



**PROVENANCE AND AGE CONSTRAINTS OF THE RIPHEAN SANDSTONES  
FROM THE IVANOVSKY GRABEN (THE KOLA PENINSULA) BASED ON THE U-Pb LA-ICP-MS DATING  
AND RAMAN SPECTROSCOPY OF DETRITAL ZIRCON**

**A.V. Chistyakova** <sup>1,2✉</sup>, **R.V. Veselovskiy** <sup>1,2</sup>, **D.V. Semenova**<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia

<sup>2</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, 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

**ABSTRACT.** The results of U-Pb LA-ICP-MS dating of 150 detrital zircon grains from the Precambrian (Riphean?) sandstones of the Kildin group on the coast of the Ivanovka Bay (northeastern Kola Peninsula) are presented. A group of three youngest grains yielded constraint on the sandstone maximum depositional age of 1179±45 Ma. Detrital zircon age distribution is dominated by three maximums of 1.9, 2.4 and 2.7 Ga. The authors consider two complementary scenarios of interpretation of the data obtained. The first scenario involves the contribution of distant provenance out of granitoids in the Lapland-Kola orogen (~1.9 Ga) and adjacent areas of the Kola-Karelia region (~2.7 Ga), Imandra-Varzuga structure (~2.4 Ga), and Sveconorwegian belt (~1.2 Ga); the off-Baltic (Greenland?) sources of the detrital zircon also cannot be excluded. According to the second scenario, the Ivanovsky graben received zircons also from the proximal sources – sialic complexes formed upon melting of granite-gneiss substratum of the upper crust of the Murmansk craton during large-scale episodic mafic magmatism 1.86, 2.50 and 2.68 Ga. The Raman spectroscopy showed that about 25 % of the analyzed detrital zircon grains experienced a 1.4-Ga-old thermal effect which did not lead to Pb losses but partially restored the crystalline structure of zircon. This result can be used as an additional constraint in the detailed provenance analysis of the northeastern East European Platform sedimentary basins and is indicative of 1.4-Ga-old large-scale magmatic events related to the breakup of the supercontinent Nuna.

**KEYWORDS:** detrital zircon; U-Pb geochronology; Riphean; the Kola Peninsula; Ivanovsky graben; provenance; stratigraphic correlation; Raman spectroscopy

**FUNDING:** The study was supported by the RF President's grant MD-1116.2018.5 and RSF grant 16-17-10260-P, and carried out as part of research projects by state assignment of IPE RAS and Faculty of Geology of Lomonosov Moscow State University. The laboratory researches were conducted using equipment of Shared Research Facilities "Petrophysics, geomechanics and paleomagnetism" IPE RAS.

## RESEARCH ARTICLE

Received: November 21, 2021

Revised: March 31, 2022

Accepted: April 13, 2022

**Correspondence:** Alvina V. Chistyakova, [alvina.tch@gmail.com](mailto:alvina.tch@gmail.com)

**FOR CITATION:** Chistyakova A.V., Veselovskiy R.V., Semenova D.V., 2022. Provenance and Age Constraints of the Riphean Sandstones from the Ivanovsky Graben (the Kola Peninsula) Based on the U-Pb LA-ICP-MS Dating and Raman Spectroscopy of Detrital Zircon. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (5), 0669. doi:10.5800/GT-2022-13-5-0669

**Supplementary files:** [Chistyakova\\_et\\_al\\_suppl\\_1.pdf](#), [Chistyakova\\_et\\_al\\_suppl\\_2.pdf](#)

## ИСТОЧНИКИ СНОСА И ОГРАНИЧЕНИЕ ВОЗРАСТА РИФЕЙСКИХ ПЕСЧАНИКОВ ИВАНОВСКОГО ГРАБЕНА КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ U-Pb LA-ICP-MS ДАТИРОВАНИЯ И РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ОБЛОМОЧНОГО ЦИРКОНА

А.В. Чистякова<sup>1,2</sup>, Р.В. Веселовский<sup>1,2</sup>, Д.В. Семёнова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

<sup>2</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия

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

**АННОТАЦИЯ.** Приводятся первые результаты U-Pb LA-ICP-MS изотопного датирования 150 зерен обломочного циркона из докембрийских (рифейских?) песчаников кильдинской серии губы Ивановской северо-востока Кольского полуострова. По группе из трех самых молодых зерен получено нижнее ограничение на время накопления песчаников –  $1179 \pm 45$  млн лет. В распределении возрастов зерен циркона доминируют три максимума – 1.9, 2.4 и 2.7 млрд лет. Авторы рассматривают два взаимодополняющих варианта интерпретации полученных данных. Первый вариант предполагает вклад удаленных источников сноса – гранитоидов Лапландско-Кольского орогена (~1.9 млрд лет) и сопряженных с ними областей Карельско-Кольского региона (~2.7 млрд лет), Имандра-Варзугской структуры (~2.4 млрд лет), Свеконорвежского пояса (~1.2 млрд лет); вероятны также и внебалтийские (гренландские?) источники. Согласно второму варианту, в Ивановский грабен циркон поступал, в том числе, из проксимальных источников – сиалических комплексов, сформированных при плавлении гранитогнейсов верхней коры Мурманского кратона в ходе эпизодов масштабного базитового магматизма 1.86, 2.50 и 2.68 млрд лет назад. Методом рамановской спектроскопии показано, что примерно 25 % проанализированных зерен обломочного циркона около 1.4 млрд лет назад испытали воздействие термального события, не приведшего к потерям Pb, но частично восстановившего кристаллическую структуру циркона. Этот результат может использоваться как дополнительное ограничение при проведении детального анализа питающих провинций осадочных бассейнов северо-восточной части Восточно-Европейской платформы и указывает на масштабность проявления магматических событий около 1.4 млрд лет назад, связанных с распадом суперконтинента Нуна.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** обломочный (детритовый) циркон; U-Pb геохронология; рифей; Кольский полуостров; Ивановский грабен; питающие провинции; стратиграфическая корреляция; спектроскопия комбинационного рассеяния; рамановская спектроскопия

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Исследования выполнены при поддержке грантов Президента РФ МД-1116.2018.5 и РНФ 16-17-10260-П, а также в рамках НИР по государственному заданию ИФЗ РАН и геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Лабораторные исследования проведены с использованием оборудования и инфраструктуры ЦКП «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» ИФЗ РАН.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Терригенные комплексы рифея и венда Восточно-Европейской платформы (ВЕП) и ее обрамления – Урала, Тимана, Баренцевоморского побережья – в последние годы интенсивно изучаются методом U-Pb датирования обломочного циркона [Kuznetsov et al., 2021; Pystin et al., 2020; Soboleva et al., 2019; Andreichev et al., 2018; Udoratina et al., 2017; Mikhailenko et al., 2016; Zhang et al., 2016]. На северо-востоке ВЕП верхнедокембрийские терригенные породы развиты преимущественно в пределах палеорифтовой системы Белого моря, где они перекрыты комплексами венд-палеозойского чехла, вскрыты небольшим количеством скважин на неполную мощность, а их выходы на поверхность относительно немногочисленны. Анализ источников сноса верхнепротерозойских осадочных толщ области сочленения ВЕП и Баренцевоморской плиты, стратиграфия и геологическая корреляция которых до сих пор являются предметом дискуссий [Mikhailenko,

2016], – актуальная задача. Цель исследования – получение новых современных данных о U-Pb возрасте обломочного циркона из докембрийских терригенных толщ, обнажающихся на северо-востоке Кольского полуострова – в относительно малоисследованном районе Фенноскандии. Первой задачей работы являлась оценка нижнего возрастного предела накопления песчаников Ивановского грабена и реконструкция питающих их провинций. Действительно, относительно небольшой Ивановский грабен расположен так, что результаты изотопных U-Pb исследований обломочного циркона из слагающих его пород должны удачно дополнять уже имеющиеся соответствующие данные по рифейским осадочным комплексам Варангер-Тиманского пояса [Zhang et al., 2016; Mikhailenko et al., 2016; Soboleva et al., 2019; и ссылки в этих работах].

