпинского». Возрасты получены с использованием вторичного электронного умножителя в одноколлекторном режиме по методике [18], интенсивность первичного пучка ионов кислорода составляла 3 нА, диаметр пятна (кратера) — около 25 мкм. Полученные данные обработаны в программе Squid-1 [19]. U/Pb отношения нормализованы относительно стандартного циркона Temora-2 с возрастом 416,8 млн лет [20]. Концентрации Pb, U и Th были получены с использованием стандарта циркона 91500 с содержанием урана 81,2 г/т [21].

Редкие (Ti, Y, Hf) и редкоземельные элементы измерялись методом количественного химического анализа [22] с интенсивностью первичного пучка 3–4 нА и диаметром аналитического кратера 25–30 мкм

в области датирования. ^{91}Zr изотоп служил опорным пиком для нормализации измеренных изотопов относительно него. Вторичные положительно заряженные ионы направлялись с использованием ускоряющего напряжения 10 кВ в масс-спектрометр и регистрировались с помощью электронного умножителя в одноколлекторном режиме. Во время анализа накапливались три массовых спектра (повтора) следующих изотопов: ^{89}Y , ^{91}Zr , ^{139}La , ^{140}Ce , ^{141}Pr , ^{143}Nd , ^{146}Nd , ^{147}Sm , ^{149}Sm , ^{151}Eu , ^{153}Eu , ^{155}Gd , ^{157}Gd , ^{159}Tb , ^{161}Dy , ^{163}Dy , ^{165}Ho , ^{166}Er , ^{167}Er , ^{169}Tm , ^{171}Yb , ^{172}Yb , ^{175}Lu , ^{178}Hf , ^{180}Hf .

Время накопления вторичного ионного тока составляет: 60 с — для ^{49}Ti , 2 с — для ^{91}Zr , 10 с — для ^{89}Y , от 15 до 40 с — для легких РЗЭ, 5–10 с — для тяжелых РЗЭ и двух изотопов Hf. Продолжительность анализа не превышает 40 мин. Полученные данные обрабатываются с помощью программы MS Excel. В результате регистрации парных изотопов для нескольких измеряемых элементов проводился дополнительный контроль качества анализа на основе степени их совпадения (с учетом величины природной распродранности). Для учета наложения диммера $^{178}\text{Hf}^+$ на пик ^{89}Y вводилась поправка: $^{89}\text{Y} = (^{89}\text{Y} - ^{178}\text{Hf})/100$. В качестве первичного стандарта концентрации применялось стекло SRM NIST-611.

В качестве эталонного (вторичного) стандарта использовался циркон 91500, контрольное измерение которого считалось приемлемым, если несовпадение не превышало 15 % [23–25].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследованные кристаллы циркона представлены полупрозрачными и непрозрачными субизометрическими, субпризматическими обломками и идиоморфными кристаллами молочно-белыми, розоватыми, желтоватыми и коричневыми (рис. 1, а, 2). В пробе преобладает ксеноморфный циркон размером $2,8 \times 3,5$ – 3×5 мм с редко наблюдаемыми дипирамидально-призматическими гранями. Идиоморфным кристаллам характерны округлые многогранные формы и размеры $2,5 \times 3$ – 3×3 мм. В ультрафиолетовых лучах (365 нм) циркон проявляет желтоватое и рыжевато-свечение (рис. 1, б).

В катодолюминесценции кристаллы обладают умеренным и ярким свечением (рис. 2), обусловленным относительно низкими концентрациями U и Th. Для циркона типична едва заметная магматическая зональность, сопряженная с более проявленными элементами секториальности, и характерна интенсивная трещиноватость.

В зернах прослеживаются две системы деформаций (рис. 3): ранняя — линейные и извилистые серые залеченные микротрещины, образующие линейную либо сетчатую трещиноватость хаотичной степени сгущения; поздняя — отличается тем, что отчетливо нарушает раннюю систему трещин и маркируется незалеченными микрополостями. Таким образом, установлено, что исследованные кристаллы циркона испытали минимум две стадии деформаций, проходивших в различных условиях и, вероятно, в разное геологическое время.

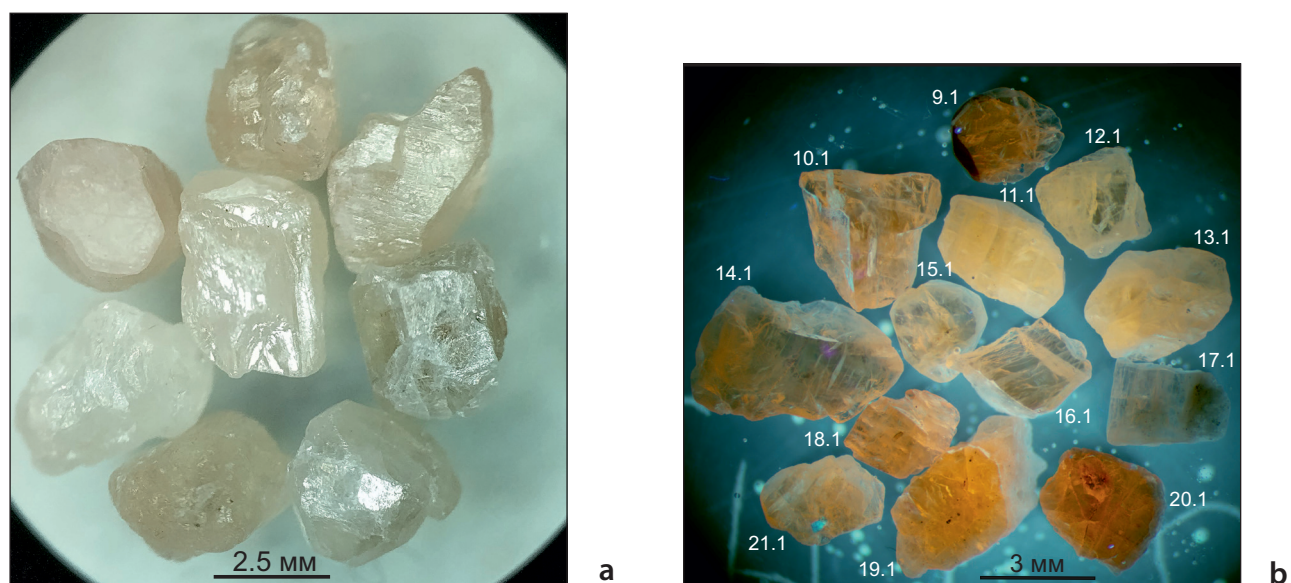


Рис. 1. Морфология (а) и особенности ультрафиолетового свечения (b) цирконов из кимберлитов тр. Нюрбинская
Нумерация зерен на рис. b соответствует аналитическим данным в табл. 1 и 2

Fig. 1. Morphology (a) and ultraviolet features (b) of the Nyurba kimberlite pipe zircons

Grain numbering in fig. b corresponds to the analytical data in tab. 1 and 2

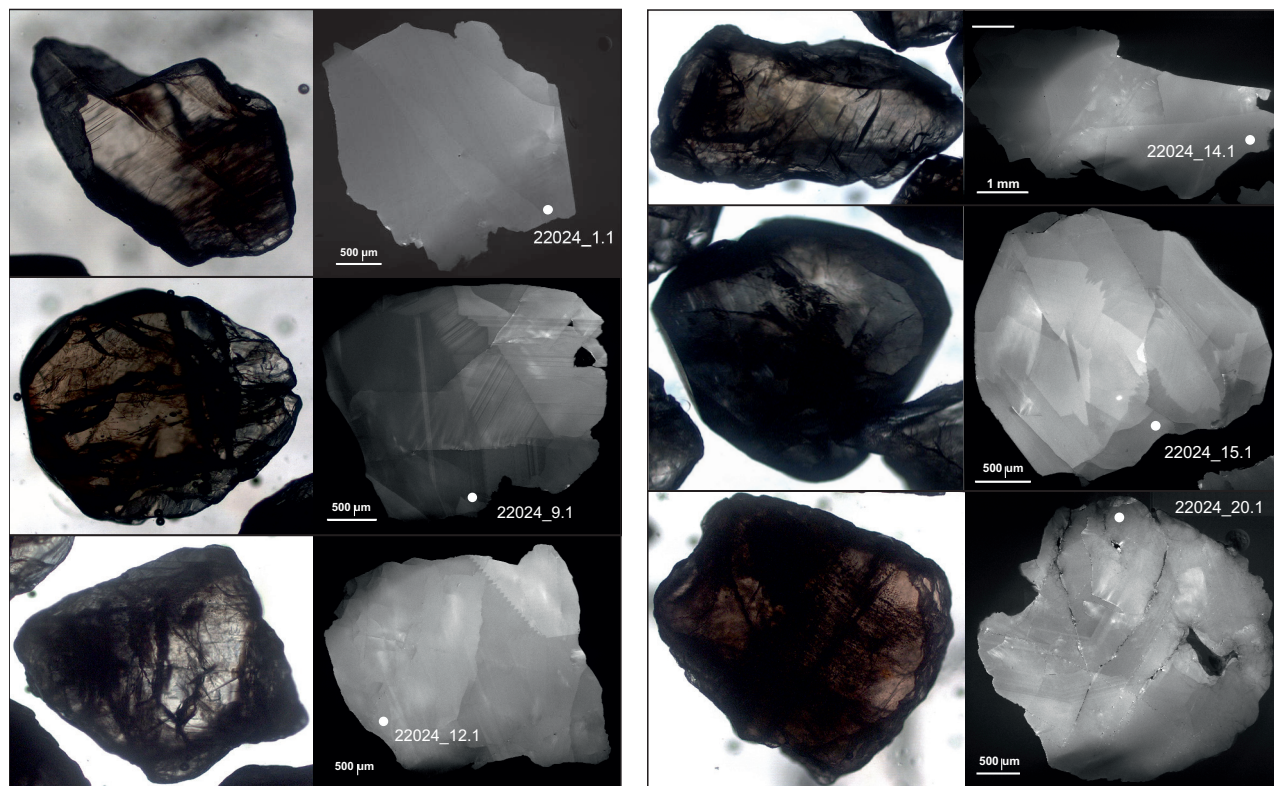


Рис. 2. Морфологические особенности цирконов из кимберлитов тр. Нюрбинская в проходящем свете и катодолуминесценции с точками датирования

