

**PRIMORSKY CENTRE FOR LOCAL ELEMENTAL AND ISOTOPIC ANALYSES OF FEGI FEB RAS:
EXPERIENCE OF THE FUNCTIONING AND MAIN AREAS OF RESEARCH****M.G. Blokhin**  , **T.A. Velivetskaya** , **G.M. Vovna**, **N.V. Zarubina**, **V.V. Ivanov** , **A.A. Karabtsov**

Far East Geological Institute, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, 159 100-letya Ave, Vladivostok 690022, Russia

ABSTRACT. The Shared Research Facilities "Primorsky Centre for Local Elemental and Isotopic Analyses" was created based on the instrumental base of the Far Eastern Geological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. The Shared Research Facilities conducts its own (for the needs of FEGI FEB RAS) fundamental and applied scientific research to establish the elemental, isotopic composition and structure of both natural and artificial objects, as well as jointly with other scientific Russian and foreign institutions and universities, industrial enterprises, state and private companies that require modern, precision methods for analyzing various substances and materials, diagnosing and monitoring the condition and changes in the environment.

KEYWORDS: Shared Research Facilities; geochemical research; elemental analysis; isotopic analysis; mass spectrometry; scanning electron microscopy; x-ray methods of analysis; laser sampling; chemical sample preparation; crushing and grinding equipment

REVIEW

Received: December 9, 2021

Revised: January 13, 2022

Accepted: January 20, 2022

Correspondence: Maksim G. Blokhin, blokhin@fegi.ru

FOR CITATION: Blokhin M.G., Velivetskaya T.A., Vovna G.M., Zarubina N.V., Ivanov V.V., Karabtsov A.A., 2022. Primorsky Centre for Local Elemental and Isotopic Analyses of FEGI FEB RAS: Experience of the Functioning and Main Areas of Research. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2), 0578. doi:10.5800/GT-2022-13-2-0578

ЦКП «ПРИМОРСКИЙ ЦЕНТР ЛОКАЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТНОГО И ИЗОТОПНОГО АНАЛИЗА» ДВГИ ДВО РАН: ОПЫТ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

М.Г. Блохин, Т.А. Веливецкая, Г.М. Вовна, Н.В. Зарубина, В.В. Иванов, А.А. Карабцов

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, 690022, Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, 159, Россия

АННОТАЦИЯ. Центр коллективного пользования (ЦКП) «Приморский центр локального элементного и изотопного анализа» создан на основе приборной базы Дальневосточного геологического института ДВО РАН. ЦКП проводит собственные (для нужд ДВГИ ДВО РАН) фундаментальные и научно-прикладные исследования по установлению элементного, изотопного состава и структуры как природных, так и техногенных объектов, а также совместно с другими научными российскими и зарубежными учреждениями и вузами, промышленными предприятиями, государственными и частными компаниями, имеющими потребность в современных, прецизионных методах анализа различных веществ и материалов, диагностики и мониторинга состояния и изменения окружающей среды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: центр коллективного пользования; геохимические исследования; элементный анализ; изотопный анализ; масс-спектрометрия; сканирующая электронная микроскопия; рентгеновские методы анализа; лазерный пробоотбор; химическая пробоподготовка; дробильно-измельчительное оборудование

1. ВВЕДЕНИЕ

«Приморский центр локального элементного и изотопного анализа» (<http://fegi.ru/ckp>) был создан на базе Аналитического центра ДВГИ ДВО РАН Постановлением Президиума ДВО РАН № 52 от 27 апреля 2004 г. с целью более рационального использования кадрового потенциала и современного дорогостоящего оборудования.

В состав ЦКП входит Аналитический центр ДВГИ ДВО РАН, включающий лабораторию стабильных изотопов, лабораторию аналитической химии, лабораторию микро- и наноисследований и лабораторию рентгеновских методов, а также несколько других подразделений института, имеющих в своем составе различные приборы и устройства. Более подробно в данной статье будет сказано о четырех лабораториях Аналитического центра.

Основу приборного парка ЦКП ДВГИ составляет оборудование (более 50 приборов и приборных комплексов) для проведения элементных и изотопных определений: масс-спектрометры, электронные и атомно-силовые микроскопы, приборы для рентгеновского микроанализа, молекулярной и Раман-спектрометрии, хроматографы, атомно-эмиссионные спектрометры и др. Использование мощного комплекса пробоподготовки, включающего дробильно-измельчительное оборудование, СВЧ-системы, автоматизированное изготовление шлифов и аншлифов, пробирную плавку, а также применение химических методик разложения, разделения и концентрирования позволяют осуществлять анализ проб различного фазового и минералогического состава. Применение лазерных систем пробоотбора дает возможность выполнять измерения локальных участков (до 10 мкм) твердых образцов, флюидных включений (состав газов и жидкостей вакуолей), делать послойное элементное и изотопное

профилирование и картирование без сложной предварительной химической подготовки проб. Рентгеновские методы анализа, широко представленные в ЦКП, позволяют проводить неразрушающие определения структуры и состава различных объектов.

Исследования ЦКП зачастую носят уникальный характер и проводятся на высоком научном уровне.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОЛУЧАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Лаборатория стабильных изотопов. Данная лаборатория является одной из лидирующих лабораторий в России по приборному и методическому обеспечению, позволяющему проводить определения изотопного состава легких элементов.

Основу приборной базы лаборатории составляет линейка масс-спектрометров Thermo Finnigan MAT-253 (Thermo Scientific, Германия) в комплексе со вспомогательным оборудованием.

Лаборатория имеет ряд собственных уникальных наработок. В частности, в лаборатории действует единственная в России установка для определения отношений $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ и $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ в силикатах и окислах из земных образцов и метеоритов, а также в различных веществах, таких как, например, перекись водорода, изучение масс-независимых аномалий ^{17}O в которой может дать дополнительные сведения о химическом составе как современной, так и, возможно, древней атмосферы [Velivetskaya et al., 2016]. Провести подобный изотопный анализ кислорода во всем мире способны всего несколько научных лабораторий. С помощью данной установки в 2013 г. был изучен знаменитый Челябинский метеорит, который в течение двух недель после падения исследовался в Открытом университете Милтон Кинс (Великобритания) [Pillinger et al., 2013]. Для него были получены различные геохимические параметры, в том

числе изотопный состав $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$. Практически параллельно в лаборатории стабильных изотопов также был определен изотопный состав кислорода для обсуждаемого «пришельца» из космоса [Khanchuk et al., 2013]. До этого ^{17}O в России не исследовался с такой точностью. Среди других измеряемых изотопных отношений находятся такие, как H/D , $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ (из CO_2 и O_2), $^{33}\text{S}/^{32}\text{S}$, $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ (из SO_2 и SF_6).

В целом, оборудование лаборатории может быть задействовано в таких научных дисциплинах, как геология (генезис рудных месторождений, решение вопросов об источниках рудного вещества и физико-химических условий их формирования), космохимия (решение вопросов образования и эволюции вещества Солнечной системы), биология (для изучения трофических связей и уровней, механизмов физиологических процессов), экология (исследование и прогнозирование экологических изменений, вызванных как естественными причинами, так и антропогенной деятельностью), палеоклиматология (реконструкция условий окружающей среды в прошлом), экспертиза и диагностика (идентификация сырьевых источников в производстве вино-водочных изделий, соков, меда и др.; идентификация природного и культивируемого женьшеня).

