

**CENTRE OF ISOTOPIC AND GEOCHEMICAL RESEARCH (IGC SB RAS):
CURRENT STATE OF MICRO- AND MACROANALYSIS****S.Yu. Skuzovatov**  , **O.Yu. Belozerova**, **I.E. Vasil'eva**, **O.V. Zarubina**, **E.V. Kaneva**,
Yu.V. Sokolnikova, **V.M. Chubarov**, **E.V. Shabanova**

Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1a Favorsky St, Irkutsk 664033, Russia

ABSTRACT. Centre of Isotopic and Geochemical Research based on the Analytical Department of Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS (Irkutsk) performs a wide range of analytical studies to solve mineralogical and petrological, geochemical, prospecting, ecological, paleoclimatic and applied problems. The studies are supported by the modern equipment for electron microprobe, X-ray diffraction, X-ray fluorescence, atomic emission and mass spectrometric (including isotope) analyses, as well as the necessary international certified reference materials (SRM) and a collection of SRM of the natural and technogenic composition of our production.

KEYWORDS: X-ray spectrometry; X-ray diffractometry; scanning electron microscopy; inductively coupled plasma mass spectrometry; isotopic analysis; atomic emission spectrometry; atomic absorption spectrometry; spectrophotometry; hydrochemical analysis; reference materials for natural and technological environmental analyses

FUNDING: The studies are performed as a part of a state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on conducting research on theme No. 0284-2021-0005 "Development of Research Methods to Study Chemical Composition and Structural Conditions of Natural and Technological Environments in Earth Sciences".

SHORT COMMUNICATION**Correspondence:** Sergei Yu. Skuzovatov, skuzovatov@igc.irk.ru

Received: December 8, 2021

Revised: December 11, 2021

Accepted: December 30, 2021

FOR CITATION: Skuzovatov S.Yu., Belozerova O.Yu., Vasil'eva I.E., Zarubina O.V., Kaneva E.V., Sokolnikova Yu.V., Chubarov V.M., Shabanova E.V., 2022. Centre of Isotopic and Geochemical Research (IGC SB RAS): Current State of Micro- and Macroanalysis. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2), 0585. doi:10.5800/GT-2022-13-2-0585

ЦЕНТР КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ «ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ» ИГХ СО РАН: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ ИЗУЧЕНИЯ ВЕЩЕСТВА НА МИКРО- И МАКРОУРОВНЕ

С.Ю. Скузоватов, О.Ю. Белозерова, И.Е. Васильева, О.В. Зарубина, Е.В. Канева,
Ю.В. Сокольников, В.М. Чубаров, Е.В. Шабанова

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1А, Россия

АННОТАЦИЯ. Центр коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований», организованный на базе Аналитического отдела Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск), выполняет широкий спектр аналитических исследований для решения минералого-петрологических, геохимических, геолого-поисковых, экологических, палеоклиматических и прикладных задач. Исследования обеспечены современным оборудованием для рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа, рентгеноструктурного и рентгенофлуоресцентного, атомно-эмиссионного и масс-спектрометрического (включая изотопный) анализа, а также необходимыми международными стандартными образцами (СО) и коллекцией СО состава природных и техногенных сред собственного производства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рентгеноспектральный анализ; рентгеновская дифрактометрия; сканирующая электронная микроскопия; масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой; изотопный анализ; атомно-эмиссионная спектрометрия; атомно-абсорбционная спектрометрия; спектрофотометрия; гидрохимический анализ; стандартные образцы состава природных и техногенных сред

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования выполнены в рамках государственного задания Минобрнауки России в части проведения НИР по теме № 0284-2021-0005 «Развитие методов исследования химического состава и структурного состояния природных и техногенных сред в науках о Земле».

1. ВВЕДЕНИЕ

Для изучения вещества в науках о Земле широкое распространение получили химические методы анализа элементного и изотопного состава, структурного состояния вещества. Современные центры коллективного пользования (ЦКП) предполагают разработку необходимых для геолого-геохимических исследований инструментов, таких как:

– современные методы (методики) химического анализа для определения состава (валовых содержаний элементов и их форм) и структурного состояния вещества;

– стандартные образцы состава для обеспечения достоверности результатов химического анализа.

ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» был организован в ноябре 2015 г. на базе Аналитического отдела Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск). Основными направлениями исследований Центра являются:

– элементный/компонентный анализ горных пород, руд, минералов, природных вод и других природных и техногенных сред для геолого-геохимических исследований, эколого-геохимических и инженерно-геологических изысканий;

– рентгеноспектральный электронно-зондовый микроанализ, рентгенофазовый анализ и оптическая спектроскопия кристаллических фаз, горных пород, агрегатов и смесей для определения состава и структуры на микроуровне;

– анализ радиогенных изотопных систем (Sm-Nd, Rb-Sr, U-Th-Pb и Lu-Hf) в горных породах, рудах и минералах для целей изотопной геохимии и геохронологии.

2. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЦКП «ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ»

2.1. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) и рентгеноспектральный электронно-зондовый микроанализ (РСМА) для решения минералого-петрологических, палеогеографических и геоэкологических задач

Современная аппаратура для РСМА (используется в институте с 1975 г.) и СЭМ (внедрен с марта 2020 г.) (рис. 1, 2) с определением состава и структуры вещества на уровне от 1 мкм до первых нанометров наиболее актуальна для идентификации новых минералов, анализа распределения и форм вхождения микро- и наноструктурных примесей. Комплексный подход, сочетающий два локальных метода, позволяет на качественно новом уровне проводить:

– идентификацию и локальный анализ состава минералов, стекол, горных пород, синтетических материалов, микронных фракций твердых осадков снежно-го покрова, почв, аэрозольных частиц в техногенных образованиях с использованием рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализатора JEOL Superprobe JXA8200 и сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA 3 LMH с системой энергодисперсионного микроанализа AztecLive Advanced Ultim Max 40



Рис. 1. Рентгеноспектральный электронно-зондовый микроанализатор Superprobe JXA8200 (JEOL Ltd., Япония).
Fig. 1. Superprobe JXA8200 electron-probe microanalyzer (JEOL Ltd., Japan).

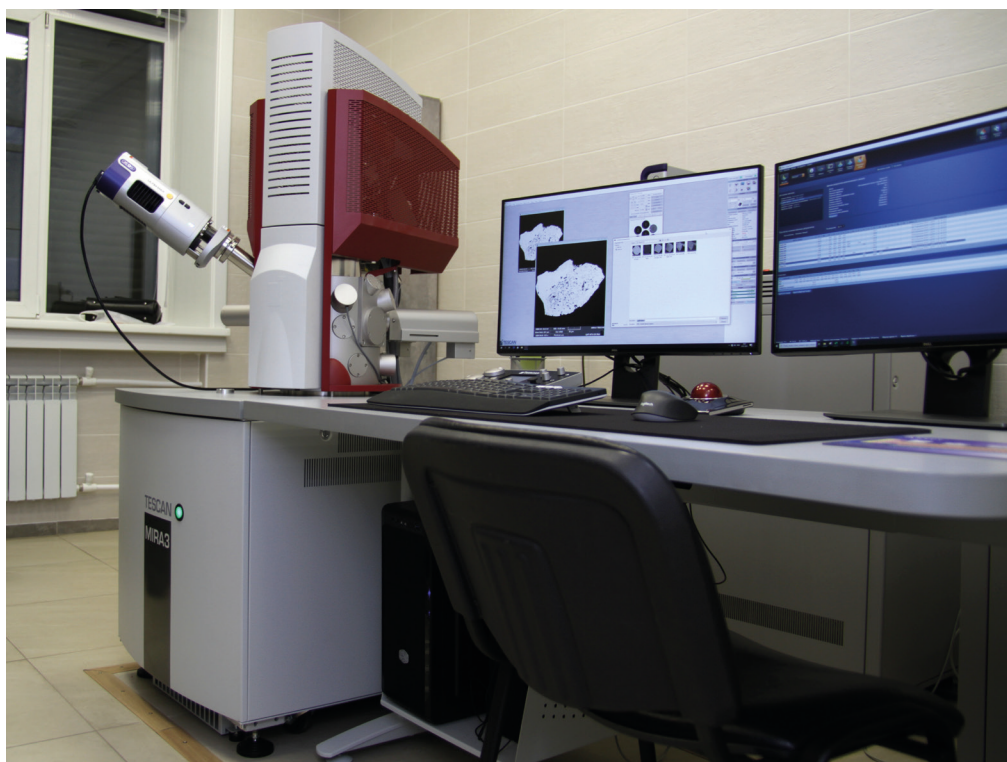


Рис. 2. Сканирующий электронный микроскоп Tescan MIRA 3 LMH (Tescan, Чехия) с системой энергодисперсионного микроанализа AztecLive Advanced Ultim Max 40 (Oxford Instruments Analytical Ltd., Англия).
Fig. 2. Tescan MIRA 3 LMH scanning electron microscope (Tescan, Czech Republic) equipped with the AztecLive Advanced Ultim Max 40 EDX microanalysis system (Oxford Instruments Analytical Ltd., England).

(Oxford Instruments Analytical Ltd., Англия) (от 10^{-3} до 100 мас. % для элементов от В до U);

- анализ микроповерхности минеральных индивидуальных, агрегатов и других объектов;
- площадное картирование поверхности с определением характера неоднородности состава минеральных фаз;
- характеристику неоднородности структуры люминесцентных фаз с применением катодолюминесцентной топографии с использованием монохроматической катодолюминесцентной приставки TESCAN Rainbow CL (TESCAN, Чехия).