Fig. 2. Morphological features of the Nyurba kimberlite pipe zircons in transmitted light and cathodoluminescence, with dating points included

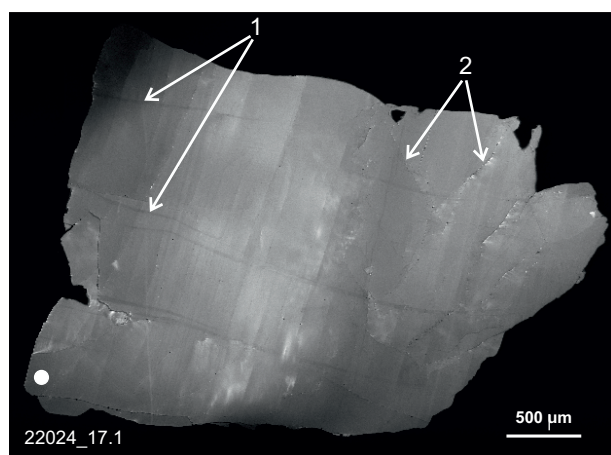


Рис. 3. Католюминесцентное изображение циркона из кимберлитов тр. Нюрбинская с двумя системами деформаций

1 — ранняя; 2 — поздняя

Fig. 3. Cathodoluminescence image of the Nyurbinskaya kimberlite pipe zircons with two deformation systems

1 — early; 2 — late

При датировании U-Pb методом остро стоит вопрос о возможном влиянии деформаций на первичную изотопную систему. Поскольку поздние деформации хорошо фиксируются в католюминесценции и их можно избежать, то определение залеченных деформационных элементов зависит от особенностей их распределения в кристалле, отличных содержаний U и Th и от качества снимков. В публикации [26] рассматривалось датирование подобных архейских кристаллов циркона из кимберлитов тр. Нюрбинская и подробно исследовались в них залеченные микротрещины, для которых было установлено отсутствие значимых отличий по составам Hf-изотопа, O-изотопа и микроэлементов от незатронутых деформациями блоков циркона, а их возраст соответствовал внедрению кимберлитового расплава ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 369–381 млн лет, SHRIMP-II).

В результате датирования U-Pb методом (SIMS SHRIMP-II) определена преобладающая в выборке популяция архейского циркона ($n = 20$) с конкордантным возрастом в интервале позднего лопия 2508–2747 млн лет (рис. 4, а, б) и один кристалл с позднекарельским возрастом 1804 ± 15 млн лет (табл. 1). В связи с отсутствием корреляции наиболее низких концентраций U и Th с определенными возрастными авторами учитывают все полученные архейские значения, и средневзвешенный возраст принимается в изотопной системе $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 2643 ± 43 млн лет с наименьшим показателем MSWD 5,5 относительно данного возраста $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ с MSWD 14 (рис. 4, в, д).

По микроэлементам архейские кристаллы циркона выделяются сравнительно низкими содержаниями редкоземельных и редких элементов (табл. 2, рис. 5). Для них характерны аномально пониженные содержания Th (0,2–7 г/т) относительно U (2–24 г/т) и, соответственно, величины Th/U (0,08–0,56) отно-

шения (табл. 1). Для трех кристаллов отмечаются более высокие значения Th/U (0,6–0,91). Редкоземельные элементы в архейских кристаллах имеют дифференцированный спектр распределения с варьирующим суммарным содержанием ($\Sigma\text{РЗЭ}$) от 120 до 214 г/т и отчетливые аномалии по Eu (Eu/Eu^* 0,24–0,33) и Ce (Ce/Ce^* 58–213). Значение тяжелых редкоземельных элементов (HREE), представленное отношением Lu/Gb, соответствует уровню 1,28–1,97, количество Y варьирует от 511 до 921 г/т, значения гафния находятся в узком интервале 10 209–12 731 г/т.

Протерозойский циркон характеризуется более высокими концентрациями U (48 г/т) и Th (47 г/т), повышенным значением отношения Th/U (1,02), более низкими количествами $\Sigma\text{РЗЭ}$ (42 г/т) и Y (46 г/т), отличными аномалиями по Eu (Eu/Eu^* 0,55) и Ce (Ce/Ce^* 16). Значения HREE (Lu/Gd 0,34) выражены пологим спектром распределения, вероятно, обусловленным совместной кристаллизацией с гранатом [27].

По определенному количеству Ti в цирконе была оценена температура кристаллизации в интервале 763–907 °C для архейского и 749 °C для протерозойского циркона по Ti-термометру [28].

ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время опубликованы многочисленные детальные исследования циркона и ксенолитов фундамента Тунгского террейна [30], включенных в кимберлиты Далдынского, Алаakit-Мархинского, Верхне-Мунского и Накынского полей, свидетельствующие об архейско-протерозойском возрасте фундамента (рис. 6, табл. 3). Не вдаваясь в подробности каждого исследования, можно отметить установленные в той или иной мере общие этапы формирования и тектоно-термальной переработки рассматриваемого фундамента [8; 10; 26; 30–39], выделенные в три основных временных события [35]: раннеархейское (3,24–3,6 млрд лет), позднеархейское (2,5–2,9 млрд лет) и раннепротерозойское (1,8–1,98 млрд лет). Также было заключено, что фундамент имеет вертикальную и латеральную гетерогенность и состоит из в разной степени преобразованных архейских и протерозойских пород [39].

Полученные в данной работе позднеархейские и раннепротерозойские возрасты циркона из фундамента под Накынским кимберлитовым полем согласуются с ранее приведенными значениями в публикациях [26; 33; 34; 36; 38], продемонстрированными в табл. 3. Следует отметить, что пока только под Накынским кимберлитовым полем определен неперекристаллизованный циркон с раннеархейским возрастом 3745 млн лет (U-Pb, LA-ICPMS) [26].

Полагая, что возраст нескольких метаморфических событий может быть запечатлен и определен в цирконе, то уровень преобразований породы в какой-то мере можно оценить по возрастным зонам в данном минерале. Результаты исследований показали, что позднеархейский циркон из кимберлитов тр. Нюрбинская не имеет протерозойских новообразованных зон и отличается от позднекарельского

циркона относительно высокими концентрациями иттрия, редкоземельных элементов и их спектром, Eu- и Ce-аномалиями, более высокой температурой кристаллизации, что в совокупности свидетельствует

о принадлежности этих кристаллов циркона к метаморфическим породам, явно залегающим в отдельных блоках или метаморфических зонах, и, соответственно, о сохранности архейских образований.

