

**"AIRES" SHARED RESEARCH FACILITIES (IPGG RAS, St. PETERSBURG): SCIENTIFIC EQUIPMENT, MAIN RESEARCH DIRECTIONS AND RESULTS****A.B. Kuznetsov** , **T.S. Zaitseva** ✉, **E.B. Salnikova** 

Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, 2 Makarova Emb, Saint Petersburg, 199034, Russia

ABSTRACT. The "AIRES" Shared Research Facilities (SRF) is a high-tech laboratory complex based on the Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS (IPGG RAS, St. Petersburg). The Institute conducts geological, mineralogical, geochronological, isotope-geochemical and paleontological studies aimed at solving the problems of the formation and evolution of the Earth's continental crust in the Precambrian and Phanerozoic. The methodological developments of the "AIRES" SRF make it possible to interpret the conditions of occurrence of igneous, metamorphic and sedimentary rocks and minerals, as well as their age. The ongoing research includes studies on geology, geodynamics, stratigraphy, petrology, lithology, isotope geochemistry, geochronology, as well as paleogeography, archeology, soil science, ecology, and chemistry.

KEYWORDS: geochronology; chemostratigraphy; isotope geochemistry; geology; stratigraphy; paleontology

FUNDING: The work was performed as part of research project FMUW-2021-0003 of the IPGG RAS.

SHORT COMMUNICATION

Received: December 14, 2021

Revised: February 3, 2022

Accepted: February 16, 2022

Correspondence: Tatiana S. Zaitseva, z-t-s@mail.ru

FOR CITATION: Kuznetsov A.B., Zaitseva T.S., Salnikova E.B., 2022. "AIRES" Shared Research Facilities (IPGG RAS, St. Petersburg): Scientific Equipment, Main Research Directions and Results. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2), 0584. doi:10.5800/GT-2022-13-2-0584

ЦЕНТР КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ «АИРИЗ» (ИГГД РАН, г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ): НАУЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ

А.Б. Кузнецов, Т.С. Зайцева, Е.Б. Сальникова

Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2, Россия

АННОТАЦИЯ. Центр коллективного пользования (ЦКП) «АИРИЗ» – высокотехнологичный лабораторный комплекс на базе Института геологии и геохронологии докембрия РАН (ИГГД РАН, г. Санкт-Петербург), проводящий геологические, минералогические, геохронологические, изотопно-геохимические и палеонтологические исследования, направленные на решение проблем формирования и эволюции континентальной коры Земли в докембрии и фанерозое. Методические разработки ЦКП «АИРИЗ» позволяют расшифровать условия происхождения магматических, метаморфических и осадочных пород и минералов, а также определить их возраст. Выполняемые работы охватывают различные области геологии, геодинамики, стратиграфии, петрологии, литологии, изотопной геохимии, геохронологии, а также палеогеографии, археологии, почвоведения, экологии и химии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геохронология; хемостратиграфия; изотопная геохимия; геология; стратиграфия; палеонтология

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено в рамках темы НИР ИГГД РАН № FMUW-2021-0003.

1. ВВЕДЕНИЕ

ЦКП «АИРИЗ» (Аналитические исследования ранней истории Земли) был создан в 2019 г. и представляет собой высокотехнологичный лабораторный комплекс на базе Института геологии и геохронологии докембрия РАН, обеспечивающий коллективное пользование прецизионным научным оборудованием как для сотрудников структурных подразделений ИГГД РАН, так и для сторонних пользователей (физические лица и организации).

ИГГД РАН – научное учреждение, изначально специализирующееся на изучении самого продолжительного периода в геологической истории Земли – от момента формирования твердой оболочки планеты до появления видимых следов многоклеточной жизни. Исследование сложнейших скрытых процессов было возможно только передовыми прецизионными аналитическими методами. Именно они стали предметом изучения для коллектива лаборатории геологии докембрия (ЛАГЕД), созданной в г. Ленинграде в 1950 г. В 1967 г. лаборатория была переименована в Институт геологии и геохронологии докембрия, который сохранил и расширил научную школу, а также продолжил разработку новых методических подходов к изучению природного вещества. Уникальность созданного учреждения состояла в том, что ЛАГЕД–ИГГД объединял два научных направления: геологию (петрологию) и радиохимию. Радиохимический отдел занимался разработкой методов изотопной геохронологии для определения возраста пород и минералов, а также поиском изотопной неоднородности химических элементов в породах различного происхождения. Сочетание этих дисциплин дало синергетический эффект, который позволил учреждению стать колыбелью отечественной геохронологии [Gerling, Polkanov, 1958]. Так, из 16 методов изотопной геохронологии, используемых в мире,