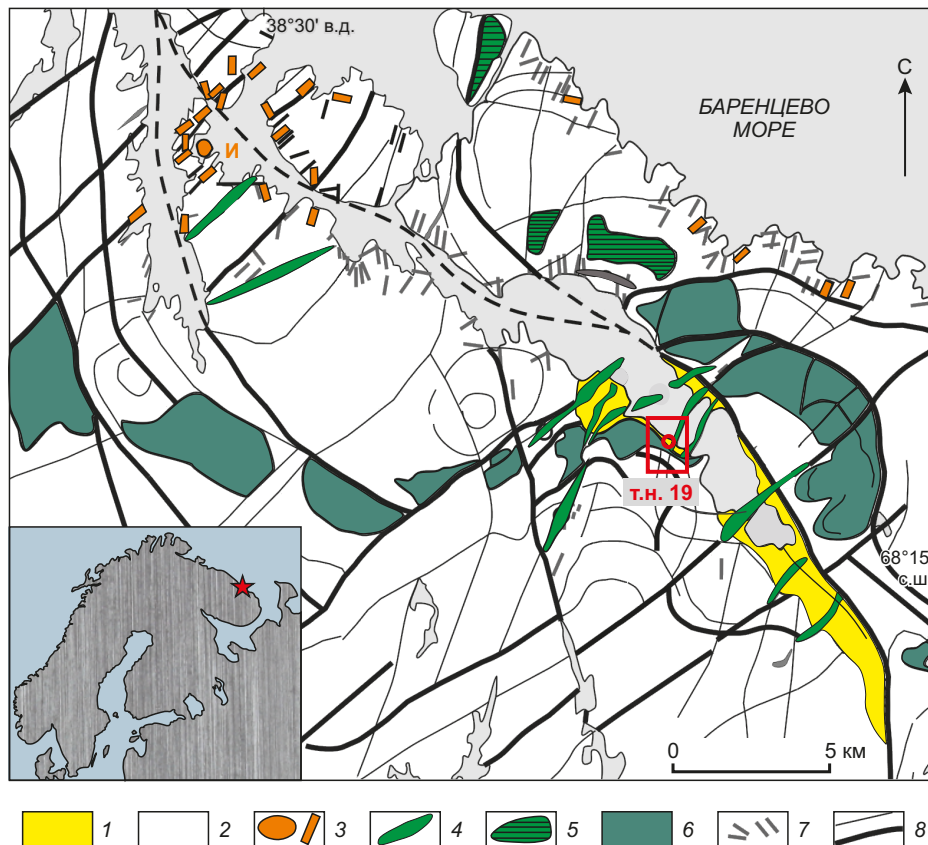
Всесторонний анализ осадочных бассейнов северо-восточной окраины ВЕП вызывает интерес, в том числе в контексте реконструкции этапов образования

и распада докембрийских суперконтинентов. Эти события нередко маркируются масштабными проявлениями эндогенной активности и могут быть зафиксированы в термальной истории осадочных бассейнов. Изучение зерен обломочного циркона методом рамановской спектроскопии (спектроскопии комбинационного рассеяния), как показано в работе [Resentini et al., 2020], – эффективный инструмент для выявления наложенных термальных событий в пределах питающих провинций и/или в бассейне осадконакопления. В основе этого подхода лежит понятие степени кристалличности зерен циркона, которая убывает с течением времени вследствие накопления радиогенных дефектов в кристаллической решетке минерала, однако может быть частично или полностью восстановлена при термальном воздействии. Для экспрессного определения степени кристалличности (метамиктности) зерен циркона используется метод рамановской спектроскопии. Возраст термальных событий может быть использован для расшифровки эволюции осадочных

бассейнов, а также как дополнительное ограничение для локализации питающих провинций и построения палеотектонических реконструкций. В связи с этим перед настоящим исследованием также стояла задача выявления термальных событий, оказавших воздействие на структуру обломочного циркона из исследуемых осадочных пород Ивановского грабена, и оценки возраста этих событий. Отметим, что определение степени кристалличности зерен обломочного циркона методом спектроскопии комбинационного рассеяния в России ранее не проводилось.

**2. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Мурманский позднеархейский кратон, в пределах которого расположен объект исследования, занимает краевое положение в северо-восточной части Балтийского щита и с юго-запада ограничен крупной шовной зоной Колмозеро-Воронья. Процессы корообразования завершились в пределах Мурманского кратона около 2.8–2.7 млрд лет назад [Kozlov et al., 2006], после чего



**Рис. 1.** Обзорная карта района исследования по [Terekhov et al., 2012].  
 1 – рифейские осадочные породы; 2 – гранитогнейсы Мурманского блока AR-PR<sub>1</sub>; 3 – девонский Ивановский щелочной массив (И) и щелочные дайки; 4–5 – девонские долериты: дайки (4) и силлы (5); 6 – интрузии пойкилоофитовых долеритов (баренцевоморский комплекс, 1860 млн лет); 7 – дайки основного состава (РЄ); 8 – структурные линии и разломы; т.н. 19 – точка отбора пробы. Врезка: красная звезда на контуре Фенноскандии – место отбора пробы.

**Fig. 1.** A sketch tectonic map of the studied region (after [Terekhov et al., 2012]).  
 1 – Riphean sedimentary rocks; 2 – AR-PR<sub>1</sub> granite-gneisses of the Murmansk craton; 3 – Devonian Ivanovsky alkaline massifs (И) and alkaline dikes; 4–5 – Devonian intrusions: dikes (4) and sill (5); 6 – pea-textured dolerites (Barents Sea complex, 1860 Ma); 7 – Precambrian mafic dikes; 8 – structural lines and faults; т.н. 19 – sampling site. Insert: a red star on the scheme of Fennoscandia marks the sampling site.

он неоднократно служил ареной масштабных проявлений основного магматизма, следы которых обнаруживаются сегодня в виде дайковых роев с возрастом 2.68 и 2.50 млрд лет [Arzamastsev et al., 2020], а также крупных пластовых интрузий пойкилоофитовых долеритов, возраст которых составляет 1.86 млрд лет [Veselovskiy et al., 2019]. Ивановский грабен находится на северо-востоке Кольского полуострова в пределах Йоканьгского блока Мурманского кратона (рис. 1), а выполняющие его терригенные породы по структурно-литологическим признакам относятся к кильдинской серии верхнего рифея п-ова Средний и локализованы в одноименной структурной зоне, отделяемой от расположенной севернее более древней Рыбачинской зоны линеаментом Тролльфьорд-Рыбачий-Канин [Baluev et al., 2016]. Материал для U-Pb датирования зерен циркона был отобран в юго-восточной части губы Ивановской Баренцева моря, в точке с координатами (68.26132° с.ш., 38.73448° в.д.), где мощная (около 60 м) долеритовая дайка девонского возраста [Veselovskiy et al., 2016] прорывает терригенные породы, выполняющие грабен. Обнажение, видимой мощностью около 3 м, представлено среднезернистыми плотными кварцевыми песчаниками, цвет которых варьируется от светло-серого до белого; по мере удаления от зоны экзоконтакта на расстояние около 50 м цвет пород становится чуть красноватым. Залегание песчаников составляет ССВ 20°, угол падения 10°. Контакт с комплексами кристаллического фундамента устанавливается по высыпкам в берегах р. Ивановка к юго-востоку от точки наблюдения, зона непосредственного контакта с долеритовой дайкой также не обнажена. Проба весом около 1 кг, из которой были выделены проанализированные зерна обломочного циркона, представляла собой обрезки палеомагнитных образцов, отобранных для выполнения теста обжига (контакта) на расстоянии 10–50 м от дайки. Гипсометрически выше опробованных кварцевых песчаников, примерно в 2 км на северо-запад вдоль побережья губы Ивановской от точки отбора пробы, обнажается пачка переслаивающихся буро-серых аргиллитов и алевролитов, видимой мощностью 6–8 м. Стратиграфическое взаимоотношение между породами указанных обнажений установить не удалось.