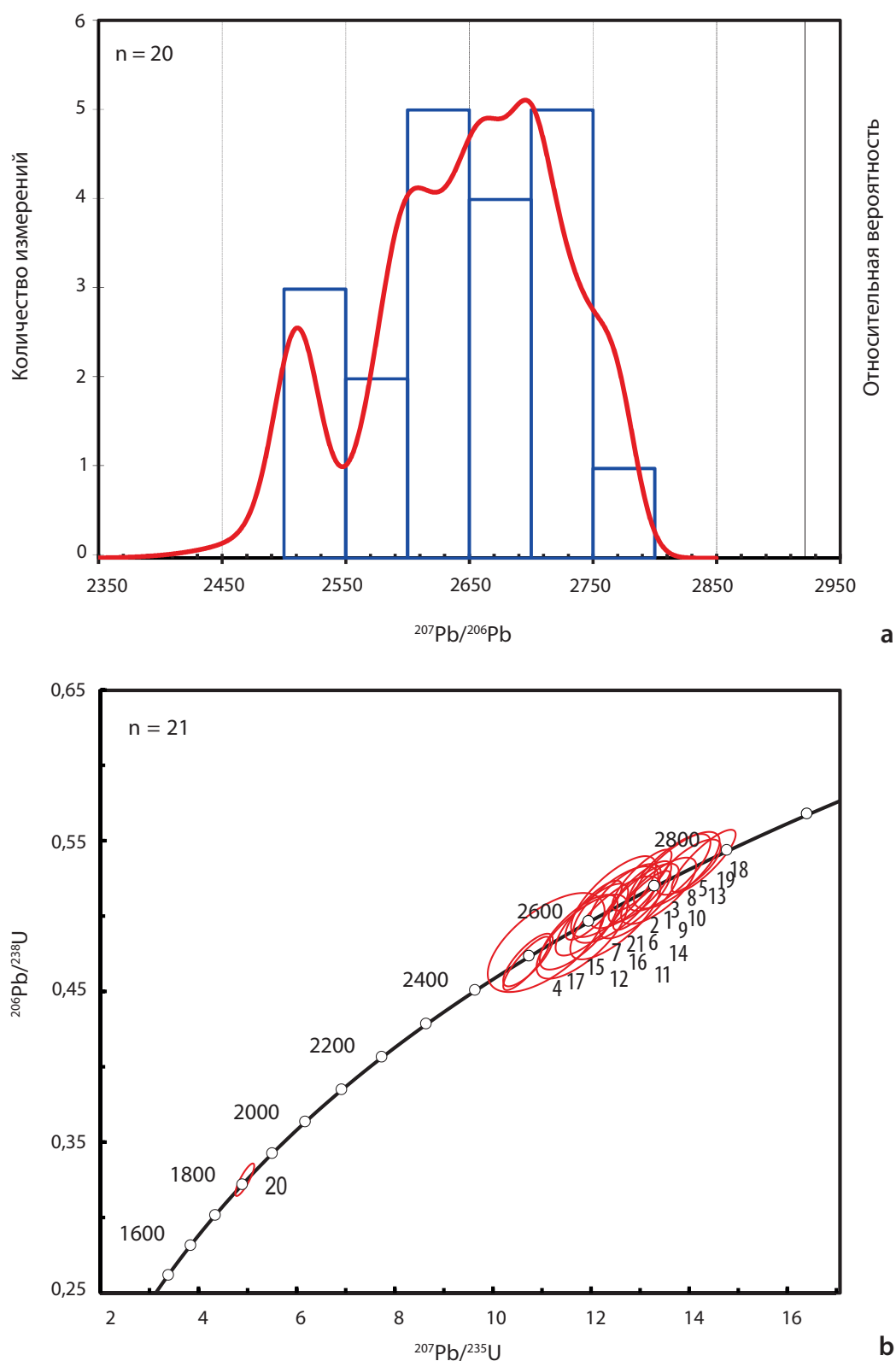


Рис. 4. Гистограмма значений $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраста (a), диаграмма с конкордией (b) и позднелопийский средневзвешенный возраст (c, d) для цирконов из кимберлитов тр. Нюрбинская

Отсутствие позднекарельских краевых зон в архейском цирконе фундамента из кимберлитовых трубок Нюрбинская и Ботуобинская прослеживается и по материалам предшественников [26; 34; 36;

38]. В работах приводится количество и распределение редкоземельных элементов, концентрации иттрия, сопоставимые с полученными данными для архейских ($\Sigma\text{P3Э}$ 132–2130 г/т; HREE (Lu/Gd) 0,94–6,5;

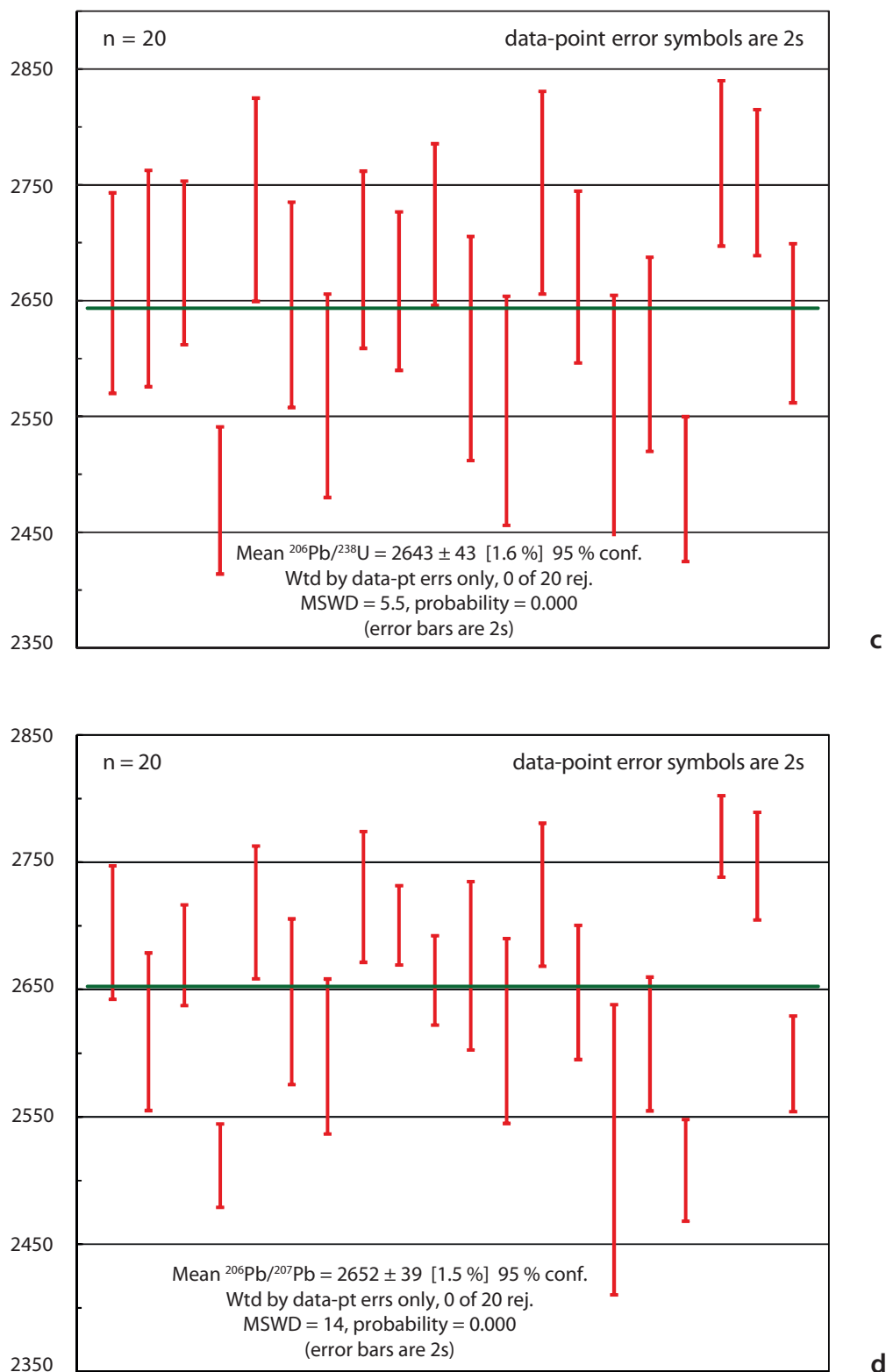


Fig. 4. Relative probability plot of $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age values (a), concordia diagram (b), and Late Lopian weighted average age (c, d) for the Nyurba kimberlite pipe zircons

Таблица 1

Результаты U–Pb (SIMS SRIMP-II) датирования цирконов из кимберлитов тр. Нюрбинская
Table 1. Results of U–Pb (SIMS SRIMP-II) dating of the Nyurba kimberlite pipe zircons

