

## **ГЕОХРОНОЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ ИЗОТОПОВ В РЕШЕНИИ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ**

---

За прошедшие сто с небольшим лет после открытия А. Беккерелем в 1896 году радиоактивности урана, успехи геохронологии и изотопной геохимии в мире являются ошеломляющими. Особенностью изотопных исследований является то, что они могут дать ответ на следующие важнейшие вопросы: источник вещества, скорость протекания процесса, возраст образования пород и минералов. Эти особенности изотопной информации определяют широкие перспективы ее использования для изучения природных и техногенных процессов. В Геологическом институте Кольского Научного центра РАН лаборатория геохронологии и геохимии изотопов была создана в 1963 году. К настоящему времени лаборатория оснащена современным оборудованием, что позволяет на высоком уровне проводить полный цикл изотопно-геохимических исследований от выделения минералов до масс-спектрометрических измерений элементов. Проводятся прецизионные U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr, He, Ar изотопные анализы. Изучаются почти все геологически важные объекты Кольского региона, диапазон возрастных данных от архея до палеозоя. На основе более 600 современных изотопных датировок определен возраст большинства реперных геологических событий региона, что является необходимым условием для составления новой серии государственных геологических карт докембрийских регионов. Установлена большая длительность формирования (от 50 до 100 млн. лет) ряда магматических комплексов, связанных с плюмовыми процессами и богато рудоносных. С использованием изотопно-геохимических методов, в частности была обоснована Кольская платинометаллическая провинция.

### ***Введение***

Геохронология и изотопная геохимия и стали возможны с открытием явления радиоактивности, которое впервые обнаружил у соединений урана французский физик А. Беккерель в 1896 году. Изотопные исследования геологических материалов начались в 1898 году, когда Мария и Пьер Кюри приступили к тщательному анализу урановых руд из Яхимсталя, Чехословакия.

После того, как с 50-х гг. стало возможным использование масс-спектрометров для повседневных изотопных анализов газов и твердых тел, несколько основных исследовательских институтов в различных странах мира начали измерять геологический возраст K-Ar, Rb-Sr, U-Pb-Th-методами. Изотопные методы развивались по мере совершенствования аналитических методик и появления новых типов масс-спектрометров: термоионизационных, таких как VG Sector, Finnigan-MAT, Triton; микрозондовых масс-спектрометров с ионной эмиссией вторичных ионов (SHRIMP, NORDSIM), LA-ICPMS – масс-спектрометры с индуктивно-связанной плазмой и пр.

Отличительной особенностью изотопных исследований является то, что они позволяют решить важнейшие задачи: определения возраста пород и минералов, определение скорости протекания процессов, определение источников вещества. Возраст минералов определяется с помощью «изотопных часов» - методов изотопной геохронологии, основанных на природных, радиоактивных превращениях и накоплении стабильных радиогенных изотопов в минералах. Изотопы можно использовать как своеобразные естественные «меченые атомы» при исследовании природных процессов. В основе этого лежит, прежде всего, геохимическое поведение радиоактивных изотопов: в одних породах они концентрируются, из других - выносятся. Соответственно изменяются и концентрации продуктов их распада - радиогенные добавки к химическим элементам. Например, коровые породы, обогащенные рубидием, в сравнении с глубинными мантийными породами содержат существенно больше радиогенного стронция, образующегося при распаде рубидия. Таким образом, изотопный состав стронция пород указывает на происхождение их исходного вещества. Используя характерное разделение (фракционирование) стабильных изотопов в геологических процессах, можно по изотопному составу объекта исследования, «меченного» стабильными изотопами, судить об источнике вещества, принимавшего участие, например, в процессе рудообразования, также по изотопному составу химических элементов можно реконструировать физико-химические параметры геологических процессов, протекавших миллионы лет назад. Эти особенности изотопной информации определяют широкие перспективы ее использования для изучения природных и техногенных процессов. Изотопные методы могут применяться в целом ряде областей: в геологии (на региональных поисково-оценочных работах), для изучения условий формирования месторождений полезных ископаемых; в водном хозяйстве (для контроля качества природных вод и создания реестра водных ресурсов); в лесном хозяйстве (для определения возраста деревьев и оценки скорости прироста лесных ресурсов); в экологии (для выявления источников загрязнения, определения темпа накопления техногенных компонентов, для решения проблемы безопасного захоронения радиоактивных и высокотоксичных отходов).