четыре было разработано в ИГГД – это калий-аргоновый [Gerling, Titov, 1949; Gerling, 1961], гелиевый [Tolstikhin, Kamensky, 1969], ксеноновый [Shukolyukov et al., 1974b] и платино-гелиевый [Shukolyukov et al., 2011]. С 80-х гг. прошлого столетия в ИГГД РАН применяются наиболее распространенные методы изотопной геохронологии: Rb-Sr метод [Gerling et al., 1958; Gorokhov, 1985], U-Pb метод [Shukolyukov et al., 1974a; Levchenkov et al., 1980; Makeev, 1981], Pb-Pb метод [Neimark et al., 1991], Sm-Nd метод [Amelin et al., 1996]. Все перечисленные методы в настоящее время широко используются в ИГГД РАН и получают дальнейшее методическое развитие. Здесь впервые в России реализованы уникальные процедуры U-Pb датирования единичных зерен циркона и их фрагментов [Salnikova et al., 2004, 2006]. За последние годы в ИГГД РАН разработаны новые методические подходы: (1) низкофоновое U-Pb датирование целого ряда нетрадиционных минералов-геохронометров – гранатов кальциевого ряда [Salnikova et al., 2019], минералов группы колумбита – танталита, перовскита, кальцитрита, тажеранита, бастнезита [Salnikova et al., 2010], метамиктных цирконов и агрегатов циркона и бадделеита; (2) U-Th-He геохронологическое исследование сульфидов [Yakubovich et al., 2019]; (3) Pb-Pb датирование карбонатных пород [Ovchinnikova et al., 1998, 2000; Semikhatov et al., 2003]. Впервые в России реализован метод стронциевой изотопной хемостратиграфии [Gorokhov et al., 1995], который совместил в себе достижения изотопной геохимии и литостратиграфии, а результаты были применены в нескольких научных областях – геодинимике, стратиграфии, литологии и относительной хронологии [Kuznetsov et al., 2018].

На базе лабораторного комплекса ИГГД РАН ежегодно проходят производственную практику и готовят дипломные работы студенты Санкт-Петербургского

государственного и горного университетов. Научно-методические стажировки регулярно проводятся для сотрудников институтов Кольского, Уральского и Сибирского отделений РАН, а также ряда учебных заведений России. Применение комплекса аналитического оборудования обеспечивает выполнение совместных работ в области изотопной геохимии, геохронологии, петрологии и металлогении практически со всеми институтами в области наук о Земле. Таким образом, лаборатории ИГГД РАН изначально функционировали в режиме ЦКП, и лишь в 2019 г. эта деятельность была оформлена в соответствии с современными требованиями.

Важно отметить, что по данным Научной электронной библиотеки на 2021 г. цитируемость работ ИГГД РАН достигает 12.07 единиц (отношение всех опубликованных работ к количеству цитирований за весь период деятельности). По этому показателю ИГГД РАН входит в тройку ведущих институтов страны данного профиля (при среднем по профилю 8 единиц).

Сегодня ЦКП «АИРИЗ» эксплуатирует прецизионное аналитическое оборудование, которое обслуживается высококвалифицированным персоналом. ЦКП «АИРИЗ» обеспечивает изучение вещества природного и искусственного происхождения.

Проводимые аналитические исследования позволяют выполнять работы по определению малых концентраций элементов в горных породах, материалах и артефактах, проводить изотопный анализ элементов в газовой и твердой форме, а также определять концентрации из микроанализов вещества как разрушающим, так и неразрушающим способом. Возможности лабораторного комплекса ЦКП «АИРИЗ» обеспечивают проведение геохронологического исследования с определением возраста объектов от миллиардов до сотен тысяч лет.

ЦКП «АИРИЗ» позволяет избавить научные учреждения, заинтересованные в получении изотопно-геохимических и геохронологических результатов, от необходимости содержать и обслуживать непрофильное для них оборудование. Получаемые научные результаты сопровождаются, помимо собственно аналитических данных, квалифицированной интерпретацией, индивидуальной для каждого объекта.

Оборудование ЦКП «АИРИЗ» дает возможность научным и образовательным организациям получать результаты в различных естественно-научных областях: геологии, географии, археологии, почвоведении, экологии и химии. ЦКП обеспечивает ученых и студентов собственным научным материалом.

2. МЕТОДОЛОГИЯ

Применяемые в ЦКП «АИРИЗ» научно-методологические подходы (комплексное изучение морфологии, внутреннего строения, геохимии и изотопно-геохимических характеристик минералов-геохронометров), многие из которых впервые разработаны в институте, составляют научную новизну и обеспечивают

конкурентоспособность исследований на уровне ведущих российских и зарубежных научно-исследовательских организаций.

