

**DETRITAL ZIRCONS FROM THE PRECAMBRIAN OF THE IGARKA UPLIFT  
(NORTHWESTERN SIBERIAN PLATFORM)****B.B. Kochnev** <sup>1,2</sup>✉, **D.V. Semenova** <sup>3</sup>, **V.B. Khubanov** <sup>4</sup>, **M.K. Danukalova** <sup>2</sup>,  
**V.V. Marusin** <sup>1,5</sup>, **A.K. Khudoley** <sup>6</sup>

<sup>1</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

<sup>2</sup>Geological Institute, Russian Academy of Sciences, 7-1 Pyzhevsky Ln, Moscow 119017, Russia

<sup>3</sup>Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

<sup>4</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia

<sup>5</sup>Novosibirsk State University, 1 Pirogov St, Novosibirsk 630090, Russia

<sup>6</sup>Saint Petersburg University, 7-9 Universitetskaya Emb, Saint Petersburg 199034, Russia

**ABSTRACT.** Herein we report the results of LA-ICP-MS dating of detrital zircons from eight stratigraphic levels of the Proterozoic section of the Igarka uplift (northwestern Siberian Platform). The age spectra include the Meso- and Neoproterozoic (3100–2600 Ma), Paleoproterozoic (2100–1700 Ma) and Neoproterozoic (1000–600 Ma) ages. However, the age distribution drastically varies among the samples. The Neoproterozoic zircons, associated with the hypothetical orogenic belt at the platform periphery, dominate in the lowstand system-tract continental and marginal marine strata (Gubinskaya, basal Chernaya Rechka, and Izluchina formations). In contrast, the zircons in the Riphean and Vendian marine strata (Bezemyanny, Ludy, Korablik, and Sukharikha formations) mostly originate from erosion of the crystalline basement of the Siberian Platform. The concordant mafic bodies in the Upper Riphean (Criogenian) Gubinskaya formation contain the concordant cluster of zircons of 835±4 Ma. It contradicts with the maximum deposition age of 716±10 Ma of the host strata, hence the zircons in the mafic bodies supposedly comprise xenocrysts.

**KEYWORDS:** Vendian; Ediacaran; Riphean; Neoproterozoic; LA-ICP-MS detrital zircon geochronology; Igarka uplift; Siberian Platform

**FUNDING:** Conceptualization, manuscript preparation and geochronological study of three samples were supported by Russian Science Foundation, grant 22-77-10096. The content of the work corresponds to research project FWZZ-2022-0002.



EDN: FSAXAO

**RESEARCH ARTICLE****Correspondence:** Boris B. Kochnev, [kochnevbb@ipgg.sbras.ru](mailto:kochnevbb@ipgg.sbras.ru)

Received: September 27, 2024

Revised: January 10, 2025

Accepted: January 13, 2025

**FOR CITATION:** Kochnev B.B., Semenova D.V., Khubanov V.B., Danukalova M.K., Marusin V.V., Khudoley A.K., 2025. Detrital Zircons from the Precambrian of the Igarka Uplift (Northwestern Siberian Platform). *Geodynamics & Tectonophysics* 16 (1), 0808. doi:10.5800/GT-2025-16-1-0808

**Supplementary files:** [Kochnev\\_et\\_al\\_2025\\_Suppl-1.pdf](#); [Kochnev\\_et\\_al\\_2025\\_Suppl-2.xlsx](#)

## ОБЛОМОЧНЫЕ ЦИРКОНЫ В ДОКЕМБРИЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЯХ ИГАРСКОГО ПОДНЯТИЯ (СЕВЕРО-ЗАПАД СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ)

Б.Б. Кочнев<sup>1,2</sup>, Д.В. Семенова<sup>3</sup>, В.Б. Хубанов<sup>4</sup>, М.К. Данукалова<sup>2</sup>, В.В. Марусин<sup>1,5</sup>, А.К. Худолей<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

<sup>2</sup> Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 1, Россия

<sup>3</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

<sup>4</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия

<sup>5</sup> Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

<sup>6</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, наб. Университетская, 7-9, Россия

**АННОТАЦИЯ.** Для докембрийских обломочных пород Игарского поднятия (северо-запад Сибирской платформы) методом LA-ICP-MS геохронологически изучены зерна обломочного циркона с восьми стратиграфических уровней неопротерозоя (верхний рифей и венд). В возрастных спектрах присутствуют мезо- и неоархейские (3100–2600 млн лет), палеопротерозойские (2100–1700 млн лет) и неопротерозойские (1000–600 млн лет) датировки, однако их распределение коренным образом отличается от образца к образцу. Зерна циркона с неопротерозойскими датировками, связанные с источником сноса в гипотетическом орогене во внешнем обрамлении Сибирского кратона, преобладают в отложениях континентального и переходного генезиса, которые формировались при низком стоянии уровня моря (губинская свита, базальные слои чернореченской, излучинская свита). В то же время в отложениях различного возраста, сформированных в морских обстановках (безымянская, лудовская, корабликовская и сухарихинская свиты), доминируют зерна циркона, связанные с продуктами эрозии кристаллического фундамента Сибирского кратона. В телах базитов, согласно залегающих в губинской свите верхнего рифея (криогений), продатированы зерна циркона, образующие конкордантный кластер с возрастом  $835 \pm 4$  млн лет, что противоречит максимальному возрасту осадконакопления вмещающих песчаников  $716 \pm 10$  млн лет и, предположительно, связано с захватом цирконов из более древнего магматического источника неясной природы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** венд; эдиакарий; рифей; неопротерозой; LA-ICP-MS геохронология обломочного циркона; Игарское поднятие; Сибирская платформа

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Обобщение данных, подготовка рукописи и геохронологические исследования зерен обломочного циркона из трех образцов проведены при поддержке РФФ, грант № 22-77-10096. Содержание работы соответствует тематике проекта НИР FWZZ-2022-0002.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение обломочных цирконов является одним из ведущих инструментов реконструкции тектонического развития питающих провинций, особенностей палеотранспорта и определения максимального возраста осадконакопления для терригенных толщ. Особое значение оно имеет для докембрия, где проблема корректного датирования тех или иных толщ наиболее актуальна. Для Сибирского кратона такие исследования позволили не только уточнить возраст различных осадочных последовательностей верхнего докембрия, но и дать новую информацию о строении и этапах формирования раннедокембрийского фундамента, распознать различные геологические процессы в непосредственном обрамлении кратона и предложить механизмы и пути переноса обломочного материала [Khudoley et al., 2015; Powerman et al., 2015; Priyatina et al., 2016, 2018; Marusin et al., 2021; Gladkochub et al., 2019, 2022; Romanov et al., 2020; и др.].

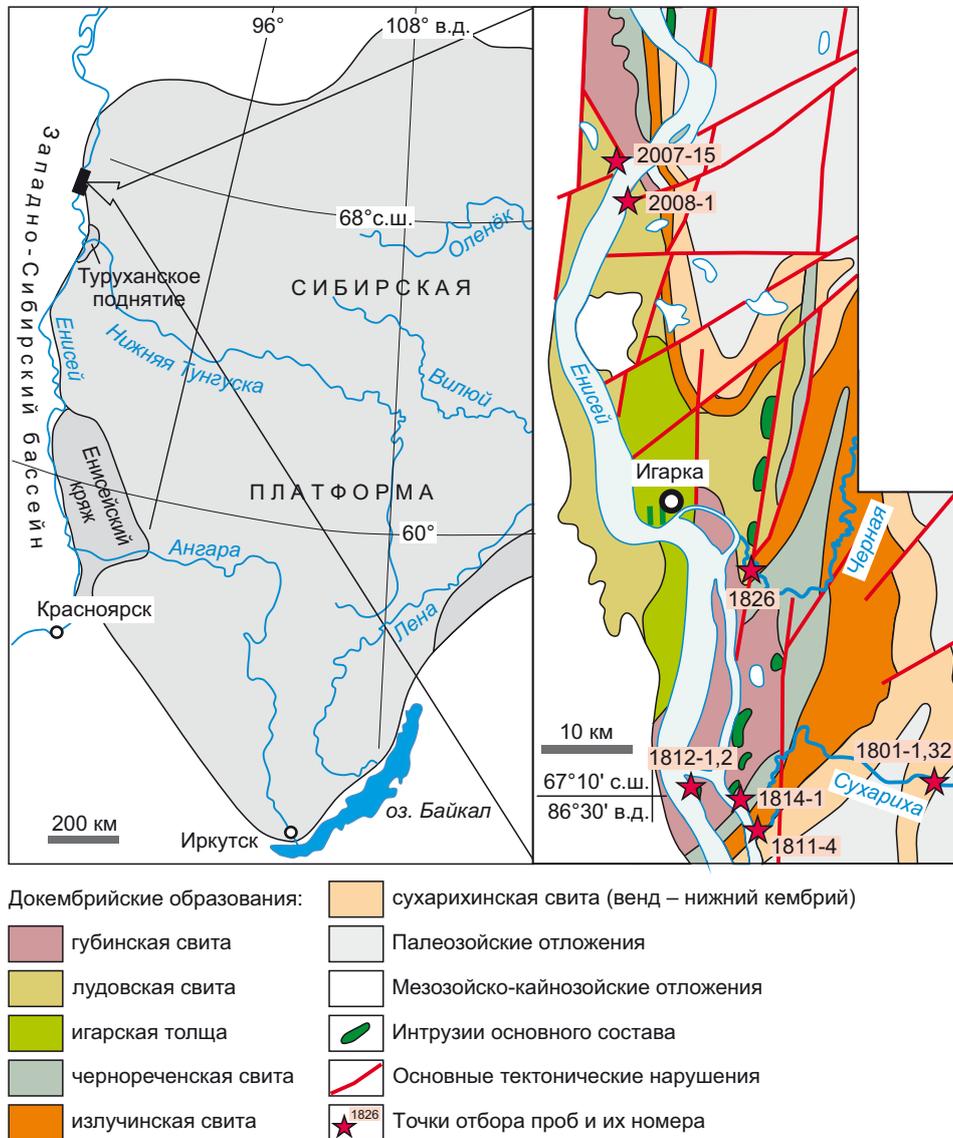
Докембрийские отложения Игарского поднятия, расположенного на северо-западной окраине Сибирской платформы, за исключением пограничных толщ докембрия и кембрия, длительное время оставались слабоизученными современными геохимическими, изотопными и геохронологическими методами. Отчасти этот пробел восполнен нами в последние годы [Kochnev et al., 2022, 2023; Marusin et al., 2022, 2023]. Для целей настоящей работы полученные нами данные о возрасте обломочных цирконов в осадочных породах с трех стратиграфических уровней [Kochnev et al., 2022] были дополнены результатами еще по пяти образцам из песчаников и по одному образцу из магматических пород. Это позволило расширить представления о возможных источниках сноса для осадочных толщ докембрия Игарского поднятия, выявить взаимосвязь возрастных спектров обломочных цирконов и обстановок осадконакопления, а также уточнить геодинамическую интерпретацию полученных ранее данных.