### ***Геохронология и геохимия изотопов***

#### ***в Геологическом Институте Кольского Научного Центра РАН***

Начатые по инициативе И.В. Белькова в 1962 году геохронологические и изотопно-геохимические исследования на Кольском полуострове получили широкое развитие. В 1963 году по Постановлению Президиума КФ АН СССР в Геологическом институте была создана лаборатория геохронологии и геохимии изотопов. Развитие изотопных методов и геохронологическое датирование объектов Кольского региона началось с появления в 80-х

годах в лаборатории двух твердофазных и одного газового украинских масс-спектрометров серии МИ 1201. На твердофазных масс-спектрометрах проводились Rb-Sr, Pb-Pb и U-Pb исследования. На газовом масс-спектрометре выполнялись изотопные анализы He (содержания и отношения  $^3\text{He}/^4\text{He}$  измерения), большей частью они сопровождалась измерениями изотопного состава Ar, а иногда Ne и Xe. Изучались почти все геологически важные объекты Кольского региона, диапазон возрастных данных касался всей шкалы геологического времени - от архея до палеозоя. Большой вклад в развитие этого направления внесли К.К. Жиров, Ю.Д. Пушкарев, Г.И. Шестаков и Э.В.Кравченко. Суммированные результаты первых геохронологических и изотопно-геохимических работ лаборатории отражены в монографии Ю.Д.Пушкарева (Ю.Д. Пушкарев, 1990).

Составление новой серии региональных геологических карт и необходимость повышения уровня металлогенетического прогноза для обеспечения минерально-сырьевой базы региона обусловил необходимость перехода на новый, качественно более высокий уровень геохронологических и изотопно-геохимических исследований, связанный с разработкой новых методик U-Pb анализа и широким внедрением в практику новых методов, прежде всего, Sm-Nd. Это позволило значительно расширить спектр пород и исследовать не только породы кислого состава, но и ультраосновного и основного. Одновременно совершенствовались методы выделения из пород циркона и других минералов-геохронометров – бадделеита, монацита, сфена и др. В связи с улучшением приборной и аналитической базы, расширяется и круг минералов-геохронометров. Все чаще в U-Pb исследованиях использовались нетрадиционные минералы-геохронометры, такие как колумбит, танталит, гранат.

В 1999 году по немецкому кредиту был получен и установлен в лаборатории геохронологии масс-спектрометр немецкой фирмы Finnigan-MAT-262, оснащенный квадрупольной установкой (RPQ). Масс-спектрометр имеет 7 приемных каналов, что позволяет измерять одновременно 7 различных изотопов. Программное обеспечение фирмы Finnigan MAT позволяет проводить все необходимые действия в полуавтоматическом и полностью автоматическом режимах. За 6 лет эксплуатации было проведено более 5000 определений изотопного состава и концентраций изотопов Pb и U, а также Sm, Nd, Rb и Sr. На этом приборе были заново аттестованы U-Pb и Sm-Nd методы исследования. На базе лаборатории геохронологии и геохимии изотопов был создан Кольский центр геохронологических и изотопно-геохимических исследований - центр коллективного пользования (ЦКП). Специальные ассигнования РФФИ 2000-2001 гг. по программе ЦКП позволили существенно улучшить и химические процедуры анализов. В настоящее время лаборатория укомплектована современной отечественной и импортной аппаратурой: твердофазный семиканальный масс-спектрометр Finnigan MAT-262(RPQ), два твердофазных масс-спектрометра МИ-1201Г, два газовых масс-спектрометра МИ-1201 и МИ-1201 ИГ. Приобретена специальная «чистая комната» фирмы KOJAK TECH OY для исключения холостого загрязнения, очиститель кислот французской фирмы «Аналэб» для получения низкофоновых ( $\text{ppt} - 10^{-12}$ ) кислот, используемых в изотопных анализах, 7-ми ступенчатая водоочистительная установка. Проводятся прецизионные U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr, He, Ar изотопные анализы. Точность и воспроизводимость измерений соответствует мировому уровню и контролируется измерениями общепризнанных стандартов NBS SRM-983, SRM-981, La Jolla, Jndi-1.