В ЦКП «АИРИЗ» реализованы и постоянно совершенствуются следующие методики:

(1) U-Pb датирование (ID TIMS) микроанализов и единичных зерен циркона (в том числе их фрагментов с катодолюминесцентным контролем), включая методики предварительной кислотной обработки и высокотемпературного отжига;

(2) U-Pb датирование (ID TIMS) микроколичеств бадделейта, монацита, рутила, минералов – концентратов редких и редкоземельных элементов, а также гранатов кальциевого ряда;

(3) U-Th-Pb датирование (LA ICP MS) детритовых цирконов, которое сопровождается детальным изучением их строения и происхождения (BSE, CL, изучение включений минералообразующих сред);

(4) изотопно-геохимическое исследование Rb-Sr, Sm-Nd и Pb-Pb систем силикатных пород и породообразующих минералов в условиях низких концентраций;

(5) U-Th-He геохронологическое исследование золота и сульфидов;

(6) Pt-He геохронологическое исследование минералов платины, сульфидов и артефактов;

(7) U-Th-Pb и Rb-Sr изотопно-геохимическое исследование и определение возраста карбонатных и фосфатных осадочных пород;

(8) комплексные кристаллохимические и Rb-Sr и Sm-Nd изотопно-геохронологические исследования глобулярных и тонкодисперсных слоистых силикатов в разноразмерных фракциях;

(9) Sr-изотопная хемотратиграфия ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) на основе карбонатных, сульфатных и фосфатных пород для определения возраста хемогенных образований и фоссилизированных остатков, корреляции осадков (осадочных пород) и построения/верификации стратиграфических схем, а также для реконструкции стадийных (диагенетических) преобразований;

(10) ступенчатое (селективное) растворение для обогащения вещества первичным материалом и частичного удаления вторичного;

(11) молекулярная динамика в сочетании с рамановской спектроскопией для создания термодинамических моделей флюидно-минеральных систем в условиях от верхней коры до литосферной мантии для понимания условий переноса рудного вещества и образования месторождений золота и других металлов;

(12) щадящая мацерация для извлечения микрофоссилий, изготовление палеонтологических препаратов, изучение таксономического состава и морфологии органостенных микрофоссилий, палеобиологическое изучение отложений;

(13) микронзондовые исследования микроструктуры и состава минералов, артефактов и синтетических материалов, подготовленных в виде шлифов, аншлифов, порошков, оксидных шайб или сколков;

(14) мессбауэровская спектроскопия для исследования валентного состояния железа и олова в структуре минералов и определения окислительно-восстановительных условий формирования пород и рудообразующих систем.

3. ОБОРУДОВАНИЕ ЦКП «АИРИЗ»

ИГГД РАН постоянно обновляет научное оборудование как из собственных средств, так и за счет грантов, выделяемых на эти цели в рамках национального проекта «Наука и университеты». Сегодня ЦКП «АИРИЗ» предоставляет возможность проводить исследования, используя следующее оборудование (рис. 1):

(1) твердофазный мультиколлекторный масс-спектрометр TRITON TI с умножителем вторичных электронов, оснащенный Daly детектором;

(2) твердофазный многоколлекторный масс-спектрометр Finnigan MAT 261 с умножителем вторичных электронов;

(3) масс-спектрометр с индукционно-связанной плазмой ELEMENT XR, оснащенный приставкой для лазерной абляции NWR-213 с двухобъемной ячейкой TWT;

(4) растровый электронный микроскоп JED-2200 (JEOL) с энергодисперсионными и волнодисперсионными спектрометрами;

(5) сканирующий электронный микроскоп TESCAN VEGA 3;

(6) лабораторный оптический комплекс Leika DLMP (увел. 1000x) и Olympus BX-41 с высокотемпературным термостолком TS 1400XY, системой охлаждения LMP95 и электропечью SNOL 6.7-1300;

(7) комплекс полностью оборудованных «чистых» беспылевых лабораторий класса 100 для подготовки проб к Rb-Sr, Sm-Nd и U-Pb геохронологическим и изотопным исследованиям;

(8) Мессбауэровский спектрометр CM-2201;

(9) биологический микроскоп AxioScore.A1 с объемной насадкой;

(10) спектральный модуль «Рамановский анализатор EnSpectrR532» для изучения минералов и состава флюидных включений;

(11) компьютерная графическая станция FORSITE 950D для моделирования сложнейших процессов флюидно-минеральных систем.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Ежегодно результаты, полученные на оборудовании ЦКП «АИРИЗ», публикуются в отечественных и зарубежных журналах, индексируемых в базе данных Web of Science и Scopus. В 2020 г. в печати вышло более 80 работ с результатами U-Pb датирования пород и минералов, Sr-изотопной хемотратиграфии карбонатных пород и мраморов, Rb-Sr и Sm-Nd изотопно-геохимического исследования глобулярных и тонкодисперсных слоистых силикатов, палеонтологического изучения микрофоссилий, моделирования флюидно-минеральных систем и т.п. Изученные объекты расположены преимущественно в областях распространения

докембрия на Кольском полуострове, Восточно-Европейской платформе, в Карелии, Сибири и на Урале.

