

# **ФИЗИЧЕСКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И МИНЕРАЛОВ В АНАЛИТИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ ИГ КарНЦ РАН**

**А. И. Михайлова**

*Институт геологии КарНЦ РАН РАН, Петрозаводск, Россия*

Аннотация: Представлена информация об организации исследований химического и минерального состава горных пород в ИГ КарНЦ РАН. Охарактеризованы научные направления, развиваемые в Аналитической лаборатории. Рассмотрены возможности аппаратуры, используемой в настоящее время для изучения геологических образцов. Приведен список основных публикаций сотрудников.

*Ключевые слова:* атомноабсорбционный, масспектрометрия с индуктивно связанной плазмой, рентгеноструктурный, рентгенофлуоресцентный, спектрофотометрический и термический методы анализа.

В составе Института геологии аналитическая лаборатория с 18 мая 1961 года (приказ №112 по Карельскому филиалу АН СССР), состояла из 5 групп: химического анализа, спектрального анализа, рентгеновского анализа, шлифовальной и механического разделения минералов. Первой заведующей лабораторией была Виено Андреевна Ахвонен, затем до 1998 года – Раиса Семеновна Мельянцева, а с 2000 года – Анжела Ивановна Михайлова. За 50 лет существования лаборатории было много структурных преобразований, а сейчас - это крупное подразделение института, где работают 15 сотрудников, среди которых 2 кандидата наук, 1 главный физик, 1 главный химик, 3 ведущих химика, 3 ведущих физика, 2 инженера-физика, 1 лаборант-исследователь.

## **1. Введение**

Исследование состава, структуры горных пород, руд и минералов требует применения сложных физико-химических методов. Для решения этой задачи в Институте геологии Карельского научного центра еще в 60-е годы прошлого столетия была создана аналитическая лаборатория (18 мая 1961 года, приказ №112 по Карельскому филиалу АН СССР), которая состояла из 5 групп: химического анализа, спектрального анализа, рентгеновского анализа, шлифовальной и механического разделения минералов. Первой заведующей лабораторией была Виено Андреевна Ахвонен, затем до 1998 года – Раиса Семеновна Мельянцева, а с 2000 года – Анжела Ивановна Михайлова. За 55 лет существования лаборатории было много структурных преобразований, а сейчас - это крупное подразделение института, где работают 15 сотрудников, среди которых 2 кандидата наук, 1 главный физик, 1 главный химик, 3 ведущих химика, 3 ведущих физика, 2 инженера-физика, 1 лаборант-исследователь.

**Основные направления:** использование комплексных аналитических методов для решения фундаментальных геологических и экологических задач и обеспечение геологических исследований аналитическими данными. Основные задачи АЛ – определение элементного и минерального состава горных пород, руд, осадков и других природных и техногенных материалов. Для этих целей применяются методики количественного анализа, разработанные НСАМ (Научный совет по аналитическим методам), а также методики, опубликованные в научной литературе. Контроль правильности применяемых методик обеспечивается использованием стандартных образцов химического состава (СО).

**2. Методы анализа,** представленные в Аналитической лаборатории:

- Гравиметрический, титриметрический методы.
- Спектрофотометрический метод анализа
- Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА)
- Атомноабсорбционный метод анализа (ААА)
- Метод масспектрометрии с индуктивно связанной плазмой и лазерной абляцией (МС ИСП и МС ИСП-Ла)
- Рентгеноспектральный микроанализ
- Рентгеноструктурный метод анализа (РСА)
- Рамановская спектроскопия
- Термический анализ

- Лазерная 3-d микроскопия

## 2.1. Рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализы

С 1976 по 2000 годы года в институте работала группа рентгеновских методов анализа под руководством к.ф.-м.н. Германова, который предложил и внедрил несколько новых методик, таких как "количественный фазовый анализ сложных кристаллических смесей", "рентгенографическое изучение текстуры шунгитовых пород", "дифракционные особенности рассеяния рентгеновских лучей на несовершенных кристаллах".