В лаборатории стабильных изотопов впервые в мировой практике была разработана методика, позволяющая выполнять локальный изотопный анализ серы методом масс-спектрометрии с лазерной абляцией с фемтосекундным лазером. Рассмотрим данную разработку более подробно, как один из основных результатов деятельности лаборатории в составе ЦКП.

Разработан новый метод для локального определения изотопных отношений серы ($\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{33}\text{S}$ и $\delta^{36}\text{S}$) в сульфидах на основе применения фемтосекундного ультрафиолетового комплекса лазерной абляции (New Wave Research, США) в сочетании с системой фторирования образцов и измерения изотопных отношений серы на мультиколлекторном изотопном масс-спектрометре MAT-253 [Ignat'ev et al., 2018; Velivetskaya et al., 2019]. Данная разработка дает новые возможности для исследования *in situ* соотношения всех четырех стабильных изотопов серы ^{32}S , ^{33}S , ^{34}S и ^{36}S в сульфидных минералах. Аналитические характеристики метода – типичное пространственное разрешение ~ 80 мкм, погрешность (1σ) определения величин $\delta^{34}\text{S}$, $\Delta^{33}\text{S}$ и $\Delta^{36}\text{S}$ составляет ± 0.2 , ± 0.03 и ± 0.27 ‰ соответственно. По сравнению с методом масс-спектрометрии вторичных ионов (ВИМС), результаты, полученные новым методом, не зависят от пространственной ориентировки кристалла или отдельных его участков (рис. 1). На рис. 1 показаны кратеры после лазерной абляции на поверхности индивидуальных кристаллов сфалерита (международный стандарт NBS-123) с указанием измеренных значений изотопного состава $\delta^{34}\text{S}$ и величины изотопной аномалии $\Delta^{33}\text{S}$.

В лаборатории стабильных изотопов были проведены исследования изотопных эффектов серы $\delta^{34}\text{S}$ и $\Delta^{33}\text{S}$ в сульфидах из пород и руд Фенноскандинавского щита

и Сибирской платформы [Ignat'ev et al., 2016; Vysotskiy et al., 2019; Velivetskaya et al., 2020, 2022; и др.]. В пределах Фенноскандинавского щита изотопный состав серы был исследован в колчеданных рудах из архейских комплексов Карельского и Кольского кратонов. Изученные сульфидные образования приурочены к вулканогенно-осадочным породам кислого состава в структуре Карельского кратона и к базит-ультрабазитовым интрузивам в структуре Кольского кратона. В пределах Сибирской платформы исследовались образцы колчеданных руд из высокометаморфизованных (гранулитовая фация) пород Иркутского блока Шарыжальгайского выступа, юго-запад Сибирского кратона.

В октябре 2021 г. руководителем лаборатории Т.А. Веливецкой была успешно защищена диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.09 по теме «Эффекты масс-независимого фракционирования изотопов серы и кислорода в архейской атмосфере Земли». Для изучения изотопных характеристик серы и кислорода были применены методы, представленные выше. Также в 2021 г. получил поддержку РНФ проект «Мультиизотопный ($\delta^{33}\text{S}$, $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{36}\text{S}$) состав серы сульфидов древних руд: значимость для определения источников серы, биогеохимических процессов и генезиса месторождений» (научный руководитель – д.г.-м.н. С.В. Высоккий), который выполняется с использованием оборудования и методического обеспечения лаборатории.

Лаборатория аналитической химии. Основной задачей лаборатории является изучение элементного и изотопного (геохронология) состава геологических образцов с применением методов плазменной спектроскопии, в том числе с использованием метода ЛА-ИСП-МС.

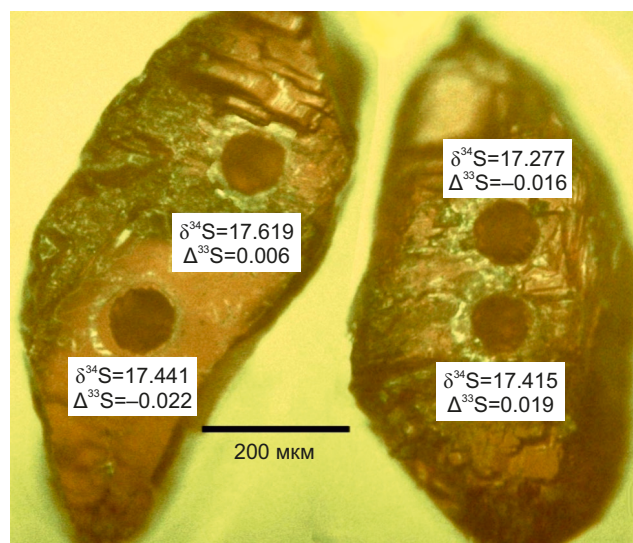


Рис. 1. Пример применения нового метода с лазерной абляцией для локального определения изотопов серы (^{33}S , ^{34}S и ^{32}S).

Fig. 1. An example of the application of a new laser ablation method for local determination of the sulfur isotopes (^{33}S , ^{34}S and ^{32}S).

Становление данного метода в лаборатории начиналось с запуска под началом к.г.-м.н. В.И. Кисёлева в середине 2000-х годов приборного комплекса, состоящего из масс-спектрометра Agilent 7500a (Agilent Technologies, Япония), оснащенного UP-266 (New Wave Research, США) Nd:YAG твердотельным лазером для изотопного датирования по цирконам и отдельным зернам сфена. Сам масс-спектрометр находится в рабочем состоянии по сегодняшний день и используется для выполнения датировок кристаллов цирконов. Кроме того, для целей геохронологического анализа в лаборатории была установлена новая модель масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой с тройным квадруполем Agilent 8800 с системой лазерной абляции UP-213. Применение данной системы позволяет выполнять U-Th-Pb датирование цирконов с пространственным разрешением 40 мкм и диапазоном определяемых возрастов геологических образований от 10 млн до 4.4 млрд лет.

Из результатов, полученных в лаборатории аналитической химии с использованием метода ЛА-ИСП-МС, можно выделить установление состава, возраста и изотопных характеристик гранитоидов южной части Вознесенского террейна Южного Приморья (полуостров Муравьева-Амурского и его окрестности) [Kruk et al., 2018], а также выполнение работ по изучению локального распределения РЗЭ и редких элементов в детритовых цирконах терригенных ассоциаций впадин Предуральяского прогиба и Западного Урала и U-Pb датирование обломочных цирконов [Maslov et al., 2016].

Еще одним из методов определения возраста геологических и археологических образцов в лаборатории является K/Ar геохронология, для этого используется масс-спектрометр Thermo Finnigan MAT 253 в комплектации с высоковакуумным устройством лазерного выделения аргона из проб и системой разделения (газовый хроматограф Agilent 6890N) по оригинальной методике (непрерывно-поточная газово-хроматографическая масс-спектрометрия для измерения изотопных отношений CF-GC-IRMS) [Ignat'ev et al., 2010]. По

данной методике было проведено геохронологическое изучение пород базальт-андезит-дацитовой (кузнецовская свита) и дацит-риолитовой (кедровская толща) серий, распространенных в пределах двух кайнозойских рифтогенных впадин Восточного Сихотэ-Алиня – Кедровской и Пейской [Chashchin et al., 2020].