Все аналитические операции, связанные с U-Pb датированием циркона, реализовывались на базе Центра многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Среди выделенных по стандартной методике (с использованием бромформа и электромагнитной сепарации) минералов тяжелой фракции для U-Pb датирования произвольным образом было отобрано 150 зерен циркона размерной фракции 100–200 мкм (рис. 2, а). Особенности внутреннего строения и морфологии зерен циркона устанавливались на оборудовании ЦКП ИФЗ РАН [Veselovskiy et al., 2022] при помощи оптической и электронной микроскопии, в рамках последней анализировались катодолюминесцентные изображения (CL) и изображения в обратнорассеянных электронах (BSE). U-Pb датирование

методом лазерной абляции на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (LA-ICP-MS) реализовано с использованием системы лазерной абляции NWR-213 и магнитно-секторного масс-спектрометра Element XR (Thermo Scientific). Диаметр кратера составлял 25 мкм при длительности каждого измерения 70 с (40 с – холостой по газу, 30 с – абляция). Настройка оптимальных значений операционных параметров масс-спектрометра и лазерной приставки проводилась по стандартному синтетическому стеклу NIST SRM 612. Изотопный анализ зерен сопровождался регулярным измерением двух стандартных образцов циркона – Harvard 91500 и Plešovice [Wiedenbeck et al., 1995; Sláma et al., 2008]. По стандартному циркону Harvard 91500 проводилась калибровка, а по контрольному стандарту Plešovice была получена конкордантная оценка возраста, согласующаяся с оценкой, полученной методом ID-TIMS [Sláma et al., 2008]:  $337 \pm 3$  млн лет ( $2\sigma$ ). Расчет изотопных отношений производился в программе Glitter [Griffin et al., 2008], а средневзвешенные значения возраста получены с помощью программы Isoplot/Ex v. 3.75 [Ludwig, 2008]. Для дальнейшей интерпретации были использованы оценки U-Pb возраста для 141 зерна, обладающие дискордантностью менее  $\pm 10\%$  и рассчитанные по изотопному отношению  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  (так как все зерна древнее 1 млрд лет).

Рамановская спектроскопия выполнялась в Центре коллективного пользования Института физики Земли РАН (г. Москва): к исследуемой выборке зерен циркона была применена методика, детально описанная в работе [Resentini et al., 2020]. Данная методика основывается на взаимосвязи параметров рамановского спектра, рассчитанной  $\alpha$ -дозы излучения и U-Pb изотопного возраста зерен циркона. Положение и ширина на полувысоте (FWHM, full width at half maximum) диагностического пика  $\nu_3$  ( $\text{SiO}_4$ ), проявляющегося в цирконе с неповрежденной кристаллической структурой на величине рамановского сдвига около  $1008\text{ см}^{-1}$ , отражают степень метамиктности зерна [Nasdala et al., 2001]. Съемка спектров проводилась с использованием рамановской приставки EnSpectr R532 к прямому оптическому микроскопу Olympus BX53M: длина волны лазера составляла 532 нм, мощность – 30 мВт, использовался 50-кратный объектив, экспозиция – 0.5 с по 20 циклов. Так как получение рамановских спектров проводилось уже после U-Pb LA-ICP-MS датирования, авторы старались исследовать области зерен, находящиеся на расстоянии не менее 20 мкм от кратера лазерной абляции, аналогичные по характеру внутренней структуры. Необходимые параметры для каждого спектра рассчитывались в программе Origin, форма пика  $\nu_3$  аппроксимировалась функцией псевдо-Фойгта.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

#### 3.1. Характеристика зерен циркона

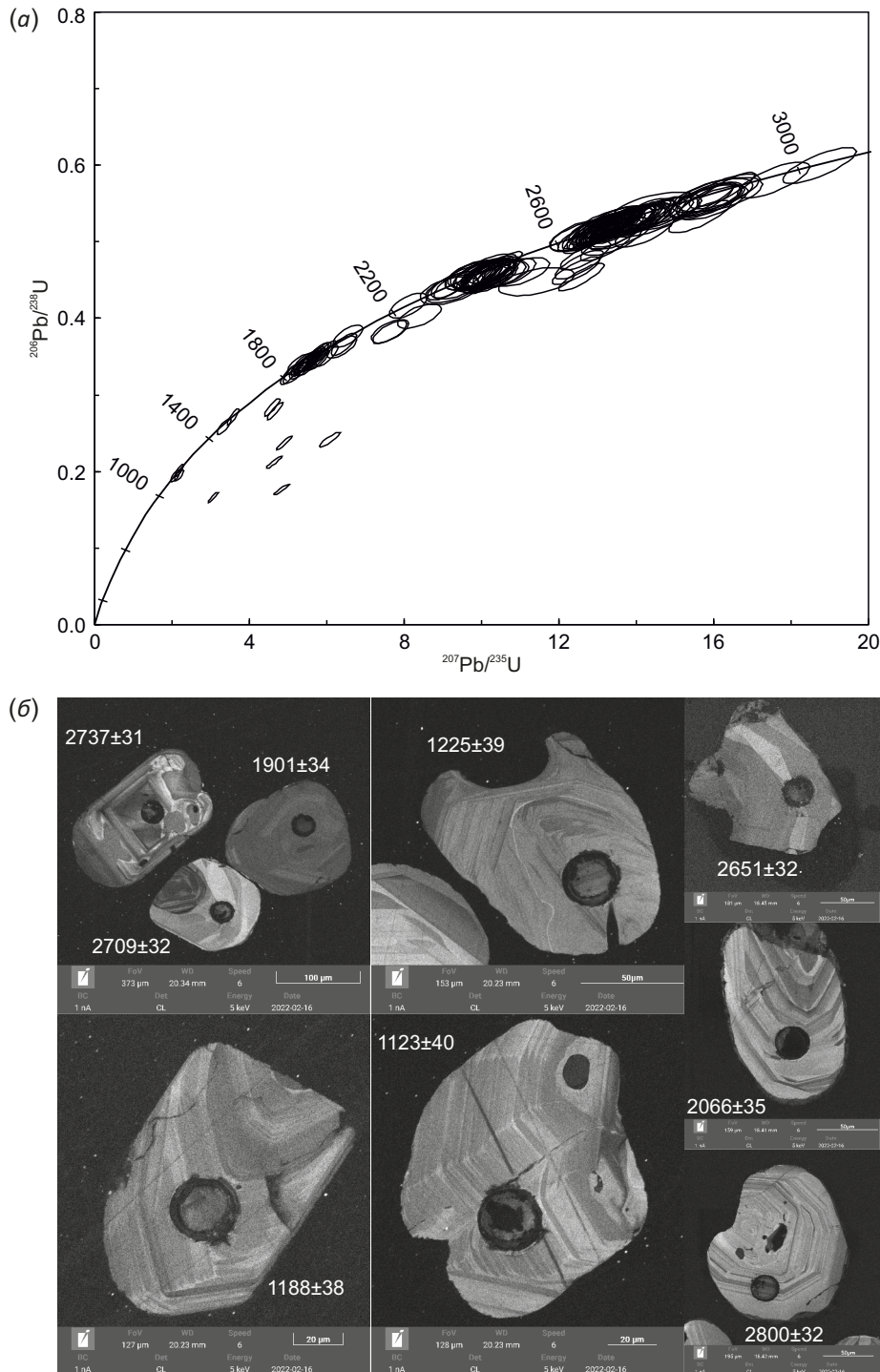
Анализируемая выборка представлена прозрачными и полупрозрачными полуокатанными, реже – окатанными зернами циркона. Местами развито ожелезнение



по трещинам, придающее слабый ржаво-коричневый неравномерный окрас отдельным индивидам. Крупные (десятки микрон) кристаллические включения немногочисленны; также отмечаются серии мелких (видимо, вторичных) черных и бурых включений. Свыше 90 % выборки представлено обломками кристаллов

циркона. Коэффициент удлинения, рассчитанный для целых кристаллов, варьируется от 1.2 до 3.0.

Циркон из исследованных песчаников Ивановского грабена характеризуется значительным разнообразием внутреннего строения, что, в первую очередь, иллюстрируют CL-изображения (рис. 2, б; см. Suppl. 1



**Рис. 2.** Диаграмма с конкордией для 150 датированных зерен циркона из песчаников грабена губы Ивановской (эллипсы соответствуют доверительному интервалу  $2\sigma$ ) (а) и примеры катодоллюминесцентных изображений зерен циркона с отмеченными U-Pb оценками возраста (б).

**Fig. 2.** Concordia diagram illustrating the study results for the U-Pb isotope system of the 150 analyzed detrital zircons from the Ivanovsky graben sandstones (ellipses show a  $2\sigma$  confidence interval) (a) and CL images of representative zircons with U-Pb ages (b).