Методы СЭМ и РСМА успешно применяются в минералого-геохимических исследованиях [Gornova et al., 2020; Marfin et al., 2021] и для анализа синтетических минеральных фаз [Belozeroва et al., 2017]. Для оборудования разрабатываются новые методики микроанализа, включая исследования озерных, донных и торфяных отложений для палеоклиматических исследований, аэрозолей и осадков снежного и почвенного покрова с целью оценки техногенного загрязнения.

2.2. Диагностика, структурная характеристика и исследование свойств минеральных фаз и синтетических соединений

Находки редких и новых минеральных видов предполагают исследование их состава и структуры. На протяжении многих лет при участии сотрудников ЦКП проводятся кристаллохимические исследования методом рентгеноструктурного анализа с помощью порошкового дифрактометра Bruker D8 ADVANCE (Bruker AXS, Германия) (излучение CuK α) (рис. 3), результатом которых являются открытие и характеристика серии новых минеральных видов в щелочных породах, гранитных

пегматитах и метасоматитах, а также пересмотр кристаллохимии и состава некоторых минералов (например [Sapozhnikov et al., 2021]). Применение высокотемпературной модификации метода с использованием нагревательной камеры НТК16 позволяет характеризовать термоупругое поведение минералов и связанные с термическим расширением окислительно-восстановительные процессы в минералах, содержащих элементы переменной валентности. В частности, недавние исследования термоупругого поведения калий-гастингсита при температуре до 750 °C показали, что амфибол подвергается процессу окисления Fe²⁺ и связанного с ним полного и необратимого депротонирования, а тепловая эволюция характеризуется расширением в диапазоне ~300–350 °C, за которым следует структурное сжатие (~400–600 °C), связанное с окислением Fe²⁺ до Fe³⁺ [Kaneva et al., 2021].

2.3. Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) в геохимических исследованиях и новые методики исследования нетрадиционных типов объектов

Действующие методики РФА с использованием сканирующего волнодисперсионного спектрометра S4 Pioneer (Bruker AXS, Германия) позволяют определять содержания главных компонентов (Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, Mn, Fe), элементов группы железа и редких элементов (Ba, Sr, Nb, Zr, Y, U, Th и др.) в широком спектре природных сред и материалов, от горных пород, минералов и руд до почв, речных и донных отложений и растений, а также валентное состояние железа, марганца и серы в породах, рудах и других природных объектах.

Недавно разработанные методики, в том числе при участии сотрудников и с использованием оборудования ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН,

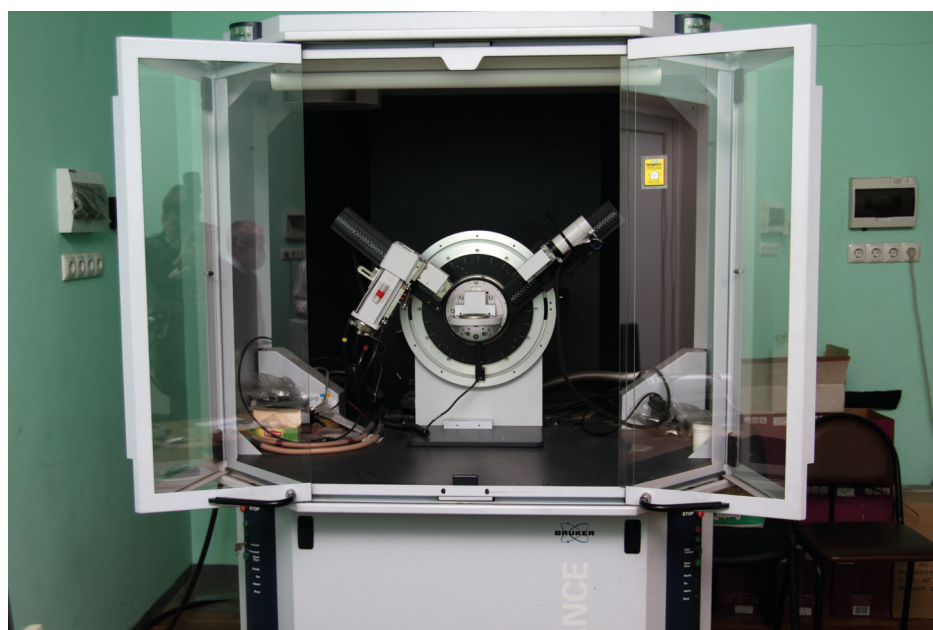


Рис. 3. Порошковый дифрактометр Bruker D8 ADVANCE (Bruker AXS, Берлин, Германия).

Fig. 3. Bruker D8 ADVANCE X-ray powder diffractometer (Bruker AXS, Germany).