Номер точки анализа	$^{206}\text{Pb}_c$, %	U, г/г	Th, г/г	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*$, г/г	(1) Возраст $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, млн лет	(1) Возраст $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, млн лет	D, %	$\pm$, %	(1) $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}^*$	$\pm$, %	(1) $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}^*$	$\pm$, %	(1) $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm$, %	(1) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Rho
1.1	0,22	7	4	0,56	3,27	2656 $\pm$ 43	2695 $\pm$ 26	1	1,4	1,961	2,0	0,1846	1,6	12,98	2,5	0,5100	0,782
2.1	0,27	6	2	0,42	2,66	2669 $\pm$ 47	2617 $\pm$ 31	–2	1,6	1,950	2,1	0,1761	1,9	12,46	2,8	0,5130	0,754
3.1	0,32	16	4	0,23	7,15	2683 $\pm$ 35	2677 $\pm$ 20	0	0,9	1,938	1,6	0,1826	1,2	13,00	2,0	0,5161	0,803
4.1	0,07	19	3	0,18	7,76	2477 $\pm$ 32	2512 $\pm$ 16	1	0,9	2,134	1,5	0,1654	0,9	10,69	1,8	0,4686	0,846
5.1	0,00	6	1	0,14	2,81	2737 $\pm$ 44	2711 $\pm$ 26	–1	1,6	1,891	2,0	0,1864	1,6	13,59	2,5	0,5290	0,780
6.1	0,29	5	2	0,48	2,29	2646 $\pm$ 44	2640 $\pm$ 33	0	1,7	1,970	2,0	0,1787	2,0	12,50	2,8	0,5080	0,722
7.1	0,00	5	1	0,13	2,09	2568 $\pm$ 44	2597 $\pm$ 30	1	1,8	2,044	2,1	0,1741	1,8	11,75	2,8	0,4890	0,751
8.1	0,25	10	1	0,08	4,23	2685 $\pm$ 38	2723 $\pm$ 26	1	1,3	1,935	1,7	0,1878	1,6	13,38	2,3	0,5167	0,746
9.1	0,06	18	4	0,24	8,02	2658 $\pm$ 34	2700 $\pm$ 16	2	0,9	1,959	1,6	0,1852	0,9	13,04	1,8	0,5104	0,857
10.1	0,00	13	2	0,15	5,95	2716 $\pm$ 35	2657 $\pm$ 18	–2	1,1	1,909	1,6	0,1805	1,1	13,04	1,9	0,5239	0,830
11.1	0,00	4	3	0,82	1,69	2609 $\pm$ 48	2669 $\pm$ 33	2	2,0	2,005	2,3	0,1817	2,0	12,50	3,0	0,4990	0,749
12.1	0,35	5	2	0,52	2,03	2555 $\pm$ 49	2617 $\pm$ 36	2	1,8	2,056	2,3	0,1762	2,2	11,82	3,2	0,4860	0,732
13.1	0,25	6	3	0,60	2,65	2743 $\pm$ 44	2724 $\pm$ 28	–1	1,5	1,885	2,0	0,1880	1,7	13,75	2,6	0,5300	0,754
14.1	0,34	10	3	0,30	4,34	2670 $\pm$ 37	2648 $\pm$ 26	–1	1,2	1,948	1,7	0,1794	1,6	12,70	2,3	0,5132	0,730
15.1	0,00	2	0,2	0,10	0,91	2538 $\pm$ 58	2524 $\pm$ 57	–1	3,4	2,073	2,8	0,1666	3,4	11,09	4,4	0,4820	0,634
16.1	0,21	8	2	0,31	3,29	2604 $\pm$ 42	2607 $\pm$ 26	0	1,4	2,010	2,0	0,1751	1,6	12,02	2,5	0,4976	0,779
17.1	0,22	17	7	0,46	6,71	2487 $\pm$ 31	2508 $\pm$ 20	1	1,0	2,124	1,5	0,1650	1,2	10,71	1,9	0,4708	0,787
18.1	0,11	16	15	0,91	7,59	2769 $\pm$ 36	2770 $\pm$ 16	0	0,9	1,864	1,6	0,1933	0,9	14,30	1,9	0,5364	0,852
19.1	0,06	24	5	0,20	11,0	2752 $\pm$ 32	2747 $\pm$ 21	0	1,3	1,878	1,4	0,1906	1,3	13,99	1,9	0,5325	0,738
20.1	0,00	48	47	1,02	13,4	1814 $\pm$ 21	1804 $\pm$ 15	–1	0,8	3,076	1,4	0,1102	0,8	4,942	1,6	0,3251	0,849
21.1	0,00	12	2	0,15	5,30	2630 $\pm$ 34	2592 $\pm$ 19	–1	1,1	1,985	1,6	0,1735	1,1	12,05	1,9	0,5039	0,816

Примечание. $^{206}\text{Pb}_c$ и $^{206}\text{Pb}^*$ — общий и радиогенный свинец. Погрешность калибровки стандарта 0,38 %. (1) — поправка на общий свинец проведена по измеренному ^{204}Pb . Погрешности вычисленных возрастов приводятся на уровне 2σ . D — коэффициент дискордантности $100 \times ((\text{возраст } ^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})/(\text{возраст } ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) - 1)$. Rho — коэффициент корреляции погрешностей отношений $^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}-^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$

Note. $^{206}\text{Pb}_c$ and $^{206}\text{Pb}^*$ — common and radiogenic lead. Standard error of calibration 0.38 %. (1) — common lead correction for the measured ^{204}Pb . The calculated age errors correspond to level 2σ . D — discordance coefficient $100 \times ((\text{age } ^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})/(\text{age } ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) - 1)$. Rho — correlation coefficient of error ratios $^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}-^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$

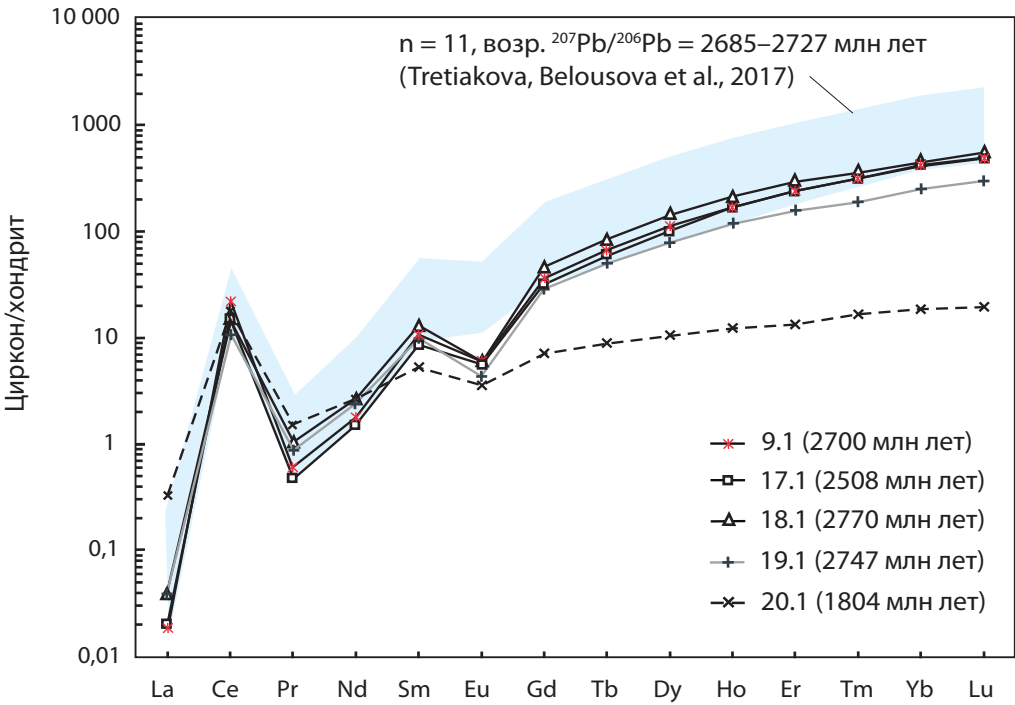


Рис. 5. Распределение редкоземельных элементов в цирконах из кимберлитов тр. Нюрбинская. Содержания нормированы на хондрит

Источник: по [29]

Fig. 5. Distribution of rare earth elements in the Nyurba kimberlite pipe zircons. Values normalized to chondrite

Source: from [29]

Таблица 2

Концентрации микроэлементов (г/т) в цирконах из кимберлитов тр. Нюрбинская

Table 2. Trace elements concentrations (ppm) in the Nyurba kimberlite pipe zircons

Компоненты	2024_9.1	22024_17.1	22024_18.1	22024_19.1	22024_20.1
La	0,011	0,012	0,024	0,023	0,196
Ce	20	14	14	10	16
Pr	0,11	0,09	0,19	0,16	0,28
Nd	1,47	1,24	2,2	1,97	2,2
Sm	3,0	2,5	3,7	2,8	1,49
Eu	0,62	0,57	0,60	0,44	0,36
Gd	13	11	17	10	2,6
Tb	4,6	4,1	5,9	3,4	0,61
Dy	53	47	67	36	4,9
Ho	19	18	23	13	1,34
Er	78	76	94	50	4,3
Tm	16	15	18	9,4	0,83
Yb	137	134	146	81	6,1
Lu	24	25	27	15	0,96

Компоненты	2024_9.1	22024_17.1	22024_18.1	22024_19.1	22024_20.1
Ti	13	13	51	41	11
Y	750	724	921	511	46
Hf	12731	10209	11554	10616	10528
Eu/Eu*	0,30	0,33	0,24	0,26	0,55
Ce/Ce*	213	152	72	58	16
Σ REE	190	179	214	120	42
Ti, Temp	763	765	907	882	749

Eu/Eu* 0,36–0,7; Y 183–1562 г/т) и позднекарельских (Σ РЗЭ 15–46 г/т; HREE (Lu/Gd) 0,1–1,01; Eu/Eu* 0,77–0,85; Y 22–75 г/т) кристаллов [26; 38]. По данным предшественников, архейский циркон характеризует возраст гранатовых и мафических гранулитов, амфибол-биотит-плагиоклазовых гнейсов, а позднекарельский циркон — гранатовых гранулитов [36; 38].

На основе обобщенного фактического материала (табл. 4) наблюдается тенденция в приуроченности Накынского и Верхне-Мунского алмазоносных полей с высоким процентом месторождений к блокам архейского фундамента, не испытавшим перекристал-

лизацию в позднем карелии, либо с ее следами, но которые могли быть сопряжены с блоками/зонами метаморфических образований, полностью переработанными в позднем карелии.