В настоящее время ведутся работы по стандартным методикам на новом приборе рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA (Thermo Fisher Scientific), который позволяет:

- Определение фазового состава пробы
- Количественное определение известных фаз в смеси (программы ICDD и Siroquant)
- Кристаллография, определение и уточнение структуры кристаллов
- Проведение анализа при температурах до 1300°C (высокотемпературная приставка Anton Paar)

При этом используется программное обеспечение:

### a. WinXRD

Современный программный пакет полностью интегрирован в систему и обеспечивает плавный переход от сбора данных к анализу, и составлению отчета. Программа анализа данных выполняет следующие функции:

- Базовая обработка данных (вычитание фона, сглаживание, выделение пиков, профилирование и т.д.);
- Поиск соответствий в базе данных или БД пользователя;
- Количественный фазовый анализ;
- Определение размеров кристаллов;

### b. ICDD

Данная программа позволяет осуществлять поиск минерала различными методами. Обработка экспериментальной рентгенограммы даёт информацию о количественном и качественном составе пробы. Так, например, при изучении морфологических и структурных особенностей кварца шунгитовых пород Максовской залежи были определены параметры кристаллической решетки (a, b, c) и объем элементарной ячейки (V) кварца шунгитовых пород и эталонов. Помимо этого определялась степень совершенства кристаллического строения (СКС) и индекс кристалличности (ИК) кварца шунгитовых пород. (Р. В. Садовничий и др., 2015 г.)

## 2.2 Рентгенофлуоресцентный анализ

Химические силикатные анализы (или силикатный анализ методом XRF) используются во всех без исключения работах и являются первым обязательным этапом изучения любого образца. Эти данные лежат в основе всех публикаций лаборатории. Метод работает в лаборатории с 70-х годов прошлого века, до 2000 года под руководством Германова Е. П., который совместно с Сафроновым А.Н. разработал методики определения рентгенофлуоресцентным методом содержания Cu, Zn, Ba, As в горных породах.

В настоящее время в лаборатории используется волновой рентгенофлуоресцентный спектрометр последовательного анализа ARL ADVANT'X фирмы THERMO FISHER SCIENTIFIC. С помощью прибора возможен количественный, полуколичественный анализ плавленных или прессованных образцов. Количественный анализ следующих элементов осуществляется на плавленных образцах  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  общ.,  $Na_2O$ ,  $CaO$ ,  $K_2O$ ,  $MgO$ ,  $MnO$ ,  $TiO_2$ ,  $P_2O_5$ .

Прибор позволяет определять до 84 элементов периодической таблицы (от Na до Am) в различных пробах: твердых или жидких, проводящих или непроводящих. Широкий диапазон задач:

- мониторинг следов элементов в маслах и полимерах
  - от анализа основных элементов до примесей в цементе и горных породах
  - полный анализ стекла, металлов, руды, огнеупоров и геологических материалов
- Преимуществами данного анализа перед другими методами являются:
- простая подготовка проб
  - скорость анализа
  - хорошая стабильность
  - хорошая воспроизводимость
  - широкий динамический диапазон измерений (от уровней ppm до 100%)
  - экспресс анализ (полуколичественный) абсолютно неизвестных проб с помощью программных пакетов бесстандартного анализа QuantAS™, UniQuant R и OptiQuant™.