делают возможным количественный анализ порошковых торфяных отложений, континентальных и озерных железомарганцевых конкреций. Проблема отсутствия матричных стандартных образцов и влияния минерального состава на точность измерений решена комбинированием РФА с волновой дисперсией, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и РФА с полным внешним отражением. Разработанная методика позволяет количественно определять породообразующие (Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, Mn, Fe), а также микроэлементы (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Y, Zr, Ba и Pb) и может быть использована в качестве инструмента для геолого-геохимических приложений [Chubarov et al., 2021]. Проведенные теоретические оценки влияния гранулометрического состава на интенсивность рентгеновской флуоресценции в минеральных фазах торфяных отложений позволили разработать методику количественного определения основных породообразующих элементов (Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, Mn, Fe) в порошковых образцах торфяных отложений без соответствующих по составу стандартных образцов с точностью, достаточной для палеоклиматических реконструкций [Amosova et al., 2021]. Методика используется для комплексных исследований торфяных отложений из районов, в которых отсутствуют источники постоянного антропогенного воздействия и преобладают ненарушенные экосистемы, что позволяет определить ключевые показатели изменчивости природной среды и оценить скорости климатических изменений.

2.4. Методы атомно-абсорбционной спектрометрии, пламенной фотометрии, спектрофотометрии, гидрохимического анализа для геохимических, геолого-прогнозных и геоэкологических исследований

Основными направлениями деятельности химико-аналитической производственной лаборатории, входящей в структуру ЦКП, являются:

- классический анализ полного химического состава горных пород, минералов и других природных/синтетических сред, а также определение отдельных компонентов пород, минералов и других природных/синтетических сред (FeO , CO_2 , H_2O^\pm , $\text{S}_{\text{общ}}$, SO_3^{2-} , F^- , п.п.п., Li, Rb, Cs, Na, K) для целей петрохимии и геохимии;

- определение содержания благородных металлов и платиноидов (Au, Ag, Pd, Pt, Rh, Ru, Ir) от кларковых до рудных содержаний в породах и рудах методами атомно-абсорбционной спектрометрии и масс-спектрометрии в фундаментальных исследованиях процессов рудообразования и при сопровождении геолого-поисковых работ;

- определение содержания ртути в породах, почвах, илах, водах и биологических объектах, форм нахождения Hg, Cd, Pb в минеральных веществах;

- общий гидрохимический анализ поверхностных, глубинных и сточных вод.

В работе используется современное отечественное оборудование, в том числе ртутный анализатор РА-915М

с приставками РП-92 и ПИРО-915+, система капиллярного электрофореза КАПЕЛЬ-105М, а также атомно-абсорбционные спектрометры Perkin-Elmer AAnalyst-200 и AAnalyst-800. Наиболее востребованным направлением данного направления работ является оценка состояния окружающей среды и экологический мониторинг в частности и использование гидрохимического анализа вод озера Байкал, рек и водохранилищ Прибайкалья [Poletaeva et al., 2021], изучение распределения ртути [Pastukhov et al., 2019] и других микроэлементов [Grebenshchikova et al., 2021], а также характера их накопления в растениях и биоте. Полученные результаты неоднократно представлялись в рамках отчетов об экологическом состоянии окружающей среды Прибайкалья перед правительством Иркутской области.

2.5. Атомно-эмиссионная спектрометрия в геолого-геохимических и геоэкологических исследованиях

Традиционными объектами атомно-эмиссионной спектрометрии являются горные породы, минералы, руды, рыхлые и донные отложения, почвы, биота растительного и животного происхождения, природные и сточные воды, а также водные и органические вытяжки. Чтобы анализировать без изменения и с изменением агрегатного состояния состав природных и техногенных веществ, в работе ЦКП используют современные атомно-эмиссионные спектрометры с различными источниками возбуждения атомов (пламя, дуговой разряд и индуктивно связанная плазма). Элементный состав растворов определяют на спектрометрах с индуктивно связанной плазмой iCAP 6300 Duo (Thermo Fisher Scientific, USA) и Колибри-2 (ООО «ВМК-Оптоэлектроника», Россия) [Zak et al., 2021]. Порошковые пробы анализируют на спектральных комплексах с дуговым разрядом и фотоэлектрической регистрацией спектров многоканальными детекторами МАЭС (ООО «ВМК-Оптоэлектроника», Россия) [Vasil'eva, Shabanova, 2021]. Приборы для многоэлементного анализа регистрируют и обрабатывают огромные массивы аналитических данных, что позволяет улучшить пределы обнаружения аналитов, расширить диапазоны определения и повысить точность результатов анализа.

В Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск) разработан новый высокочувствительный способ одновременного определения содержания всех благородных металлов в геологических объектах без химической пробоподготовки. Способ реализован на дуговом сцинтилляционном атомно-эмиссионном спектрометре с высоким временным и спектральным разрешением «Гранд-2000-Поток» (ООО «ВМК-Оптоэлектроника», Россия) (рис. 4), обеспечивает определение с 1–50 нанограмм элемента на грамм анализируемого образца (табл. 1). Приложим к объектам разного состава и происхождения и может быть рекомендован для получения данных о валовом содержании благородных металлов, составе и размерах микрофаз, включающих эти металлы (известно, что золото, платина



Рис. 4. Дуговой сцинтилляционный атомно-эмиссионный спектрометр с высоким временным и спектральным разрешением «Гранд-2000-Поток» (ООО «ВМК-Оптоэлектроника», Россия).

Fig. 4. Grand-2000-Potok scintillation atomic-emission spectrometer with arc discharge and high temporal and spectral resolution (VMK-Optoelectronics, Ltd., Russia).

Таблица 1. Среднее содержание благородных металлов в земной коре, содержания элементов в геологических пробах, минимально определяемые и найденные методом сцинтилляционной атомно-эмиссионной спектрометрии

Table 1. The abundance of precious metals in the Earth's crust, the minimum determined and found element contents in geological samples by scintillation atomic emission spectrometry

Элемент Земная кора	Содержание, 10^{-7} мас. % (ppb)			Размеры микрофаз, мкм
	Минимально определяемое	Углеродсодержащие породы сарминской серии [Danilova et al., 2021]	найденные	
Золото Au	4.3	0.6	13-790	2-22
Серебро Ag	60	4	30-1700	2-16
Платина Pt	5	4	40-100	2-6
Палладий Pd	10	1.3	2-8	2-6
Родий Rh	1	30	<30	2-4
Рутений Ru	50	0.4	3	2-4
Иридий Ir	1	3	3	2-4
Осмий Os	50	10	<10	2-4

и другие элементы рассматриваемой группы часто распределены в геологических объектах неомогенно). Методика успешно апробирована на метаморфизованных углеродсодержащих породах сарминской серии из южной части Байкальского выступа фундамента Сибирского кратона [Danilova et al., 2021].

2.6. Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой в изотопно-геохимических исследованиях

Группа масс-спектрометрического анализа осуществляет исследования микроэлементного и изотопного состава широкого спектра горных пород и минералов

с использованием квадрупольного масс-спектрометра PerkinElmer NexION 300D (рис. 5), магнитосекторного масс-спектрометра высокого разрешения с двойной фокусировкой Thermo Finnigan ELEMENT 2. В спектр основных направлений микроэлементного анализа в настоящий момент входят:

- рутинный микроэлементный (от Li до U) анализ горных пород и руд с пробоподготовкой открытым и автоклавным кислотным разложением, сплавлением с метаборатом лития (для трудноразлагаемых проб); в ручном режиме и с помощью автономной системы микроволнового разложения образцов туннельного типа MultiVIEW (Канада);

- высокоточный элементный анализ природных вод и сверхчистых материалов (в том числе кремния и кварцевого сырья) с ультраследовым содержанием аналита;

- локальный анализ содержания редких и рассеянных элементов в минералах, стеклах, флюидных/расплавных включениях и синтетических материалах с использованием высокопроизводительной системы лазерной абляции New Wave Research UP 213 с Nd:YAG лазером (рис. 6).

В рамках работы ЦКП освоены и усовершенствованы методики хроматографической пробоподготовки и изотопного анализа радиогенных Rb-Sr, Sm-Nd и U-Th-Pb систем, включая высокоточный анализ изотопного состава Pb, с использованием мультиколлекторного

масс-спектрометра Thermo Finnigan Neptune plus (МС-ICP-MS) (рис. 7), а также комплекса термоионизационных масс-спектрометров МИ-1201, методик изотопного разбавления и смешанных изотопных трассеров. Исследования обеспечены комплексом чистых лабораторных помещений и проводятся с использованием сверхчистой воды, полученной с помощью комбинированной системы Milli-Q IQ 7005 (Millipore, Франция). Для увеличения производительности МС-ICP-MS Neptune plus оснащен интегрированным автосэмплером SC-Micro DX. В последние годы методики наиболее масштабно отработаны на примере исследования высокоградных пород Забайкалья, северной и центральной части Центрально-Азиатского складчатого пояса [Skuzovатов et al., 2018, 2019; Shatsky et al., 2018], а также систематически используются в рамках совместных с другими организациями Минобрнауки исследований осадочных и вулканических комплексов (к примеру [Fedorov et al., 2019; Kanygina et al., 2021; Zakharov et al., 2018]).

В настоящее время завершается отработка методики пробоподготовки и анализа изотопного состава Hf в горных породах контрастного состава (от гранитоидов до базальтов). В целях совершенствования существующих методик для высокоточного анализа изотопного состава Nd-Pb-Hf, в том числе для анализа объектов с низким содержанием радиогенных изотопов (к примеру, ультраосновных пород и некоторых



Рис. 5. Квадрупольный масс-спектрометр PerkinElmer NexION 300D (PerkinElmer, USA) с автосэмплером.