Среди главных результатов с момента регистрации ЦКП «АИРИЗ» в 2019 г. можно отметить следующие.

На основе геологических, геохронологических (U-Pb ID-TIMS, U-Th-Pb LA-ICP-MS) и изотопно-геохимических (Sm-Nd) исследований реперных магматических и метаморфических комплексов центрального сегмента Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) уточнены представления о его развитии [Kotov et al., 2019; Salnikova et al., 2019; Savatenkov et al., 2020; и др.]. Показано, что формирование раннекаледонского супертеррейна ЦАСП произошло около 500–480 млн лет, а его сочленение с Сибирской платформой – после 470–460 млн лет [Kozakov et al., 2020a]. В отложениях олокитской серии Байкало-Патомского пояса помимо материала, сносимого с Сибирского кратона и Байкало-Муйского пояса, обнаружен мезопротерозойский терригенный материал с континентального блока, расположенного между Сибирью и Лаврентией [Kovach et al., 2020]. Разработана новая схема тектонического районирования Дзабханского и Сонгинского террейнов ЦАСП, которые формировались при субдукции (960–860 млн лет) окраин Родинии, и развития континентальных рифтов, инициировавших распад суперконтинента около 860 и 800 млн лет [Kozakov и et al., 2020b].

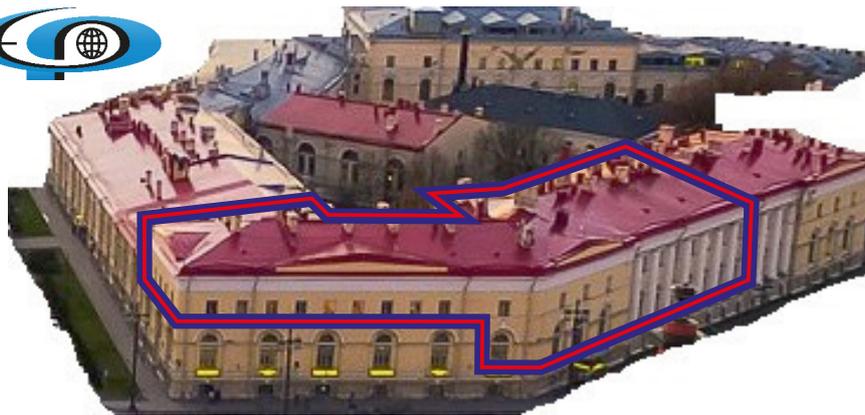
Установлен возраст формирования редкометалльных гранитов Тургинского массива в Восточном Забайкалье. Впервые успешно применен метод U-Pb CA-ID-TIMS датирования метамиктизированного циркона плохой сохранности с высокой дозой авторадационного облучения ($>6 \times 10^{-18}$ α-расп/г) из амазонитовых Li-F гранитов Тургинского массива Восточного Забайкалья [Ivanova et al., 2021]. В результате работ установлено, что порфиридные биотитовые граниты, которые ранее рассматривались в качестве «материнских», являются останцами гранитоидов палеозойского ундинского комплекса.

Определен возраст базальных горизонтов венда на Южном Урале, установленный на основе Rb-Sr датирования осадочных глауконитов бакеевской свиты ашинской серии 642±9 млн лет [Zaitseva et al., 2019]. Реконструирована история заполнения позднерифейского палеобассейна на основе Rb-Sr и Sm-Nd изотопного исследования тонкодисперсных слоистых силикатов в разноразмерных фракциях инзерской свиты Южного Урала [Gorokhov et al., 2019b].

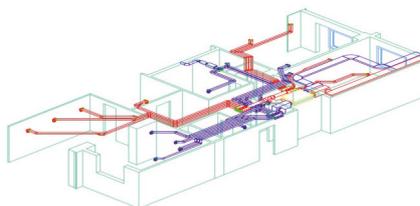
Определен Pb-Pb возраст и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ хемотратиграфическая характеристика карбонатных горизонтов в типовых разрезах рифея Южного Урала [Kuznetsov et al., 2017], Анабарского поднятия [Gorokhov et al., 2019a] и Енисейского кряжа [Kuznetsov et al., 2019a].

Намечены геохимические критерии для выбора кальцитовых мраморов с наименее измененными Rb-Sr системами после воздействия метаморфизма амфиболитовой фации, и доказано, что метакарбонатные породы могут использоваться для реконструкции осадочного протолита в докембрийских палеобассейнах

Институт геологии и геохронологии докембрия РАН



Система приточно-вытяжной
вентиляции, термостатированной
с тройной очисткой



Масс-спектрометр Triton TI



Масс-спектрометр Finnigan MAT-262



Масс-спектрометр
Element2 с приставкой LA-ICP-MS



Электронные микроскопы
Jeol, Gatlen, Raman



Минералогическая
сепарационная лаборатория



Четыре сверхчистые комнаты,
класс 100



Рис.1. Оборудование ЦКП «АИРИЗ» (на базе ИГГД РАН).
Fig.1. Equipment of the "AIRES" SRF (based on the IPGG RAS).