#### ***Основные научные направления исследования лаборатории геохронологии и геохимии изотопов***

Основная деятельность лаборатории связана с решением фундаментальных проблем геологии и металлогении докембрия – древнейшего и одного из важнейших этапов развития Земли. Эволюция земной коры в раннем докембрии – вообще является одной из актуальных проблем современной геологии. К тому же, докембрийские структуры являются основным резервуаром многих полезных ископаемых: медно-никелевое и платино-палладиевое оруденение, связанное с расслоенными интрузиями, золоторудная минерализация, связанная с докембрийскими зонами сдвиговых деформаций, редкие металлы, связанные с образованием архейских пегматитов.

Генеральные направления исследовательской и научно-организационной деятельности Геологического института на современном этапе определены двумя главными научными направлениями, ведущимися под научно-методическим руководством Отделения геологии, геофизики, геохимии, и горных наук РАН:

1. геология, геохронология и глубинное строение докембрийских структур континентальной литосферы;
2. прогнозная минерагения уникальных и дефицитных месторождений полезных ископаемых древних щитов и шельфа северных морей.

Определены и приоритетные задачи исследований Института в настоящее время:

1. комплексное исследование восточной части Балтийского щита с целью реконструкции истории формирования докембрийской коры и взаимодействия коры-мантия на различных этапах становления Земли;
2. геохронологическое датирование реперных геологических объектов с целью установления последовательности и длительности формирования магматических и метаморфических комплексов пород и процессов, выделения основных рубежей рудообразования;

В рамках вышеприведенных генеральных направлений и приоритетных задач основные направления исследования лаборатории заключаются в следующем:

- создание шкалы геологических событий с архейского по палеозойское время на основе комплексного датирования реперных геологических объектов с использованием U-Pb (по циркону, бадделеиту, монациту, сфену, рутилу, апатиту и др.), Sm-Nd и Rb-Sr (по первичным и вторичным

породообразующим минералам - оливину, клино и ортопироксену, плагиоклазу, сфену, апатиту, биотиту, мусковиту)

- создание моделей корово-мантийных взаимоотношений при формировании рудно-магматических систем на базе изотопно-геохимических данных (изучение изотопных составов Nd и Sr)
- разработка моделей ранней эволюции Земли, определение источников вещества при формировании геологических тел, определение характеристик теплопереноса в оболочках Земли (на основе изучения благородных газов (He, Ar, Ne)).

#### ***Результаты исследовательской деятельности лаборатории геохронологии и геохимии изотопов***

В течение последнего десятилетия сотрудниками Геологического института КНЦ РАН был выполнен большой объем исследований, направленный на изучение реперных объектов и реконструкцию основных этапов магматизма, метаморфизма и структурных преобразований. Геохронологические и изотопно-геохимические исследования выполнялись по нескольким направлениям.

Одним из них было изучение геологических образований, являющиеся опорными для реконструкции истории геологического развития региона или его составляющих блоков. В качестве таковых выступают Печенгская раннепротерозойская структура, Лапландский гранулитовый пояс, Кейвская зона, Колмозеро-Вороньинский зеленокаменный пояс, а также древнейшие образования Центрально-Кольского блока, в том числе вскрытые Кольской сверхглубокой скважиной (СГ-3). Установлено, что формирование основного объема литосферы континентального типа в Кольской структуре произошло в позднем архее (3100-2500 млн. лет назад) и в раннем протерозое (2500 – 1600 млн. лет назад), но процессы структурно-вещественного преобразования коры происходили неоднократно и продолжались и в рифее, и в палеозое.