**2.3 Рентгеноспектральный микроанализ** (микрорентгеноспектральный анализ, электронно-зондовый рентгеноспектральный анализ, электронно-зондовый микроанализ) — методика, позволяющая с помощью электронного микроскопа или специального электронно-зондового микроанализатора ("микрозонд") получить информацию о химическом составе образца в произвольно выбранном участке микроскопических размеров. С 2006 года в лаборатории работает сканирующий электронный микроскоп VEGA II LSH с оксфордской энерго-дисперсионной приставкой INCA Energy. Этот микроскоп позволяет выполнять:

- Количественный анализ элементов
- Карты распределения элементов по линии, по площади
- Фазовые карты
- Анализ частиц

Микрозонд используется всеми геологами и некоторыми технологами института для решения многочисленных задач. Исследования, проведенные на этом приборе, легли в основу статей, посвященных изучению архейских и палеопротерозойских эклогитов в Беломорской провинции Фенноскандинавского щита [Balagansky и др., 2015; Слабунов и др., 2011] и палеопротерозойских габброидов Карельского кратона [Stepanova et al., 2014; Stepanova et al., 2015; Степанов, Степанова, Егорова, 2013; Степанова, Самсонов, Ларионов, 2014]. Методами электронной микроскопии и рамановской спектроскопии установлено увеличение упорядоченности углеродистого вещества шунгитовых пород в зонах контактового метаморфизма (Chazhengina S.Y., 2013).

Микрозондовый анализ используется с целью подготовки объектов для изучения их методами рамановской и LA-ICP-MS спектроскопии.

#### **2.4. Комбинационное рассеяние**

Комбинационное рассеяние (КР) или рамановская спектроскопия позволяет изучать структуру образцов в различных агрегатных состояниях. Суть данного метода исследования заключается в регистрации спектральных линий излучения, рассеянного самим образцом.

В КР-спектре проявляются линии, отвечающие колебательным переходам с изменением поляризуемости молекулы, что обеспечивает надежную идентификацию материалов. Преимуществами данного метода являются неразрушающий контроль и быстрота сканирования. В результате растет интерес к комбинационному рассеянию как к инструменту для решения многих проблем в геохимии и минералогии. Институт геологии располагает спектрометром Nicolet Almega XR Dispersive Raman (Thermo Scientific). Для измерений используется лазерное излучение с длиной волны 532 нм (зеленый лазер) и 785

нм (красный лазер). Разрешение прибора позволяет изучать объекты размером от 1 мкм в диапазоне до  $5000 \text{ см}^{-1}$ . Есть возможность проводить сканирование в точке, вдоль линии и по сетке с заданным шагом. Рамановская спектроскопия является прекрасным дополнением к другим методам анализа, существующим в институте, например рентгеноспектральному микроанализу. Основной областью применения данного метода в институте геологии является оценка степени структурного совершенства кристаллических и аморфнокристаллических образцов, а так же обнаружение и идентификация микропримесей.

В качестве примера можно привести использование Рамановской спектроскопии в изучении шунгитового вещества пород и антраксолитов, графита, наноалмазов и цирконов. Методом спектроскопии комбинационного рассеяния (КР), или рамановской спектроскопии, в сочетании с рентгенографическими методами проведено структурное исследование графитов из графитовых месторождений основных геолого-промышленных типов. Для графитов каждого промышленного типа получен специфический набор КР характеристик, который позволяет судить о степени упорядоченности (дефектности) структуры и, тем самым о качестве графитового сырья. На материале графитовых руд Приладжья с разным содержанием углерода, определены изменения в кристаллической структуре графита в зависимости от степени регионального метаморфизма. Установлено, что различия в структуре графита из руд различного состава, максимально проявленные в условиях фации зеленых сланцев, нивелируются с уменьшением дефектности кристаллической структуры в ходе регионального метаморфизма. Параметры КР, рассчитанные с использованием первой и второй областей спектра, согласуются с известными данными, полученными методами рентгенографии и термографии. Однако по сравнению с рентгеноструктурным анализом КР спектроскопия дает возможность уловить различия в степени структурной упорядоченности графита, преобразованного в более высокотемпературных условиях. Метод КР предлагается использовать для прогнозной оценки качества графитовых руд метаморфического типа.