Fig. 5. PerkinElmer NexION 300D quadrupole (Q-ICP-MS) mass-spectrometer (PerkinElmer, USA) with the autosampler.

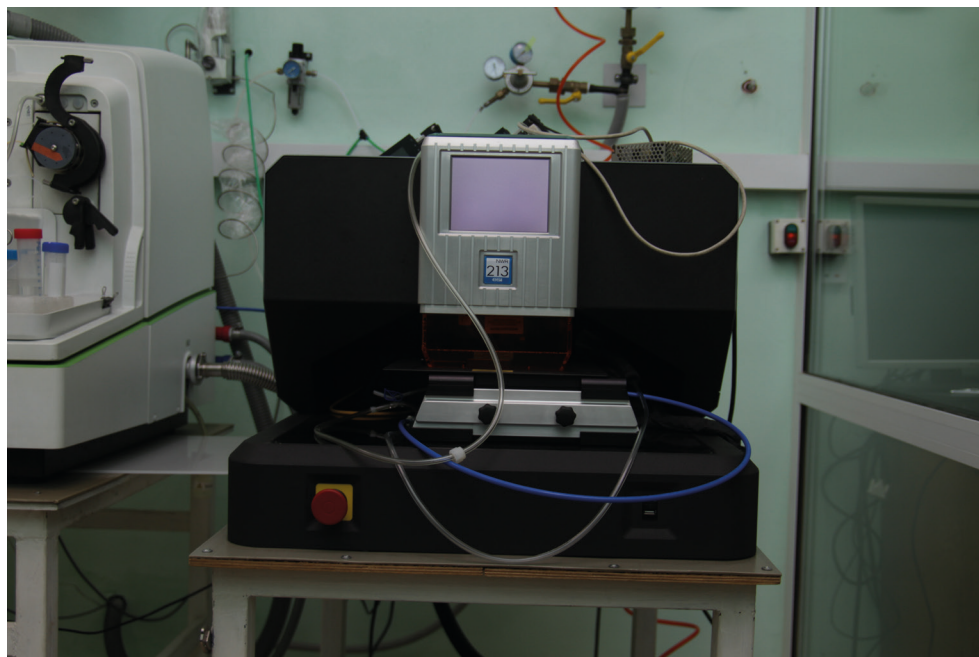


Рис. 6. Система лазерной абляции New Wave Research UP 213 с Nd:YAG лазером (213 нм).

Fig. 6. New Wave Research UP 213 laser ablation platform with the Nd:YAG laser (213 nm).



Рис. 7. Мультиколлекторный (MC-ICP-MS) масс-спектрометр Thermo Finnigan Neptune plus (ThermoFinnigan LLC, USA), оснащенный автосэмплером SC-Micro DX.

Fig. 7. ThermoFinnigan Neptune plus Multi-collector (MC-ICP-MS) mass-spectrometer (ThermoFinnigan LLC, USA) equipped with the SC-Micro DX autosampler.

Таблица 2. Список и характеристики разработанных СО из кластера «Растения» коллекции ИГХ СО РАН
Table 2. The list and features of reference materials from «Plants» cluster of the collection IGC SB RAS

Тип, наименование и номер в реестре СО			Содержания элементов аттестованы (рекомендованы)	Срок действия до
Элодея канадская	ЭК-1	ГСО 8921-2007, СОМЕТ 00652008RU	34 (30)	
Травосмесь	Тр-1	ГСО 8922-2007, СОМЕТ 00662008RU	38 (22)	30.11.2027
Лист березы	ЛБ-1	ГСО 8923-2007, СОМЕТ 00672008RU	41 (22)	
Хвоя сосны сибирской	ХСС-1	РМ-2016	28 (30)	30.11.2026

минералов), и для изохронного датирования в 2022 г. планируется дооснащение масс-спектрометрического оборудования системой конфигурирования вводных конусов (Jet Interface, X-skimmer) и десольватирующим небулайзером CETAC Aridus II.

2.7. Метрологическое обеспечение аналитических исследований: развитие коллекции матричных стандартных образцов ИГХ СО РАН

Обеспечение качества аналитических работ при геолого-геохимических, палеоклиматических и экологических исследованиях опирается на метрологическое обеспечение, включающее использование сертифицированных стандартных образцов и референтных материалов состава исследуемых сред [Vasil'eva, Shabanova, 2017]. Несмотря на имеющийся в мире обширный перечень стандартных образцов (СО) для геоанализа, в целях сохранения окружающей среды, а также в связи с увеличением объемов трансграничной торговли развитие коллекции матричных стандартных образцов ИГХ СО РАН остается актуальным. Коллекция, включающая более 35 утвержденных типов государственных стандартных образцов природных и техногенных сред, востребована в испытательных центрах научно-исследовательских и производственных организаций России, стран ближнего и дальнего зарубежья. В аналитических работах ЦКП образцы из коллекции применяются для контроля качества результатов, аттестации и верификации аналитических методик.