Второе направление связано с необходимостью датирования объектов, являющиеся реперными для стратиграфических схем. В качестве объектов были выбраны вулканогенные или субвулканические образования, геологическое положение которых в разрезах той иной структуры было определено. В качестве примеров можно указать на вулканиты матерской свиты Северо-Печенгской зоны, сейдореченской и арвареченской свит Мончегорского района. Одновременно с U-Pb-датированием выполнялись исследования по реконструкции возраста протолитов путем изучения Sm-Nd-системы, что позволило восстановить возраст субстрата. На основе геолого-геохронологических данных, на базе более 1000 современных изотопных датировок, полученных различными методами (Баянова и др., 2002) определен возраст большинства реперных геологических событий региона, что является необходимым условием для составления новой серии государственных геологических карт докембрийских регионов.

Третье направление - это датирование рудосодержащих объектов в пределах рудных и промышленно-рудных районов: Печенгско-Аллареченского, Мончегорского, Ловноозерского, Колвицкого, Куолярвинского и др. Основное внимание было уделено изучению докембрийских интрузий базит-ультрабазитов, вмещающих месторождения и рудопроявления сульфидных Cu-Ni, платинометалльных, хромитовых и титаномагнетитовых руд, и изучению интрузий центрального типа палеозойского возраста, содержащих месторождения апатит-нефелиновых руд. Были изучены Мончегорский плутон, интрузии Главного хребта, массив Панских тундр, никеленосные интрузии Печенгского рудного поля (Пильгуярвинская), рудные и безрудные интрузии Аллареченской группы, массивы Ловноозерский, Застейд, Плотище, плутон Гремяха-Вырмес, Ковдозерский массив, Хибинский и Ловозерский плутоны, массив Ковдор и др. В ряде случаев удалось получить данные не только для интрузий в целом, но и для отдельных ее фаз, а также комагматических им дайковых тел.

С использованием нетрадиционных минералов-геохронометров, таких как колумбит и танталит было проведено датирование и исследованы источники вещества редкометалльных пегматитов пояса Колмозеро-Воронья. Поскольку для интрузивных пород важным является не только возраст их формирования, но и данные об изотопном составе этого расплава и порождающем его источнике, наряду с U-Pb датированием акцессорных минералов (циркон, бадделит и др.) выполнялись Sm-Nd и Rb-Sr изотопные исследования пород и составляющих их породообразующих и акцессорных минералов. Установлена большая длительность формирования (от 50 до 100 млн. лет) ряда магматических комплексов, связанных с плюмовыми процессами и богато рудоносных (архейских щелочных гранитов, ультрабазит-базит-анортозитовых интрузий, палеозойских щелочных интрузий).

И, наконец, четвертое направление - изучение благородных газов (He, Ar). Изотопный состав гелия может использоваться применительно к геохимическим, гидрологическим и океанологическим проблемам. Вследствие большого различия изотопных отношений и низкого содержания He в атмосфере, гелий является наиболее чувствительным трассером земных флюидов, в том числе рудосодержащих гидротермальных флюидов. Осуществляются работы по совместному проекту Горного и Геологического институтов КНЦ РАН «Мониторинг геологической среды горнопромышленных природно-технических систем для прогноза и профилактики техногенных катастроф (на примере Кольского полуострова)». Предложен новый метод реконструкции концентраций гелия в поровых и подземных водах водонепроницаемых осадочных разрезов. Предложенный метод незаменим для создания гидрогеологических моделей осадочных разрезов низкой проницаемости на временных шкалах свыше 1 млн. лет, где радиогенный <sup>4</sup>He представляется оптимальным трассером. Такие разрезы являются потенциальным объектом для захоронения радиоактивных и токсичных отходов. Предложенный метод может также успешно применяться и для ряда других фундаментальных и прикладных задач.

На основе изучения изотопного состава и содержаний гелия в породах и минералах Кольского полуострова и из других мест земного шара, установлено, что Кольский полуостров исключительно богат в отношении содержания гелия в горных породах, при этом изотопный состав гелия варьирует в чрезвычайно широких пределах. Все это позволяет назвать Кольский полуостров оазисом изотопов гелия. На столь небольшой территории представлен гелий всех трех основных твердых оболочек Земли: коры, верхней и нижней мантии. Наиболее ярко здесь представлен гелий нижней мантии - девонские щелочно-ультраосновные карбонатитовые интрузии Кольского полуострова, являясь продуктами нижнемантийного плюма, вместе с другими летучими в виде незначительной примеси доставили и гелий из нижней мантии. При этом в некоторых образцах содержание нижнемантийного гелия превосходит таковое для других мест Земли. Своего рода «мировым рекордом» можно считать оценку концентрации  $^3\text{He}$  в магнетите из рудного оливинита Себлявра -  $4 \times 10^{-9} \text{ см}^3/\text{г}$  (Каменский и др., 2003), что в четыре раза выше выявленной ранее аномалии в “*robbing rock*” (Honda & Patterson, 1999).