Для исследования зональности первично-магматических хромшпинелидов из архейских коматиитов Костомукшской и Совдозерской зеленокаменных структур восточной части Фенноскандинавского щита был использован метод рамановского картирования, позволяющий более четко визуализировать гетерогенность зерен хромшпинелидов, выявить границы ядра и каймы зерен. Сочетание методов СЭМ и рамановской спектроскопии позволило надежно идентифицировать наиболее сохранившееся реликты первично-магматической шпинели даже в таких сложных объектах как архейские коматииты, претерпевшие значительную метаморфическую переработку. (М. М. Филиппов, 2014 г., Н. С. Биске, 2014 г., В. Н. Кожевников, 2015 г., С. Ю. Чаженина, 2015 г.). Данный метод незаменим для неразрушающего анализа газожидких включений в минералах. Исследования, проведенные нашими коллегами из Апатит и Москвы на рамановском спектрометре позволили найти и изучить включения алмазов в цирконах из эклогитов северной части Беломорской провинции [Щипанский и др., 2016].

**2.5. Лазерная 3d-микроскопия** – совмещает в себе удобство оптического микроскопа с функциями анализа данных растрового электронного микроскопа (РЭМ) и точность профилометра. В институте с 2011 года работает цветной 3d лазерный сканирующий микроскоп VK-9700 Generation. Он позволяет:

- Бесконтактные 3d измерения (с высокой точностью – разрешение 1 нм)
  - Высокие четкость и глубину резкости изображения (резкость, сопоставимая с растровым электронным микроскопом)
  - Изображение высокой четкости в истинной цветовой гамме
- VK-Анализатор позволяет:

- Измерять высоту, ширину, поперечное сечение, угол или радиус любого прямолинейного или изогнутого профиля в разрезе.

- Выполнять бесконтактное измерение неровностей любой выбранной на изображении прямой или кривой линии, а также шероховатость поверхности

- Измерения объема, площади 3d поверхности, отношения площадей участка и всей поверхности

- Задавать условия проведения автоматического измерения высоты и ширины исследуемых объектов с регулярной структурой.

- Может выводить на экран профили сечения двух объектов, наложенные друг на друга и замерять различия объектов по толщине и высоте вдоль всего сечения.

Лазерный сканирующий микроскоп востребован при изучении поверхности зерен циркона и бадделеита в монофракциях подготовленных для U-Pb анализа. Этот метод полезен при определении степени сохранности и морфологии зерен этих минералов и является частью разработанной в ИГ КарНЦ РАН, ИГГД РАН и ИГЕМ РАН методики выделения и U-Pb датирования бадделеита [Степанова и др., 2015]

**2.6. Термический анализ** - СТА (синхронный термический анализ) сочетает методы дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрии в одном измерении. С помощью СТА проводятся измерения потоков теплоты и измерения массы при полностью идентичных условиях. Области применения прибора STA 449 F1 Jupiter® фирмы NETZSCH – пластики, каучуки, резины, волокна, покрытия, масла, керамика, стекла, цемент, огнеупоры, металлы, топливо, лекарства, пищевые продукты и т.п.

**Программное обеспечение** Прибор STA 449 F1 Jupiter работает под управлением программного обеспечения Proteus . Программа Proteus включает все необходимое для выполнения измерений и обработки полученных данных. Комбинация простых для понимания меню и автоматизированных подпрограмм позволяет проводить сложный анализ. Программное обеспечение Proteus software лицензировано вместе с прибором и может быть инсталлировано на другие компьютерные системы.