Метод ИСП-МС также используется в лаборатории аналитической химии для измерения концентрации химических элементов на уровне от 0.01–1.00 мкг/л до единиц мг/л в природных объектах, в искусственных и биологических материалах после их предварительного разложения и перевода в раствор. Линейка ИСП-МС спектрометров Agilent 7500c и 7700x позволяет проводить измерение содержаний элементов в образцах сложного состава быстро и надежно.

В лаборатории была разработана и внедрена в практику аналитических исследований методика прямого, без предварительного концентрирования, определения такого ценного компонента, как рений, с использованием метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой с детектированием на ИСП-МС спектрометре Agilent 7700x [Ivanov et al., 2015; Zarubina et al., 2020]. В природе рений проявляет органофильные свойства, а предложенная методика позволяет с высокой степенью надежности определять рений в пробах со сложной матрицей, таких как углеродистые аргиллиты (диктионемовые сланцы), бурые и каменные угли.

Цикл работ [Arbuzov et al., 2016, 2018, 2019a, 2019b; и др.] по изучению элементного состава углей, угле-вещающих пород, торфов был выполнен совместно с коллегами из Томского политехнического университета (ТПУ) под руководством профессора, д.г.-м.н. С.И. Арбузова в рамках реализации научных проектов РНФ и РФФИ, в том числе и международных. Особое внимание в данных работах уделялось анализу редкоземельных элементов (РЗЭ) (рис. 2), так как метод ИНАА, используемый коллегами в ТПУ, не дает возможности определения полного спектра этих элементов. Высокая точность результатов ИСП-МС анализа РЗЭ и

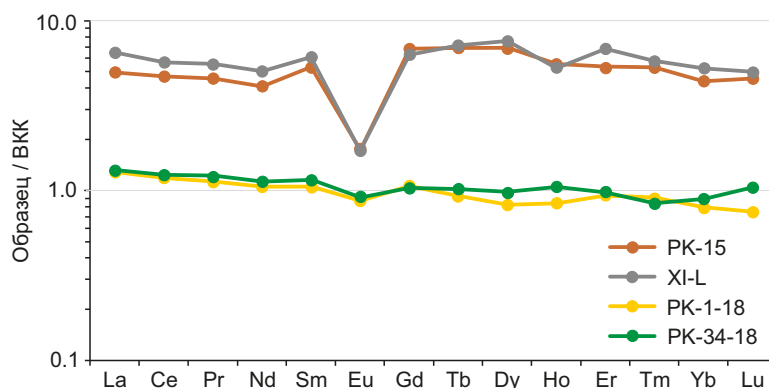


Рис. 2. Нормированные графики распределения РЗЭ к верхней континентальной коре (ВКК) в прослое угольного пласта XI (Кузбасс), а также в кровле и подошве угленосных пород по данным ИСП-МС анализа [Arbuzov et al., 2019c].

Fig. 2. Normalized plots of REE distribution to the upper continental crust (UCC) in the interlayer of the XI coal seam (Kuzbass), as well as in the top and bottom of coal-bearing rocks according to ICP-MS analysis [Arbuzov et al., 2019c].

других элементов, получаемая в лаборатории аналитической химии, подтверждается сопоставлением данных с результатами ИНАА, выполняемого на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т ИШЯТ ТПУ [Zarubina et al., 2021].

Методика химической пробоподготовки проб углей открытым кислотным разложением к элементному анализу ИСП-МС и ИСП-АЭС методами также применяется и при анализе других геологических образцов с содержанием SiO_2 менее 70 %. Суть методики заключается в разложении навесок проб массой 0.05 г смесью HNO_3 , HClO_4 и HF ("suprapur", Merck) в тefлоновых бюксах с последующим удалением избытка HF упариванием аналита с азотной кислотой (1:1). В аликвотную же часть добавляют каплю HF для предотвращения возможного гидролиза и полимеризации высокозарядных ионов элементов Zr, Nb, Hf, Ta, а также Mo и W.

Для выполнения анализа золы углей и геологических проб кислого состава с высоким содержанием SiO_2 пробы предварительно озоляют при температуре 550 ± 10 °C. Навески массой 0.05 г сплавляют в платиновых тиглях с метаборатом лития в соотношении 1:3 при температуре 1050 °C в течение 15 мин с последующим растворением плавня в смеси азотной и плавиковой кислот. Методика химической пробоподготовки способом сплавления с метаборатом лития подробно описана в работе [Sorokin et al., 2019].

С участием лабораторий ЦКП впервые были проведены масштабные геолого-гидробиогеохимические исследования Сихотэ-Алиня (Приморский край), где массово проявлена геофагия среди диких копытных [Panichev et al., 2018, 2021a, 2021b]. Сделан вывод, что геофагия у животных развивается в ландшафтах на вулканических породах с высокими концентрациями подвижных форм редкоземельных элементов, содержание которых на протяжении нескольких лет анализировалось в лаборатории аналитической химии. Данное исследование, при финансовой поддержке РНФ, выполняется коллективом ученых из Тихоокеанского института географии ДВО РАН (руководитель научной группы в.н.с., д.б.н. А.М. Паничев) и ТПУ (руководитель научной группы профессор, д.б.н. Н.В. Барановская) [Panichev, Baranovskaya, 2021].

В лаборатории аналитической химии уже на протяжении почти 10 лет ведутся работы по изучению фазового состава образцов железомарганцевых образований (ЖМО) из различных частей Мирового океана с применением методики селективного выщелачивания [Mikhailik et al., 2014, 2017, 2019; Khanchuk et al., 2015; Ivanova et al., 2019]. Метод ИСП-МС высокого разрешения также был задействован для определения следовых концентраций элементов в морских геологических образцах. На масс-спектрометре Element XR (Thermo Scientific, Германия) было проанализировано содержание галлия в ЖМО Японского моря [Blokhin et al., 2014]. Было установлено, что в случае применения квадрупольного масс-спектрометра, как в режиме работы со столкновительной ячейкой, так и без нее, определение Ga по

обоим его изотопам крайне затруднительно из-за наложений двузарядного иона $^{138}\text{Ba}^{++}$, MnO^+ , $^{142}\text{Ce}^{++}$ и $^{142}\text{Nd}^{++}$. ИСП-МС высокого разрешения позволяет выполнять определение галлия по обоим массам изотопов ^{69}Ga и ^{71}Ga , устраняя вышеназванные интерференции.

Лаборатория с 2018 г. принимает активное участие в реализации научного проекта РНФ «Источники и структурно-химическое состояние стратегических элементов в железомарганцевых образованиях северо-западной части Тихого океана и прилегающих окраинных морей как основа для совершенствования оценочных критериев и развития технологий комплексного освоения этого типа руд» под руководством академика РАН А.И. Ханчука.