Фенноскандии и Сарматии [Kuznetsov et al., 2019b, 2021; Savko et al., 2020, 2021; Gorokhov et al., 2021].

Получены изотопно-геохимические характеристики мантийных ксенолитов из перидотитов субконтинентальной литосферной мантии в зоне сочленения Сибирского кратона и ЦАСП. Новые данные свидетельствуют о различном составе и типе мантии, подстилающей Сибирский кратон и сопредельные супертеррейны ЦАСП в раннем архее, еще до образования в мантии кратона эклогитов, имеющих возраст 2.7–3.1 млрд лет [Nikitina et al., 2020].

Создана численная термодинамическая модель многокомпонентной солевой флюидной системы ($H_2O-CO_2-CaCl_2$), расшифрованы физико-химические свойства и эволюция глубинных флюидов на границе мантия – кора. Предсказан распад однородного, гомогенного флюида на несмешиваемые флюиды с контрастными физико-химическими свойствами [Ivanov, Bushmin, 2019; Bushmin et al., 2020].

На основе Sm-Nd данных подтвержден коровый источник железорудного флюида и определено время (970 ± 40 млн лет) формирования метасоматических сидеритов Бакальской группы месторождения на Южном Урале [Krupenin et al., 2021] (совместная работа с ЦКП «Геоаналитик» (г. Екатеринбург)).

Разработана модель вертикального распространения микро- и макроскопических ископаемых организмов в вендских отложениях котлинского горизонта северо-запада Восточно-Европейской платформы. Полученные новые данные могут быть использованы для детализации региональной стратиграфической схемы венда [Golubkova et al., 2020].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ЦКП «АИРИЗ» создан на базе Института геологии и геохронологии докембрия РАН и представляет собой высокотехнологичный лабораторный комплекс, позволяющий решать широкий круг научных задач в геологии, геохронологии, минералогии, палеонтологии и т.д., привлекать к сотрудничеству в рамках различных проектов лучших специалистов России и зарубежных стран, готовить новые квалифицированные кадры, а главное – продолжать лучшие традиции российской науки.

6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

7. 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.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Amelin Yu.V., Neymark L.A., Ritsk E.Yu., Nemchin A.A., 1996. Enriched Nd-Sr-Pb Isotopic Signatures in the Dovyren Layered Intrusion (Eastern Siberia, Russia): Evidence for Source Contamination by Ancient Upper-Crustal Material. *Chemical Geology* 129 (1–2), 39–69. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00135-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00135-2).

Bushmin S.A., Vapnik Ye.A., Ivanov M.V., Lebedeva Yu.M., Savva E.V., 2020. Fluids in High-Pressure Granulites. *Petrology* 28, 17–46. <https://doi.org/10.1134/S0869591120010026>.

Gerling E.K., 1961. The Current State of the K-Ar Method and Its Application in Geology. Publishing House of the USSR Academy of Sciences, Moscow-Leningrad, 131 p. (in Russian) [Герлинг Э.К. Современное состояние калий-аргонового метода и его применение в геологии. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1961. 131 с.].

Gerling E.K., Polkanov A.A., 1958. A Problem of Absolute Age of the Precambrian Baltic Shield. *Geochemistry* 8, 695–716 (in Russian) [Герлинг Э.К., Полканов А.А. Проблема абсолютного возраста докембрия Балтийского щита // Геохимия. 1958. № 8. С. 695–716].

Gerling E.K., Titov N.E., 1949. On K-Decay of Potassium. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Chemical Series* 2, 128–133 (in Russian) [Герлинг Э.К., Титов Н.Е. О К-распаде калия // Известия АН СССР. Серия химическая. 1949. № 2. С. 128–133].

Gerling E.K., Yashchenko M.L., Levsky L.K., Ovchinnikova G.V., 1958. Rb-Sr Age Determinations on Micas. *Geochemistry* 6, 535–544 (in Russian) [Герлинг Э.К., Ященко М.Л., Левский Л.К., Овчинникова Г.В. Определение возраста некоторых слюд рубидий-стронциевым методом // Геохимия. 1958. № 6. С. 535–544].

Golubkova E.Yu., Kushim E.A., Tarasenko A.B., 2020. Fossil Organisms of the Kotlin Regional Stage of the Upper Vendian of the Northwestern Russian Platform (Leningrad Region). *Paleontological Journal* 54, 420–428. <https://doi.org/10.1134/S0031030120040061>.

Gorokhov I.M., 1985. Rb-Sr Isotopic Chronology. *Energoatomizdat, Moscow*, 152 p. (in Russian) [Горохов И.М. Рубидий-стронциевый метод изотопной геохронологии. М.: Энергоатомиздат, 1985. 152 с.].