#### **Возможности дифференциального сканирующего калориметра:**

- Определение температуры начала, максимума, перегиба, конца пика теплового эффекта
- Автоматический поиск пика
- Энтальпии превращения: анализ площадей пиков (энтальпий) с возможностью выбора базовой линии, анализ парциальной площади пика и его ширины
- определение теплового эффекта с учетом изменения массы
- Комплексный анализ переходов стеклования/расстекловывания
- Автоматическая коррекция базовой линии (TG, DSC, DTA)
- Определение степени кристалличности
- Определение индекса кислородной индукции
- VeFlat® для автоматической коррекции базовой линии (опция)
- Коррекция пика:
- Определение тепловых эффектов при учете постоянных времени системы и теплового сопротивления (опционально)
- Определение удельной теплоемкости (опция).
- Расширение ТМ-ДСК для температурно-модулированных ДСК измерений (опционально)

#### **Возможности термогравиметрии:**

- Изменение массы в % или мг
- Автоматическое определение стадий изменения массы
- Определение остаточной массы
- Определение температуры начала и конца изменения массы на ТГ-кривой
- Температурный максимум 1-й и 2-й производной термогравиметрической кривой
- Автоматическая коррекция базовой линии и выталкивающей силы
- с-DТА для расчетного сигнала ДТА с вычислением характеристических температур и площадей пиков

## 2.7. Химические методы анализа

Основной специализацией группы с самого ее основания является силикатный анализ – определение содержаний SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, ППП (потери при прокаливании). Кроме этого определяются содержания S, Li, Rb, Cs, Cu, Ni, Zn в горных породах, минералах, рудах, почвах. Применяемая в настоящее время схема силикатного анализа является сочетанием классических (титрометрический и гравиметрический) и физико-химических методов определения порообразующих оксидов с применением атомно-абсорбционного и спектрофотометрического анализа. Результаты исследования некоторых типов горных пород представлены в работах практически всех геологов института.

В общей сложности аналитиками химгруппы освоено более 20 аналитических методик. С приходом Ю. А. Савельева (1975 г.) в группе интенсивно внедрялись методы эмиссионной и атомно-абсорбционной спектрофотометрии пламени. Освоены и успешно применяются методики атомно-абсорбционного определения Mn, Sr, Fe, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn. На атомноабсорбционном спектрометре NOVAA400 (Analitic Jeina, Германия) определяются CoO, NiO, CuO, ZnO, Li<sub>2</sub>O, Rb<sub>2</sub>O, Cs<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, MnO.

**2.8. Массспектрометрия с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией. (LA-ICP-MS)** - разновидность масс-спектрометрии, отличающаяся высокой чувствительностью и способностью определять ряд металлов и несколько неметаллов в концентрациях, не превышающих 10<sup>-10</sup>%, т.е. одну частицу на 10<sup>12</sup>. Метод основан на использовании индуктивно-связанной плазмы в качестве источника ионов и масс-спектрометра для их разделения и детектирования. ИСП-МС также позволяет следить за изотопным распределением выбранного иона. Анализируемый образец растворяется (обычно в сверхчистой кислоте) и вводится в прибор в жидком виде. Метод позволяет проводить определение практически всех элементов периодической системы в одной пробе за время около минуты. Выбор способа разложения исследуемых образцов зависит от их предполагаемого химического и минералогического состава. Для горных пород ультраосновного, основного и среднего состава, а также осадочных пород используется методика открытого кислотного разложения. Для подготовки к анализу кислых и трудно вскрываемых горных пород и минералов применяется методика кислотного разложения в закрытой системе (автоклавирование). Данные, полученные этим методом, использованы в работах [Li et al., 2015; Lubnina et al., 2016; Stepanova et al., 2015; Степанова и др., 2014; Степанова, Самсонов, Ларионов, 2014] и многих других.

Лазерная абляция (англ. Laser ablation) — метод удаления вещества с поверхности лазерным импульсом. Лазерная абляция используется в аналитической химии и геохимии для прямого локального и послойного анализа образцов (непосредственно без пробоподготовки). При лазерной абляции небольшая часть поверхности образца переводится в состояние плазмы, а затем она анализируется методом ИСП-МС. ЛА-ИСП-МС (масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией) - метод, при котором анализ производится путём переноса продуктов лазерной абляции (аэрозоля) в индуктивно-связанную плазму и последующим детектированием свободных ионов в масс-спектрометре – современный быстроразвивающийся метод анализа, позволяющий

анализировать количественное содержание практически всех элементов таблицы Менделеева и их изотопов в самых сложных образцах. При этом практически отсутствует сложная пробоподготовка.