Особый интерес представляют СО из кластера «Растения» [Shabanova et al., 2021]. Наземные и водные растения, выбранные для изготовления четырех СО, являются чувствительными индикаторами состояния окружающей среды, собраны с незагрязненных территорий в районе оз. Байкал. В СО растений установлены содержания более 60 элементов, из которых от 23 до 41 аттестованы способом межлабораторной аттестации при участии большого числа аккредитованных российских и зарубежных лабораторий (табл. 2). Многоэлементные СО из кластера «Растения» не имеют аналогов в России по типам материала и по числу аттестованных содержаний химических элементов. Согласно законодательству РФ они рекомендованы для выполнения химических измерений в области обязательного государственного регулирования, а также для

профессионального тестирования лабораторий геоэкологических, фармацевтических и сельскохозяйственных организаций.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Центр коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН предоставляет возможность проведения анализа широкого спектра горных пород, минералов, синтетических соединений и материалов, а также техногенных сред, обеспеченного современным оборудованием и матричными международными стандартными образцами для решения минералого-геохимических, геолого-поисковых, геоэкологических и иных прикладных задач. Организации, которым необходимы эти виды исследований, приглашаются к сотрудничеству.

4. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

5. 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.

6. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Amosova A.A., Chubarov V.M., Finkelshtein A.L., 2021. Features of X-Ray Fluorescence Determination of Rock-Forming Elements in Powder Samples of Peat Sediments. X-Ray Spectrometry 1. <http://doi.org/10.1002/xrs.3267>.

Belozerova O.Yu., Mikhailov M.A., Demina T.V., 2017. Investigation of Synthesized Be-Bearing Silicate Glass as Laboratory Reference Sample at X-Ray Electron Probe Microanalysis of Silicates. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy 127, 34–41. <http://doi.org/10.1016/j.sab.2016.11.007>.

Chubarov V.M., Pashkova G.V., Panteeva S.V., Amosova A.A., 2021. Multielement Analysis of Continental and Lacustrine

Ferromanganese Nodules by WDXRF, TXRF and ICP MS Methods: Intercomparison Study and Accuracy Assessment. *Applied Radiation and Isotopes* 178, 109981. <http://doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.109981>.

Danilova Yu.V., Vasil'eva I.E., Shabanova E.V., Savelyeva V.B., Danilov B.S., 2021. Noble Metals in Rocks of the Sarma Group: Phase Composition and Element Associations. *Geochemistry International* 59, 301–313. <https://doi.org/10.1134/S001670292101002X>.

Fedorov P.I., Perepelov A.B., Kovalenko D.V., Dril S.I., Lobanov K.V., 2019. Sources of Eocene Magmatism in Western Kamchatka by the Geochemical and Sr–Nd–Pb Isotope Characteristics of Basites. *Doklady Earth Sciences* 487, 835–840. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X19070225>.

Gornova M.A., Karimov A.A., Skuzovatov S.Yu., Belyaev V.A., 2020. From Decompression Melting to Mantle-Wedge Refertilization and Metamorphism: Insights from Peridotites of the Alag-Khadny Accretionary Complex (SW Mongolia). *Minerals* 10 (5), 396. <http://doi.org/10.3390/min10050396>.

Grebenshchikova V.I., Kuzmin M.I., Rukavishnikov V.S., Efimova N.V., Donskikh I.V., Doroshkov A.A., 2021. Chemical Contamination of Soil on Urban Territories with Aluminum Production in the Baikal Region, Russia. *Air, Soil and Water Research* 14, 1–11. <https://doi.org/10.1177/11786221211004114>.

Kaneva E., Radomskaya T., Shendrik R., Chubarov V., Danilovsky V., 2021. Potassic-Hastingsite from the Kedrov District (East Siberia, Russia): Petrographic Description, Crystal Chemistry, Spectroscopy, and Thermal Behavior. *Minerals* 11 (10), 1049. <https://doi.org/10.3390/min11101049>.

Kanygina N.A., Tretyakov A.A., Degtyarev K.E., Kovach V.P., Skuzovatov S.Yu., Pang K.-N., Wang K.-L., Lee H.-Y., 2021. Late Mesoproterozoic – Earliest Neoproterozoic Quartzite-Schists Sequences of the Aktau-Mointy Terrane (Central Kazakhstan): Provenance, Crustal Evolution and Implication for Paleotectonic Reconstructions. *Precambrian Research* 354, 106040. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.106040>.

Marfin A.E., Radomskaya T.A., Ivanov A.V., Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., Yakich T.Yu., Gertner I.F., Kamo S.L. et al., 2021. U–Pb Dating of Apatite, Titanite and Zircon of the Kingash Mafic–Ultramafic Massif, Kan Terrane, Siberia: From Rodinia Break-up to the Reunion with the Siberian Craton. *Journal of Petrology* 62 (9), egab049. <https://doi.org/10.1093/petrology/egab049>.