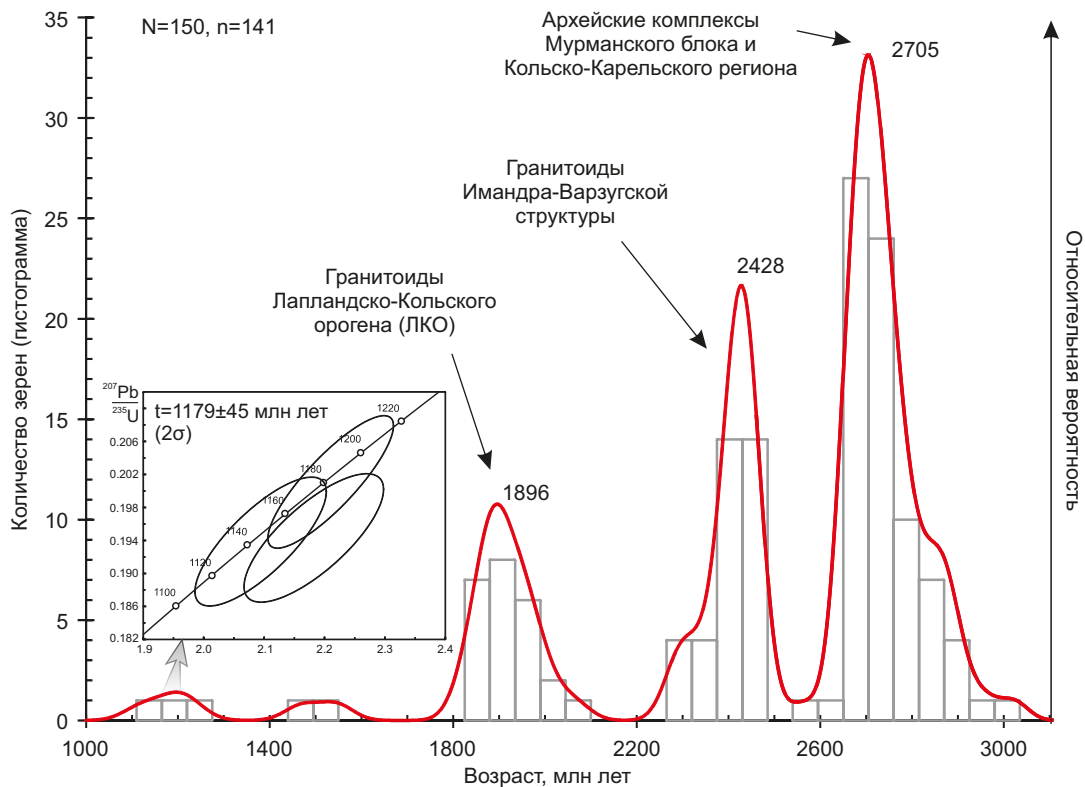
на странице статьи). Наиболее многочисленны (около 30 %) зерна с грубой и/или нерегулярной ритмичной зональностью. Менее 10 % зерен обладают четкой тонкой осцилляторной зональностью, характерной для циркона магматического генезиса. В ряде случаев отмечаются контрастные по интенсивности люминесценции и внутреннему строению более молодые каймы, а также «пятнистый» характер зональности. Обращает на себя внимание представительная группа зерен со сложным строением, в которых часто можно выделить отдельные секторы роста, разделяемые неровными границами. Встречается и однородный (полностью либо участками) в режиме катодолюминесценции циркон без признаков зональности. Подобная широкая вариативность характера внутреннего строения свидетельствует о разнообразии условий формирования и последующей истории преобразований отдельных индивидов.

Концентрации U и Th в исследованных зернах варьируются в пределах 22–543 и 12–562 ppm соответственно (Suppl. 2, табл. 2.1). Среди рассчитанных Th/U отношений однозначно доминируют значения, как правило

характерные для циркона кислых и/или средних пород магматического генезиса (0.1–1.5).

### 3.2. U-Pb датирование

Полученные оценки U-Pb возраста циркона расположены в широком диапазоне – 3022–1123 млн лет (рис. 3; Suppl. 2, табл. 2.1). Однако раннесреднерифейский интервал представлен всего пятью зернами. Основная часть выборки (97 %) формирует полимодальное распределение с тремя выраженными пиками, разделенными глубокими минимумами. Доминирующей является группа позднеархейских зерен (54 %) с модальным значением 2705 млн лет. В свою очередь, раннепротерозойская популяция образует два пика – 2428 и 1896 млн лет (26 и 17 % соответственно). Следует отдельно отметить присутствие циркона с изотопным возрастом непосредственно около 1.86 млрд лет (7–9 зерен) и 2.68 млрд лет (26–30 зерен) с учетом погрешности определения. В каждой из перечисленных субпопуляций есть зерна с различными морфоструктурными характеристиками, поэтому сложно выделить признаки, свойственные циркону определенной



**Рис. 3.** Распределение возрастов зерен обломочного циркона из песчаников Ивановского грабена. N – общее количество проанализированных зерен, n – количество оценок U-Pb возраста с дискордантностью менее ±10 %. Числами обозначены максимумы трех основных возрастных групп (млн лет), для которых приводятся наиболее вероятные источники поступления обломочного материала [Daly et al., 2006; Arzamastsev et al., 2020]. На врезке показана диаграмма с конкордией для трех самых молодых зерен циркона и приведено средневзвешенное значение их возраста, рассчитанное по отношению  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ .

**Fig. 3.** Detrital zircon U-Pb age distribution from the Ivanovsky graben sandstones. N – a total number of grains analyzed; n – a number of grains having discordance ±10 %. The numbers mark three main age peaks (Ma) and the most probable detrital zircon provenance [Daly et al., 2006; Arzamastsev et al., 2020]. The sidebar shows the concordia diagram for the three youngest zircon grains and their mean age, calculated by the  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  ratio.

возрастной группы. Можно отметить, что секториальная зональность, сложные заливки и каймы закономерно чаще наблюдаются у архейских зерен циркона. В то же время изотопный возраст почти всех однородных в катодоллюминесценции индивидов находится в пределах 2.3–2.5 млрд лет.

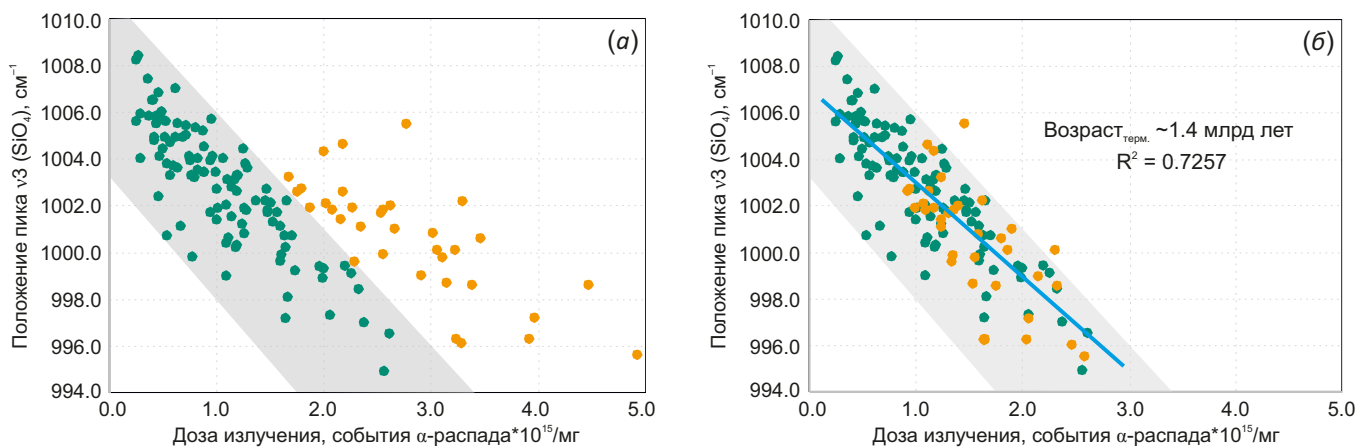
### 3.3. Рамановская спектроскопия

Дополнительно охарактеризовать потенциальные питающие провинции позволяет рамановская спектроскопия [Resentini et al., 2020]. Альфа-распад U и Th в цирконе приводит к закономерно возрастающей величине его метамиктности с течением времени. Накопленная доза излучения рассчитывается исходя из возраста циркона и концентрации радиоизотопов и в общем случае линейно связана с кристалличностью. Однако при длительном воздействии относительно невысокой температуры (порядка 150–200 °C) кристаллическая структура циркона может частично или полностью восстанавливаться без потери радиогенного свинца (простой термический отжиг без участия флюидов) [Nasdala et al., 2001]. В этом случае степень метамиктности зерна может значительно отличаться от ожидаемой для соответствующего возраста, что дает возможность фиксировать более поздние термальные события, воздействовавшие на циркон после запуска в нем радиоактивных часов.