**2. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И СТРАТИГРАФИЯ**

Игарское поднятие представляет собой крупную положительную структуру на северо-западной окраине Сибирского кратона, вытянутую в меридиональном направлении (рис. 1). В пределах поднятия обнажены позднекембрийские осадочные и вулканогенно-осадочные породы, которые к востоку постепенно погружаются под палеозойский осадочный чехол платформы. К западу они перекрыты мезозойскими отложениями Западно-Сибирской плиты, однако по материалам бурения прослежены на широте г. Игарка как минимум на 80 км на запад [State Geological Map..., 2018]. Как докембрийские, так и палеозойские толщи в регионе интенсивно деформированы, что в сочетании со слабой обнаженностью значительно затрудняет реконструкцию истории геологического развития, хотя отчасти это восполнено данными колонкового и глубокого бу-

рения [Kozlov et al., 1992a, 1992b; Geological Map ..., 1984; State Geological Map..., 2018]. При малом количестве прямых данных о возрасте толщ эти обстоятельства привели к формированию достаточно широкого спектра взглядов на стратиграфию докембрия Игарского поднятия (см. обзор в [Mel'nikov et al., 2005]). Тем не менее на основе комплекса биостратиграфических, геохимических, изотопных и геохронологических данных, полученных нами в последние годы, последовательность формирования докембрийских отложений этого района была существенно уточнена [Kochnev et al., 2022, 2023; Marusin et al., 2023].

При характеристике разреза принята схема стратификации, отраженная в легенде государственных геологических карт [Geological Map..., 1984; State Geological Map..., 2001, 2018]. Согласно ей, к докембрию на Игарском поднятии отнесены медвежьинская, лудовская,



**Рис. 1.** Обзорная карта Сибирской платформы и схема геологического строения Игарского поднятия по материалам [State Geological Map..., 2018].

**Fig. 1.** Overview map of the Siberian Platform and geological scheme of the Igarka uplift by [State Geological Map..., 2018].

губинская, корабликовская, чернореченская, излучинская и сухарихинская свиты (толщи), а также игарская толща или одноименный вулканический комплекс. Верхняя часть сухарихинской свиты относится уже к томмотскому ярусу кембрия Общей стратиграфической шкалы (рис. 2).

Медвежьинская свита сложена желтовато-серыми окремненными, иногда брекчированными доломитами и обнажена в отдельных блоках видимой мощностью до 70 м. По материалам бурения мощность медвежьинской свиты достигает 1300 м [Kozlov et al., 1992a]. Геохимические и изотопные характеристики медвежьинских доломитов, а также вероятные условия их формирования в шельфовых обстановках пассивной окраины сходны с верхнерифейскими (мезо-неопротерозойскими) карбонатными толщами Туруханского поднятия, расположенными в 200 км к югу [Kochnev et al., 2022]. Основание свиты не вскрыто, перекрыта она чернореченской свитой. По всей видимости, к этому же или близкому стратиграфическому уровню, судя по степени метаморфизма, отнесена обнажающаяся в нижнем течении р. Черной толща серых кварцитовидных песчаников с включениями пирита видимой мощностью более 15 м, которая по литологическим особенностям идентична безымянской (стрельногорской) свите Туруханского поднятия [Kozlov et al., 1992b].

Лудовская свита, связанная постепенным переходом с губинской [Mel'nikov et al., 2005], представлена преимущественно глинистыми филлитизированными сланцами зеленовато-серой окраски с редкими горизонтами глинистых известняков и песчаников общей мощностью до 500 м. Состав пород, тонкая и градационная слоистость и текстуры оползания осадка указывают на накопление лудовской свиты в обстановках дистального шельфа [Kochnev et al., 2022].

Губинская свита, мощностью до 800 м в нижней части, сложена красноцветными, часто косослоистыми олигомиктовыми песчаниками, которые в верхней части сменяются темно-красными глинистыми сланцами, обогащенными гематитом. Свита формировалась, вероятно, в условиях аллювиальных русел и дельтовых равнин [Kochnev et al., 2022]. В поле распространения губинской свиты в типовых разрезах по р. Енисею описаны силлы, дайки и покровы метадолеритов мощностью до 40–50 м [Kozlov et al., 1992b]. Позднерифейский (криогений) возраст свиты обоснован датировками по зернам обломочного циркона [Kochnev et al., 2022].

Игарская толща, которая рассматривается как латеральный аналог лудовской и губинской свит [Mel'nikov et al., 2005; State Geological Map..., 2018], сложена зеленокаменно-измененными туфами, лавами, туфо- и лавобрекчиями преимущественно основного состава, прорванными дайками долеритов. Мощность игарской толщи, сформированной в наземных и субаквальных обстановках, составляет свыше 1200 м. Согласно петрохимическим и геохронологическим данным, и

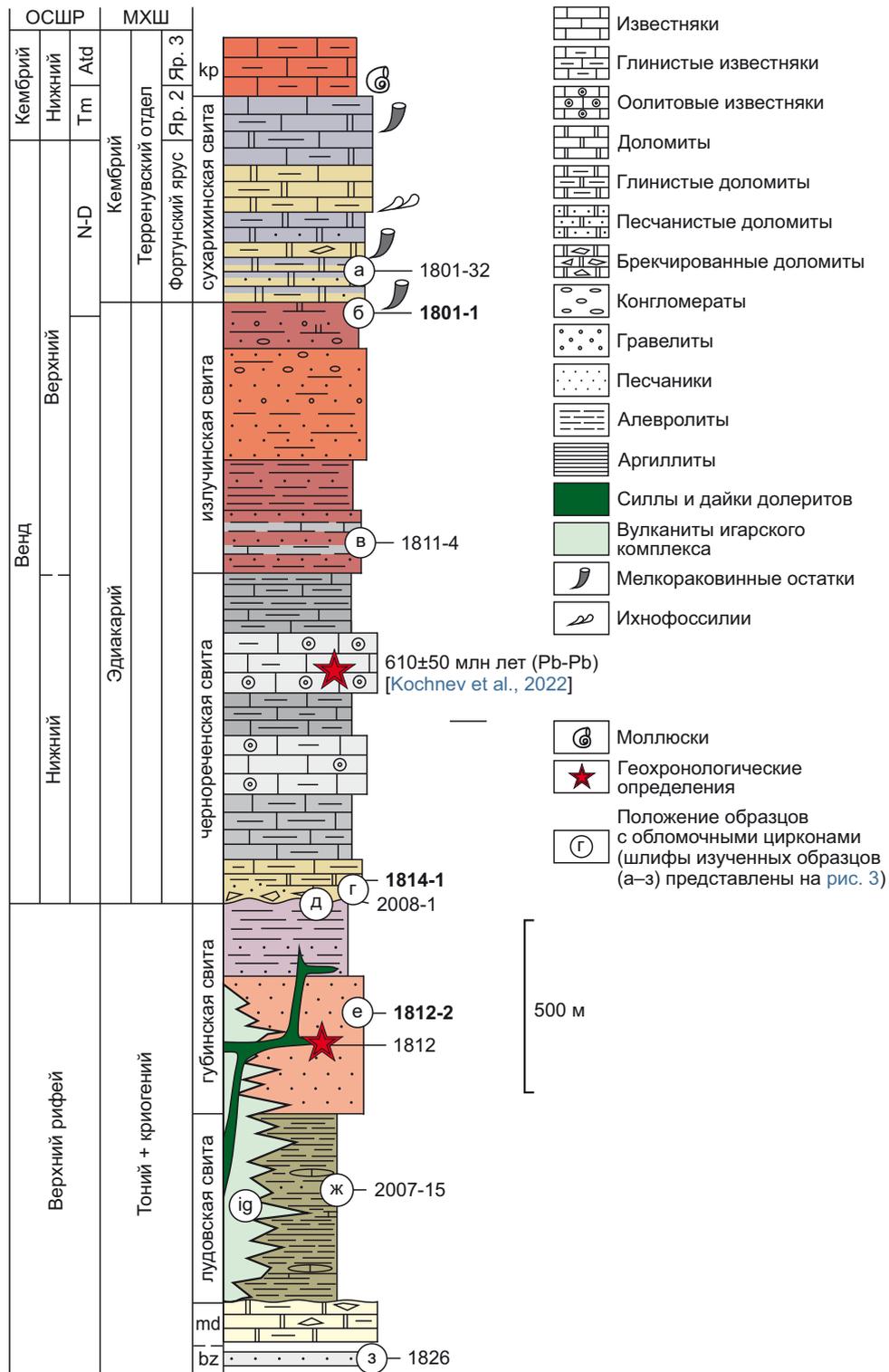
вулканыты игарской толщи, и долериты в губинской свите связаны с внутриплитным рифтогенезом, возраст которого не древнее 715 млн лет [Kochnev et al., 2022].

Корабликовская толща (свита), описанная в единственном выходе на р. Енисее выше о. Плахинский, представлена желтоватыми ожелезненными песчанистыми и кремнистыми доломитами видимой мощностью до 10–15 м. На основании сходства состава одни авторы сопоставляют ее с медвежьинской свитой [Geological Map..., 1984; Kozlov et al., 1992a], тогда как другие выделяют в самостоятельное подразделение, залегающее под лудовской свитой [Mel'nikov et al., 2005; State Geological Map..., 2018]. Изучение типового разреза показало, что структурные и возрастные соотношения между лудовской и корабликовской свитами неоднозначны, а по своим геохимическим и изотопным характеристикам корабликовские доломиты сходны с породами, слагающими базальные слои чернореченской свиты [Kochnev et al., 2022], в связи с чем в используемой стратиграфической схеме корабликовская свита как отдельное подразделение не выделяется.

Чернореченская свита, мощностью до 900 м, залегает под излучинской с постепенным переходом, тогда как нижняя граница свиты является поверхностью регионального перерыва [Geological Map..., 1984; Kozlov et al., 1992a; Kochnev et al., 2022]. В составе чернореченской свиты преобладают сероцветные глинистые, реже – песчаные известняки, которые формировались в различных частях протяженного карбонатного рампа. Ранневендский (раннеэдиакарский) возраст свиты обоснован изотопно-геохимическими и геохронологическими данными [Kochnev et al., 2022, 2023].