Gorokhov I.M., Kuznetsov A.B., Azimov P.Y., Dubinina E.O., Vasilieva I.M., Rizvanova N.G., 2021. Sr and C Isotope Chemostratigraphy of the Paleoproterozoic Metacarbonate Rocks of the Sortavala Group: Fennoscandian Shield, Northern Ladoga Area. *Stratigraphy and Geological Correlation* 29, 121–139. <https://doi.org/10.1134/S0869593821020027>.

Gorokhov I.M., Kuznetsov A.B., Vasilyeva I.M., Rizvanova N.G., Semikhatov M.A., Lipenkov G.V., Dubinina E.O., 2019a. Early Riphean Billyakh Group of the Anabar Uplift, North Siberia: C–O Isotopic Geochemistry and Pb–Pb Age of Dolomites. *Stratigraphy and Geological Correlation* 27, 514–528. <https://doi.org/10.1134/S0869593819050022>.

Gorokhov I.M., Semikhatov M.A., Baskakov A.V., Kutyaev E.P., Mel'nikov N.N., Sochava A.V., Turchenko T.L., 1995. Sr Isotopic Composition in Riphean, Vendian, and Lower

Cambrian Carbonates from Siberia. *Stratigraphy and Geological Correlation* 3 (1), 1–28.

Gorokhov I.M., Zaitseva T.S., Kuznetsov A.B., Ovchinnikova G.V., Arakelyants M.M., Kovach V.P., Konstantinova G.V., Turchenko T.L., Vasilyeva I.M., 2019b. Isotope Systematics and Age of Authigenic Minerals in Shales of the Inzer Formation, South Urals. *Stratigraphy and Geological Correlation* 27, 133–158. <https://doi.org/10.1134/S0869593819020035>.

Ivanov M.V., Bushmin S.A., 2019. Equation of State of the Fluid System $H_2O-CO_2-CaCl_2$ and Properties of Fluid Phases at P-T Parameters of the Middle and Lower Crust. *Petrology* 27, 395–406. <https://doi.org/10.1134/S0869591119040039>.

Ivanova A.A., Salnikova E.B., Kotov A.B., Plotkina Yu.V., Tolmacheva E.V., Syritso L.F., Bocharov V.N., 2021. U-Pb (ID-TIMS) Geochronological Studies of High-Uranium Metamict Zircons: New Opportunities of Familiar Approaches. *Petrology* 29, 676–685. <https://doi.org/10.1134/S0869591121060047>.

Kotov A.B., Skovitina T.M., Kovach V.P., Sklyarov E.V., Donskaya T.V., Lopatin D.P., Plotkina Yu.V., Tolmacheva E.V., Gorokhovskii B.M., Buchnev I.N., 2019. Sources and Provenances of Late Cenozoic Sand Deposits of the Ol'khon Island (Baikal Rift Zone). *Doklady Earth Sciences* 484, 45–47. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19010203>.

Kovach V.P., Rytsk E.Y., Velikoslavinsky S.D., Kuznetsov A.B., Wang K.-L., Chung S.-L., 2020. Age of Detrital Zircons and Sources of Terrigenous Deposits of the Olokit Zone (Northern Baikal Region). *Doklady Earth Sciences* 493, 600–603. <https://doi.org/10.1134/S1028334X20080115>.

Kozakov I.K., Kirnozova T.I., Fugzan M.M., Plotkina Yu.V., Erdenegargal Ch., 2020a. Post-accretionary Granitoids in the Structure of the Dzabkhan Terrain of the Early Caledonian Framing of the East Siberian Platform. *Stratigraphy and Geological Correlation* 28, 157–166. <https://doi.org/10.1134/S0869593820020021>.

Kozakov I.K., Kovach V.P., Plotkina Y.V., Kirnozova T.I., Fugzan M.M., Erdenejargal Ch., 2020b. Neoproterozoic Age of the Crystalline Basement of the Bogdoingol Block, Dzabkhan Terrane (Central Asian Fold Belt). *Stratigraphy and Geological Correlation* 28, 630–637. <https://doi.org/10.1134/S0869593820060064>.

Krupenin M.T., Kuznetsov A.B., Chervyakovskaya M.V., Gulyaeva T.Y., Konstantinova G.V., 2021. The Source of Ore Fluids and Sm-Nd Age of Siderite from the Largest Bakal Deposit, Southern Urals. *Geology of Ore Deposits* 63, 324–340. <https://doi.org/10.1134/S1075701521040048>.

Kuznetsov A.B., Bekker A., Ovchinnikova G.V., Gorokhov I.M., Vasilyeva I.M., 2017. Unradiogenic Strontium and Moderate-Amplitude Carbon Isotope Variations in Early Tonian Seawater after the Assembly of Rodinia and before the Bitter Springs Excursion. *Precambrian Research* 298, 157–173. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.06.011>.