Степень кристалличности циркона находит отражение в характеристиках рамановских спектров, в первую очередь в величине рамановского сдвига и ширине

на полувысоте пика  $\nu_3$  ( $\text{SiO}_4$ ), проявляющегося для зерен высокой степени кристалличности в значении сдвига  $\sim 1008 \text{ см}^{-1}$ . При этом, чем больше нарушена кристалличность циркона, тем менее интенсивными, более широкими и смещенными в сторону меньших значений рамановского сдвига становятся все основные пики спектра, в том числе диагностический пик «1008» [Nasdala et al., 2001].

Результаты проведенных авторами исследований (Suppl. 2, табл. 2.2) показали, что около 80 % всех проанализированных зерен циркона характеризуются высокой степенью кристалличности (рамановский сдвиг пика  $\nu_3$  находится в интервале  $1008\text{--}1000 \text{ см}^{-1}$ , FWHM  $5\text{--}10 \text{ см}^{-1}$ ). Метамиктных зерен с рамановским сдвигом в пределах  $1000\text{--}990 \text{ см}^{-1}$  и FWHM  $10\text{--}20 \text{ см}^{-1}$  фиксируется значительно меньше – около 20 %. Полностью метамиктные аморфные зерна отсутствуют. На диаграмме взаимосвязи положения пика  $\nu_3$  ( $\text{SiO}_4$ ) и накопленной дозы альфа-излучения (рис. 4, а) большинство зерен попадает в область, ожидаемую для не подверженного отжигу циркона с высокой степенью кристалличности (зеленые точки на рис. 4, а). Однако около 25 % точек анализа (оранжевые точки на рис. 4, а) значительно отклоняются от этого поля и, следовательно, указывают на наличие температурного воздействия, частично восстановившего кристалличность данных зерен циркона. Путем эмпирического пересчета дозы излучения по алгоритму из работы [Resentini et al., 2020] приблизительный возраст этого термального события был определен как 1.4 млрд лет. Возраст термального



**Рис. 4.** Зависимость положения пика  $\nu_3$  ( $\text{SiO}_4$ ) от накопленной дозы альфа-излучения: (а) – изначально полученная для исследованной выборки зерен циркона, (б) – после процедуры итеративной оценки возраста наложенного термального события. Серое поле – область ожидаемых значений для циркона, не подверженного термическому отжигу [Nasdala et al., 2001]. Зеленые точки – зерна, попадающие в область ожидаемых значений для неотожженного циркона. Оранжевые точки – зерна, для которых степень метамиктности не соответствует ожидаемой исходя из дозы альфа-излучения и значения U-Pb возраста.  $R^2$  – величина достоверности линейной аппроксимации. Возраст<sub>терм.</sub> – полученная оценка возраста предполагаемого термального события.

**Fig. 4.** Relationship between  $\nu_3$  ( $\text{SiO}_4$ ) Raman peak position and accumulated alpha-dose: (а) – initially obtained for the studied zircon grains, (б) – after iterative estimation of the superimposed thermal event age. The grey area represents the range of expected values of un-annealed zircon grains [Nasdala et al., 2001]. Green dots correspond to the grains, which fall within the range of expected values of un-annealed zircons. Orange dots are the grains whose metamictization degree is lower than that expected from calculated alpha-dose and U-Pb age.  $R^2$  – linear approximation confidence value. Возраст<sub>терм.</sub> – age estimate obtained for the inferred thermal event.

события вычислялся таким образом, чтобы при аппроксимации облака зеленых и оранжевых точек по методу наименьших квадратов значение величины достоверности аппроксимации  $R^2$  было максимальным (рис. 4, б). При анализе катодоллюминесцентных изображений циркона никаких особенностей, свойственных только подверженным температурному воздействию зернам, не выявлено, что неудивительно, поскольку восстановление кристалличности предполагается по механизму простого термического отжига без флюидного воздействия.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

##### 4.1. Реконструкция источников сноса

Учитывая морфологические особенности зерен циркона и высокую зрелость песчаника, можно предполагать интенсивную переработку осадка в пределах мелководья в условиях активной гидродинамики. Косвенным свидетельством неоднократного переотложения материала среди прочего служит пониженное значение отношения  $K_2O/Al_2O_3$  (0.1–0.2), поэтому оценить удаленность питающих провинций по степени окатанности циркона невозможно.

Являясь крупнейшей областью, доступной для непосредственного изучения докембрийской истории ВЕП, Фенноскандия характеризуется наличием многочисленных результатов изотопного датирования. При этом закономерно, что возраст детритового циркона из терригенных пород Кольского полуострова в первую очередь соотносят с гранитоидами Балтийского щита, что позволяет предполагать ведущую роль Фенноскандии как источника кластического материала для рифейского выполнения осадочных бассейнов Варангер-Тиманского пояса. Так, гранитоиды позднеархейского возраста (2.9–2.6 млрд лет) широко развиты в пределах непосредственно Мурманского блока, а также распространены во всем Карельско-Кольском регионе [Daly et al., 2006]. Значения изотопного возраста 2.66–2.68 млрд лет характерны для сиалических комплексов Кейвского блока [Balagansky et al., 2021]. В свою очередь, оценки U-Pb возраста циркона в интервале 2.5–2.3 млрд лет коррелируют со временем формирования пород среднего и кислого состава Печенга-Имандра-Варзугского пояса [Arzamastsev et al., 2020], а популяция зерен со значениями возраста 2.0–1.8 млрд лет, вероятно, связана с размывом раннепротерозойского Лапландско-Кольского орогена [Daly et al., 2006].

Вместе с тем в рамках обозначенных этапов тектономагматической активности Северо-Восточной Фенноскандии не менее известны масштабные проявления мафического магматизма: гранитоидная рама Мурманского кратона пронизана многочисленными, нередко мощными (десятки метров) интрузивными телами основного состава позднеархейско-раннепротерозойского возраста. Их внедрение могло инициировать плавление вмещающих пород и образование кислых разностей, содержащих в том числе «первичный» циркон

соответствующего возраста – 2.68, 2.50 и 1.86 млрд лет. Подобный сценарий рассмотрен, например, в работе [Gladkochub et al., 2013]. Сейчас предполагаемые кислые магматические комплексы полностью эродированы, однако характерные фельзитовые жилы, секущие долеритовые дайки, встречаются достаточно часто (А.В. Самсонов, устное сообщение).

Подобные экзотические источники детритового циркона рассматриваются нами в силу чрезвычайного разнообразия морфоструктурных особенностей зерен из терригенных пород северо-восточной окраины ВЕП (здесь во внимание принимаются все ранее опубликованные данные). И если для Ивановского грабена поступление материала из проксимальных областей маловероятно, то наличие многочисленных (суб)идиоморфных индивидов и зерен с выраженным древним ядром в некоторых других верхнедокембрийских литокомплексах (например, в лонской свите п-ова Рыбачий [Mikhailenko, 2016]) может указывать на локальность питающих провинций и генетическое разнообразие циркона.

В качестве вероятных материнских пород «молодых» цирконов традиционно рассматриваются сиалические комплексы Свеконорвежского орогена [Bingen et al., 2021], но авторы также не исключают менее удаленные источники сноса. Последние могут представлять собой террейны, либо перекрытые покровами каледонид [Roberts, Siedlecka, 2012], либо отделенные и значительно перемещенные после распада Родинии, а также комплексы, в настоящее время слагающие фундамент Тимано-Печорского региона [Pystin et al., 2020, и ссылки в этой работе].