Излучинская свита, мощностью до 1100 м, связана с сухарихинской постепенным переходом. В разрезе излучинской свиты преобладают красноцветные, зачастую косослоистые терригенные породы, сформированные в русловых (дельтовых и аллювиальных) обстановках [Sovetov, 2018; Kochnev et al., 2022]. Верхняя, преимущественно грубообломочная, часть свиты, содержащая в кровле прослой глинистых доломитов, некоторыми исследователями была выделена как гравийская свита [Kozlov et al., 1992b; State Geological Map..., 2018], в основании которой ими предполагался локальный размыв. Поздневендский (позднеэдиакарско-раннекембрийский согласно Международной шкале) возраст свиты обоснован положением в разрезе и находками мелкокоралловидных остатков в ее верхней части [Marusin et al., 2023].

Сухарихинская свита, мощностью 570 м, представлена в различной степени глинистыми и доломитизированными известняками с подчиненными прослоями песчаников. Свита была сформирована в пределах протяженного карбонатного рампа [Rowland et al., 1998]. Поздневендско-раннекембрийский возраст свиты обоснован комплексом био- и хемотратиграфических данных [Rowland et al., 1998; Kouchinsky et al., 2007; Marusin et al., 2022, 2023].



**Рис. 2.** Сводная литологическая колонка докембрийских отложений Игарского поднятия (по [Kochnev et al., 2022], с дополнениями).

Цвета в колонке приближены к естественной окраске пород. Полуужирным шрифтом – положение образцов по [Kochnev et al., 2022]. ОСШР – Общая стратиграфическая шкала России, МХШ – Международная хроностратиграфическая шкала, Тм – томмотский ярус, Аtd – атдабанский ярус, N-D – немакит-далдынский регионарус, кр – краснопорожская свита, иг – игарская толща, md – медвежьинская свита, bz – безымянская свита.

**Fig. 2.** Composite stratigraphy of the Precambrian sequence of Igarka uplift (by [Kochnev et al., 2022] with additions). Colors in the column resemble natural rocks coloration. Bold font – sample position by [Kochnev et al., 2022]. ОСШР – General Stratigraphic Scale of Russia, МХШ – International Chronostratigraphic Chart, Тm – Tommotian stage, Atd – Atdabanian stage, N-D – Nemakit-Dalfynian regional stage, кр – Krasny Porog formation, иг – Igarka member, md – Medvezhy formation, bz – Bezimyanny formation.

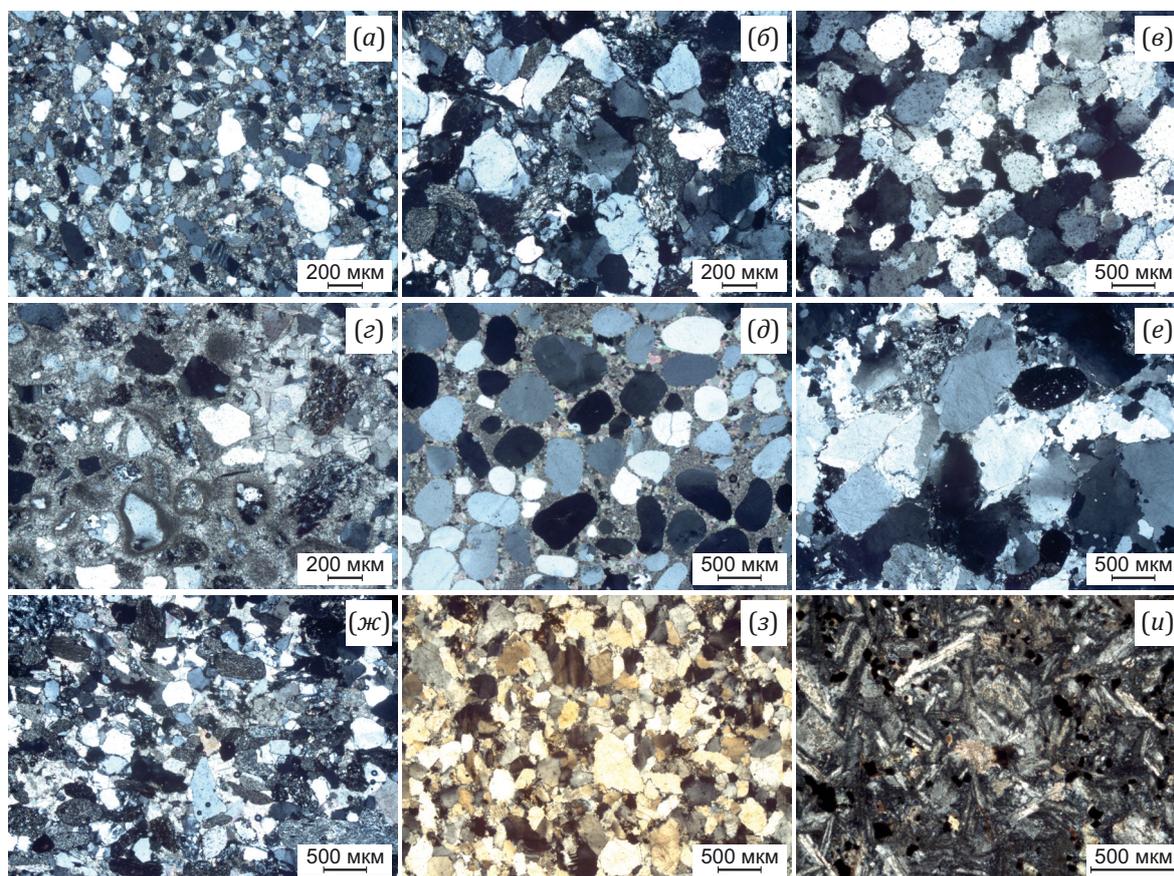
Исходя из предложенной ранее тектоноседиментационной модели, докембрийские образования Игарского поднятия можно отнести к трем структурным ярусам, которые разделены между собой стратиграфическими перерывами, а степень метаморфизма и деформаций которых возрастает вниз по разрезу [Kochnev et al., 2022]. Наиболее древний структурный ярус, датированный не моложе 900–1000 млн лет, сложен медвежьинской свитой и кварцитами безымянской толщи. Они слагают восточный борт рифтогенного прогиба [Kochnev et al., 2022]. Второй ярус, осадконакопление которого ограничено возрастными рамками 715–640 млн лет, представлен вулканогенно-осадочными образованиями игарской толщи, губинской и лудовской свит и ассоциирующими с ними магматическими телами основного состава, заполняющими рифтогенный прогиб. Оба эти яруса после перерыва в осадконакоплении в начале венда (эдиакария) (не ранее 635 млн лет назад) трансгрессивно перекрыты чер-

нореченской свитой морского генезиса, которая, судя по ее развитию лишь в пределах Игарской структуры, также накапливалась в сравнительно узком прогибе. К началу кембрия этот прогиб был полностью сnivelирован и объединен с обширным мелководным бассейном, распространившимся на весь Сибирский кратон [Kochnev et al., 2022].

### 3. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для целей этой работы использованы полученные нами геохронологические данные по зернам обломочного циркона из восьми образцов, три из которых были изучены ранее [Kochnev et al., 2022], а также по циркону из одного тела долеритов.

Наиболее молодой из изученных образцов – 1801-32 (рис. 3, а; 4, а) – отобран в стратотипе сухарихинской свиты, расположенном на правом берегу р. Сухариха, в 40 км от ее устья (см. рис. 1) (разрез 1801, основание: 67.20842° с.ш., 87.36189° в.д.), в 20 м выше подошвы



**Рис. 3.** Микрофотографии шлифов изученных образцов песчаника (а–з) и долерита (u) в поляризованном свете.

(а) – обр. 1801-32, сухарихинская свита; (б) – обр. 1801-1, излучинская свита; (в) – обр. 1811-4, излучинская свита; (г) – обр. 1814-1, чернореченская свита; (д) – обр. 2008-1, чернореченская свита (=корабликовская толща); (е) – обр. 1812-2, губинская свита; (ж) – обр. 2007-15, лудовская свита; (з) – обр. 1826, безымянская свита; (u) – обр. 1812-2, долерит в поле распространения губинской свиты.

**Fig. 3.** Cross-polarized light, thin section microphotographs of the studied sandstone (a–z) and dolerite (u) samples.

(a) – sample 1801-32, Sukharikha formation; (b) – sample 1801-1, Izluchina formation; (c) – sample 1811-4, Izluchina formation; (d) – sample 1814-1, Chernaya Rechka formation; (e) – sample 2008-1, Chernaya Rechka formation (=Korablik Mbr.); (f) – sample 1812-2, Gubinskaya formation; (g) – sample 2007-15, Ludy formation; (z) – sample 1826, Bezimyanny formation; (u) – sample 1812-2, dolerite body within Gubinskaya formation.

свиты. Образец представлен желтовато-серым мелко- и среднезернистым кварцевым песчаником с доломитовым цементом с разнонаправленной косою слоистостью, слои которого чередуются с пачками глинистых и песчаных доломитов.

Образец 1801-1 (см. рис. 3, б; рис. 4, б) происходит из этого же разреза и представлен красновато-бурым крупнозернистым массивным олигомиктовым литокластово-кварцевым песчаником из прослоя мощностью около 1 м, расположенного среди красноцветных алевролитов и мелкозернистых песчаников в верхней части (60 м ниже кровли) излучинской свиты.

Образец 1811-4 (см. рис. 3, в; рис. 4, в) отобран из нижней части разреза 1811 (основание: 67.13893° с.ш., 86.77058° в.д.), расположенного в 800 м выше устья р. Сухариха на ее левом берегу (см. рис. 1). Здесь обнажено переслаивание красно-бурых крупнозернистых песчаников и гравелитов с глинистым цементом, относящееся к нижней части излучинской свиты [Kozlov et al., 1992b].

Образец 1814-1 (см. рис. 3, г; рис. 4, г) отобран из нижней части разреза 1814 (основание: 67.16766° с.ш., 86.71045° в.д.), расположенного на правом берегу р. Енисей в 3.5 км ниже устья р. Сухариха. Породы, отнесенные здесь к нижней части чернореченской свиты согласно [Kozlov et al., 1992a], представлены доломитистыми кварцевыми песчаниками с обильной примесью неокатанных обломков различной (от песчаной до щебневой) размерности, сложенных подстилающими красноцветными песчаниками, сланцами и долеритами губинской свиты [Kochnev et al., 2022].

Образец 2008-1 (см. рис. 3, д; рис. 4, д) отобран в типовом разрезе корабликовской толщи (67.77107° с.ш., 86.40436° в.д.) на правом берегу р. Енисей в 6.3 км выше о. Плахинский. Образец взят из серых доломитов с обильной примесью окатанных кварцевых зерен песчаной размерности в 2 м от их контакта с зеленовато-серыми глинистыми сланцами лудовской свиты.