В свете тектонических построений на основе приведенного аналитического материала можно предложить две вероятные модели. Одна из моделей предполагает, что кимберлиты Накынского поля приурочены к зоне глубинных разломов, сопряженных с границей архейского и протерозойского блоков фундамента, обеспечивающей повышенную проницаемость и, соответственно, быстрый

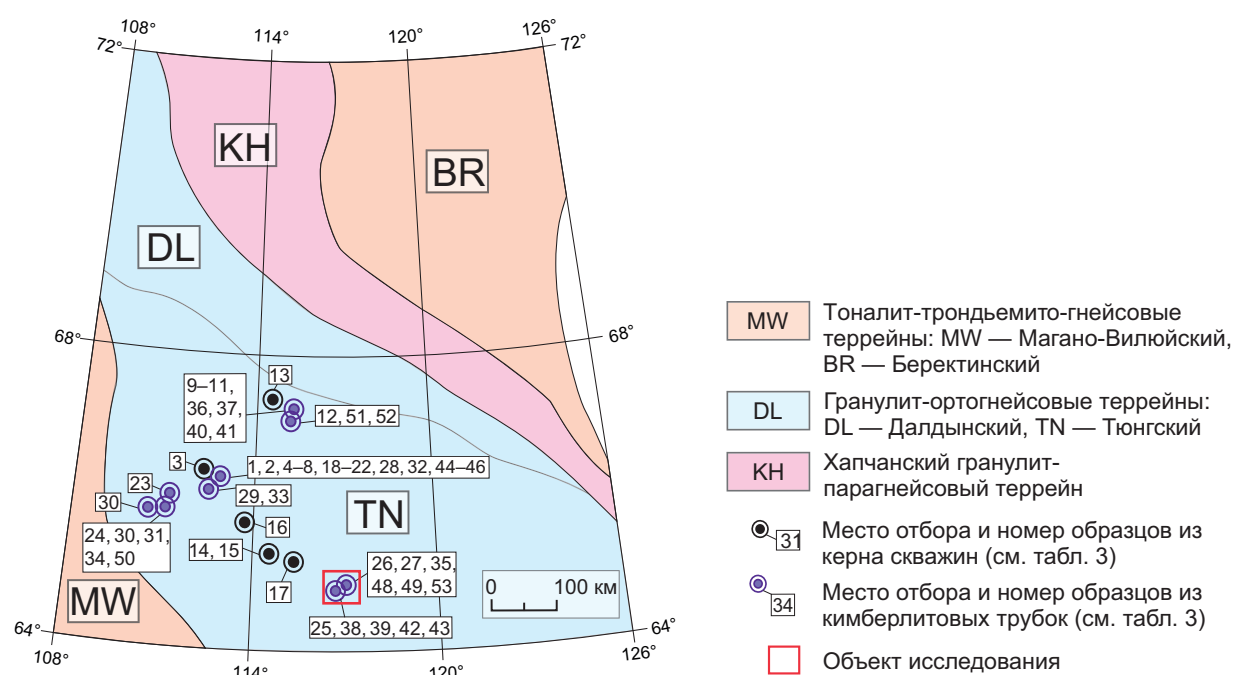


Рис. 6. Структура фундамента Восточно-Сибирской алмазоносной провинции

Источник: по [30]

Fig. 6. Basement structure of the East Siberian diamond-bearing province

Source: from [30]

Таблица 3

Результаты изотопного датирования пород фундамента из ксенолитов кимберлитовых трубок и керна скважин, ксенокристаллов циркона в пределах Тюнгского террейна

Table 3. Results of isotope dating of basement rocks from kimberlite and borehole core xenoliths, zircon xenocrystals within the Tyung terrane

Номер на рис. 6	Порода	Возраст, млн лет	Место отбора
А. П. Смелов и др., 2001 (T_{Nd} (DM)) [31]			
1	Гранат-клинопироксеновый амфиболит	2537	Трубка Удачная
2	Гранат-клинопироксеновый амфиболит	2488	Трубка Удачная
3	Гранат-клинопироксеновый амфиболит	2906	Удачинская скважина
4	Гранат-амфиболовый кристаллический сланец	2982	Трубка Удачная
5	Амфибол-клинопироксеновый кристаллический сланец	2109	Трубка Удачная
6	Амфиболит	3050	Трубка Удачная
7	Гранат-клинопироксеновый амфиболит	3072	Трубка Удачная
8	Биотит-амфиболовый плагиогнейс	3108	Трубка Удачная
9	Гранат-клинопироксеновый амфиболит	2907	Трубка Заполярная
10	Гранат-клинопироксеновый амфиболит	3129	Трубка Заполярная
11	Гранат-клинопироксеновый амфиболит	3286	Трубка Заполярная
12	Гранат-амфиболовый кристаллический сланец	2938	Трубка Новинка
13	Гнейс	3183	Бысытыхская скважина
14	Диоритогнейс	2848	Танхайская скважина
15	Гнейс	2653	Танхайская скважина
16	Гранит	2325	Сохолохская скважина
17	Гранитогнейс	2696	Онхойдохская скважина
М. Yu. Koreshkova et al., 2009 (U-Pb, SIMS SHRIMP-II) [32]			
18	Двупироксеновый гранатовый гранулит	1827–1866 1881 1939 2710–3150	Трубка Удачная
19	Амфиболсодержащий гранатовый гранулит	1831	Трубка Удачная
20	Гранатовый гранулит среднего состава	1824	Трубка Удачная
21	Гранатовый гранулит	1846 1900	Трубка Удачная
22	Кинцитит	1894 1936	Трубка Удачная
Н. В. Владыкин, Е. Н. Лепехина, 2009 (U-Pb, SIMS SHRIMP-II) [33]			
23	Кимберлиты	1887	Трубка Айхал
24	Кимберлиты	1874	Трубка Комсомольская
25	Кимберлиты	2224–2748	Трубка Ботуобинская
26	Кимберлиты	2425–2622	Трубка Нюрбинская
Z. V. Spetsius et al., 2011 (U-Pb, LA-ICPMS) [34]			
27	Кимберлиты	2700	Трубка Нюрбинская

Номер на рис. 6	Порода	Возраст, млн лет	Место отбора
V. S. Shatsky et al., 2016 (U-Pb, LA-ICPMS) [35]			
28	Гранатовый гранулит	1722–2530	Трубка Удачная
29	Гранатовый гранулит	1877–1986	Трубка Ленинградская
30	Гранатовый гранулит	1859	Трубка Юбилейная
31	Гранат-биотитовый гнейс	1793–2883	Трубка Комсомольская
V. S. Shatsky et al., 2016 (Hf, T _{DM} °) [35]			
32	Гранатовый гранулит Гранат-биотитовый гнейс	2500–3120	Трубка Удачная
33			Трубка Ленинградская
34			Трубка Комсомольская
I. G. Tretiakova et al., 2017 (U-Pb, LA-ICPMS) [26]			
35	Кимберлиты	2709 3745	Трубка Нюрбинская
V. S. Shatsky et al., 2018 (U-Pb, LA-ICPMS) [36]			
36	Гранат-пироксеновый гнейс	2711 2716	Трубка Заполярная
37	Двупироксеновый гранулит	2708	Трубка Заполярная
38	Мафический гранулит	2751	Трубка Ботуобинская
39	Гранатовый гранулит	2782	Трубка Ботуобинская
V. S. Shatsky et al., 2018 (Lu-Hf, T _{DM} °) [36]			
40	Гранат-пироксеновый гнейс	3200–3720	Трубка Заполярная
41	Двупироксеновый гранулит	3250–3710	Трубка Заполярная
42	Мафический гранулит	3120–3650	Трубка Ботуобинская
43	Гранатовый гранулит	3110–3420	Трубка Ботуобинская
V. S. Shatsky et al., 2019 (U–Pb, LA-ICPMS) [37]			
44	Двупироксеновый гранулит	1897 2000 2420–2866	Трубка Удачная
45	Метадиориты	1856 2503–2768	Трубка Удачная
46	Кварцевые метадiorиты	2611	Трубка Удачная
47	Гранатовый гранулит	1836–1880 2567	Трубка Зарница
M. Koreshkova et al., 2021 (U-Pb, LA-ICPMS) [38]			
48	Гранатовый гранулит	1876 1848	Трубка Нюрбинская
49	Амфибол-биотит-плагноклазовый гнейс	2758	Трубка Нюрбинская

Окончание табл. 3

Номер на рис. 6	Порода	Возраст, млн лет	Место отбора
50	Гранат-двупироксеновый гранулит	1656 1807 2039	Трубка Комсомольская
В. С. Шацкий и др., 2023 (U-Pb, LA-ICPMS) [39]			
51	Гранат-пироксеновый сланец	2607–2765	Трубка Новинка
52	Гранат-пироксеновый гнейс	2704 2680 1900	Трубка Новинка
U-Pb, SIMS SHRIMP-II выполнено в ЦИИ, ФГБУ «Институт Карпинского»			
53	Кимберлиты	1804 2643	Трубка Нюрбинская

Источник: по [26; 31–39]

Source: from [26; 31–39]

Таблица 4

Промышленная алмазоносность кимберлитовых полей и возраст фундамента в пределах Тюнгского террейна

Table 4. Commercial diamond potential of kimberlite fields and age of basement within the Tyung terrane

№ п/п	Количество кимберлитовых трубок / месторождений	Промышленная алмазоносность поля, % месторождений	U-Pb возраст цирконов из фундамента под кимберлитовыми полями, млн лет / наличие протерозойских краевых зон
Накынское кимберлитовое поле			
1	3 / Нюрбинская, Ботуобинская, Майская	100	3745 / отсутствуют; 2500–2782 / отсутствуют; 1804–1876
Верхне-Мунское кимберлитовое поле			
2	15 / Заполярная, Комсомольская-Магнитная, Поисковая, Новинка	33	2607–2765 / отсутствуют; 1900 (нижнее пересечение дискордии)
Далдынское кимберлитовое поле			
3	59 / Удачная, Зарница, Дальная	5	2500–2866 / отмечаются; 1836–2000
Алакит-Мархинское кимберлитовое поле			
4	65 / Айхал, Юбилейная, Сытыканская, Комсомольская, Заря	8	1807–2039; 1656