Kuznetsov A.B., Gorokhov I.M., Azimov P.Y., Dubinina E.O., 2021. Sr- and C- Chemostratigraphy Potential of the Paleoproterozoic Sedimentary Carbonates under Medium-Temperature Metamorphism: The Ruskeala Marble, Karelia.

Petrology 29, 175–194. <https://doi.org/10.1134/S0869591121010033>.

Kuznetsov A.B., Kochnev B.B., Vasilyeva I.M., Ovchinnikova G.V., 2019a. The Upper Riphean of the Yenisei Range: Sr Chemostratigraphy and Pb–Pb Age of Limestones of the Tungusik and Shirokaya Groups. *Stratigraphy and Geological Correlation* 27, 538–554. <https://doi.org/10.1134/S0869593819050058>.

Kuznetsov A.B., Lobach-Zhuchenko S.B., Kaulina T.V., Konstantinova G.V., 2019b. Paleoproterozoic Age of Carbonates and Trondhjemites of the Central Azov Group: SR Isotope Chemostratigraphy and U–Pb Geochronology. *Doklady Earth Sciences* 484, 142–145. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19020211>.

Kuznetsov A.B., Semikhatov M.A., Gorokhov I.M., 2018. Strontium Isotope Stratigraphy: Principles and State of the Art. *Stratigraphy and Geological Correlation* 26, 367–386. <https://doi.org/10.1134/S0869593818040056>.

Levchenkov O.A., Balagansky V.V., Makeev A.F., Anderson E.B., Shuleshko I.K., Ovchinnikova G.V., Yakovleva S.Z., 1980. Isotopic Age Data for Granitoids of the Eastern Stanovoy Ridge. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Geological Series* 7, 25–34 (in Russian) [Левченков О.А., Балаганский В.В., Макеев А.Ф., Андерсон Е.Б., Шулешко И.К., Овчинникова Г.В., Яковлева С.З. Возраст гранитоидов восточной части Станового хребта (по изотопным данным) // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1980. № 7. С. 25–34].

Makeev A.F., 1981. Radiation-Chemical Transformation of Zircons and Their Application in Geochronology. *Nauka, Leningrad*, 65 p. (in Russian) [Макеев А.Ф. Радиационно-химические превращения цирконов и их применение в геохронологии. Л.: Наука, 1981. 65 с.].

Neimark L.A., Rytsk E.Yu., Gorokhovskiy B.M., Ovchinnikova G.V., Kiseleva E.I., Konkin V.D., 1991. Isotopic Composition of Lead and Genesis of Lead-Zinc Mineralization in the Olokite Zone of North Pribaikalye. *Geology of Ore Deposits* 6, 34–49 (in Russian) [Неймарк Л.А., Рыцк Е.Ю. Гороховский Б.М., Овчинникова Г.В., Киселева Е.И., Конкин В.Д. Изотопный состав свинца и генезис свинцово-цинкового оруденения Олоkitской зоны Северного Прибайкалья // Геология рудных месторождений. 1991. № 6. С. 34–49].

Nikitina L.P., Goncharov A.G., Bogomolov E.S., Beliatsky B.V., Krinsky R.Sh., Prichod'ko V.S., Babushkina M.S., Karaman A.A., 2020. HFSE and REE Geochemistry and Nd-Sr-Os Systematics of Peridotites in the Subcontinental Lithospheric Mantle of the Siberian Craton and Central Asian Fold Belt Junction Area: Data on Mantle Xenoliths. *Petrology* 28, 207–219. <https://doi.org/10.1134/S0869591120020058>.

Ovchinnikova G.V., Vasilyeva I.M., Gorokhov I.M., Kuznetsov A.B., Gorokhovskii B.M., Levskii L.K., Semikhatov M.A., 2000. The Pb–Pb Trail Dating of Carbonates with Open U–Pb Systems: The Min'yar Formation of the Upper Riphean Stratotype, Southern Urals. *Stratigraphy and Geological Correlation* 8 (6), 529–543.

Ovchinnikova G.V., Vasilyeva I.M., Kuznetsov A.B., Gorokhov I.M., Gorokhovskii B.M., Levskii L.K., Semikhatov M.A.,

1998. U-Pb Systematics of Proterozoic Carbonate Rocks: The Inzer Formation of the Upper Riphean Stratotype (Southern Urals). *Stratigraphy and Geological Correlation* 6 (4), 336–347.

Salnikova E.B., Chakhmouradian A.R., Stifeeva M.V., Reguir E.P., Kotov A.B., Gritsenko Y.D., Nikiforov A.V., 2019. Calcic Garnets as a Geochronological and Petrogenetic Tool Applicable to a Wide Variety of Rocks. *Lithos* 338–339, 141–154. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.03.032>.