Образец 1812-2 (см. рис. 3, е; рис. 4, е; 5) происходит из толщи розовато-серых косослоистых грауваково-кварцевых песчаников губинской свиты, обнажающихся на северо-западном окончании о. Бол. Медвежий (67.18009° с.ш., 86.58050° в.д.), перекрывающих крупное тело метадолеритов, из центральной части которого в этом же обнажении в 40 м к СЗ от предыдущего образца отобран образец 1812-1 (см. рис. 3, и; рис. 5).

Образец 2007-15 (см. рис. 3, ж) взят из нижней части лудовской свиты (в 83 м от подошвы обнаженного разреза) в ее типовом разрезе по левому берегу Енисея в 3.4 км выше о. Плахинский (основание разреза 67.80394° с.ш., 86.42067° в.д.). Он отобран из пласта буровато-серых крупнозернистых полимиктовых песчаников мощностью 1.4 м, залегающего среди зеленовато-серых и серых метаалевролитов.

Образец 1826 (см. рис. 3, з) происходит из изолированного выхода в правом берегу р. Черная (67.39250° с.ш., 86.75025° в.д.), где обнажена толща серых парал-

лельно-слоистых кварцитовидных песчаников с примесью пирита видимой мощностью 10–12 м, которые отнесены к аналогам безымянской (стрельногорской) свиты [Kozlov et al., 1992b].

Выделение циркона проводилось путем дробления образца массой 1–2 кг, просеивания через сито с ячейей 0.25 мм и дальнейшей отмывки шлиха в воде и ручной выборке зерен циркона из немагнитной фракции под микроскопом. Образец 2008-1, содержащий значительное количество доломита, после дробления был

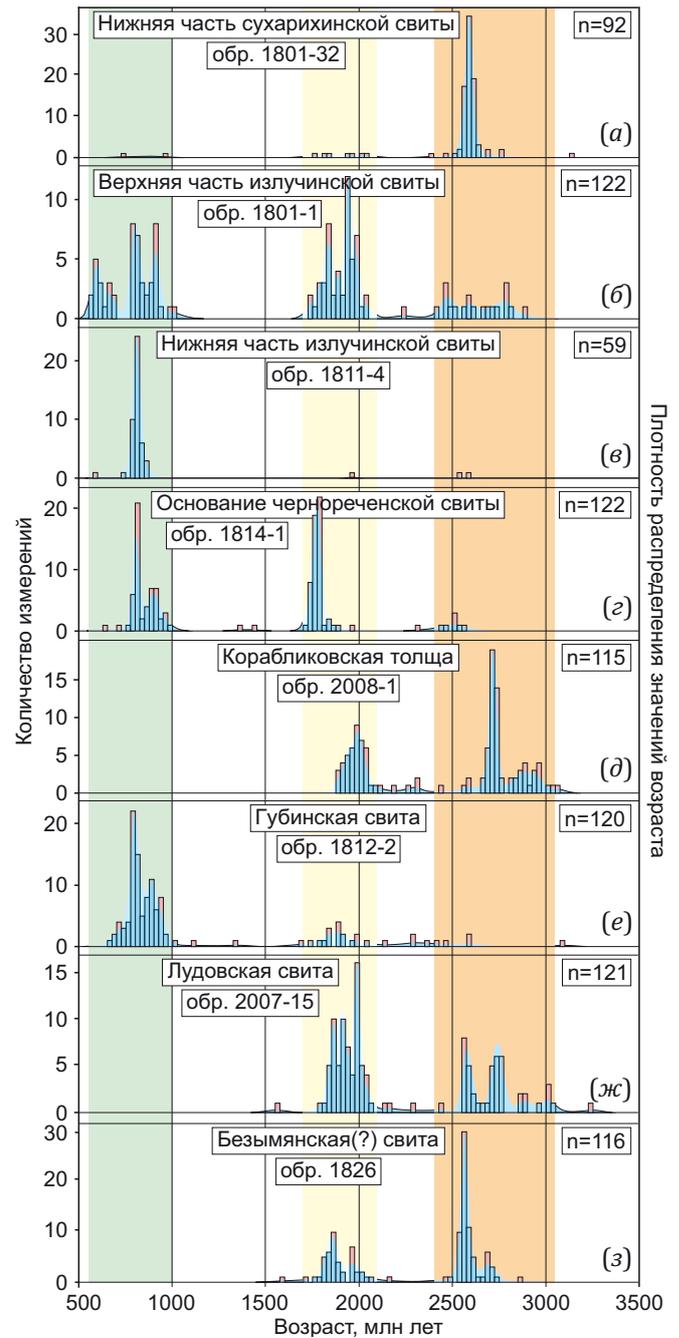


Рис. 4. Сопоставление возрастных спектров обломочных цирконов из докембрийских отложений Игарского поднятия.

Fig. 4. Comparison of detrital zircon age spectra from Precambrian sequences of the Igarka uplift.

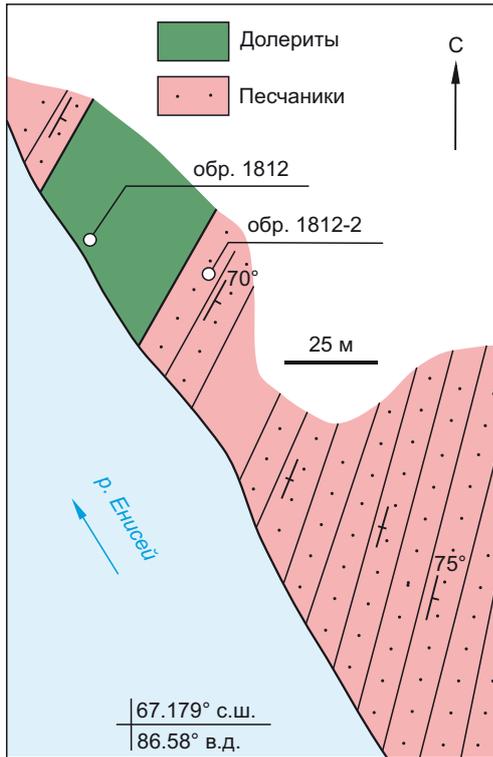


Рис. 5. Схема строения обнажения 1812 на левом берегу о. Мал. Медвежий.

Fig. 5. Sketch map of the outcrop 1812 at the left bank of Maly Medvezhy Island.

подвергнут обработке 5–10%-ной соляной кислотой для удаления карбонатной фракции. В ряде случаев было проведено дополнительное разделение шлиха на минеральные фракции с использованием электромагнита и тяжелых жидкостей. Выделенные зерна циркона были смонтированы в шашки с эпоксидной смолой и изучены под оптическим микроскопом в проходящем и отраженном свете, а также проведено их CL-фотографирование (Suppl. 1 на странице статьи онлайн).

Геохронологическое изучение зерен и кристаллов циркона осуществлено в четырех лабораториях. Образцы 1801-1, 1812-2 и 1814-1 были изучены ранее С.А. Дюфрэйном (Отделение наук о Земле и атмосфере Университета Альберта, г. Эдмонтон, Канада); описание методики приведено в работе [Kochnev et al., 2022]. U-Pb датирование цирконов из образцов 1801-32 и 1811-4 проводилось на масс-спектрометре высокого разрешения Element XR (Thermo Fisher Scientific) с эксимерной системой лазерной абляции Analyte Excite (Teledyne Cetac) согласно методике [Semenova et al., 2024] на базе ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Данные масс-спектрометрических измерений, в том числе расчет изотопных отношений, обрабатывали с помощью программы «Glitter» [Griffin et al., 2008]. Образец 1826 был исследован В.Б. Хубановым в ЦКП «Гео-спектр» (ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ) согласно методике, описанной в работе [Khubanov et al., 2016]. Образцы

2007-15, 2008-1 и образец из метадолерита 1812-1 изучены М.К. Данукаловой и А.Б. Кузьмичевым в ГИН РАН, (г. Москва) на масс-спектрометре Element 2 с системой лазерной абляции NWR-213 согласно методике, приведенной в статье [Kuzmichev et al., 2023]. В последней лаборатории обработка масс-спектрометрических данных проводилась в среде Iolite 4.6. Данная программа отображает концентрации каждой измеряемой массы и их отношения в виде последовательности приблизительно из 350 сканов, полученных для каждого анализа на протяжении около 40 с. Программа позволяет интегрировать не только полную последовательность изотопных отношений, но и отдельные интервалы этой последовательности, степень конкордантности которых оператор может наблюдать в окне «Live Concordia» модуля VisualAge. Так как интегрировались только конкордантные участки последовательности сканов, отбраковка результатов по степени дискордантности изотопных отношений не проводилась. В остальных случаях для анализа использованы датировки, дискордантность которых не выше 10 %, рассчитанные с помощью программного пакета Glitter по соотношению  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  для измерений моложе 1 млрд лет и по соотношению  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  для измерений древнее 1 млрд лет. Гистограммы и кривые плотности вероятности для возрастов циркона построены с помощью программы Kernel Density Estimation (KDE) [Vermeesch, 2012].

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Зерна обломочного циркона в терригенных отложениях.** Популяции циркона во всех изученных образцах отчетливо разделяются на три группы: мезонеоархейскую (3100–2600 млн лет), палеопротерозойскую (2100–1700 млн лет) и неопротерозойскую (1000–600 млн лет) (см. рис. 4; Suppl. 2 на странице статьи онлайн), однако относительное распределение датировок между образцами различно.

Из песчаников нижней части сухарихинской свиты по зернам циркона, имеющим различную форму и зональное строение (см. рис. 4, а; обр. 1801-32), получено 92 определения (Suppl. 1), среди которых доминируют позднеархейские (2.75–2.55 млрд лет) возрасты. Также присутствует семь палеопротерозойских зерен и два неопротерозойских зерна, возраст которых составляет  $956 \pm 12$  и  $734 \pm 9$  млн лет.

Циркон из песчаников верхней части излучинской свиты (см. рис. 4, б; обр. 1801-1) представлен разнообразными по морфологии, внутреннему строению и степени окатанности зернами, из которых получено 122 определения возраста. Наряду с неоархейской (2.90–2.50 млрд лет, 14 определений) и палеопротерозойской (2.48–1.74 млрд лет, 58 определений) популяциями, присутствует представительная неопротерозойская популяция (570–990 млн лет, 43 определения), в которой выделяются пики 910, 783 и 615 млн лет. Конкордантный возраст самого молодого кластера из трех зерен составляет  $577 \pm 7$  млн лет [Kochnev et al., 2022].

Циркон из песчаников нижней части излучинской свиты (см. рис. 4, в; обр. 1811-4,  $n=59$ ) представлен преимущественно слабоокатанными изометричными и умеренно удлинёнными кристаллами с преобладающей осцилляторной зональностью. Возрастной спектр датировок существенно отличен от пород выше и ниже по разрезу: почти все определения, кроме трех «древних» и одного с возрастом  $593 \pm 8$  млн лет, принадлежат к одной популяции в диапазоне от  $907 \pm 12$  до  $702 \pm 9$  млн лет с выраженным максимумом относительной вероятности около 808 млн лет.