Источник: по [26; 31–39]

Source: from [26; 31–39]

подъем кимберлитового расплава к поверхности, благоприятный для сохранности алмазов. Другая модель подразумевает, что под Накынским кимберлитовым полем на архейский блок надвинут блок раннепротерозойских кристаллических пород на

заклучительной стадии тектоно-термальной переработки около 1800 млн лет в момент возможной локальной континентальной коллизии. В данном случае реализовывался благоприятный структурный фактор алмазоносности — утолщение литосферы

и погружение кратонного «киля» в область образования и сохранения алмазов, т. е. в «алмазоносные мантийные корни», обеспечившие высокую алмазность всех кимберлитовых тел Накынского поля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованные кристаллы циркона из кимберлитов тр. Нюрбинская имеют крупные размеры $2,5 \times 3-3 \times 5$ мм и по этому признаку являются мегакристаллами. Проведенное U-Pb датирование (SIMS SHRIMP-II) показало их архейский (среднез. $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{U}$ 2643 ± 43 млн лет по 20 кристаллам) и протерозойский (1804 ± 15 млн лет по 1 кристаллу) возраст. Установленные типоморфные особенности циркона в значительной мере соответствуют его образованию в условиях гранулитовой фации, отмечается лишь необычный для метаморфического циркона крупный размер, отражающий стабильные химические и термодинамические продолжительные условия кристаллизации. Уровень микропримесей в разновозрастных кристаллах циркона различается и с учетом данных предшественников может быть представлен в следующих значениях: для архейских типичны $\Sigma\text{P3Э}$ 120–2130 г/т, HREE (Lu/Gd) 0,94–6,5, Eu/Eu* 0,24–0,7, Y 183–1562 г/т; позднекарельские характеризуются $\Sigma\text{P3Э}$ 15–46 г/т, HREE (Lu/Gd) 0,1–1,01, Eu/Eu* 0,77–0,85; Y 22–75 г/т. Обобщенные данные свидетельствуют о принадлежности возрастных популяций циркона к архейским гранатовым и мафическим гранулитам, амфибол-биотит-плагиоклазовым гнейсам и позднекарельским гранатовым гранулитам, образующим отдельные блоки или метаморфические зоны в фундаменте, и, соответственно, о сохранности архейских образований под Накынским кимберлитовым полем.

Обнаруженные в кристаллах деформации в виде залеченных микротрещин с учетом исследовательской работы предшественников [26] представляют собой уникальные морфологические признаки внедрения глубинного расплава.

Промышленно алмазоносные кимберлитовые тела Накынского поля (трубки Нюрбинская, Ботубинская и Майская) расположены в пределах архейского стабильного блока — архона, что блестяще подтверждает правило Клиффорда-Дженса.

Присутствие позднекарельских краевых зон на архейских кристаллах циркона из алмазоносных кимберлитов Алакит-Мархинского и Далдынского полей свидетельствует о неравномерном масштабном тектоно-термальном преобразовании фундамента Тюнгского террейна в период 1,8–2,1 млрд лет, вероятно влияющем на продуктивность месторождений.

Наличие наряду с промышленно алмазоносными телами Алакит-Мархинского, Далдынского и Верхне-Мунского полей множества убогалмазоносных кимберлитов и отсутствие месторождений в пределах Хапчанского протона свидетельствуют о том, что архейский фундамент Восточно-Сибирской алмазоносной провинции осложнен протерозойскими поясами, мощность и степень преобразования которых могли повлиять на продуктивность кимберлитовых полей либо месторождений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сарсадских Н. Н. Структурный фактор размещения кимберлитов на Сибирской платформе и прогнозирование коренной алмазности // Прогнозирование и методы поисков месторождений никеля, олова и алмазов в Советской Арктике : материалы конф., Ленинград, 15–17 янв. 1969 г. Л., 1968. С. 72–76.
2. Масайтис В. Л., Михайлов М. В., Селивановская Т. В. Вулканизм и тектоника Патомско-Виллюйского среднепалеозойского авлаогена // Тр. ВСЕГЕИ. Новая сер. Т. 192. М. : Недра, 1975. 181 с.
3. Суворов В. Д. Глубинные сейсмические исследования в Якутской кимберлитовой провинции / отв. ред. С. В. Крылов. Новосибирск : Наука : Сиб. изд. фирма, 1993. 134 с.
4. Горев Н. И. Кимберлитоконтролирующие зоны северо-востока Сибирской платформы // Геология, закономерности размещения, методы прогнозирования и поисков месторождений алмазов : материалы науч.-практ. конф., Мирный, 24–28 марта 1998 г. Мирный : Мирнинская город. тип., 1998. С. 246–248.
5. Горев Н. И. Тектоническое районирование Сибирской платформы при прогнозировании коренных источников алмазов // Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения. Воронеж : Воронеж. гос. ун-т, 2001. С. 462–481.
6. Манаков А. В. Особенности строения литосферы Якутской кимберлитовой провинции. Воронеж : Воронеж. гос. ун-т, 1999. 58 с.
7. Манаков А. В. Технология выделения литосферного корня на основе интегрированного анализа геофизических данных // Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения. Воронеж : Воронеж. гос. ун-т, 2001. С. 270–277.
8. Смелов А. П., Тимофеев В. Ф. Террейновый анализ и геодинамическая модель формирования северо-азиатского кратона в раннем докембрии // Тихоокеанская геология. 2003. Т. 22, № 6. С. 42–54.
9. Изотопно-геохимические и возрастные характеристики раннепротерозойских террейнов, коллизионных зон и связанных с ними анортозитов на северо-востоке Сибирского кратона / О. М. Розен [и др.] // Геология и геофизика. 2000. Т. 41, № 2. С. 163–180.
10. Розен О. М., Манаков А. В., Зинчук Н. Н. Сибирский кратон: формирование, алмазность / науч. ред. С. И. Митюхин. М. : Научный Мир, 2006. 210 с.
11. Clifford T. N. Tectono-metallogenic units and metallogenic provinces of Africa // Earth and Planetary Science Letters. 1966. Vol. 1, no. 6. P. 421–434. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(66\)90039-2](https://doi.org/10.1016/0012-821x(66)90039-2).
12. Janse A. J. A. Is Clifford's Rule still valid? Affirmative examples from around the World // Proc. of the Fifth Intern. Kimberlite Conf. Vol. 2. Diamonds: Characterization, Genesis and Exploration, Araxá, June 1991 / Eds. H. O. A. Meyer, O. Leonardos. Brasília : Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1994. P. 215–235.
13. Janse A. J. A., Sheahan P. A. Catalogue of world wide diamond and kimberlite occurrences: A selective and annotative approach // Journal of Geochemical Exploration. 1995. Vol. 53, nos. 1–3. P. 73–111. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)00017-6](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)00017-6).
14. Божко Н. А. Геотектонические факторы локализации алмазоносных кимберлитов в свете современных данных // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века : материалы регион. науч. конф. «Актуальные проблемы геологической отрасли АК «АЛРОСА» и научно-методическое обеспечение их решений», посвященной 35-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА», Мирный, апрель 2003 г. / отв. ред. Н. Н. Зинчук [и др.]. Воронеж : Воронеж. гос. ун-т, 2003. С. 360–365.
15. Божко Н. А. Тектонические обстановки локализации алмазоносных кимберлитов за пределами архейских кратонов // Руды и металлы. 2006. № 1. С. 31–41.