##### 4.2. Возрастные ограничения осадконакопления и термальная история песчаников Ивановского грабена

Нижний возрастной предел седиментации исследованных песчаников был рассчитан как средневзвешенный возраст по отношению  $^{207}Pb/^{206}Pb$  для группы из трех самых молодых зерен (см. рис. 3, врезка) и оценивается в  $1179 \pm 45$  млн лет ( $2\sigma$ , СКВО=1.7, вероятность=0.18). Таким образом, терригенные отложения грабена Ивановской губы не могут быть древнее среднего рифея. В то же время надежным верхним возрастным ограничением могут служить только определение изотопного возраста девонских долеритовых даек [Veselovskiy et al., 2016], которые прорывают осадочные породы, выполняющие грабен.

Группа частично отожденных ~1.4 млрд лет назад обломочных зерен циркона, диагностированных по результатам рамановской спектроскопии, включает в себя циркон с изотопным возрастом от 1.87 до 2.89 млрд лет, т.е. охватывает все три основные возрастные популяции (см. рис. 3). Заметим, что наличие неотоженных зерен циркона исключает возможность прогрева песчаников после их аккумуляции в пределах Ивановского грабена. Таким образом, наблюдаемые признаки отжига кристаллической структуры минерала являются

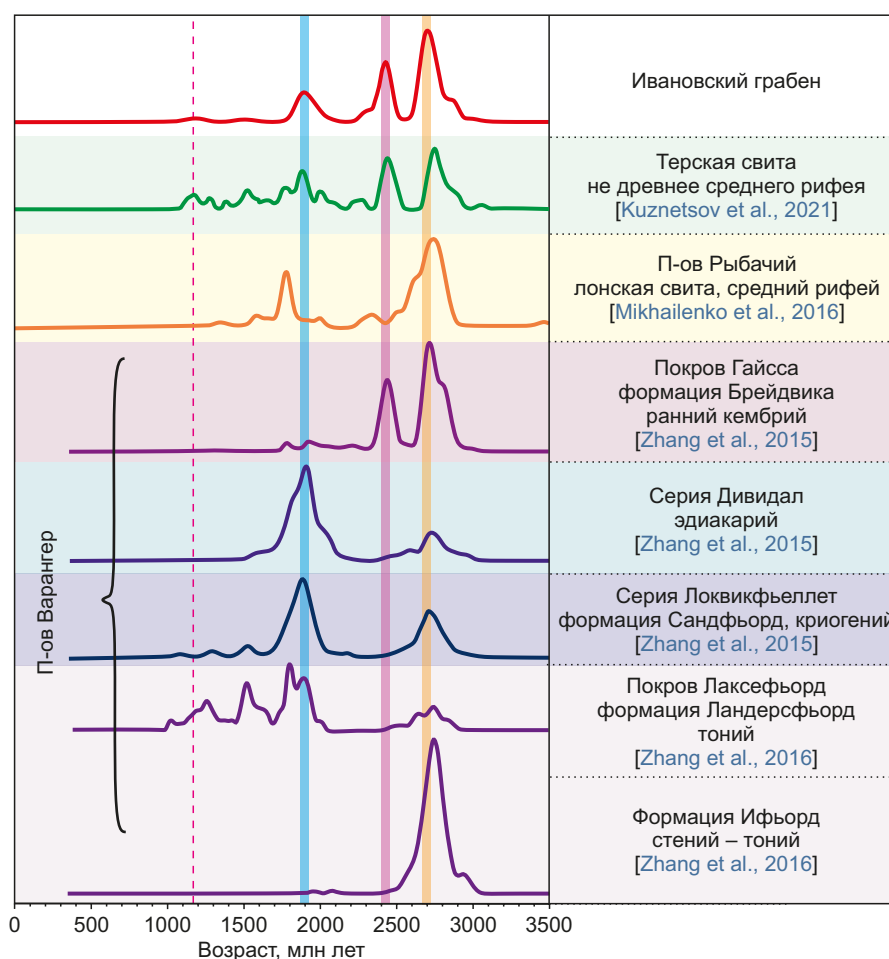


отличительной чертой одного из источников сноса, который должен либо объединять на локальной площади кристаллические комплексы с возрастом около 1.9, 2.4 и 2.7 млрд лет, либо представлять собой промежуточный терригенный комплекс, циркон из которого в дальнейшем был переотложен при формировании исследуемых песчаников.

Следы крупномасштабных магматических событий с возрастом около 1.4 млрд лет фиксируются в пределах Гренландии, Северной Америки, Сибири, норвежской и юго-восточной периферии Балтики [Malyshev et al., 2021; Bingen et al., 2021], что дает возможность предполагать и внебалтийские (гренландские?) источники сноса. В этом случае верхняя граница осадконакопления

в Ивановском грабене может быть косвенно оценена временем раскрытия океанического бассейна между Балтикой и Лаврентией, имевшего место около 630 млн лет назад [Li et al., 2008].

Интересно отметить, что девонский магматизм никак не отразился в термальной истории обломочного циркона песчаников Ивановского грабена, даже несмотря на то, что исследованные образцы отбирались в непосредственной близости (десятки метров) от мощной девонской дайки. Это наблюдение находит свое подтверждение в результатах трекового анализа апатита Кольского п-ова [Veselovskiy et al., 2019], а также в наличии первичной палеомагнитной записи в породах пачки переслаивающихся буро-серых аргиллитов



**Рис. 5.** Схема корреляции нормализованных спектров возрастов детритового циркона из верхнедокембрийских пород обрамления Кольского п-ова, сопоставимых с распределением, полученным для кварцевых песчаников губы Ивановской. Цветными полосами маркируются три основных возрастных максимума последнего. Пунктирная линия соответствует значению нижнего возрастного предела осадконакопления в Ивановском грабене – 1179 млн лет. Приводимые возрасты толщ не имеют надежного обоснования, только для формации Брейдвика имеются палеонтологические свидетельства. Часть возрастов указана в терминах Международной стратиграфической шкалы в соответствии с данными первоисточников [Kuznetsov et al., 2021; Mikhailenko et al., 2016; Zhang et al., 2015, 2016].

**Fig. 5.** Correlation of the normalized distributions of U-Pb ages obtained for detrital zircon from the Upper Precambrian rocks along the margins of the Kola Peninsula and comparable to the distribution obtained for quartz sandstones of the Ivanovskiy graben. Three main age peaks of the last one are marked with colored bands. The dotted line represents the maximum depositional age of the Ivanovskiy graben strata – 1179 Ma. The cited depositional ages don't have reliable substantiation; the paleontological evidence was only found for the Breidvik Formation. Some depositional ages are given in terms of International Chronostratigraphic Chart according to the primary sources [Kuznetsov et al., 2021; Mikhailenko et al., 2016; Zhang et al., 2015, 2016].

и алевролитов [Veselovskiy, 2016], находящейся в 2 км от объекта исследования, залегающей гипсометрически выше и прорванной аналогичной дайкой девонского возраста.

#### 4.3. Корреляция с верхнедокембрийскими литокомплексами Варангер-Тиманского пояса

Полученное для терригенных пород Ивановского грабена распределение возрастов детритового циркона было сопоставлено с возрастными спектрами верхнедокембрийских терригенных толщ Тимана [Soboleva et al., 2019; Andreichev et al., 2018; Udoratina et al., 2017; Kuznetsov et al., 2010], полуостровов Средний и Рыбачий [Mikhailenko et al., 2016; Mikhailenko, 2016], п-ова Варангер [Zhang et al., 2015, 2016], а также терской свиты [Kuznetsov et al., 2021]. Как правило, корреляция графиков отрицательная, в первую очередь в связи с главенствующей долей позднепротерозойских значений изотопного возраста для циркона из терригенных пород Варангер-Тиманского пояса, поэтому из всех опубликованных на настоящий момент спектров возрастов обломочного циркона нами были отобраны только те, которые могут быть сопоставлены со спектром U-Pb возрастов циркона песчаников губы Ивановская (рис. 5). Наилучшим образом результаты U-Pb датирования циркона песчаников Ивановского грабена согласуются со спектром, полученным для красноцветов терской свиты [Kuznetsov et al., 2021]: три основных моды, а также средневзвешенный возраст самых молодых зерен в этих двух пробах аналогичны. Вместе с тем проведенный статистический тест Колмогорова-Смирнова (KS-тест) указывает на значимые различия питающих провинций этих двух стратонов (вероятность  $p=0.001$ ). Несмотря на элементы визуального сходства остальных спектров возрастов детритового циркона, корреляция Ивановского грабена с литокомплексами северо-востока Кольского п-ова очень слабая. Также следует обратить внимание на то, что некоторые сопоставляемые комплексы – формация Сандфьорд и лонская свита – занимают существенно иную геологическую позицию и относятся, соответственно, к структурно-формационным зонам (СФЗ) Баренц-Си и Рыбачинская, отделенным от Кильдинской СФЗ крупным структурным швом Тролльфьорд-Рыбачий-Канин [Valuev et al., 2016; Zhang et al., 2015].