Среди циркона из базальных отложений чернореченской свиты (обр. 1814-1) преобладают окатанные и изометричные либо слабо удлинённые зерна, имеющие как линейную, так и осцилляторную зональность. Конкордантные определения ( $n=122$ ) группируются в три четко выраженных кластера (см. рис. 4, г): неархейско-палеопротерозойский (2.57–2.32 млрд лет; 8 зерен), палеомезопротерозойский (1.96–1.38 млрд лет, 59 зерен, пик 1.78 млрд лет) и неопротерозойский (981–625 млн лет, 55 зерен). В неопротерозойском кластере выделяются два максимума с возрастом около 800 и 900 млн лет; наиболее молодые определения составляют  $625 \pm 18$ ,  $694 \pm 15$  и  $702 \pm 19$  млн лет [Kochnev et al., 2022].

Зерна циркона, выделенные из корабликовской толщи (см. рис. 3, д; обр. 2008-1) преимущественно окатанные, среди них есть как изометричные, так и удлинённые зерна с осцилляторной, реже секториальной либо невыраженной зональностью. Среди использованных для построения диаграммы определений ( $n=115$ ) присутствуют только палеопротерозойские и неархейские датировки в диапазоне от 3.06 до 1.88 млрд лет с главными пиками около 2.73 и 2.05 млрд лет.

Циркон из песчаников губинской свиты (обр. 1812-2) представлен преимущественно изометричными либо слабо удлинёнными окатанными кристаллами

и их обломками с преобладающей осцилляторной, реже слабо выраженной зональностью (см. рис. 3, е;  $n=120$ ). В датировках присутствуют все три возрастные популяции, при этом наиболее представительной является неопротерозойская (91 определение). В ней обособляются уже фиксируемые выше по разрезу возрастные пики около 800 и 900 млн лет; конкордантный возраст кластера из трех самых молодых определений составляет  $716 \pm 10$  млн лет [Kochnev et al., 2022].

Из зерен циркона, выделенных из песчаников лудовской свиты (см. рис. 3, ж; обр. 2007-15) для сравнительного анализа использовано 121 определение возраста. Морфологически зерна преимущественно окатанные, от изометричных до умеренно удлинённых, с различными типами зональности. За исключением одного самого молодого определения  $1551 \pm 27$  млн лет, все датировки имеют палеопротерозойско-архейский возраст в диапазоне от 3.25 до 1.80 млрд лет с несколькими максимумами распределений около 2.76, 2.57, 2.05, 1.93 и 1.87 млрд лет.

Песчаники (обр. 1826), предположительно относящиеся к стрельногорской (безымянской) свите, содержат изометричные либо слабо удлинённые, как правило окатанные зерна циркона с преобладающей осцилляторной зональностью. Распределение полученных возрастов в этом образце (см. рис. 3, з;  $n=116$ ) имеет бимодальный характер: выделяется палеопротерозойская и неархейская популяции с наиболее выраженными максимумами распределений возрастов около 2.57 и 1.86 млрд лет соответственно; самое молодое зерно имеет возраст  $1590 \pm 23$  млн лет.

**Циркон в долеритах в поле губинской свиты.** Из образца 1812-1 было выделено 11 зерен циркона. Семь зерен представляют собой бесформенные обломки крупных кристаллов и имеют однородное неконтрастное на CL-изображениях строение. Вероятнее всего,

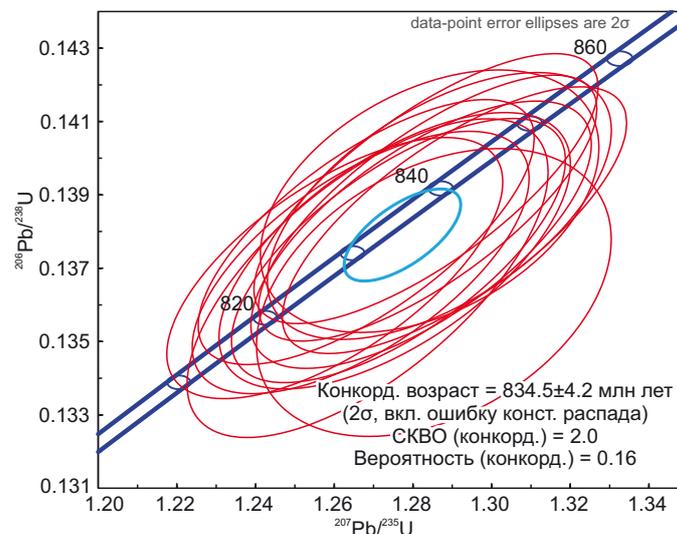


Рис. 6. Диаграмма с конкордией для возрастов циркона из тела долерита губинской свиты, обр. 1812.

Fig. 6. Concordia plot for zircon age data from dolerite body within Gubinskaya formation, sample 1812.

они принадлежат к одной популяции, которую можно связать с кристаллизацией долерита, на что указывает приблизительно равная концентрация урана и тория в цирконе. Примечательно то, что в высокоурановых зернах (>1500 г/т) тория больше, чем урана ( $U/Th = 0.7-0.9$ ), а в относительно низкоурановых тория меньше, чем урана (Suppl. 2). По этим зернам получено 13 определений возраста в диапазоне 812–872 млн лет, которые образуют кластер с конкордантным возрастом  $835 \pm 4$  млн лет ( $2\sigma$ , MSWD=2.0) (рис. 6). Четыре зерна резко отличаются от остальных удлиненной формой и контрастным строением в CL-изображениях и, по всей видимости, являются захваченными. Два из них проанализированы со следующим результатом:  $1878 \pm 27$  млн лет ( $^{207}Pb/^{206}Pb$ ,  $2\sigma$ , ядро зонального кристалла) и  $900 \pm 19$  млн лет ( $^{206}Pb/^{238}U$ ,  $2\sigma$ , светлая зона в обломке кристалла).

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### Возможные источники обломочного материала.

В исследованных образцах присутствуют две контрастирующие группы зерен циркона: раннедокембрийская и неопротерозойская, зерна с мезопротерозойскими датировками отсутствуют. Первая группа включает архейские и палеопротерозойские зерна в диапазонах возраста 2.9–2.4 и 2.1–1.7 млрд лет, которые считаются продуктами эрозии фундамента Сибирского кратона [Gladkochub et al., 2013, 2014, 2019, 2022; Letnikova et al., 2013; Khudoley et al., 2015; Kuptsova et al., 2015; Powerman et al., 2015; Priyatkina et al., 2016, 2018, 2019; Romanov et al., 2020]. Такие зерна могли быть транспортированы с выступов фундамента, точное палеогеографическое расположение которых неизвестно, или быть переотложенными из более древних осадочных пород. Ближайшим к Игарскому поднятию регионом, где достоверно известны образования кристаллического фундамента, является Анабарский щит, расположенный в 600 км к востоку. Здесь широко распространены магматические и метаморфические комплексы в составе архейских террейнов и разделяющих их раннепротерозойских шовных и коллизионных зон [Rosen et al., 2006], которые можно рассматривать как один из непосредственных источников соответствующих возрастных популяций обломочного циркона в докембрийских образованиях Игарского поднятия. Кроме того, известны ксенолиты гранитов, в том числе содержащих древние (>2 млрд лет) зерна циркона, найденные в диатремах, связанных с раннетриасовым трапповым магматизмом в Норильском районе [Czamanske et al., 2000; Samsonov et al., 2022]. Еще одним потенциальным источником древних цирконов могут быть терригенные осадочные толщи мезопротерозоя, залегающие в нижней части разреза осадочного чехла и известные, например, на Туруханском поднятии [Mel'nikov et al., 2005].

Неопротерозойские популяции в интервале 1000–600 млн лет, вероятно, происходят из неопротерозойского коллизионного орогена, который в современной

структуре погребен под отложениями Западно-Сибирского бассейна [Kochnev et al., 2022]. Этот орогенный пояс маркирует окраину Сибирского палеоконтинента; фрагменты пояса обнажены на Енисейском кряже и на Таймыре. В обоих регионах установлено, что магматизм на окраине Сибири неравномерно проявлялся на протяжении всего неопротерозоя, и в его эволюции выделяются два этапа: 1000–780 млн лет и 760–600 млн лет. На Енисейском кряже длительный этап гранитообразования в раннем неопротерозое связан с обстановкой активной окраины и имеет основные возрастные пики активности около 900 и 805 млн лет [Kuzmichev et al., 2025]. Во второй половине неопротерозоя надсубдукционный магматизм на Енисейской окраине Сибири продолжался только в пределах Киселихинского террейна, фрагмент которого в современной структуре обнажен в СЗ части кряжа [Kuzmichev et al., 2023]. Магматизм в интервале 760–700 млн лет представлен разнообразными гранитоидами Порожинского массива [Vernikovskiy et al., 2001; Kuzmichev et al., 2022], который являлся частью магматического пояса, ныне в основном перекрытого чехлом Западно-Сибирского бассейна. Судя по морфологическим, геохимическим и изотопным характеристикам детритовых цирконов, он включал разнофациальные гранитоиды и метаморфиты высоких ступеней [Kuzmichev et al., 2025]. Выходы более молодых надсубдукционных вулканитов сохранились в южной части Киселихинского террейна. Эти выходы также представляют собой фрагмент обширного вулканического пояса, активного в интервале 680–620 млн лет [Kuzmichev et al., 2023]. В кратонной части Енисейского кряжа во второй половине неопротерозоя, в интервале 760–720 млн лет, внедрялись многочисленные гранитные плутоны глушихинского комплекса [Vernikovskaya et al., 2023; Kuzmichev, Sklyarov, 2016; Kuzmichev, Danukalova, 2024]. В этой части кряжа известны также и более поздние проявления внутриплитного магматизма [Rud'ko et al., 2020; Vernikovskaya et al., 2020], однако из-за преобладания базитов вряд ли они могли поставлять большое количество циркона.

В пределах Центрально-Таймырского складчатого пояса также реконструирована активная континентальная окраина в первой половине неопротерозоя (980–770 млн лет, возраст цирконов из мигматитов [Kuzmichev, Danukalova, 2018]; 970–800 млн лет, возраст детритового циркона [Priyatkina et al., 2017]). В северной части пояса широко распространены надсубдукционные вулканиты середины и второй половины неопротерозоя, среди которых известны риолиты и комагматические граниты с возрастом 680–660 млн лет [State Geological Map..., 2016]. Вероятно, сходные процессы происходили на протяжении неопротерозоя и к западу от современного Игарского поднятия. Внекратонный источник для неопротерозойских зерен циркона, связанный с Таймырским складчатым поясом, предполагается для отложений этого же возрастного диапазона, распространенных в северной части Сибирского

кратона – в Восточном Прианабарье, на Уджинском, Оленекском и Хараулахском поднятиях [Khudoley et al., 2015; Kuptsova et al., 2015; Vishnevskaya et al., 2017; Malyshev et al., 2022].