16. Helmstaedt H. H., Gurney J. J. Geotectonic controls of primary diamond deposits: Implications for area selection // *Journal of Geochemical Exploration*. 1995. Vol. 53, nos. 1–3. P. 125–144. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)00018-7](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)00018-7).
17. Гусев Н. Анабарский щит Сибирского кратона: вещественный состав, геохимия, геохронология. Saarbrücken, Germany : LAMBERT Academic Publishing, 2013. 181 с.
18. Williams I. S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe // *Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes* / Eds. M. A. McKibben, W. C. Shanks III, W. I. Ridley. Vol. 7. Littleton, USA : Society of Economic Geologists, 1998. P. 1–35. <https://doi.org/10.5382/Rev.07.01>.
19. Ludwig K. R. SQUID 1.13a. A User's Manual. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel // *Berkeley Geochronol. Center Spec. Publ. No. 2*. Berkeley, USA : Berkeley Geochronol. Center, 2005. 19 p.
20. 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 / L. P. Black [et al.] // *Chemical Geology*. 2004. Vol. 205, nos. 1–2. P. 115–140. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.01.003>.
21. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analysis / M. Wiedenbeck [et al.] // *Geostandards and Geoanalytical Research*. 1995. Vol. 19, no. 1. P. 1–23. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.1995.tb00147.x>.
22. Hoskin P. W. O. Minor and trace element analysis of natural zircon (ZrSiO_4) by SIMS and laser ablation ICPMS: A consideration and comparison of two broadly competitive techniques // *J. Trace Microprobe Tech.* 1998. Vol. 16, no. 3. P. 301–326.
23. Further characterisation of the 91500 zircon crystal / M. Wiedenbeck [et al.] // *Geostandards and Geoanalytical Research*. 2004. Vol. 28, no. 1. P. 9–39. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2004.tb01041.x>.
24. Zircon M257 — a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U–Pb analysis of zircon / L. Nasdala [et al.] // *Geostandards and Geoanalytical Research*. 2008. Vol. 32, no. 3. P. 247–265. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2008.00914.x>.
25. Isotope-dilution anchoring of zircon reference materials for accurate Ti-in-zircon thermometry / D. Szymanowski [et al.] // *Chemical Geology*. 2018. Vol. 481. P. 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.02.001>.
26. Recurrent magmatic activity on a lithosphere-scale structure: Crystallization and deformation in kimberlitic zircons / I. G. Tretiakova [et al.] // *Gondwana Research*. 2017. Vol. 42. P. 126–132. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.10.006>.
27. Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U–Pb ages and metamorphism // *Chemical Geology*. 2002. Vol. 184, nos. 1–2. P. 123–138. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(01\)00355-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(01)00355-2).
28. Watson E. B., Wark D. A., Thomas J. B. Crystallization thermometers for zircon and rutile // *Contrib Mineral Petrol.* 2006. Vol. 151. P. 413–433. <https://doi.org/10.1007/s00410-006-0068-5>.
29. Palme H., O'Neill H. St. C. 2.01 — cosmochemical estimates of mantle composition // *Treatise on Geochemistry*. 2007. Vol. 2. P. 1–38. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/02177-0>.
30. Smelov A. P., Timofeev V. F. The age of the North Asian Cratonic basement: An overview // *Gondwana Research*. 2007. Vol. 12, no. 3. P. 279–288. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.10.017>.
31. Общая структура фундамента восточной части кратона / А. П. Смелов [и др.] // *Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия)* / отв. ред. Л. М. Парфенов, М. И. Кузьмин. М. : МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 108–112.
32. Trace element and age characteristics of zircons in granulite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe, Siberia / M. Koreschkova [et al.] // *Precambrian Research*. 2009. Vol. 168, nos. 3–4. P. 197–212. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.09.007>.
33. Владыкин Н. В., Лепехина Е. А. Возраст необычных ксеногенных цирконов из кимберлитов Якутии // *Доклады Академии наук*. 2009. Т. 429, № 6. С. 774–778.
34. Zircon from kimberlites of the Nyurbinskaya pipe as indicator of kimberlite emplacement and lithosphere evolution / Z. V. Spetsius [et al.] // *Mineralogical Magazine*. 2011. Vol. 75, no. 3. P. 1922.
35. Tectonothermal evolution of the continental crust beneath the Yakutian diamondiferous province (Siberian craton): U-Pb and Hf isotopic evidence on zircons from crustal xenoliths of kimberlite pipes / V. S. Shatsky [et al.] // *Precambrian Research*. 2016. Vol. 282. P. 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.06.022>.
36. Multi-stage modification of Paleoproterozoic crust beneath the Anabar tectonic province (Siberian craton) / V. S. Shatsky [et al.] // *Precambrian Research*. 2018. Vol. 305. P. 125–144. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.11.017>.
37. The crust-mantle evolution of the Anabar tectonic province in the Siberian Craton: Coupled or decoupled? / V. S. Shatsky [et al.] // *Precambrian Research*. 2019. Vol. 332. P. 105388. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105388>.
38. Koreschkova M., Downes H. The age of the lower crust of the central part of the Columbia supercontinent: A review of zircon data // *Gondwana Research*. 2021. Vol. 96. P. 37–55. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.02.024>.
39. Особенности строения и эволюции нижних частей континентальной коры Якутской алмазонасной провинции в районе Верхне-Мунского кимберлитового поля / В. С. Шацкий [и др.] // *Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле*. 2023. Т. 508, № 2. С. 173–184. <https://doi.org/10.31857/S2686739722602393>.

REFERENCES

1. Sarsadskikh N. N. Structural factor of kimberlite distribution on the Siberian Platform and forecasting of primary diamond potential. *Prediction and prospecting methods for nickel, tin, and diamond deposits in the Soviet Arctic: Proc.*, Leningrad, 15–17 Jan. 1969. Leningrad; 1968. P. 72–76. (In Russ.).
2. Masaitis V. L., Mikhailov M. B., Selivanovskaya T. V. Volcanism and tectonics of the Mid-Paleozoic Patom-Vilyuy aulacogen. *VSEGEI Proc. N. S.* Vol. 192. Moscow: Nedra; 1975. 181 p. (In Russ.).
3. Suvorov V. D. Deep seismic studies in the Yakutian kimberlite province / Publ. Ed. S. V. Krylov. Novosibirsk: Nauka: Siberian Publ. Co.; 1993. 134 p. (In Russ.).
4. Gorev N. I. Kimberlite-controlling zones of the North-East Siberian platform. *Geology, distribution patterns, methods of forecasting and prospecting for diamond deposits: Proc. of the Sci. Conf.*, Mirny, 24–28 March 1998. Mirny: Mirny State Printing House; 1998. P. 246–248. (In Russ.).
5. Gorev N. I. Tectonic zonation of the cover of the Siberian platform during forecasting primary sources of diamonds. *Problems of diamond geology and some ways of their solution*. Voronezh: Voronezh State Univ.; 2001. P. 462–481. (In Russ.).
6. Manakov A. V. Structural features of the lithosphere in the Yakutian kimberlite province. Voronezh: Voronezh State Univ.; 1999. 58 p. (In Russ.).
7. Manakov A. V. The technique of lithosphere root detection on the base of integrated geophysical data. *Problems of diamond geology and some ways of their solution*. Voronezh: Voronezh State Univ.; 2001. P. 270–277. (In Russ.).
8. Smelov A. P., Timofeev V. F. Terrane analysis and the geodynamic model of the formation of the North Asian craton in the Early Precambrian. *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2003; 22 (6): 42–54. (In Russ.).
9. Early Proterozoic terranes, collision zones, and associated anorthosites in the northeast of the Siberian craton: Isotope geochemistry and age characteristics / O. M. Rozen [et al.]. *Russian Geology and Geophysics*. 2000; 41 (2): 159–178. (In Russ.).
10. Rozen O. M., Manakov A. V., Zinchuk N. N. Siberian craton: Origin and the diamond control / Sci. Ed. S. I. Mityukhin. Moscow: Sci. World; 2006. 210 p. (In Russ.).