Pastukhov M.V., Poletaeva V.I., Tirskikh E.N., 2019. Long-Term Dynamics of Mercury Pollution of the Bratsk Reservoir Bottom Sediments, Baikal Region, Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 321, 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/321/1/012041>.

Poletaeva V.I., Tirskikh E.N., Pastukhov M.V., 2021. Hydrochemistry of Sediment Pore Water in the Bratsk Reservoir (Baikal Region, Russia). *Scientific Reports* 11, 11124. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90603-x>.

Sapozhnikov A.N., Tauson V.L., Lipko S.V., Shendrik R.Yu., Levitskii V.I., Suvorova L.F., Chukanov N.V., Vigasina M.F., 2021.

On the Crystal Chemistry of Sulfur-Rich Lazurite, Ideally $\text{Na}_7\text{Ca}(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})(\text{SO}_4)(\text{S}_3) \cdot n\text{H}_2\text{O}$. *American Mineralogist* 106 (2), 226–234. <https://doi.org/10.2138/am-2020-7317>.

Shabanova E.V., Vasil'eva I.E., Tausenev D.S., Scherbarth S., Pierau U., 2021. Features of «Plants» Cluster from the Reference Materials Collection of IGC SB RAS. *Measurement Standards. Reference Materials* 17 (3), 45–61 (in Russian) [Шабанова Е.В., Васильева И.Е., Таусенев Д.С., Scherbarth S., Pierau U. Характерные свойства стандартных образцов кластера «Растения» в коллекции ИГХ СО РАН // Эталоны. Стандартные образцы. 2021. Т. 17. № 3. С. 45–61]. <https://doi.org/10.20915/2687-0886-2021-17-3-45-61>.

Shatsky V.S., Skuzovatov S.Yu., Ragozin A.L., 2018. Isotope-Geochemical Evidence for Crustal Contamination of Eclogites in the Kokchetav Subduction-Collision Zone. *Russian Geology and Geophysics* 59 (12), 1560–1576. <http://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.12.003>.

Skuzovatov S.Yu., Shatsky V.S., Dril S.I., Perepelov A.B., 2018. Elemental and Isotopic (Nd–Sr–O) Geochemistry of Eclogites from the Zamtyin-Nuruu Area (SW Mongolia): Crustal Contribution and Relation to Neoproterozoic Subduction-Accretion Events. *Journal of Asian Earth Sciences* 167, 33–51. <http://doi.org/10.1016/j.jseae.2017.11.032>.

Skuzovatov S.Yu., Shatsky V.S., Wang K.-L., 2019. Continental Subduction during Arc-Microcontinent Collision in the Southern Siberian Craton: Constraints on Protoliths and Metamorphic Evolution of the North Muya Complex Eclogites (Eastern Siberia). *Lithos* 342–343, 76–96. <http://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.05.022>.

Vasil'eva I.E., Shabanova E.V., 2017. Certified Reference Materials of Geological and Environmental Objects: Problems and Solutions. *Journal of Analytical Chemistry* 72, 129–146. <https://doi.org/10.1134/S1061934817020149>.

Vasil'eva I.E., Shabanova E.V., 2021. Stages of Arc Atomic Emission Spectrometry Development as Applied to the Solid Geological Samples' Analysis. *Analytics and Control* 25 (4), 280–295 (in Russian) [Васильева И.Е., Шабанова Е.В. Этапы развития дуговой атомно-эмиссионной спектроскопии в приложении к анализу твердых геологических образцов // Аналитика и контроль. 2021. Т. 25. № 4. С. 280–295]. <https://dx.doi.org/10.15826/analitika.2021.25.4.007>.

Zak A.A., Shabanova E.V., Vasil'eva I.E., 2021. Results Accuracy of the Simultaneous Na, K, Li, Rb and Cs Determination in Geochemical Objects Using the Flame Atomic Emission Spectrometry. *Analytics and Control* 25 (1), 6–19 (in Russian) [Зак А.А., Шабанова Е.В., Васильева И.Е. Точность результатов одновременного определения Na, K, Li, Rb и Cs в геохимических объектах методом пламенной атомно-эмиссионной спектроскопии // Аналитика и контроль. 2021. Т. 25. № 1. С. 6–19]. DOI:10.15826/analitika.2021.25.1.004.

Zakharov Y.D., Dril S.I., Shigeta Y., Popov A.M., Baraboshkin E.Y., Michailova I.A., Safronov P.P., 2018. New Aragonite $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Records of Mesozoic Ammonoids and Approach to the Problem of N, O, C and Sr Isotope Cycles in the Evolution of the Earth. *Sedimentary Geology* 364, 1–13. <http://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.11.011>.