**Влияние условий осадконакопления на возрастные спектры.** Сопоставление возрастных спектров циркона на различных стратиграфических уровнях (см. рис. 4) позволяет выявить некоторые закономерности возможных путей транспортировки кластического материала. Кроме очевидного отсутствия молодых популяций в стратиграфически древних толщах (песчаники безымянской свиты), видно, что влияние неопротерозойских источников сноса во время осадконакопления сильно варьируется даже внутри близких по возрасту толщ. Не исключено, что одной из причин этого может быть неверная оценка стратиграфического положения тех или иных стратонев и, соответственно, их относительного возраста. Отсутствие молодых зерен циркона в корабликовской толще может поставить под сомнение предположение об ее соответствии базальным слоям чернореченской свиты венда [Kochnev et al., 2022], где неопротерозойские зерна представлены достаточно широко. Наличие исключительно «древних» популяций в песчаниках лудовской свиты также резко отличает ее от пород губинской свиты, которую принято объединять с ней в один структурный ярус [Votakh, 1968; Kozlov et al., 1992a, 1992b; Mel'nikov et al., 2005].

С другой стороны, наблюдается очевидная связь распространенности зерен циркона неопротерозойского возраста с условиями седиментации. Отложения сухарихинской свиты верхнего венда – нижнего кембрия, формировавшиеся в обстановках относительно мелководного шельфа, несмотря на их молодой возраст, содержат в основном позднеархейские зерна (см. рис. 4, а). Песчанистые доломиты корабликовской толщи, отнесенные в нашей интерпретации к нижнему венду (нижнему эдиакарию), в которых силикокластическая примесь представлена почти исключительно зрелым кварцевым песком (см. рис. 3, д), также накапливались в условиях протяженного шельфа и содержат лишь «древние» зерна (см. рис. 4, д). Похожие спектры распределений датировок, где преобладают либо присутствуют только архейско-раннепротерозойские значения, наблюдаются для лудовской (см. рис. 4, ж) и безымянской (см. рис. 4, з) свит рифея (мезоэопротерозой), которые также были сформированы в обстановках шельфа и берегового склона [Petrov, 1993; Kochnev et al., 2022].

В свою очередь, стратиграфические уровни, обогащенные неопротерозойским обломочным материалом, приурочены к совершенно другим условиям седиментации. Это либо плохо сортированные, с обилием неокатанных обломков относительно маломощные (первые десятки метров) горизонты, имеющие четкое базальное положение в основании крупного трансгрессивного цикла (см. рис. 4, г; низы чернореченской свиты), либо косослоистые красноцветные, с различной

степенью сортированности мощные (сотни метров) толщи достаточно однородного облика – излучинская свита венда (эдиакария) и губинская свита верхнего рифея (криогения) (см. рис. 4, б, в, е). Очевидно, что все эти толщи отлагались при низком стоянии уровня моря: либо в аллювиальных или дельтовых руслах, либо в условиях крайнего мелководья. Таким образом, неоднократно фиксируемая в разрезе докембрия Игарского поднятия регрессия моря и осушение прилегающих к осадочному бассейну пространств значительно расширяли область эрозии, способствуя также активному сносу кластики с неопротерозойского орогена. И наоборот – при трансгрессии поступление материала из этого источника резко ослабевало либо вовсе прекращалось и размывались преимущественно внутрикратонные поднятия, сложенные древними породами, либо выступы палеорельефа, где могли быть обнажены терригенные толщи мезопротерозоя (раннего и среднего рифея). Причинами изменения уровня моря могли быть как глобальные эвстатические колебания, так и факторы более локального характера, такие как изостатический подъем континентальных масс либо различные тектонические процессы во внешнем обрамлении Сибирского кратона.

**О возрасте базитовых тел в поле распространения губинской свиты.** Конкордантный возраст  $835 \pm 4$  млн лет кластера из 13 определений по 7 фрагментам кристаллов циркона из тела долеритов, залегающего среди пород губинской свиты, противоречит возрасту обломочных цирконов из этой свиты: возраст 42 зерен циркона моложе 800 млн лет, конкордантный возраст трех самых молодых датировок составил  $716 \pm 10$  млн лет [Kochnev et al., 2022]. Это заставляет обсудить возможные причины такого несоответствия, которых можно наметить три: 1) тектонический контакт пород губинской свиты с более древним интрузивным телом, 2) стратиграфическое налегание песчаников на более древние долериты и 3) ксеногенное происхождение циркона из долеритов.

Для анализа возможных причин 1 и 2 приводим дополнительные сведения о геологической ситуации на опробованном участке берега р. Енисей (см. рис. 5). В обнажении 1812 субвертикально залегающие долериты и песчаники выходят на поверхность в очень пологой прибрежной полосе и доступны для изучения лишь при самом низком уровне воды. И нами, и нашими предшественниками [Kozlov et al., 1992b] отмечено, что линия контакта между долеритами и песчаниками совпадает с плоскостью напластования последних, а направление косых серий позволяет установить кровлю и подошву слоев. Песчаники, круто (под углом  $70-80^\circ$ ) падающие на ЮВ, обнажены стратиграфически как выше, так и ниже долеритового тела. Миндалекаменная текстура в эндоконтакте долеритового тела и скрытозернистая структура приурочены к его верхней части, тогда как его средняя и нижняя часть сложены более массивными и хорошо раскристаллизованными породами, что свидетельствует в пользу ненарушенного

контакта. Тело долеритов может являться как силлом, так и лавовым потоком, но в любом случае оно не может оказаться более древним, чем вмещающие породы. Охарактеризованная геологическая ситуация делает маловероятными причины 1 и 2: тектонический контакт губинской свиты с более древним интрузивным телом либо стратиграфическое налегание песчаников на более древние долериты.

Рассмотрим третью возможную причину (ксеногенные цирконы). Судя по геохимическим характеристикам [Kochnev et al., 2022], базиты игарского комплекса были выплавлены в мантии, и магма была транспортирована к месту внедрения (или излияния) через всю кору. На этом пути она могла ассимилировать какие-либо коровые породы и вынести наверх содержащиеся в них цирконы. Однако следует иметь в виду, что цирконы из популяции 835 млн лет крайне специфичны по своему составу (см. выше), и такие вполне ожидаемы для щелочной базитовой внутриплитной магмы, обогащенной Nb и Ti [Kochnev et al., 2022]. Трудно представить, чтобы щелочная базитовая магма игарского комплекса могла ассимилировать более древнюю щелочную базитовую магму и заимствовать из нее цирконы. С другой стороны, по материалам колонкового бурения в поле распространения пород губинской и лудовской свит в правобережье Енисея в районе островов Мал. и Бол. Медвежий описаны тела сиенит-порфиоров [Kozlov et al., 1992b], а кроме того, здесь же, судя по результатам химического анализа, могут присутствовать маломощные интрузии гранитоидов [State Geological Map..., 2001]. Таким образом, вопрос о возрасте и геодинамической принадлежности продатированного эпизода магматизма около 835 млн лет пока остается открытым, и для его решения необходимы дальнейшие целенаправленные исследования.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные при изучении обломочных цирконов из докембрийских отложений Игарского поднятия, сводятся к следующему:

1. В возрастных спектрах обломочных цирконов на различных стратиграфических уровнях присутствуют архейские (3100–2600 млн лет), палеопротерозойские (2100–1700 млн лет) и неопротерозойские (1000–600 млн лет) популяции, однако соотношение их коренным образом отличается от образца к образцу.

2. Источником архейских и палеопротерозойских цирконов являются продукты эрозии пород кристаллического фундамента Сибирского кратона либо продукты разрушения и дальнейшего переотложения обломочных пород мезопротерозоя. Зерна циркона неопротерозойского возраста поступали из орогена, вероятно располагавшегося в северо-западном (в современных координатах) обрамлении Сибирского кратона.

3. Установлена зависимость наличия либо отсутствия неопротерозойских датировок циркона в обломочных породах от условий осадконакопления, проявленная в отложениях различного возраста: отложения,

накапливавшиеся в шельфовых обстановках при высоком стоянии уровня моря, содержат преимущественно архейско-палеопротерозойские цирконы, тогда как толщи, отвечающие регрессивным трактам седиментации, обогащены неопротерозойским кластическим материалом.

4. Датировка по конкордантному кластеру магматогенных цирконов из долеритов в губинской свите  $835 \pm 4$  млн лет более чем на 100 млн лет древнее полученного ранее максимального возраста осадконакопления  $716 \pm 10$  млн лет для вмещающих песчаников. Исходя из известных на сегодняшний день данных, наиболее вероятным объяснением может быть захват циркона из более древнего источника магматической природы, происхождение которого пока не установлено.

## 7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

## 8. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

## 9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Czamanske G.K., Wooden J.L., Walker R.J., Fedorenko V.A., Simonov O.N., Budahn J.R., Siems D.F., 2000. Geochemical, Isotopic, and SHRIMP Age Data for Precambrian Basement Rocks, Permian Volcanic Rocks, and Sedimentary Host Rocks to the Ore-Bearing Intrusions, Noril'sk-Talnakh District, Siberian Russia. *International Geology Review* 42 (10), 895–927. <https://doi.org/10.1080/00206810009465117>.

Geological Map of the USSR, 1984. Tunguska Series. Scale of 1:200000. Sheet Q-45-III, IV. Explanatory Note. VSEGEI, Moscow, 99 p. (in Russian) [Геологическая карта СССР. Серия Тунгусская. Масштаб 1:200000. Лист Q-45-III, IV: Объяснительная записка. М.: ВСЕГЕИ, 1984. 99 с.].

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Stanevich A.M., Pisarevsky S.A., Zhang S., Motova Z.L., Mazukabzov A.M., Li H., 2019. U-Pb Detrital Zircon Geochronology and Provenance of Neoproterozoic Sedimentary Rocks in Southern Siberia: New Insights Into Breakup of Rodinia and Opening of Paleo-Asian Ocean. *Gondwana Research* 65, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.07.007>.

Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Stanevich A.M., Donskaya T.V., Motova Z.L., Vanin V.A., 2014. Precambrian Sedimentation in the Urik-Iya Graben, Southern Siberian Craton: Main Stages and Tectonic Settings. *Geotectonics* 48, 359–370. <https://doi.org/10.1134/S0016852114050033>.