11. Clifford T. N. Tectono–metallogenic units and metallogenic provinces of Africa. *Earth and Planetary Science Letters*. 1966; 1 (6): 421–434. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(66\)90039-2](https://doi.org/10.1016/0012-821x(66)90039-2).
12. Janse A. J. A. Is Clifford's Rule still valid? Affirmative examples from around the World. *Proc. of the Fifth Intern. Kimberlite Conf. Vol. 2. Diamonds: Characterization, Genesis and Exploration*, Araxá, June 1991 / Eds. H. O. A. Meyer, O. Leonardos. Brasília: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais; 1994. P. 215–235.
13. Janse A. J. A., Sheahan P. A. Catalogue of world wide diamond and kimberlite occurrences: A selective and annotative approach. *Journal of Geochemical Exploration*. 1995; 53 (1–3): 73–111. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)00017-6](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)00017-6).
14. Bozhko N. A. Modern data on geotectonic factors of diamondiferous kimberlite localization. *Problems of Forecasting, Prospecting, and Studying Mineral Deposits at the Threshold of the XXI Century: Proc. of the Reg. Sci. Conf. "Current Problems of ALROSA's Geological Industry, and Scientific and Methodological Provisions of Their Solutions"*, Mirny, Apr. 2003 / Publ. Ed. N. N. Zinchuk [et al.]. Voronezh: Voronezh State Univ.; 2003. P. 360–365. (In Russ.).
15. Bozhko N. A. Tectonic settings of diamondiferous kimberlite localization beyond Archean cratons. *Ores and Metals*. 2006; (1): 31–41. (In Russ.).
16. Helmstaedt H. H., Gurney J. J. Geotectonic controls of primary diamond deposits: Implications for area selection. *Journal of Geochemical Exploration*. 1995; 53 (1–3): 125–144. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)00018-7](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)00018-7).
17. Gusev N. The Anabar Shield of the Siberian Craton: Composition, geochemistry, geochronology. Saarbrücken: LAMBERT Academic Publishing; 2013. 181 p. (In Russ.).
18. Williams I. S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. *Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes* / Eds. M. A. McKibben, W. C. Shanks III, W. I. Ridley. Vol. 7. Littleton, USA: Society of Economic Geologists; 1998. P. 1–35. <https://doi.org/10.5382/Rev.07.01>.
19. Ludwig K. R. SQUID 1.13a. A User's Manual. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronol. Center Spec. Publ.* Berkeley, USA: Berkeley Geochronol. Center; 2005. 19 p.
20. 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 / L. P. Black [et al.]. *Chemical Geology*. 2004; 205 (1–2): 115–140. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.01.003>.
21. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analysis / M. Wiedenbeck [et al.]. *Geostandards and Geoanalytical Research*. 1995; 19 (1): 1–23. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.1995.tb00147.x>.
22. Hoskin P. W. O. Minor and trace element analysis of natural zircon (ZrSiO_4) by SIMS and laser ablation ICP-MS: A consideration and comparison of two broadly competitive techniques. *J. Trace Microprobe Tech.* 1998; 16 (3): 301–326.
23. Further characterisation of the 91500 zircon crystal / M. Wiedenbeck [et al.]. *Geostandards and Geoanalytical Research*. 2004; 28 (1): 9–39. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2004.tb01041.x>.
24. Zircon M257 — a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon / L. Nasdala [et al.]. *Geostandards and Geoanalytical Research*. 2008; 32 (3): 247–265. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X-2008.00914.x>.
25. Isotope-dilution anchoring of zircon reference materials for accurate Ti-in-zircon thermometry / D. Szymanowski [et al.]. *Chemical Geology*. 2018; 481: 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.02.001>.
26. Recurrent magmatic activity on a lithosphere-scale structure: Crystallization and deformation in kimberlitic zircons / I. G. Tretiakova [et al.]. *Gondwana Research*. 2017; 42: 126–132. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.10.006>.
27. Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U–Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*. 2002; 184 (1–2): 123–138. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(01\)00355-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(01)00355-2).
28. Watson E. B., Wark D. A., Thomas J. B. Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contrib Mineral Petrol.* 2006; 151: 413–433. <https://doi.org/10.1007/s00410-006-0068-5>.
29. Palme H., O'Neill H. St. C. 2.01 — cosmochemical estimates of mantle composition. *Treatise on Geochemistry*. 2007; 2: 1–38. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/02177-0>.
30. Smelov A. P., Timofeev V. F. The age of the North Asian Cratonic basement: An overview. *Gondwana Research*. 2007; 12 (3): 279–288. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.10.017>.
31. General foundation of the eastern part of the craton / A. P. Smelov [et al.]. *Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Sakha Republic (Yakutia)* / Publ. Eds. L. M. Parfenov, M. I. Kuzmin. Moscow: MAIK "Nauka/Interperiodica"; 2001, P. 108–112. (In Russ.).
32. Trace element and age characteristics of zircons in granulite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe, Siberia / M. Koreschkova [et al.]. *Precambrian Research*. 2009; 168 (3–4): 197–212. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.09.007>.
33. Vladykin N. V., Lepekhina E. A. The age of unusual xenogenic zircons from Yakutian kimberlites. *Dokl. Earth Sc.* 2009; 429: 1451–1456. <https://doi.org/10.1134/S1028334X09090098>. (In Russ.).
34. Zircon from kimberlites of the Nyurbinskaya pipe as indicator of kimberlite emplacement and lithosphere evolution / Z. V. Spetsius [et al.]. *Mineralogical Magazine*. 2011; 75 (3): 1922.
35. Tectonothermal evolution of the continental crust beneath the Yakutian diamondiferous province (Siberian craton): U-Pb and Hf isotopic evidence on zircons from crustal xenoliths of kimberlite pipes / V. S. Shatsky [et al.]. *Precambrian Research*. 2016; 282: 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.06.022>.
36. Multi-stage modification of Paleoarchean crust beneath the Anabar tectonic province (Siberian craton) / V. S. Shatsky [et al.]. *Precambrian Research*. 2018; 305: 125–144. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.11.017>.
37. The crust-mantle evolution of the Anabar tectonic province in the Siberian Craton: Coupled or decoupled? / V. S. Shatsky [et al.]. *Precambrian Research*. 2019; 332: 105388. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105388>.
38. Koreschkova M., Downes H. The age of the lower crust of the central part of the Columbia supercontinent: A review of zircon data. *Gondwana Research*. 2021; 96: 37–55. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.02.024>.
39. Features of the structure and evolution of the lower parts of the continental crust of the Yakutian diamondiferous province in the area of the Upper-Muna kimberlite field / V. S. Shatsky [et al.]. *Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle*. 2023; 508 (2): 173–184. <https://doi.org/10.31857/S2686739722602393>. (In Russ.).

Голобурдина Марина Николаевна

Ведущий геолог

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

<https://orcid.org/0009-0007-3390-1955>

SPIN-код РИНЦ 1900-6624

Marina_Goloburdina@karpinskyinstitute.ru

Marina N. Goloburdina

Leading Geologist

All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky, Saint Petersburg, Russia

<https://orcid.org/0009-0007-3390-1955>

RSCI SPIN-code 1900-6624

Marina_Goloburdina@karpinskyinstitute.ru

Граханов Сергей Александрович

¹Доктор геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник, ²главный геолог

¹Всероссийский научно-исследовательский геологический
институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия;
²АЛМАР — алмазы Арктики, Якутск, Россия

<https://orcid.org/0009-0009-5327-309X>
SPIN-код РИНЦ 5254-5010

¹Sergey_Grakhnov@karpinskyinstitute.ru; ²s.grakhnov@yandex.ru

Дак Алексей Иванович

Кандидат геолого-минералогических наук,
руководитель направления группы поисковой минералогии
Экспертно-геологического центра Вилуйской
геологоразведочной экспедиции

Акционерная компания «АЛРОСА», Мирный, Россия

AuthorID РИНЦ 307879
DakAI@alrosa.ru

Зубова Татьяна Николаевна

Заместитель генерального директора
по геологоразведочным работам

Всероссийский научно-исследовательский геологический
институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

<https://orcid.org/0009-0004-2188-4017>
SPIN-код РИНЦ 7260-4280
Tatiana_Zubova@karpinskyinstitute.ru

Мальковец Владимир Григорьевич

¹Кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник Научно-геологического
центра Вилуйской геологоразведочной экспедиции,
²старший научный сотрудник

¹Акционерная компания «АЛРОСА», Мирный, Россия;
²Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, Россия

<https://orcid.org/0000-0002-2966-8579>
Scopus Author ID 6505902107
ResearcherID E-5222-2011
SPIN-код РИНЦ 5426-4826

¹MalkovetsVG@alrosa.ru; ²Vladimir.malkovets@igm.nsc.ru

Проскурнин Василий Федорович

Доктор геолого-минералогических наук,
заведующий отделом региональной геологии
и полезных ископаемых Севера Сибири

Всероссийский научно-исследовательский геологический
институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

<https://orcid.org/0000-0002-6424-0068>
Scopus Author ID 24071443100
SPIN-код РИНЦ 9643-9569
AuthorID РИНЦ 125966
Vasily_Proskurnin@karpinskyinstitute.ru

Sergey A. Grakhnov

¹DSc (Geology and Mineralogy), Chief Researcher
²Chief Geologist

¹All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky,
Saint Petersburg, Russia;
²ALMAR — diamonds of the Arctic, Yakutsk, Russia

<https://orcid.org/0009-0009-5327-309X>
RSCI SPIN-code 5254-5010

¹Sergey_Grakhnov@karpinskyinstitute.ru; ²s.grakhnov@yandex.ru

Aleksey I. Dak

PhD (Geology and Mineralogy),
Exploration Mineralogy Group Leader
Vilyuy Geological Exploration Expedition

ALROSA, Mirny, Russia

RSCI AuthorID 307879
DakAI@alrosa.ru

Tatiana N. Zubova

Deputy Director General
in geological exploration

All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky,
Saint Petersburg, Russia

<https://orcid.org/0009-0004-2188-4017>
RSCI SPIN-code 7260-4280
Tatiana_Zubova@karpinskyinstitute.ru

Vladimir G. Malkovets

¹PhD, Leading Researcher
Geological Research Center,
Vilyuy Geological Exploration Expedition,
²Senior Researcher

¹ALROSA, Mirny, Russia;
²V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia

<https://orcid.org/0000-0002-2966-8579>
Scopus Author ID 6505902107
ResearcherID E-5222-2011
RSCI SPIN-code 5426-4826

¹MalkovetsVG@alrosa.ru; ²Vladimir.malkovets@igm.nsc.ru

Vasily F. Proskurnin

DSc (Geology and Mineralogy),
Head, Department of Regional Geology and Mineral Resources
of the North of Siberia

All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky,
Saint Petersburg, Russia

<https://orcid.org/0000-0002-6424-0068>
Scopus Author ID 24071443100
RSCI SPIN-code 9643-9569
RSCI AuthorID 125966
Vasily_Proskurnin@karpinskyinstitute.ru

Тарасов Алексей Всеволодович

Кандидат геолого-минералогических наук,
заместитель начальника Управления геологических основ,
науки и информатики

Федеральное агентство по недропользованию, Москва, Россия

<https://orcid.org/0009-0002-1826-0655>
atarasov@rosnedra.gov.ru

Aleksey V. Tarasov

PhD (Geology and Mineralogy),
Deputy Head, Department of Geological Foundations,
Science, and Informatics

Federal Subsoil Resources Management Agency, Moscow, Russia

<https://orcid.org/0009-0002-1826-0655>
atarasov@rosnedra.gov.ru

Авторское выражение благодарности: авторы выражают благодарность специалистам Центра изотопных исследований ФГБУ «Институт Карпинского» за подготовку пробы к измерениям и Н. В. Родионову за помощь в получении экспериментальных данных.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to the specialists of the Centre of Isotopic Research at Karpinsky Institute for preparing the sample to be measured and N. V. Rodionov for assistance in obtaining experimental data.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 27.11.2024
Одобрена после рецензирования 10.04.2025
Принята к публикации 20.06.2025

Submitted 27.11.2024
Approved after reviewing 10.04.2025
Accepted for publication 20.06.2025