На примере Хибинских апатито-нефелиновых, Ловозерских редкометалльных и Ковдорского апатито-магнетитового месторождений и вмещающих их палеозойских нефелин-сиенитовых и щелочно-ультраосновных с карбонатитами интрузивных комплексов показаны возможности использования изотопного состава He и Ar в качестве индикаторов условий возникновения и эволюции уникальных рудно-магматических систем (Nivin et al., 2001).

### **Заключение**

За прошедшие сто с небольшим лет после открытия А.Беккерелем в 1896 году радиоактивности урана, успехи геохронологии в мире являются ошеломляющими. В начале нового тысячелетия австралийские геохронологи, используя новейшую аппаратуру - ионный микрозонд SHRIMP по циркону из г. Нарраер, Австралия получили древнейший U-Pb возраст земных пород, равный  $4404 \pm 8$  млн. лет. Измеренное значение  $\delta^{18}\text{O}$  в породе, равное 5- 7.4‰, показало наличие гидросферы уже через 100 млн. лет после образования планеты Земля на рубеже 4.565 млрд. лет (Quitte et al, 2000; Wilde et al., 2001). Возраст Земли достаточно близок возрасту формирования Луны - 4.549 млрд. лет по (Alibert et al, 1994). Для единичных обломочных цирконов из раннедокембрийских метаосадков Лапландско-Колвицкого пояса был получен возраст 3.8 млрд. лет, подтверждая наличие древней континентальной коры и на Балтийском щите (Бриджутер и др., 1999).

Четверть века назад во всем мире число изотопных лабораторий едва насчитывало полтора-два десятка, а в настоящее время только на территории бывшего СССР насчитывается до 50 изотопных лабораторий. Эксперименты проводятся с погрешностью в 100 раз меньше прежней. Неизмеримо выросла производительность изотопных лабораторий, если прежде выполнялось 10-15 изотопных анализов в год, то сегодня такое количество анализов может быть выполнено за день.

Такими же темпами развивается лаборатория геохронологии и геохимии изотопов Геологического института. За сорок лет своего существования лаборатория превратилась в одну из ведущих в стране. Созданный на ее базе Кольский центр геохронологических и изотопно-геохимических исследований является одной из крупнейших в северо-западном регионе Российской Федерации специализированной научной материально-технической базой. Комплекс прецизионного оборудования опыт и квалификация коллектива исследователей позволяет на высоком уровне проводить полный цикл изотопно-геохимических исследований от выделения минералов до масс-спектрометрических измерений элементов. Ежегодно услугами Кольского центра геохронологических и изотопно-геохимических исследований пользуются многочисленные отечественные и зарубежные организации, а также грантодержатели различных фондов, таких как РФФИ, ИНТАС и др.

Результатом многолетних исследований U-Pb и Sm-Nd методами возрастов пород явилось создание геологической карты Кольского региона 500 000 масштаба на базе детальной геохронологии, а также Каталога геохронологических данных по северо-восточной части Балтийского щита (Баянова и др., 2002), включающем более 1000 определений. Следует особо отметить обнаружение в раннедокембрийских метаосадках Лапландско-Колвицкого пояса единичных обломочных цирконов с возрастом 3.8 млрд. лет (Бриджутер и др., 1999), что свидетельствует о наличии на Балтийском щите древней континентальной коры, немногим уступающей по времени формирования самым ранним горным породам земной коры, выявленным в Австралии -  $4404 \pm 8$  млн. лет, и возрасту земной гидросферы - 4,4 млрд. лет по (Quitte et al, 2000), да и Земли и Луны в целом - 4.565 млрд. лет (Wilde et al., 2001) и 4.549 млрд. лет (Alibert et al, 1994) соответственно.