Проведено тестирование методики масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на примере анализа результатов изучения докембрийских мафитов и ультрамафитов восточной части Фенноскандинавского щита и слагающих их минералов. Показана возможность измерения валового состава проб, как с использованием химического разложения образцов, так и с применением локального лазерного пробоотбора (LA-ICP-MS). Качество анализа (точность и воспроизводимость) оценено с использованием российских и международных стандартных образцов горных пород и внутри лабораторных (*in house*) контрольных образцов. Приведен состав и результаты измерений внутри лабораторных стандартов С-1412, КН1 и КБК1. Изучено влияние режимов лазерного испарения на точность и воспроизводимость результатов определения содержаний химических элементов при LA-ICP-MS анализе эталонных образцов, минералов и горных пород. Показано, что чувствительность метода зависит не только от физико-химических свойств природных объектов (температура плавления, летучесть), но и от применяемой методики лазерной абляции. (С. А. Светов и др., 2015) Изучено распределение примесных фаз в органическом и терригенном материале слоистых строматолитных построек палеопротерозоя Карелии и Кольского полуострова. Получены химические маркеры эволюции палеосреды морских бассейнов и участия вулканических эманаций в эволюции экологической среды. (Medvedev P.V., Chazhengina S.J., Svetov S.A, 2016).

Выполняются работы по изучению связи химической «чистоты» кварца с его генезисом. Данные работы направлены на выявление перспективных нетрадиционных объектов особо чистого кварцевого сырья. (Скамницкая Л.С., Светова Е.Н., Светов С.А, 2014); исследования шпинелидов из мезоархейских (3.0-2.8 млрд. лет) коматиитовых серий зеленокаменных структур Фенноскандинавского щита. Проанализированы акцессорные минералы из массивных и мезокумулятивных зон расслоенных лавовых потоков коматиитов (содержащих 27-45 вес.% MgO). В коматиитах установлено сосуществование нескольких генераций акцессорных шпинелидов, представляющих первично магматические фазы (алюмохромит, субферриалюмохромит) и поздние метаморфические (хроммагнетит, магнетит). На основе интерпретации химического состава первично-магматических хромитов и пород установлены температуры излияния коматиитовых расплавов. Изучены метаморфические преобразования шпинелидов. (Рыбникова З.П., 2015).

На основе комплексного метода исследования, включающего сочетание оптической, лазерной, электронной микроскопии и прецизионной локальной масс-спектрометрии (LA-ICP-MS), разработана методика изучения минералов – петрологических индикаторов (на примере акцессорных шпинелидов из мезо-неоархейских коматиитов Восточной Фенноскандии), что позволяет получать уникальную информацию о процессах формирования магматических расплавов докембрия и оценивать металлогенический потенциал первичных магм. (Чаженгина С. Ю. и др., 2015).

### 3. Заключение

Исследуя динамику выполнения анализов образцов горных пород различными методами за период с 2000 года по настоящий период можно отметить, что подъем начался с 2006 года, когда институт начал получать современное оборудование, увеличилось количество качественных публикаций. Общий спад с 2014 года. обусловлен известными причинами (резкое уменьшение финансирования экспедиционных работ, что привело к существенному снижению количества исследуемых проб; сокращение штата, неполный рабочий день, отсутствие финансирования комплектующих и расходных материалов, разработки и освоения методик исследования не анализируемых ранее в лаборатории типов горных пород).

Высокий профессиональный уровень специалистов и надежность выполняемых, с использованием разработанных методик, анализов неоднократно подтверждены участием аналитиков в выполнении аттестационных определений химического состава новых СО горных пород, а также высоким качеством работ и публикаций сотрудников Института геологии.