Gladkochub D.P., Motova Z.L., Donskaya T.V., Khubonov V.B., Sizov A.V., 2022. Cambrian/Ordovician Boundary as a Milestone in the Sedimentation History of the Southern

Siberian Craton: Evidence from U-Pb Dating of Detrital Zircons. *Journal of Asian Earth Sciences*: X 8, 100107. <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2022.100107>.

Gladkochub D.P., Stanevich A.M., Mazukabzov A.M., Don-skaya T.V., Pisarevsky S.A., Nicoll G., Motova Z.L., Kornilova T.A., 2013. Early Evolution of the Paleasian Ocean: LA-ISP-MS Dating of Detrital Zircons from Late Precambrian Sequences of the Southern Margin of the Siberian Craton. *Russian Geology and Geophysics* 54 (10), 1150–1163. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.09.002>.

Griffin W.L., Powell W.J., Pearson N.J., O'Reilly S.Y., 2008. GLITTER: Data Reduction Software for Laser Ablation ICPMS. In: P.J. Sylvester (Ed.), *Laser Ablation ICP-MS in the Earth Sciences: Current Practices and Outstanding Issues*. Mineralogical Association of Canada Short Course Series. Vol. 40. Vancouver, Canada, p. 308–311.

Khubanov V.B., Buyantuev M.D., Tsygankov A.A., 2016. U-Pb Dating of Zircons from PZ<sub>3</sub>-MZ Igneous Complexes of Transbaikalia by Sector-Field Mass Spectrometry with Laser Sampling: Technique and Comparison with SHRIMP. *Russian Geology and Geophysics* 57 (1), 190–205. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.013>.

Khudoley A., Chamberlain K., Ershova V., Sears J., Prokopiev A., MacLean J., Kazakova G., Malyshev S. et al., 2015. Proterozoic Supercontinental Restorations: Constraints from Provenance Studies of Mesoproterozoic to Cambrian Clastic Rocks, Eastern Siberian Craton. *Precambrian Research* 259, 78–94. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.10.003>.

Kochnev B.B., Khudoley A.K., Priyatkina N.S., Dufrane S.A., Pokrovsky B.G., Kuznetsov A.B., Kaurova O.K., Marusin V.V., 2022. Neoproterozoic Evolution of the Northwestern Margin of the Siberian Platform. *Precambrian Research* 382, 106877. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2022.106877>.

Kochnev B.B., Pokrovsky B.G., Kuznetsov A.B., Marusin V.V., Kaurova O.K., Bykova N.V., Ivanova N.A., 2023. Early Ediacaran Positive C-Isotope Anomaly in Limestones of the Chernaya Rechka Formation, Igarka Uplift (Northwestern Siberian Platform). *Lithology and Mineral Resources* 58, 235–257. <https://doi.org/10.1134/S0024490223700086>.

Kouchinsky A.V., Bengston S., Pavlov V., Runnegar B., Torssander P., Young E., Ziegler K., 2007. Carbon Isotope Stratigraphy of the Precambrian-Cambrian Sukharikha River Section, Northwestern Siberian Platform. *Geological Magazine* 144 (4), 609–618. <https://doi.org/10.1017/S016756807003354>.

Kozlov G.V., Aleksandrov V.S., Aksenova L.A., Malakhov V.P., Chunikhina L.E., 1992a. Reference Sections of Upper Precambrian Sedimentary and Volcanogenic-Sedimentary Sequences in the Northwest of the Siberian Platform. Vol. 1: Medvezhniskaya and Chernorechenskaya Formations. SNIIGGiMS, Novosibirsk, 123 p. (in Russian) [Козлов Г.В., Александров В.С., Аксенова Л.А., Малахов В.П., Чунихина Л.Е. Опорные разрезы верхнедокембрийских осадочных и вулканогенно-осадочных толщ северо-запада Сибирской платформы. Т. 1: Медвежьинская и чернореченская свиты. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1992. 123 с.]

Kozlov G.V., Aleksandrov V.S., Aksenova L.A., Malakhov V.P., Chunikhina L.E., 1992b. Reference Sections of Upper Precambrian Sedimentary and Volcanogenic-Sedimentary Stages in the Northwest of the Siberian Platform. Vol. 2: Ludovskaya, Malinovoslantsevaya, Kluch Spilitovogo (Rzhevskogo), Medvezheostrovnyaya Stages, Rudnorucheynaya and Graviyevskaya Formations. SNIIGGiMS, Novosibirsk, 99 p. (in Russian) [Козлов Г.В., Александров В.С., Аксенова Л.А., Малахов В.П., Чунихина Л.Е. Опорные разрезы верхнедокембрийских осадочных и вулканогенно-осадочных толщ северо-запада Сибирской платформы. Т. 2: Лудовская, малиновосланцевая, ключа Спилитового (Ржевского), медвежьеостровная толщи, рудноручейная и гравийская свиты. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1992. 99 с.]

Kuptsova A.V., Khudoley A.K., Davis W., Rainbird R.H., Molchanov A.V., 2015. Results of the U-Pb Age of the Detrital Zircons from the Upper Proterozoic Deposits of the Eastern Slope of the Anabar Uplift. *Stratigraphy and Geological Correlation* 23 (3), 246–261. <https://doi.org/S0869593815030053>.

Kuzmichev A.B., Danukalova M.K., 2018. The Central Taimyr Fold Belt in the Precambrian: Passive Margin of the Siberian Paleoccontinent in the Mesoproterozoic and Active Margin in the Neoproterozoic. In: *Problems of Tectonics and Geodynamics of the Earth's Crust and Mantle. Proceedings of L Tectonic Meeting (January 30 – February 3, 2018)*. Vol. 1. GEOS, Moscow, p. 352–356 (in Russian) [Кузьмичев А.Б., Данукалова М.К. Центральнo-Таймырский складчатый пояс в докембрии: пассивная окраина Сибирского палеоконтинента в мезопротерозое, активная окраина в неопротерозое // Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии: Материалы L Тектонического совещания (30 января – 3 февраля 2018 г.). М.: ГЕОС, 2018. Т. 1. С. 352–356].

Kuzmichev A.B., Danukalova M.K., 2024. The Reference Garevka Granite (Yenisei Ridge, Western Frame of the Siberian Craton): The Final Attempt to Verify Paleoproterozoic Pb/U Isotopic Age by M.I. Volobuev. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (2), 0746 (in Russian) [Кузьмичев А.Б., Данукалова М.К. Референсный Гаревский гранитный плутон Енисейского кряжа (Западное обрамление Сибирского кратона): финальная попытка воспроизвести палеопротерозойские Pb/U изотопные датировки М.И. Волобуева // Геодинамика и тектонофизика. 2024. Т. 15. № 2. 0746]. <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-2-0746>.

Kuzmichev A.B., Danukalova M.K., Babitsky E.F., Bryansky N.V., Dubensky A.S., Khubanov V.B., 2025 (in press). Neoproterozoic Tectonostratigraphy of the Northern Part of the Kiselikhinsky Terrane (Yenisei Ridge), a Fragment of the Active Margin of the Siberian Paleoccontinent. *Stratigraphy and Geological Correlation* (in Russian) [Кузьмичев А.Б., Данукалова М.К., Бабицкий Е.Ф., Брянский Н.В., Дубенский А.С., Хубанов В.Б. Тектоностратиграфия неопротерозоя северной части Киселихинского террейна (Енисейский кряж), фрагмента активной окраины Сибирского палеоконтинента // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2025 (в печати)].

Kuzmichev A.B., Danukalova M.K., Babitsky E.F., Somsikova A.V., Khubanov V.B., Bryansky N.V., Dubensky A.S., 2022. Search for a Terrane That Collided with the Yenisei Margin of the Siberian Palecontinent at the End of the Neoproterozoic. 1. Composition, Age, and Geodynamic Position of the "Island-Arc" Porozhninsky Granite Complex on the NW Margin of the Yenisei Ridge. In: Geodynamic Evolution of the Lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from Ocean to Continent). Proceedings of Scientific Conference (October 18–21, 2022). Iss. 20. IEC SB RAS, Irkutsk, p. 158–160 (in Russian) [Кузьмичев А.Б., Данукалова М.К., Бабицкий Е.Ф., Сомсикова А.В., Хубанов В.Б., Брянский Н.В., Дубенский А.С. Поиски террейна, столкнувшегося с Енисейской окраиной Сибирского палеоконтинента в конце неопротерозоя. 1. Состав, возраст и геодинамическая позиция «островодужного» Порожнинского гранитного комплекса на СЗ окраине Енисейского кряжа // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научной конференции (18–21 октября 2022 г.). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2022. Вып. 20. С. 158–160].

Kuzmichev A.B., Sklyarov E.V., 2016. The Precambrian of Transangaria, Yenisei Ridge (Siberia): Neoproterozoic Microcontinent, Grenville-Age Orogen, or Reworked Margin of the Siberian Craton? *Journal of Asian Earth Sciences* 115, 419–441. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2015.10.017>.

Kuzmichev A.B., Storozhenko A.A., Danukalova M.K., Khubanov V.B., Dubensky A.S., 2023. The First Detrital Zircon Data on the Northwestern Precambrian Yenisei Ridge: Identification of the Continental-Arc Kiselikha Terrane. *Stratigraphy and Geological Correlation* 31, 507–521. <https://doi.org/10.1134/S0869593823060060>.

Letnikova E.F., Kuznetsov A.B., Vishnevskaya I.A., Veshcheva S.V., Proshenkin A.I., Geng H., 2013. The Vendian Passive Continental Margin in the Southern Siberian Craton: Geochemical and Isotopic (Sr, Sm-Nd) Evidence and U-Pb Dating of Detrital Zircons by the LA-ICP-MS Method. *Russian Geology and Geophysics* 54 (10), 1177–1194. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.09.004>.

Malyshev S.V., Pasenko A.M., Khudoley A.K., Ivanov A.V., Priyatkina N.S., Pazukhina A.A., Marfin A.E., DuFrane S.A., Sharygin I.S., Gladkochub E.A., 2022. What Is the Age of the Udzha Paleorift?: U-Pb Age of Detrital Zircons from Udzha Basin Terrigenous Succession, Northern Siberia. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences* 67 (4), 548–567 (in Russian) [Малышев С.В., Пасенко А.М., Худолей А.К., Иванов А.В., Прияткина Н.С., Пазухина А.А., Марфин А.Е., Дюфрейн Э.С., Шарыгин И.С., Гладkochуб Е.А. Каков возраст Уджинского палеорифта?: U-Pb возраст обломочных цирконов терригенных пород Уджинского бассейна, север Сибири // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2022. Т. 67. № 4. С. 548–567]. <https://doi.org/10.21638/spbu.07.2022.401>.