С использованием видов анализов, представленных в лаборатории аналитической химии, проводится изучение геохимических условий формирования природных вод Дальнего Востока России [Chudaev et al., 2016; Kharitonova et al., 2020; Chelnokov et al., 2018; Bragin et al., 2019]. Данные виды исследований имеют регулярную поддержку со стороны различных научных фондов, включая РФФИ (до недавнего времени) и РНФ. На основе полученных результатов защищаются кандидатские и докторские диссертации.

Лаборатория микро- и наноисследований. Данная лаборатория обеспечивает выполнение полного цикла услуг по разноплановым физико-химическим, минералого-геохимическим, минерагеническим и информационно-аналитическим исследованиям, включая пробоподготовку, микроскопию, пробирную плавку, инструментальный физико-химический анализ и др.

Геохимическое направление исследований охватывает элементный и вещественный анализ природных и техногенных образований с помощью различных методов, в частности пробирный анализ на Au, Pt, Pd, Rh, рентгенофлуоресцентную спектрометрию с использованием переносных XRF спектрометров Olympus серии Delta (США) и Innov-X серии Alpha-6000 (США), атомно-абсорбционную спектрометрию (ААС) на спектрофотометрах с пламенной и электротермической атомизацией Shimadzu AA-6800 (Япония) и Thermo Electron SolAAR M6 (США). Применение усовершенствованных методик пробоподготовки позволяет определять методом ААС Au, Pt и Pd с пределом обнаружения от 0.001 г/т. Молекулярная спектрометрия веществ (в том числе рентгеноаморфных многокомпонентных смесей) представлена инфракрасным Фурье-спектрометром Thermo Scientific Nicolet 6700 (США) с интегрированным ИК-микроскопом Continuum.

Минералогическое направление исследований минеральных и техногенных образований нано-, микро- и макрозернистого строения включает минераграфическое и петрографическое изучение руд и горных пород (световая микроскопия); минералогический (в том числе ситовой) анализ шлихов и протолочек; инструментальное определение (ЭДС- и ВДС-микрoанализ) состава минералов, искусственных веществ с использованием методов электронной микроскопии.

Аналитическая сканирующая электронная микроскопия представлена рядом сканирующих микроскопов (СЭМ) с различными спектрометрами (ЭДС и ВДС) для элементного микроанализа. Это СЭМ Carl Zeiss EVO 50XVP (Германия) и Jeol JSM 6490LV (Япония), а также Tescan LYRA 3 XMH (Чехия). При этом на последнем СЭМ есть возможность автоматизированного поиска и идентификации нано- и микрофаз в порошках (т.е. без полировки), а также модифицирования поверхностей (ионная колонна).

Оснащенность лаборатории комплексом световых микроскопов нового поколения для петрографических, минераграфических и иных микроскопических исследований соответствует мировому уровню.

Результаты работы лаборатории отразились в характеристиках природной группы минеральных систем с тонкодисперсным рудным веществом. В частности, находка [Ivanov et al., 2021b; Mikhailik et al., 2021] минералов системы Ag–Au–Cu в глубоководных кобальтмарганцевых корках (КМК) подводных гор, относящихся к трем значительно разобщенным районам Северо-Западной Пацифики, впервые показала их неслучайное и более широкое, чем принято считать, развитие в океане. Была предложена не имеющая аналогов биогеохимическая модель (рис. 3) кристаллогенезиса природных золотых сплавов в глубоководной морской обстановке Fe-Mn рудоотложения. Учтены наработки специалистов разного профиля по способности

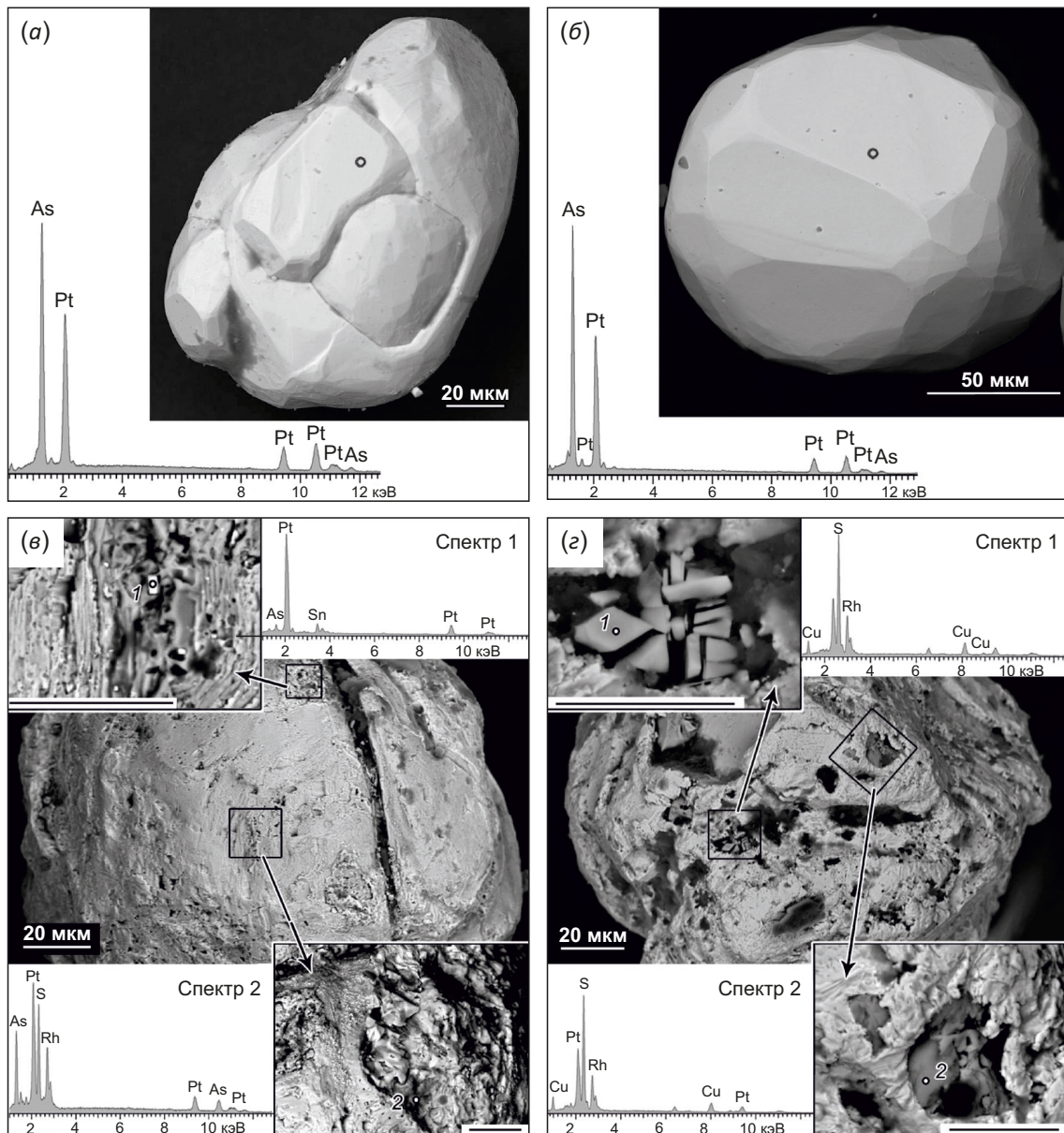


Рис. 3. СЭМ-изображения и ЭДС-спектры состава кристаллов сперрилита (а, б) и изоферроплатины с новообразованиями рустенбургита (в, спектр 1), «безымянной» фазы RhPtAsS₂ (в, спектр 2) и купрородсита (з, спектры 1, 2).