### 4. Литература

1. Бискэ Н.С., Колодей В.А. Спектроскопия комбинационного рассеяния графита из месторождений и рудопроявления Приладожья Геология и полезные ископаемые Карелии Вып.17, 2014, с.103-109
2. Кожевников В.Н., Ивашевская С.Н., Кевлич В.И. Геохимия и рамановские спектры цирконов из рудных (PGE-Au) амфиболитов массива Травяная Губа, Северная Карелия Труды Карельского научного центра РАН № 7. 2015. С.36-53
3. Раков Л.Т., Щипцов В.В., Дубинчук В.Т., Скамницкая Л.С. Кварцевое сырье Карело-Кольского региона: о природе образования и генетическом значении субмикроскопических структурных неоднородностей в кварце Труды Карельского научного центра РАН № 7. 2015. С. 164-180
4. Рыбникова З.П. Реликты первично магматических акцессорных шпинелидов в архейских коматиитах Восточной Фенноскандии // Труды КарНЦ РАН. № 7. 2015. С. 149-163 DOI: 10.17076/GEO141
5. Садовничий Р.В., Михайлина А.А., Рожкова Н.Н., Инина И.С. Морфологические и структурные особенности кварца шунгитовых пород Максовской залежи Труды Карельского научного центра РАН № 7. 2015 DOI: <http://dx.doi.org/10.17076/geo126>
6. Светов С.А., Степанова А.В., Чаженгина С.Ю., Светова Е.Н., Михайлова А.И., Рыбникова З.П., Парамонов А.С., Утицина В.Л., Колодей В.С., Эхова М.В. Прецизионный (ICP-MS, LA-ICP-MS) анализ состава горных пород и минералов: методика и оценка точности результатов на примере раннедокембрийских мафитовых комплексов // Труды КарНЦ РАН. № 7. 2015. С.54-73. DOI: 10.17076/geo140
7. Скамницкая Л.С., Шахнович М.М., Букчина О.В. Использование слюды и расположение мест добычи мусковита в позднем средневековье на Кольском полуострове и в Северной Карелии Труды Карельского научного центра РАН № 7. 2015. С. 181-191:
8. Скамницкая Л.С., Светова Е.Н., Светов С.А. Минералого-технологические особенности кварцевых конгломератов Карелии как нетрадиционного источника кварцевого сырья // Обогащение руд. 2014. №2 (350). С.36-42.
9. Слабунов, А.И., Володичев, О.И., Скублов, С.Г., Березин, А.В., Главные стадии формирования палеопротерозойских эклогитизированных габброноритов по результатам U-Pb (SHRIMP) датирования цирконов и изучения их генезиса // Доклады Академии наук. 2011. Т. 437. № 2. С. 1–5.
10. Степанов В.С., Степанова А.В., Егорова С.В. Процессы кристаллизации в дайках палеопротерозойских габброноритов в Карельском кратоне на примере района оз. Кундозеро // Геология и полезные ископаемые Карелии. 2013. № 16. С. 64–75.
11. Степанова, А.В., Сальникова, Е.Б., Самсонов, А.В., Ларионова, Ю.О., Степанов, В.С., Проявление внутриплитного магматизма на Карельском кратоне 2.3 млрд лет назад: к проблеме эпохи “эндогенного покоя” в палеопротерозое // Доклады Академии наук. 2014. Т. 457. № 4. С. 460–465.
12. Степанова, А.В., Сальникова, Е.Б., Самсонов, А.В., Котов, А.Б. Бадделлит как минерал-геохронометр для определения возраста даек и силлов основных пород: новые возрастные рубежи палеопротерозойского базитового магматизма Карельского кратона // ИЗОТОПНОЕ ДАТИРОВАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ: НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОДХОДЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ. Санкт-Петербург, 2015. С. 290–291.
13. Степанова А.В., Самсонов А.В., Ларионов А.Н. Заключительный эпизод магматизма среднего палеопротерозоя в Онежской структуре: данные по долеритам Заонежья // Труды Карельского научного центра РАН. 2014. № 1. С. 3–16.
14. Филиппов М.М. Рамановская спектроскопия как метод изучения глубоко углефицированного органического вещества. Часть 1. Основные направления использования. Труды Карельского научного центра РАН № 1. 2014. С. 115–134
15. Чаженгина С.Ю., Рыбникова З.П., Светов С.А. Сканирующая электронная микроскопия и рамановская спектроскопия как комплекс методов для исследования зональности минералов (на примере шпинелидов из архейских коматиитов) Записки Российского минералогического общества №6. 2015. С. 94-106