Marusin V.V., Kochnev B.B., Izokh O.P., 2022. Thalassinoides and Olenichnus in the Terreneuvian Carbonates of the Igarka Uplift, NW Siberian Platform. *Lethaia* 55 (2), 1–17. <https://doi.org/10.18261/let.55.2.6>.

Marusin V.V., Kochnev B.B., Karlova G.A., Izokh O.P., Sarsembaev Zh.A., Ivanova N.A., 2023. Precambrian-Cambrian Transition at the Igarka Uplift (Northwestern Siberian Platform). *Russian Geology and Geophysics* 64 (6), 682–697. <https://doi.org/10.2113/RGG20224523>.

Marusin V.V., Kolesnikova A.A., Kochnev B.B., Kuznetsov N.B., Pokrovsky B.G., Romanyuk T.V., Karlova G.A., Rud'ko S.V. et al., 2021. Detrital Zircon Age and Biostratigraphic and Chemostratigraphic Constraints on the Ediacaran-Cambrian Transitional Interval in the Irkutsk Cis-Sayan Uplift, Southwestern Siberian Platform. *Geological Magazine* 158, 1156–1172. <https://doi.org/10.1017/S0016756820001132>.

Mel'nikov N.V., Yakshin M.S., Shishkin B.B., Efimov A.O., Karlova G.A., Kilina L.I., Konstantinova L.N., Kochnev B.B. et al., 2005. Stratigraphy of Oil and Gas Basins of Siberia. Riphean and Vendian of the Siberian Platform and Its Folded Frame. GEO, Novosibirsk, 428 p. (in Russian) [Мельников Н.В., Якшин М.С., Шишкин Б.Б., Ефимов А.О., Карлова Г.А., Килина Л.И., Константинова Л.Н., Кочнев Б.Б. и др. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Рифей и венд Сибирской платформы и ее складчатого обрамления. Новосибирск: Гео, 2005. 428 с.]

Petrov P.Yu., 1993. Depositional Environments of Lower Formations of the Riphean Sequence, Turukhansk Uplift. *Stratigraphy and Geological Correlation* 1 (2), 55–66 (in Russian) [Петров П.Ю. Условия накопления нижних свит рифея северной части Туруханского поднятия // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 1993. Т. 1. № 2. С. 55–66].

Powerman V., Shatsillo A., Chumakov N., Kapitonov I., Hourigane J., 2015. Interaction Between the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) and the Siberian Craton as Recorded by Detrital Zircon Suites from Transbaikalia. *Precambrian Research* 267, 39–71. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.05.015>.

Priyatkina N., Collins W.J., Khudoley A., Zastrozhnov D., Ershova V., Chamberlain K., Shatsillo A., Proskurnin V., 2017. The Proterozoic Evolution of Northern Siberian Craton Margin: A Comparison of U-Pb-Hf Signatures from Sedimentary Units of the Taimyr Orogenic Belt and the Siberian Platform. *International Geology Review* 59 (13), 1289341. <https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1289341>.

Priyatkina N., Collins W.J., Khudoley A.K., Letnikova E.F., Huang H.-Q., 2018. The Neoproterozoic Evolution of the Western Siberian Craton Margin: U-Pb-Hf Isotopic Records of Detrital Zircons from the Yenisey Ridge and the Prisayan Uplift. *Precambrian Research* 305, 197–217. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.12.014>.

Priyatkina N., Khudoley A.K., Collins W.J., Kuznetsov N.B., Huang H.-Q., 2016. Detrital Zircon Record of Meso- and Neoproterozoic Sedimentary Basins in Northern Part of the Siberian Craton: Characterizing Buried Crust of the Basement. *Precambrian Research* 285, 21–38. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.09.003>.

Priyatkina N.S., Kuznetsov N.B., Rud'ko S.V., Shatsillo A.V., Khudoley A.K., Romanyuk T.V., Maslov A.V., 2019. The Proterozoic Pogor'uy Formation of Yenisey Ridge: Age and Provenance Sources According to U/Pb Dating of Detrital

Zircons. *Doklady Earth Science* 484, 28–31. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19010136>.

Romanov M., Sovetov J.K., Vernikovskiy V.A., Rosenbaum G., Vernikovskaya A.E., Matushkin N.Yu., Kadilnikov P.I., Wilde S.A., 2020. Late Neoproterozoic Evolution of the Southwestern Margin of the Siberian Craton: Evidence from Sedimentology, Geochronology and Detrital Zircon Analysis. *International Geology Review* 63 (13), 1658–1681. <https://doi.org/10.1080/00206814.2020.1790044>.

Rosen O.M., Manakov A.V., Zinchuk N.N., 2006. Siberian Craton: Formation, and Diamond Potential. Nauchny Mir, Moscow, 210 p. (in Russian) [Розен О.М., Манаков А.В., Зинчук Н.Н. Сибирский кратон: формирование, алмазоносность. М.: Научный мир, 2006. 210 с.].

Rowland S.M., Luchinina V.A., Korovnikov I.V., Sipin D.P., Tarletskov A.I., Fedoseev A.V., 1998. Biostratigraphy of the Vendian–Cambrian Sukharikha River Section, Northwestern Siberian Platform. *Canadian Journal of the Earth Sciences* 35 (4), 339–352. DOI:10.1139/e98-002.

Rud'ko S., Kuznetsov N., Shatsillo A., Rud'ko D., Malyshev S., Dubensky A., Sheshukov V., Kanygina N., Romanuk T., 2020. Sturtian Glaciation in Siberia: Evidence of Glacial Origin and U-Pb Dating of the Diamictites of the Chivida Formation in the North Yenisei Ridge. *Precambrian Research* 345, 105778. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105778>.

Samsonov A.V., Sluzhenikin S.F., Larionova Yu.O., Larionov A.N., Erofeeva K.G., Polozov A.G., 2022. Active Margin 870 Ma in the Northwestern Siberian Craton: Data from Xenoliths in the Early Triassic Explosive Maslovskaya Diatreme, Norilsk Region. In: Problems of Tectonics and Geodynamics of the Earth's Crust and Mantle. Proceedings of the LIII Tectonic Meeting (February 1–5, 2022). Vol. 2. GEOS, Moscow, p. 168–171 (in Russian) [Самсонов А.В., Служеникин С.Ф., Ларионова Ю.О., Ларионов А.Н., Ерофеева К.Г., Полозов А.Г. Активная окраина 870 млн лет в северо-западной части Сибирского кратона: данные по ксенолитам из раннетриасовой эксплозивной Масловской диатремы, Норильский район // Тектоника и геодинамика земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2022: Материалы LIII Тектонического совещания (1–5 февраля 2022 г.). М.: ГЕОС, 2022. Т. 2. С. 168–171].

Semenova D.V., Vladimirov V.G., Karmysheva I.V., Yakovlev V.A., 2024. The Age of Early Collisional Granitoids of Western Sangilen (SE Tuva): Implications for Estimating the Duration of Orogeny at the Margin of the Tuva-Mongolian Massif. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (4), 0767 (in Russian) [Семенова Д.В., Владимиров В.Г., Кармышева И.В., Яковлев В.А. Возраст раннеколлизионных гранитоидов Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува): значение для оценки длительности орогенеза на окраине Тувино-Монгольского массива // Геодинамика и тектонофизика. 2024. Т. 15. № 4. 0767]. <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-4-0767>.

Sovetov J.K., 2018. Sedimentology and Stratigraphic Correlation of Vendian Deposits in the Southwestern Siberian Platform: Major Contribution of an Exocraton Clastic Source to Sedimentary Systems. *Lithosphere* 18 (1), 20–45 (in Rus-

sian) [Советов Ю.К. Седиментология и стратиграфическая корреляция вендских отложений на юго-западе Сибирской платформы: выдающийся вклад внешнего источника кластического материала в образование осадочных систем // Литосфера. 2018. Т. 18. № 1. С. 20–45]. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-1-020-045>.

State Geological Map of the Russian Federation, 2001. Tunguska-Turukhanskaya Series. Scale of 1:200000. Sheet Q-45-IX, X (Poloy). Explanatory Note. VSEGEI, Saint Petersburg, 84 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Серия Тунгусско-Туруханская. Лист Q-45-IX, X (Полой): Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2001. 84 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2016. Taimyro-Severozemelskaya Series. Scale of 1:1000000. Sheet S-46 (Tareya). Explanatory Note. VSEGEI, Saint Petersburg, 115 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000. Серия Таймыро-Североземельская. Лист S-46 (Тарей): Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2016. 115 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2018. Norilsk Series. Scale of 1:1000000. Sheet Q-45 (Igarka). Explanatory Note. VSEGEI, Saint Petersburg, 389 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Норильская. Масштаб 1:1000000. Лист Q-45 (Игарка): Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2018. 389 с.].

Vermeesch P., 2012. On the Visualization of Detrital Age Distribution. *Chemical Geology* 312–313, 190–194. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.04.021>.

Vernikovskaya A., Vernikovskiy V.A., Matushkin N., Kadilnikov P., Metelkin D.V., Romanova I., Li Z.-X., Bogdanov E., 2020. Early Ediacaran Magmatism in the Yenisei Ridge and Evolution of the Southwestern Margin of the Siberian Craton. *Minerals* 10, 565. <https://doi.org/10.3390/min10060565>.

Vernikovskaya A.E., Vernikovskiy V.A., Matushkin N., Kadilnikov P., Wingate M.T.D., Bogdanov E.A., Travin A.V., 2023. Cryogenian A-type Granites of the Yenisei Ridge – Indicators of Tectonic Transformation in the Southwestern Margin of the Siberian Craton. *Russian Geology and Geophysics* 64 (6), 647–668. <https://doi.org/10.2113/RGG20224532>.

Vernikovskiy V.A., Vernikovskaya A.E., Chernykh A.I., Sal'nikova E.B., Kotov A.B., Kovach V.P., Yakovleva S.Z., Fedoseenko A.M., 2001. Porozhnaya Granitoids of the Enisei Ophiolite Belt: Indicators of Neoproterozoic Events on the Enisei Ridge. *Doklady Earth Science* 381A (9), 1043–1046.

Vishnevskaya I.A., Letnikova E.F., Vetrova N.I., Kochnev B.B., Dril S.I., 2017. Chemostratigraphy and Detrital Zircon Geochronology of the Neoproterozoic Khorbusuonka Group, Olenek Uplift, Northeastern Siberian Platform. *Gondwana Research* 51, 255–271. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.07.010>.

Votakh O.A., 1968. The Precambrian Tectonics of the Western Margin of the Siberian Platform. Nauka, Moscow, 138 p. (in Russian) [Вотях О.А. Тектоника докембрия западной окраины Сибирской платформы. М.: Наука, 1968. 138 с.].