Особо следует отметить характерное для подавляющего большинства распределений возраста обломочного циркона отсутствие значений  $\sim 2.4$  млрд лет (рис. 5). Исключение составляет возрастная спектр терской свиты, где зерна соответствующего возраста формируют выраженный максимум. Подобный доминантный пик также проявлен в породах формации Брейдвика (п-ов Варангер), при этом сходство с возрастными характеристиками источников сноса Ивановского грабена в этом случае косвенно подчеркивается результатами KS-теста: вероятность  $p=0.099$ . Тем не менее возраст кварцито-песчаников Брейдвика по фаунистическим остаткам определен как раннекембрийский

[Högström et al., 2013], и по структурно-формационным признакам эти породы не сопоставимы с рифейским (рифей-вендским?) выполнением грабена губы Ивановской. Обнаруженная общность характера возрастных спектров может указывать на терригенные комплексы района Ивановского грабена как на еще один возможный источник обломочного материала формации Брейдвика.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые выполнено U-Pb LA-ICP-MS датирование и исследование методом рамановской спектроскопии 150 зерен обломочного циркона из докембрийских песчаников Ивановского грабена, расположенного на северо-востоке Кольского полуострова. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Нижнее ограничение возраста песчаников кильдинской серии Ивановского грабена составляет  $1179 \pm 45$  млн лет (средний рифей).

2. Распределение оценок U-Pb возраста обломочного циркона включает временные интервалы 2.9–2.6, 2.5–2.3 и 2.1–1.8 млрд лет с модальными значениями, соответственно, 2.71, 2.43 и 1.90 млрд лет. Также присутствуют единичные зерна с возрастом  $\sim 1.5$  и  $\sim 1.2$  млрд лет.

3. Наиболее вероятными источниками циркона являются гранитогнейсы Мурманского кратона (2.7 млрд лет), сиалические породы Кейвского блока и Печенга-Имандра-Варзугского пояса (2.4 млрд лет), гранитоиды Лапландско-Кольского орогена (1.9 млрд лет). Кислые вулканы и малоглубинные интрузивы, генетически связанные с крупными этапами базитового магматизма в пределах Кольского полуострова (2.68 и 1.86 млрд лет), предложены в качестве потенциальных прокси-мальных источников обломочного материала.

4. Полученное распределение возрастов зерен циркона из песчаников Ивановского грабена слабо коррелирует с возрастными спектрами для докембрийских терригенных комплексов Варангер-Тиманского пояса.

5. В пределах одной из питающих провинций, породы которой содержали циркон всех трех основных возрастных популяций – 1.9, 2.4 и 2.7 млрд лет, фиксируется низкотемпературное термальное событие, проявившееся около 1.4 млрд лет назад. Удаленность объектов со следами наложенного термального события соответствующего возраста в пределах ВЕП позволяет предполагать внебалтийские (гренландские?) источники сноса.

6. Показано отсутствие значимого температурного воздействия на терригенные породы Ивановского грабена после их накопления.

#### 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают исключительную признательность А.В. Самсонову (ИГЕМ РАН) за всестороннюю помощь и плодотворные дискуссии в ходе работы над статьей. Авторы благодарят А.Б. Котова и анонимного рецензента за ценные замечания, существенно повысившие качество статьи.

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

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

## 8. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## 9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Andreichev V.L., Soboleva A.A., Khubanov V.B., Sobolev I.D., 2018. U-Pb (LA-ICP-MS) Age of Detrital Zircons from Meta-Sedimentary Rocks of the Upper Precambrian Section of Northern Timan. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Series* 93 (2), 14–26 (in Russian) [Андреичев В.Л., Соболева А.А., Хубанов В.Б., Соболев И.Д. U-Pb (LA-ICP-MS) возраст детритовых цирконов из метаосадочных пород основания верхнедокембрийского разреза Северного Тимана // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. 2018. Т. 93. № 2. С. 14–26].

Arzamastsev A.A., Egorova S.V., Erofeeva K.G., Samsonov A.V., Skuf'in P.K., Chashchin V.V., Veselovskiy R.V., 2020. Paleoproterozoic (2.51–2.40 Ga) Igneous Provinces of the Northeastern Fennoscandia: Geochemistry of Volcanic Rocks and Correlation with Intrusive Complexes. *Stratigraphy and Geological Correlation* 28, 603–629. <https://doi.org/10.1134/S0869593820060039>.

Balagansky V.V., Myskova T.A., Lvov P.A., Larionov A.N., Gorbunov I.A., 2021. Neoproterozoic A-Type Acid Metavolcanics in the Keivy Terrane, Northeastern Fennoscandian Shield: Geochemistry, Age, and Origin. *Lithos* 380–381, 105899. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105899>.

Baluev A.S., Morozov Y.A., Terekhov E.N., Bayanova T.B., Tyupanov S.N., 2016. Tectonics of the Junction Region between the East European Craton and West Arctic Platform. *Geotectonics* 50, 453–481. <https://doi.org/10.1134/S0016852116050022>.

Bingen B., Viola G., Möller C., Vander Auwera J., Laurent A., Yi K., 2021. The Sveconorwegian Orogeny. *Gondwana Research* 90, 273–313. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.10.014>.

Daly J.S., Balagansky V.V., Timmerman M.J., Whitehouse M.J., 2006. The Lapland-Kola Orogen: Palaeoproterozoic Collision and Accretion of the Northern Fennoscandian Lithosphere. *Geological Society London Memoirs* 32, 579–598. <https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2006.032.01.35>.

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Wingate M.T.D., Mazukabzov A.M., Pisarevsky S.A., Kornilova T.A., 2013. Using the Isotope Dating of Endocontact Hybrid Rocks for the Age Determination of Mafic Rocks (Southern Siberian Craton). *Russian Geology and Geophysics* 54 (11), 1340–1351. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.10.001>.

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, p. 308–311.

Högström A.E.S., Jensen S., Palacios T., Ebbestad J.O.R., 2013. New Information on the Ediacaran–Cambrian Transition in the Vestertana Group, Finnmark, Northern Norway, from Trace Fossils and Organic-Walled Microfossils. *Norwegian Journal of Geology* 93, 95–106.

Kozlov N.E., Sorokhtin N.O., Glaznev V.N., Kozlova N.E., Ivanov A.A., Kudryashov N.M., Martynov E.V., Tyuremnov V.A., Matyushkin A.V., Osipenko L.G., 2006. Archean Geology of the Baltic Shield. Nauka, Saint Petersburg, 328 p. (in Russian) [Козлов Н.Е., Сорохтин Н.О., Глазнев В.Н., Козлова Н.Е., Иванов А.А., Кудряшов Н.М., Мартынов Е.В., Тюремнов В.А., Матюшкин А.В., Осипенко Л.Г. Геология архея Балтийского щита. СПб.: Наука, 2006. 328 с.]

Kuznetsov N.B., Baluev A.S., Terekhov E.N., Kolodyazhnyi S.Yu., Przhivalgovskii E.S., Romanyuk T.V., Dubensky A.S., Sheshukov V.S., Lyapunov S.M., Bayanova T.B., Serov P.A., 2021. Time Constraints on the Formation of the Kandalaksha and Keretski Grabens of the White Sea Paleo-Rift System from New Isotopic Geochronological Data. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (3), 570–607 (in Russian) [Кузнецов Н.Б., Балуюев А.С., Терехов Е.Н., Колодяжный С.Ю., Пржиалговский Е.С., Романюк Т.В., Дубенский А.С., Шешуков В.С., Ляпунов С.М., Баянова Т.Б., Серов П.А. О времени формирования Кандалакшского и Керецкого грабенов палеорифтовой системы Белого моря в свете новых данных изотопной геохронологии // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 3. С. 570–607]. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-3-0540>.