Fig. 3. SEM images and EDS spectra of the composition of sperrylite (a, b) and isoferroplatinum with neoformations of rustenburgite (в, spectrum 1), the "unnamed" phase RhPtAsS₂ (в, spectrum 2) and cuprorodsite (з, spectra 1, 2).

микробных клеток извлекать из растворов ионы благородных и других металлов, перимембранно их сорбируя и/или внутриклеточно аккумулируя.

В Южном Сихотэ-Алине, хрестоматийном районе более чем полторавековой добычи золота, до настоящего времени отсутствовали сведения о минералах платиноидов. Минералы металлов платиновой группы впервые [Ivanov et al., 2021a] были обнаружены в рамках исследований, проведенных лабораторией микро- и наноисследований, в золотых россыпях Литовского рудно-россыпного узла (рис. 3). Это открыло новые перспективы для платинометалльного прогнозно-металлогенического районирования региона. Предложенная модель отразила факторы структурно-вещественных преобразований минеральных масс в зонах сдвиговой кинематики.

Таким образом, исследования лаборатории, направленные на решение задач по идентификации «невидимых» форм присутствия благородных и редких металлов в природных системах, соответствуют современному научному тренду получения новой информации о веществе с использованием передовых инструментальных методов анализа.

Лаборатория рентгеновских методов. Основной задачей лаборатории является изучение состава и структуры минералов, горных пород, руд, металлов и их сплавов при помощи рентгеновской дифракции, рентгеноспектрального микроанализа, рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) и рентгеновской компьютерной микротомографии.

В 2017 г. в лаборатории был установлен настольный рентгеновский компьютерный микротомограф

Bruker SKYSCAN 1272 (Бельгия). Рентгеновская томография позволяет визуализировать и измерять пространственные структуры в образцах без их химической и механической обработки. В процессе съемки фиксируются теневые (трансмиссионные) изображения образца. На их основе выполняется реконструкция виртуальных поперечных сечений объекта с использованием 256 градаций серого цвета. С начала использования микротомографа были проведены исследования геологических, археологических образцов, деталей приборов, раковин моллюсков, биологического материала, металлических образцов. Используемое на томографе программное обеспечение позволяет выполнять цветовую раскраску изображения согласно степени рентгеновской проницаемости (рис. 4).

Рентгеноспектральный микроанализ, который является неразрушающим локальным (5–10 мкм) методом для получения качественного и количественного анализа состава вещества в ограниченном объеме, с содержанием анализируемого вещества 0.01–100.00 мас. %, представлен четырехканальным микроанализатором Jeol JXA 8100 (Япония). Анализируемые элементы – от В до U. Прибор дополнительно оснащен катодолуминесцентной приставкой Gatan с двумя датчиками Mini CL, CromaCL 2.

Спектр прикладных задач, которые решаются с помощью микроанализатора, помимо геохимической – изучение химического состава минералов, морфологии кристаллов, фазового состава и взаимодействия различных фаз, анализ микровключений, включает также металловедение – анализ химического состава сплавов, тонких пленок, текстуры металлов и сплавов.

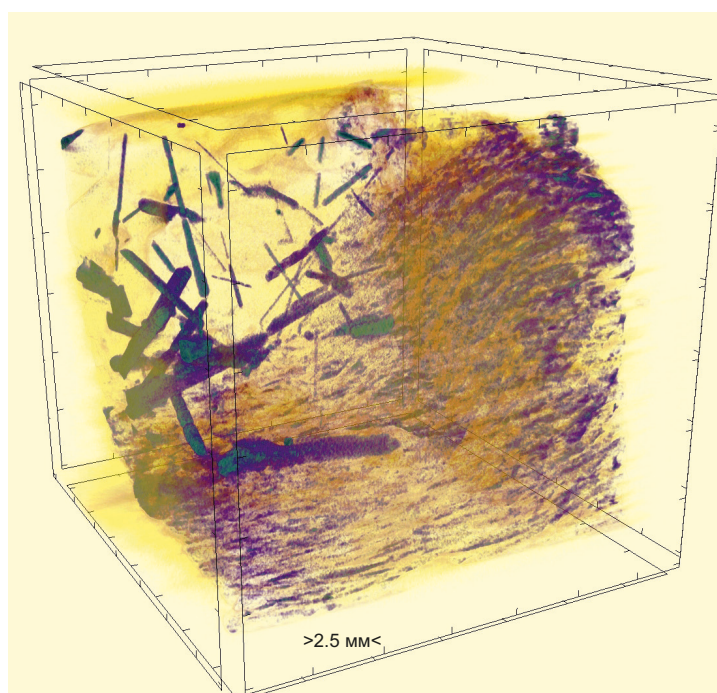


Рис. 4. Образец базальта с минеральными включениями (режим полупрозрачности).

Fig. 4. Basalt sample with mineral inclusions (translucent mode).

Оснащение микроанализатора приставкой Gatan позволяет получать изображение зерен минералов (например, цирконов) в катодных лучах и использовать затем результаты морфологического анализа, дополнительно с анализом гафния, для построения реперных кривых в определении абсолютного возраста горных пород.

Рентгеноструктурный анализ поликристаллов является одним из основных методов исследования состава и структуры твердотельных соединений, который применяется в лаборатории. В ряде случаев он дает уникальную информацию о фазовом составе и строении вещества, которая не может быть получена с помощью других аналитических методов. Особенностью рентгенографического анализа является многоцелевая направленность данного метода, позволяющая осуществлять следующие виды исследования: определение фазового состава многокомпонентных соединений; вычисление концентраций фаз, входящих в исследуемый образец; определение параметров кристаллической решетки; определение степени кристаллического совершенства. В лаборатории для выполнения этого вида анализа имеется микродифрактометр Bruker D8-Discover (Германия), предназначенный для получения дифракционной картины с микрообласти плоского образца. Имеющийся набор коллиматоров (0.5; 0.3; 0.2; 0.1; 0.05 мм) позволяет получить рентгеновские данные с области диаметром 0.07 мм или с отдельного кристалла. Также используется настольный дифрактометр (XRD) MiniFlex II производства RIGAKU (Япония) для исследования кристаллических и аморфных образцов.

Для проведения РФА лаборатория укомплектована рентгенофлуоресцентным сканирующим спектрометром Bruker S4 Pioneer (Германия). РФА является неразрушающим физическим методом качественного и количественного определения концентраций элементов в различных материалах, в том числе и в геологических образцах. В настоящее время лаборатория выполняет количественные определения концентраций микро- и макроэлементов в различных горных породах, минералах, рудах, в разнотипном минеральном сырье, в почвах, золах углей и т.д. Пределы обнаружения большинства этих элементов составляют 2–10 г/т.