Полученные результаты использованы при подготовке и выпуске новой Государственной геологической карты РФ масштаба 1: 200 000, лист Q-36 III, IV (2000 г.), а также при издании Мурманским комитетом по природным ресурсам сводки «Геология рудных районов Мурманской области» (2002 г.). Изотопное датирование рудоносных расслоенных интрузивов оказалось также важным для выбора направлений проведения современных поисковых и разведочных работ на Pt-Pd, Co-Cu-Ni и Cr оруденения. Кроме того, определение длительности геологических процессов, особенно при их большой продолжительности, помогает созданию моделей формирования месторождений гигантов (Сахарйокское, Мончегорское, Печенгское, Ковдорское, Хибинское, Кировогорское и др.) полезных ископаемых, столь характерных для Кольского региона – платиноидов, апатита, бадделита, редкометалльного и редкоземельного сырья.

С использованием современной прецизионной аппаратуры Кольского центра геохронологических и изотопно-геохимических исследований был проведен комплекс исследований, позволивших выявить и оценить масштабы крупнейшей в Европе Кольской платинометалльной провинции, в которой сосредоточено, по последним данным, около 15 % прогнозных ресурсов платиноидов страны.

## Литература

1. Баянова Т.Б., Пожиленко В.И., Смолькин В.Ф., Кудряшов Н.М., Каулина Т.В., Ветрин В.Р. Каталог геохронологических данных по Северо-Восточной части Балтийского щита. //Приложение №3 к монографии «Геология рудных районов Мурманской области» / Кол. науч. центр, Геологич. ин-т; Ред. Ф.П.Митрофанов. Апатиты. 2002. 53 с.
2. Бриджуотер Д., Скотт Д., Балаганский в.В., Тиммерман М.Я., Маркер М., Бушмин С.А., Алексеев Н.Л., Дейли Дж.С. Природа раннедокембрийских метаосадков в Лапландско-Кольском поясе по результатам  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  – датирования единичных зерен циркона // Докл. РАН. 1999. Т. 306, № 5. С. 664-668.
3. Каменский И.Л., Икорский С.В., Ганнибал М.А., Новиков Д.Д., Толстихин И.Н. Кольский полуостров – оазис изотопов гелия. Материалы II Российской конференции по изотопной геохронологии. 25-27 ноября 2003 г. Санкт-Петербург. 2003. С. 186-187.
4. Пушкарев Ю.Д. Мегациклы в эволюции системы кора – мантия. 1990. Л.: Наука. 217 с.
5. Wilde S.A., Valley J. W., Peck W.H. and Graham C.M. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Ga ago: Nature. 2001. V. 409. P. 175-178.
6. Quitte G., Birek J.L., Allegre C.J. Chronology of basalts achondrites, irons and stony iron meteorites as inferred by hafnium tungsten systematics // Meteorites, Planet. Sci. 2000. V. 35, N 5. Suppl. P. 131-132.
7. Alibert C., Norman M.D., Mc Culloch M.T. An ancient Sm-Nd age for a ferroan noritic Anorthosite clast from lunar breccia 67016 // Geochim. Cosmochim. Acta. 1994. V. 58, N13. P. 2921-2926.
8. Honda M. and Patterson D.B. Systematic elemental fractionation of mantle-derived helium, neon, and argon in mid-oceanic ridge glasses // Geochim Cosmochim acta. 1999. V. 63, N 18. P. 2863-2874.
9. Nivin V.A., Ikorsky S.V., Kamensky I.L. Noble gas (He, Ar) isotope evidence for sources of devonian alkaline magmatism and ore formation related within the Kola province (NW Russia) // Alkaline magmatism and the problems of mantle sources. Irkutsk. 2001. P.177-188.
10. Nutman A.P., Clark R.L., Friend and Vickie C. Bennett. Review of the oldest (4400-3600 Ma) geological and mineralogical records: Glimpses and beginning // Episodes. 2001.V. 24, N 2. P. 93-101.