Kuznetsov N.B., Natapov L.M., Belousova E.A., O'Reilly S.Y., Kulikova K.V., Soboleva A.A., Udoratina O.V., 2010. The First Results of the Dating (U/Pb) and Isotopic-Geochemistry Study of the Detrital Zircons from the Neoproterozoic Sandstones of the Southern Timan (Djem-Parma Hill). *Doklady Earth Sciences* 435, 1676–1683. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10120263>.

Li Z.X., Bogdanova S.V., Collins A.S., Davidson A., De Waele B., Ernst R.E., Fitzsimons I.C.W., Fuck R.A. et al., 2008. Assembly, Configuration, and Break-up History of Rodinia: A Synthesis. *Precambrian Research* 160 (1–2), 179–210. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.021>.

Ludwig K.R., 2008. ISOPLOT 3.70. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. User's Manual. Berkeley Geochronology Center Special Publication 4, 76 p.

Malyshev S.V., Ivanov A.V., Khudoley A.K., Marfin A.E., Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., Lebedeva O.Y., 2021. Global Implication of Mesoproterozoic (~1.4 Ga) Magmatism within the Sette-Daban Range (Southeast Siberia). *Scientific Reports* 11, 20484. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00010-5>.

Mikhailenko Yu.V., 2016. Structural Features and Composition of the Karuyarva Formation, Kildin Group of Ripheids, Sredny Peninsula (Northern Framing of the Kola Peninsula).



PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Ukhta, 205 p. (in Russian) [Михайленко Ю.В. Особенности строения и состав карюярвинской свиты кильдинской серии рифейд полуострова Средний (северное обрамление Кольского полуострова): Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Ухта, 2016. 205 с.]

Mikhailenko Yu.V., Soboleva A.A., Hourigan J.K., 2016. U-Pb Age of Detrital Zircons from Upper Precambrian Deposits of the Sredni and Rybachi Peninsulas (Northern Margin of the Kola Peninsula). *Stratigraphy and Geological Correlation* 24, 439–463. <https://doi.org/10.1134/S086959381605004X>.

Nasdala L., Wenzel M., Vavra G., Irmer G., Wenzel T., Kober B., 2001. Metamictisation of Natural Zircon: Accumulation versus Thermal Annealing of Radioactivity-Induced Damage. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 141, 125–144. <https://doi.org/10.1007/s004100000235>.

Pystin A.M., Ulyasheva N.S., Pystina Y.I., Grakova O.V., 2020. Provenance and U-Pb Age of Detrital Zircons from the Upper Proterozoic Deposits of the Polar Urals: To the Question of the Time of Formation of the Timan Passive Margin. *Stratigraphy and Geological Correlation* 28 (5), 457–478. <https://doi.org/10.1134/S0869593820050081>.

Resentini A., Andò S., Garzanti E., Malusà M.G., Pastore G., Vermeesch P., Chanvry E., Dall'Asta M., 2020. Zircon as a Provenance Tracer: Coupling Raman Spectroscopy and U-Pb Geochronology in Source-To-Sink Studies. *Chemical Geology* 555, 119828. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119828>.

Roberts D., Siedlecka A., 2012. Provenance and Sediment Routing of Neoproterozoic Formations on the Varanger, Nordkinn, Rybachi and Sredni Peninsulas, North Norway and Northwest Russia: A Review. *NGU Bulletin* 452, 1–19.

Sláma J., Košler J., Condon D.J., Crowley J.L., Gerdes A., Hanchar J.M., Horstwood M.S.A., Morris G.A. et al., 2008. Plešovice Zircon – A New Natural Reference Material for U-Pb and Hf Isotopic Microanalysis. *Chemical Geology* 249 (1–2), 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>.

Soboleva A.A., Andreichev V.L., Burtsev I.N., Nikulova N.Yu., Khubanov V.B., Sobolev I.D., 2019. Detrital Zircons from the Upper Precambrian Rocks of the Vym Group of the Middle Timan (U-Pb Age and Sources of Drift). *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Section* 94 (1), 3–16 (in Russian) [Соболева А.А., Андреичев В.Л., Бурцев И.Н., Никулова Н.Ю., Хубанов В.Б., Соболев И.Д. Детритовые цирконы из верхнедокембрийских пород вымской серии Среднего Тимана (U-Pb возраст и источники сноса) // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. 2019. Т. 94. Вып. 1. С. 3–16].

Terekhov E.N., Baluev A.S., Przhivalgovsky E.S., 2012. Structural Setting and Geochemistry of Devonian Dikes in the Kola Peninsula. *Geotectonics* 46, 69–84. <https://doi.org/10.1134/S0016852112010074>.

Udoratina O.V., Burtsev I.N., Nikulova N.Yu., Khubanov V.B., 2017. Age of Upper Precambrian Metasandstones of Chetlas

Group of Middle Timan on U-Pb Dating of Detrital Zircons. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Section* 92 (5), 15–32 (in Russian) [Удоратина О.В., Бурцев И.Н., Никулова Н.Ю., Хубанов В.Б. Возраст метапесчаников верхнедокембрийской четласской серии Среднего Тимана на основании U-Pb датирования детритных цирконов // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. 2017. Т. 92. № 5. С. 15–32].

Veselovskiy R.V., 2016. Paleomagnetism of Large Magmatic Provinces in East Eurasia: Geodynamic Consequences. PhD Thesis (Doctor of Geology and Mineralogy). Moscow, 442 p. (in Russian) [Веселовский Р.В. Палеомагнетизм крупных магматических провинций Северной Евразии: геодинамические следствия: Дис. ... докт. геол.-мин. наук. М., 2016. 442 с.]

Veselovskiy R.V., Bazhenov M.L., Arzamastsev A.A., 2016. Paleomagnetism of Devonian Dykes in the Northern Kola Peninsula and Its Bearing on the Apparent Polar Wander Path of Baltica in the Precambrian. *Tectonophysics* 675, 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.03.014>.

Veselovskiy R.V., Dubinya N.V., Ponomarev A.V., Fokin I.V., Patonin A.V., Pasenko A.M., Fetisova A.M., Matveev M.A., Afinogenova N.A., Rud'ko D.V., Chistyakova A.V., 2022. Shared Research Facilities "Petrophysics, Geomechanics and Paleomagnetism" of the Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2) (in Russian) [Веселовский Р.В., Дубиня Н.В., Пономарёв А.В., Фокин И.В., Патонин А.В., Пасенко А.М., Фетисова А.М., Матвеев М.А., Афиногенова Н.А., Рудько Д.В., Чистякова А.В. Центр коллективного пользования Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0579>.

Veselovskiy R.V., Thomson S.N., Arzamastsev A.A., Bot-syun S., Travin A.V., Yudin D.S., Samsonov A.V., Stepanova A.V., 2019. Thermochronology and Exhumation History of the Northeastern Fennoscandian Shield since 1.9 Ga: Evidence from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  and Apatite Fission Track Data from the Kola Peninsula. *Tectonics* 38 (7), 2317–2337. <https://doi.org/10.1029/2018TC005250>.

Wiedenbeck M., Allé P., Corfu F., Griffin W.L., Meier M., Oberli F., Von Quadt A., Roddick J.C., Spiegel W., 1995. Three Natural Zircon Standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace Element and REE Analyses. *Geostandards and Geoanalytical Research* 19 (1), 1–23. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.1995.tb00147.x>.

Zhang W., Roberts D., Pease V., 2015. Provenance Characteristics and Regional Implication of Neoproterozoic, Timanian-Margin Successions and a Basal Caledonian Nappe in Northern Norway. *Precambrian Research* 268, 153–167. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.07.006>.

Zhang W., Roberts D., Pease V., 2016. Provenance of Sandstones from Caledonian Nappes in Finnmark, Norway: Implications for Neoproterozoic–Cambrian Palaeogeography. *Tectonophysics* 691, 198–205. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.09.001>.