В целом, исследования, выполняемые с использованием оборудования лаборатории рентгеновских методов, можно назвать мульти- и междисциплинарными. Это прослеживается по решаемым задачам в опубликованных работах, где фигурирует данное оборудование [Kirichenko et al., 2018; Andreev et al., 2021; Yugay et al., 2021; Shkryl et al., 2021; и мн. др.]. Но основное внимание в лаборатории все же уделяется геохимическим исследованиям. В качестве примера здесь можно привести несколько публикаций [Kolesnik et al., 2021; Timofeeva et al., 2021; Vakh et al., 2019; Volokhin et al., 2019].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание конкурентоспособного на мировом уровне национального сектора исследований и разработок,

являющегося двигателем развития отечественной науки, предполагает наличие развитой научной инфраструктуры. Ключевым звеном научной инфраструктуры является дорогостоящее научное оборудование, а также уникальные научные установки и комплексы. В силу высокой стоимости приборов и специфики решаемых исследовательских задач особое значение приобретает обеспечение организациями – держателями научного оборудования – доступа к нему широкого круга пользователей. В этих целях создана и функционирует сеть центров коллективного пользования научным оборудованием.

Благодаря мерам государственной поддержки, направленным на развитие приборной базы научных организаций, в России на 2017 г. было создано более 500 ЦКП. Но в настоящее время, особенно после «категорирования» академических институтов, подведомственных МОН РФ, ряд ЦКП, находящихся на балансе организаций 2- и 3-й категории, оказались в сложном финансовом положении. Дополнительных средств на их поддержку, и тем более на развитие, практически не выделяется. В такой ситуации основным источником дополнительного финансирования становится участие ЦКП в реализации проектов научных фондов и выполнение договорных работ.

Говоря о ЦКП «Приморский центр локального элементного и изотопного анализа» ДВГИ ДВО РАН, можно подчеркнуть, что его кадровый потенциал и приборная база позволяют обеспечивать инфраструктурную поддержку программ и проектов в сфере приоритетных национальных фундаментальных и поисковых научных изысканий, участвовать в международных проектах, выполняя исследования на мировом уровне.

В то же время ЦКП ДВГИ ДВО РАН успешно выполняет и сервисные функции, специализируясь на оказании услуг третьим лицам в целях обеспечения проведения аналитических работ, контрольных измерений, диагностики и экспертизы.

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

Andreev V.V., Sharipov F.F.U., Chashchin A.A., Karabtsov A.A., Ushkova M.A., Chashchin S.A., 2021. Investigation of the Structure of Glass-Ceramic Material Obtained on the

Basis of Basalt. Eurasian Scientific Association 6–2 (76), 83–87 (in Russian) [Андреев В.В., Шарипов Ф.Ф.У., Чащин А.А., Карабцов А.А., Ушкова М.А., Чащин С.А. Исследование структуры стеклокерамического материала, полученного на основе базальта // Евразийское научное объединение. 2021. № 6–2 (76). С. 83–87].

Arbuzov S.I., Chekryzhov I.Yu., Finkelman R.B., Sun Y.Z., Zhao C.L., Ilenok S.S., Blokhin M.G., Zarubina N.V., 2019a. Comments on the Geochemistry of Rare-Earth Elements (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) with Examples from Coals of North Asia (Siberia, Russian Far East, North China, Mongolia, and Kazakhstan). *International Journal of Coal Geology* 206, 106–120. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2018.10.013>.

Arbuzov S.I., Finkelman R.B., Ilenok S.S., Maslov S.G., Mezhibor A.M., Blokhin M.G., 2019b. Modes of Occurrence of Rare-Earth Elements (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) in Coals of Northern Asia (Review). *Solid Fuel Chemistry* 53, 1–21. <https://doi.org/10.3103/S0361521919010026>.

Arbuzov S.I., Ilenok S.S., Mashenkin V.S., Sun Yu., Zhao Ts., Blokhin M.G., Ivanov V.V., Zarubina N.V., 2016. Rare Earth Elements in Late Paleozoic Coals of Northern Asia (Siberia, Northern China, Mongolia, Kazakhstan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering* 327 (8), 74–88 (in Russian) [Арбузов С.И., Ильенок С.С., Машенькин В.С., Сунь Ю., Жао Ц., Блохин М.Г., Иванов В.В., Зарубина Н.В. Редкоземельные элементы в позднепалеозойских углях Северной Азии (Сибирь, Северный Китай, Монголия, Казахстан) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 8. С. 74–88].

Arbuzov S.I., Maslov S.G., Finkelman R.B., Mezhibor A.M., Ilenok S.S., Blokhin M.G., Peregudina E.V., 2018. Modes of Occurrence of Rare Earth Elements in Peat from Western Siberia. *Journal of Geochemical Exploration* 184 (A), 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.012>.

Arbuzov S.I., Spears D.A., Vergunov A.V., Ilenok S.S., Mezhibor A.M., Ivanov V.P., Zarubina N.A., 2019c. Geochemistry, Mineralogy and Genesis of Rare Metal (Nb-Ta-Zr-Hf-Y-REE-Ga) Coals of the Seam XI in the South of Kuznetsk Basin, Russia. *Ore Geology Reviews* 113, 103986. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103073>.

Blokhin M.G., Zarubina N.V., Mikhailik P.E., 2014. Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometric Measurement of Gallium in Ferromanganese Crusts from the Sea of Japan. *Journal of Analytical Chemistry* 69, 1237–1244. <https://doi.org/10.1134/S1061934814130036>.

Bragin I.V., Chelnokov G.A., Kharitonova N.A., 2019. Geochemistry of Thermal Springs at Baransky Volcano, Southern Kuriles (Russia). *Environmental Earth Sciences* 78, 79. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8079-5>.

Chashchin A.A., Popov V.K., Budnitskiy S.Yu., Chashchin S.A., Nozdachev E.A., 2020. New Data on the Age of Volcanic Complexes from the Cenozoic Rift Basins of the Eastern Sikhote-Alin. *Advances in Current Natural Sciences* 4, 169–175 (in Russian) [Чащин А.А., Попов В.К., Будницкий С.Ю., Чащин С.А., Ноздрачев Е.А. Новые данные о возрасте вулканических комплексов кайнозойских рифтогенных впадин Восточного Сихотэ-Алиня // Успехи современного

естествознания. 2020. № 4. С. 169–175]. <https://doi.org/10.17513/use.37381>.

Chelnokov G.A., Bragin I.V., Kharitonova N.A., 2018. Geochemistry of Mineral Waters and Associated Gases of the Sakhalin Island (Far East of Russia). *Journal of Hydrology* 559, 942–953. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.049>.

Chudaev O.V., Chelnokov G.A., Bragin I.V., Kharitonova N.A., Rychagov S.N., Nuzhdaev A.A., Nuzhdaev I.A., 2016. Geochemical Features of Major and Rare-Earth Element Behavior in the Paratunka and Bol'shebanni Hydrothermal Systems of Kamchatka. *Russian Journal of Pacific Geology* 10, 458–475. <https://doi.org/10.1134/S1819714016060026>.