Salnikova E.B., Glebovitsky V.A., Kotov A.B., Larin A.M., Yakovleva S.Z., Berezhnaya N.G., Kovach V.P., Drugova G.M., Anisimova I.V., 2004. Metamorphic Evolution of Granulites from the Kurul'ta Block, Aldan Shield: U-Pb Single Zircon Study. *Doklady Earth Sciences* 398 (7), 968–972.

Salnikova E.B., Kotov A.B., Kazansky V.I., Glebovitsky V.A., Pertsev N.N., Yakovleva S.Z., Fedoseenko A.M., Plotkina Yu.V., 2006. Early Proterozoic Age of the Tyrkandin Fault Zone, the Aldan Shield: U-Pb Dating of Fragments of Single Zircon Grains. *Doklady Earth Sciences* 408, 538–541. <https://doi.org/10.1134/S1028334X06040076>.

Salnikova E.B., Yakovleva S.Z., Nikiforov A.V., Kotov A.B., Yarmolyuk V.V., Anisimova I.V., Sugorakova A.M., Plotkina Y.V., 2010. Bastnaesite: A Promising U-Pb Geochronological Tool. *Doklady Earth Sciences* 430, 134–136. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10010290>.

Savatenkov V.M., Kozlovsky A.M., Yarmolyuk V.V., Rudnev S.N., Oyunchimeg T.S., 2020. Pb and Nd Isotopic Data for Granites from the Lake Zone, Mongolian and Gobi Altai with Implications for Crustal Growth of the Central Asian Orogenic Belt. *Petrology* 28, 403–417. <https://doi.org/10.1134/S0869591120050045>.

Savko K.A., Kuznetsov A.B., Ovchinnikova M.Yu., 2020. Carbonate Deposits of Eastern Sarmatia (Early Precambrian Ignateevo Formation, Kursk Block): Sedimentation Conditions and Paleocontinental Correlations. *Stratigraphy and Geological Correlation* 28, 343–364. <https://doi.org/10.1134/S0869593820030107>.

Savko K.A., Ovchinnikova M.Y., Kuznetsov A.B., Kramchaninov A.Y., 2021. Positive $\delta^{13}\text{C}$ Anomaly and Sr Isotope Composition in Paleoproterozoic Limestone of the Tim

Formation within the Kursk Block, Sarmatia. *Doklady Earth Sciences* 497, 286–290. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21040140>.

Semikhatov M.A., Ovchinnikova G.V., Gorokhov I.M., Kuznetsov A.B., Kaurova O.K., Petrov P.Yu., 2003. Pb-Pb Isochron Age and SR-Isotopic Signature of the Upper Yudoma Carbonate Sediments (the Vendian of the Yudoma-Maya Trough, Eastern Siberia). *Doklady Earth Sciences* 393 (8), 1093–1097.

Shukolyukov Yu.A., Gorokhov I.M., Levchenkov O.A., 1974a. *Graphic Methods in Isotopic Geology*. Nedra, Moscow, 207 p. (in Russian) [Шуколюков Ю.А., Горохов И.М., Левченков О.А. Графические методы изотопной геологии. М.: Недра, 1974. 207 с.].

Shukolyukov Yu.A., Kirsten T., Jessberger E.K., 1974b. The Xe-Xe Spectrum Technique, a New Dating Method. *Earth Planetary Science Letters* 24 (2), 271–281. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(74\)90105-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(74)90105-8).

Shukolyukov Yu.A., Yakubovich O.V., Gorokhovskii B.M., Korneev S.I., Cherkashin I.A., 2011. A New ^{190}Pt - ^4He Method of Native Platinum Age Determination. *Doklady Earth Sciences* 441, 1579–1582. <https://doi.org/10.1134/S1028334X11110304>.

Tolstikhin I.N., Kamensky I.L., 1969. On the Possibility of Groundwater Age Determination Using Tritium-Gelium-3 Method. *Geochemistry* 8, 1027–1029 (in Russian) [Толстихин И.Н., Каменский И.Л. О возможности определения возраста подземной воды тритий-гелий-3 методом // Геохимия. 1969. № 8. С. 1027–1029].

Yakubovich O.V., Gedz A.M., Vikentyev I.V., Kotov A.B., Gorokhovskii B.M., 2019. Migration of Radiogenic Helium in the Crystal Structure of Sulfides and Prospects of Their Isotopic Dating. *Petrology* 27, 59–78. <https://doi.org/10.1134/S0869591118050089>.

Zaitseva T.S., Kuznetsov A.B., Gorozhanin V.M., Gorokhov I.M., Ivanovskaya T.A., Konstantinova G.V., 2019. The Lower Boundary of the Vendian in the Southern Urals as Evidenced by the Rb-Sr Age of Glauconites of the Bakeevo Formation. *Stratigraphy and Geological Correlation* 27, 573–587. <https://doi.org/10.1134/S0869593819050083>.