16. Balagansky V. V., Shchipansky, A., Slabunov, A.I., Gorbunov, I., Mudruk, S., Sidorov, M., Azimov, P., Egorova, S., Stepanova, A., Voloshin, A. Archaean Kuru-Vaara eclogites in the northern Belomorian Province, Fennoscandian Shield: crustal architecture, timing, and tectonic implications // *Int. Geol. Rev.* 2015. № October. C. 1–23.
17. Chazhengina S.Y., Kovalevski V.V. Structural characteristics of shungite carbon subjected to contact metamorphism overprinted by greenschist-facies regional metamorphism // *European Journal of Mineralogy.* 2013. V. 25. P. 835–843. :
18. Medvedev P.V., Chazhengina S.J., Svetov S.A. Application of Raman Spectroscopy and High-Precision Geochemistry for Study of Stromatolites // *Biogenic - Abiogenic Interactions in Natural and Anthropogenic Systems.* 2016. Springer International Publishing, Switzerland P. 329 - 341 (DOI 10.1007/978-3-319-24987-2);
19. Li X., Zhang, L., Wei, C., Slabunov, A.I. Metamorphic PT path and zircon U – Pb dating of Archean eclogite association in Gridino complex , Belomorian province , Russia // *Precambrian Res.* 2015. T. 268. C. 74–96.
20. Lubnina N. V., Stepanova, A. V., Ernst, R.E., Nilsson, M.K.M., Söderlund, U. New paleomagnetic and isotopic data for the 1.98 Ga dyke swarm in the Lake Onega region: links with the regional Pechenga-Onega event // *GFF.* 2016.
21. Stepanova A. V., Samsonov, A. V., Salnikova, E.B., Puchtel, I.S., Larionova, Y.O., Larionov, A.N., Stepanov, V.S., Shapovalov, Y.B., Egorova, S. V. Palaeoproterozoic Continental MORB-type Tholeiites in the Karelian Craton: Petrology, Geochronology, and Tectonic Setting // *J. Petrol.* 2014. T. 55. № 9. C. 1719–1751.
22. Stepanova A. V., Salnikova, E.B., Samsonov, A. V., Egorova, S. V., Larionova, Y.O., Stepanov, V.S., The 2.31Ga mafic dykes in the Karelian Craton, eastern Fennoscandian shield: U–Pb age, source characteristics and implications for continental break-up processes // *Precambrian Res.* 2015. T. 259. C. 43–57.

Institute of geology KARNZ RAHN RAHN, Petrozavodsk, Russia

Summary: Information on the organization of researches of chemical and mineral composition of rocks is provided in IS KARNZ RAHN. The scientific directions developed in the Analytical Laboratory are characterized. The possibilities of the equipment, now in use for studying of geological samples are considered. The list of the main publications of employees is provided.

Keywords: atomic absorption, mass spectrometry with inductively coupled plasma, X-ray diffraction, X-ray fluorescent, spectrophotometry and thermal methods of the analysis.

atomic absorption

mass spectrometry with inductively coupled plasma  
spectrophotometry

atomic absorption

mass spectrometry

Inductively coupled plasma mass-spectrometry, ICP-MS)