Ignat'ev A.V., Khanchuk A.I., Vysotskii S.V., Velivetskaya T.A., Levitskii V.I., Terekhov E.N., 2016. The First Data on Mass-Independent Fractionation of Sulfur Isotopes in Sulfides from Rocks of the Eastern Part of the Fennoscandian Shield. *Doklady Earth Sciences* 469, 867–869. <https://doi.org/10.1134/S1028334X16080237>.

Ignat'ev A.V., Velivetskaya T.A., Budnitskii S.Yu., 2010. A Method for Determining Argon Isotopes in a Continuous Helium Flow for K/Ar Geochronology. *Journal of Analytical Chemistry* 65, 1347–1355. <https://doi.org/10.1134/S1061934810130071>.

Ignat'ev A.V., Velivetskaya T.A., Budnitskiy S.Y., Yakovenko V.V., Vysotskiy S.V., Levitskii V.I., 2018. Precision Analysis of Multisulfur Isotopes in Sulfides by Femtosecond Laser Ablation GC-IRMS at High Spatial Resolution. *Chemical Geology* 493, 316–326. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.06.006>.

Ivanov V.V., Khanchuk A.I., Kolesova L.G., 2021a. The Nature of Platinoid Minerals from Gold Placers of Southern Sikhote-Alin (Primorye). *Doklady Earth Sciences* 498, 482–486. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21060088>.

Ivanov V.V., Khanchuk A.I., Mikhailik P.E., 2021b. Nature of Native Gold in Ferromanganese Crusts on the Seafloor of the Northwestern Pacific Ocean. *Doklady Earth Sciences* 497, 223–226. <https://doi.org/10.1134/S1028334X2103003X>.

Ivanov V.V., Zarubina N.V., Zinoviev V.G., Okunev I.S., Shulyak G.I., Ostapenko D.S., 2015. Comparative Estimation of Rhenium Concentrations in Carboncontaining Rock by the Methods of Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, and Instrumental Neutron Activation Analysis. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear and Reactor Constants* 5, 49–58 (in Russian) [Иванов В.В., Зарубина Н.В., Зиновьев В.Г., Окунев И.С., Шуляк Г.И., Остапенко Д.С. Сравнительная оценка содержания рения в углеродсодержащих горных породах методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и инструментального нейтронно-активационного анализа // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2015. № 5. С. 49–58].

Ivanova Yu.M., Mikhailik P.E., Mikhailik E.V., Zarubina N.V., Blokhin M.G., 2019. Chemical Composition and Genesis of Ferromanganese Crusts from the Sonne Ridge (Kuril Basin, Sea of Okhotsk). *Russian Geology and Geophysics* 60 (9), 1026–1042. <https://doi.org/10.15372/RGG2019063>.

Khanchuk A.I., Grokhovskii V.I., Ignat'ev A.V., Velivetskaya T.A., Kiyashko S.I., 2013. The First Data on the Oxygen, Carbon, and Sulfur Isotope Composition of the Chelyabinsk Meteorite. *Doklady Earth Sciences* 452, 967–970. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1309016X>.

Khanchuk A.I., Mikhailik P.E., Mikhailik E.V., Zarubina N.V., Blokhin M.G., 2015. Peculiarities of the Distribution of Rare-Earth Elements and Yttrium in Mineral Phases of the Ferromanganese Crusts from the Detroit Guyot (Pacific Ocean). *Doklady Earth Sciences* 465, 1243–1247. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15120016>.

Kharitonova N.A., Chelnokov G.A., Bragin I.V., Chudaev O.V., Shand P., Funikova V.V., 2020. Major and Trace Element Geochemistry of CO₂-Rich Groundwater in the Volcanic Aquifer System of the Eastern Sikhote-Alin (Russia). *Environmental Earth Sciences* 79, 55. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8697-y>.

Kirichenko K.Y., Agoshkov A.I., Drozd V.A., Gridasov A.V., Kholodov A.S., Kobylakov S.P., Kosyanov D.Y., Zakharenko A.M., Karabtsov A.A. et al., 2018. Characterization of Fume Particles Generated during Arc Welding with Various Covered Electrodes. *Scientific Reports* 8, 17169. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35494-1>.

Kolesnik O.N., Kolesnik A.N., Ren X., Karabtsov A.A., Astakhov A.S., Shi X., 2021. First Data on the Distribution of Rare-Earth Elements in Ferromanganese Deposits of the Laptev Sea. *Doklady Earth Sciences* 497, 217–222. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21030065>.

Kruk N.N., Golozubov V.V., Kiselev V.I., Kruk E.A., Rudnev S.N., Serov P.A., Kasatkin S.A., Moskalenko E.Yu., 2018. Paleozoic Granitoids of the Southern Part of the Voznesenka Terrane (Southern Primorye): Age, Composition, Melt Sources, and Tectonic Settings. *Russian Journal of Pacific Geology* 12, 190–209. <https://doi.org/10.1134/S1819714018030041>.

Maslov A.V., Mizens G.A., Vovna G.M., Kiselev V.I., Ronkin Yu.L., 2016. Detrital Zircons from Lower Triassic Sandstones, Belsky Depression, Pre-Uralian Foredeep: LA-ICP-MS U-Pb Isotopic Ages and Distribution of Rare and Trace Elements. *Lithosphere* 1, 7–28 (in Russian) [Маслов А.В., Мизенс Г.А., Вовна Г.М., Киселев В.И., Ронкин Ю.Л. Обломочные цирконы из песчаников нижнего триаса бельской впадины предуральского прогиба: LA-ICP-MS U-Pb изотопные возраста и распределение редких и рассеянных элементов // Литосфера. 2016. № 1. С. 7–28].

Mikhailik P.E., Khanchuk A.I., Mikhailik E.V., Zarubina N.V., Blokhin M.G., 2014. New Data on Rare Earth Elements and Yttrium Distribution in Hydrothermal Fe-Mn Crusts from the Sea of Japan: Evidence from Phase Analysis. *Doklady Earth Sciences* 454, 79–83. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14010218>.

Mikhailik P.E., Khanchuk A.I., Mikhailik E.V., Zarubina N.V., Blokhin M.G., 2019. Compositional Variations and Genesis of Sandy-Gravel Ferromanganese Deposits from the Yōmei Guyot (Holes 431, 431A DSDP), Emperor Ridge. *Minerals* 9 (11), 709. <https://doi.org/10.3390/min9110709>.

Mikhailik P.E., Mikhailik E.V., Ivanov V.V., 2021. Gold in Ferromanganese Deposits from the NW Pacific. *Minerals* 11 (9), 979. <https://doi.org/10.3390/min11090979>.

Mikhailik P.E., Mikhailik E.V., Zarubina N.V., Blokhin M.G., 2017. Distribution of Rare-Earth Elements and Yttrium in Hydrothermal Sedimentary Ferromanganese Crusts of the Sea of Japan (from Phase Analysis Results). *Russian Geology and Geophysics* 58 (12), 1530–1542. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.11.013>.

Panichev A.M., Baranovskaya N.V., 2021. The Roots of Geophagy and Rare Earth Elements. *Priroda* 11 (1275), 23–34 (in Russian) [Паничев А.М., Барановская Н.В. Причины геофагии и редкоземельные элементы // Природа. 2021. № 11 (1275). С. 23–34]. <https://doi.org/10.7868/S0032874X2111003X>.

Panichev A.M., Baranovskaya N.V., Chekryzhov I.J., Seryodkin I.V., Vakh E.A., Belyanovskaya A., 2021a. Rare Earth Elements as a Causal Factor of Geophagy among Herbivorous Animals. *Doklady Earth Sciences* 499, 599–603. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21070084>.

Panichev A.M., Ivanov A.V., Chekryzhov I.Yu., Yashkov I.A., Ivanov V.V., 2021b. Geochemical Features of Silicy and Silicy-Carbonate Metasomatites in Cretaceous and Paleogene Deposits in Lower Volga Region. *The Life of the Earth* 43 (1), 4–19 (in Russian) [Паничев А.М., Иванов А.В., Чекрыжов И.Ю., Яшков И.А., Иванов В.В. Геохимические особенности кремнистых и кремнисто-карбонатных метасоматитов в меловых и палеогеновых отложениях Нижнего Поволжья // Жизнь Земли. 2021. Т. 43. № 1. С. 4–19]. https://doi.org/10.29003/m1990.0514-7468.2020_43_1/4-19.

Panichev A.M., Seryodkin I.V., Zaumyslova O.Y., Wach E.A., Stolyarova T.A., Sergievich A.A., Popov V.K., Chekryzhov I.Y., Blokhin M.G., Khoroshikh P., 2018. Results of Geological and Geochemical Investigations of Kaplanov Kudurs in Sikhote-Alin, Russian Far East. *Arabian Journal of Geosciences* 11, 493. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3820-z>.

Pillinger C.T., Greenwood R.C., Johnson D., Gibson J.M., Tindle A.G., Verchovsky A.B., Buikin A.I., Franchini I.A., Grady M.M., 2013. Light Element Geochemistry of the Chelyabinsk Meteorite. *Geochemistry International* 51, 540–548. <https://doi.org/10.1134/S0016702913070136>.

Shkryl Y., Rusapetova T., Yugay Y., Egorova A., Silant'ev V., Grigor'chuk V., Karabtsov A., 2021. Biosynthesis and Cytotoxic Properties of Ag, Au and Bimetallic Nanoparticles Synthesized using *Lithospermum erythrorhizon* Callus Culture Extract. *International Journal of Molecular Sciences* 22 (17), 9305. <https://doi.org/10.3390/ijms22179305>.

Sorokin A.P., Konyushok A.A., Ageev O.A., Zarubina N.V., Ivanov V.V., Wang J., 2019. Distribution of Rare Earth and Selected Trace Elements in Combustion Products of Yerkovetskoe Brown Coal Deposit (Amur Region, Russia). *Energy Exploration & Exploitation* 37 (6), 1721–1736. <https://doi.org/10.1177/0144598719862416>.

Timofeeva Y.O., Karabtsov A., Ushkova M., Burdukovskii M., Semal V., 2021. Variation of Trace Element Accumulation by Iron-Manganese Nodules from Dystric Cambisols with and without Contamination. *Journal of Soils and Sediments* 21, 1064–1078. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-2814-w>.

Vakh A.S., Gvozdev V.I., Goryachev N.A., Karabtsov A.A., Fedoseev D.G., Vakh E.A., 2019. Bismuthian Jamesonite

("Sakharovaita") in Ores of the Sredny Golgotai Gold Deposit, Eastern Transbaikal Region, Russia. *Geology of Ore Deposits* 61, 791–802. <https://doi.org/10.1134/S1075701519080129>.

Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V., Budnitskiy S.Y., Yakovenko V.V., Vysotskiy S.V., 2016. Mass-Independent Fractionation of Oxygen Isotopes during H_2O_2 Formation by Gas-Phase Discharge from Water Vapour. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 193, 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.08.008>.

Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V., Yakovenko V.V., 2020. Mass-Independent Sulfur Isotope Fractionation in the Photochemical SO_2 Processes under the UV Radiation of Different Wave Length. *Geochemistry International* 58, 1228–1238. <https://doi.org/10.1134/S0016702920110105>.

Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V., Yakovenko V.V., Vysotskiy S.V., 2019. An Improved Femtosecond Laser-Ablation Fluorination Method for Measurements of Sulfur Isotopic Anomalies ($\Delta^{33}S$ and $\Delta^{36}S$) in Sulfides with High Precision. *Rapid Communication in Mass Spectrometry* 33 (22), 1722–1729. <https://doi.org/10.1002/rcm.8528>.

Velivetskaya T.A., Vysotskiy S.V., Khanchuk A.I., Ignatiev A.V., Kuleshevich L.V., 2022. Distribution of Sulfur Isotope Anomalies in the Archean (on the Example of the Karelian and Siberian Cratons). *Doklady Earth Sciences* 502 (1), 8–13 (in Russian) [Веливецкая Т.А., Высоцкий С.В., Ханчук А.И., Игнатъев А.В., Кулешевич Л.В. Распространение изотопных аномалий серы в архее (на примере Карельского и Сибирского кратонов) // Доклады АН. 2022. Т. 502. № 1. С. 8–13]. <https://doi.org/10.31857/S2686739722010091>.

Volokhin Yu.G., Karabtsov A.A., Ustinov A.Y., 2019. Manganese Mineralization in the Mesozoic Siliceous Deposits of the Central Sikhote-Alin and Nadanhada-Alin. *Russian*

Journal of Pacific Geology 13, 29–50. <https://doi.org/10.1134/S181971401901007X>.

Vysotskiy S.V., Ignat'ev A.V., Levitskii V.I., Velivetskaya T.A., Aseeva A.V., Levitskii I.V., Mekhonoshin A.S., 2019. Sources of Sulfur for Sulfide Mineralization in the Archean Rocks of the Sharyzhalgai Uplift of the Siberian Craton Basement (from Multi-Isotope Data). *Russian Geology and Geophysics* 60 (8), 862–875. <https://doi.org/10.15372/RGG2019062>.

Yugay Y., Rusapetova T., Mashtalyar D., Grigorochuk V., Vasyutkina E., Kudinova O., Zenkina K., Trifuntova I. et al., 2021. Biomimetic Synthesis of Functional Silver Nanoparticles Using Hairy Roots of Panax Ginseng for Wheat Pathogenic Fungi Treatment. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 207, 112031. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2021.112031>.

Zarubina N.V., Blokhin M.G., Ostapenko D.S., Chekryzhov I.Y., Arbuzov S.I., Sudyko A.F., 2021. Analytical Approaches to the Quantitative Determination of the Chemical Elements Content in Coals and Coal Rocks using ICP-MS and INAA Methods. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering* 332 (3), 99–112 (in Russian) [Зарубина Н.В., Блохин М.Г., Остапенко Д.С., Чекрыжов И.Ю., Арбузов С.И., Судыко А.Ф. Аналитические подходы к количественному определению содержаний химических элементов в углях и углистых породах с использованием методов ИСП-МС и ИНАА // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 3. С. 99–112]. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/3/3105>.

Zarubina N.V., Ostapenko D.S., Ivanov V.V., 2020. Rhenium in Carbonaceous Rocks: ICP Mass Spectrometry of Low Concentrations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 459, 052061. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/5/052061>.