



Vita brevis — ars longa

Ю. А. Шуколюков



ЮРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ
ШУКОЛЮКОВ
1929 — 2013

К 90-летию со дня рождения

Vita brevis — ars longa

Жизнь коротка — наука безгранична

Ю. А. Шуколюков

Санкт-Петербург
2019

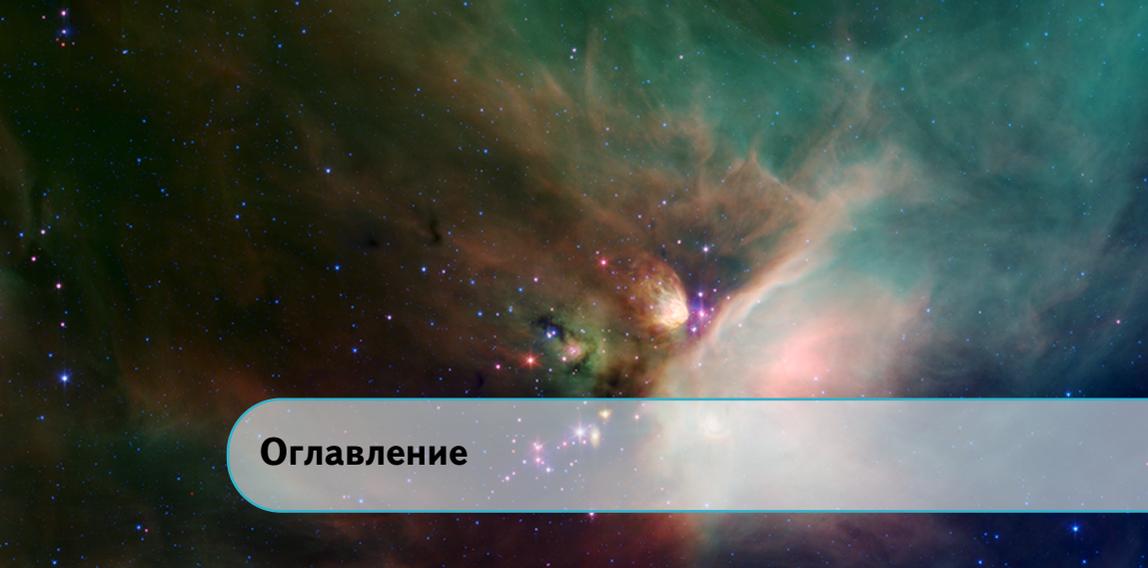
Автор: Ю. А. Шуколюков

Vita brevis — ars longa (Жизнь коротка — наука безгранична) —
СПб.: Изд-во Спринтер, 2019. — 104 с.

Издание подготовлено к девяностолетию со дня рождения д.х.н., заслуженного деятеля науки и техники РФ, профессора Ю. А. Шуколюкова. Монография представляет собой научный рассказ о создании методов изотопной геохронологии, актуальных задачах геохимии изотопов и об истории становления изотопной геологии в России.

ISBN 978-5-4386-1702-0

© Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, 2019



Оглавление

	Предисловие	7
1	Vita brevis — ars longa	9
1.1	Эпизод первый: Как я сюда попал?	10
1.2	Эпизод второй: Делиться надо!	19
1.3	Эпизод третий: Чернобыль 2 миллиарда лет назад...	30
1.4	Эпизод четвертый: Погоня за призраком...	36
1.5	Эпизод пятый: Путешествие из Петербурга в Москву...	41
1.6	Эпизод шестой: Сквозь тернии — к звездам...	49
1.7	Эпизод седьмой: «Не счесть алмазов...	61
1.8	Эпизод восьмой: В компании с...	64
1.9	Эпизод девятый: Когда, казалось бы...	76
1.10	Эпилог: Жизнь была бы куда лучше...	82
2	Становление изотопной геологии в России	85

Предисловие

В XX веке родилась и начала быстро прогрессировать изотопная геология — наука о происхождении изотопов, их распространенности и распределении в различных резервуарах Земли, о применении изотопов для измерения геологического времени, изучения первичного вещества Земли, ее эволюции и современного строения. Представленная в этом сборнике история — это взгляд на развитие радиогеологии в России одного из ее выдающихся пионеров — Юрия Александровича Шуколюкова (1929–2013).

В книге две части. Первая часть — доклад Ю. А. Шуколюкова, сделанный им на свое восьмидесятилетие. Он представляет собой историю его жизни, которая тесно переплетается с новыми идеями и открытиями в области ядерной физики и геологии, но при этом вписана в советскую, а затем уже и российскую действительность. Это взгляд изнутри на масштабные научные проекты того времени и людей, которые их создавали. Но, несмотря на исторические отступления, это в первую очередь научный рассказ о создании методов изотопной геохронологии, открытии новых типов радиоактивного распада, поиске следов сверхтяжелых элементов и других захватывающих идей. Рассказ о напряженной работе, сложных проблемах, глубоком

удовольствии научного открытия, которое было источником радости и вдохновения.

Вторая часть — это история становления изотопной геохронологии в России. Раздел из небольшого учебного пособия, над которым работал Ю. А. Шуколюков в последние годы. Глава интересна тем, что знакомит с рядом выдающихся отечественных исследователей, таких как В. И. Вернадский, А. Е. Ферсман, В. Г. Хлопин, И. Е. Старик, А. П. Виноградов, Д. И. Щербаков, Л. В. Комлев и других, сыгравших важную роль в развитии отечественной изотопной геологии. Повествует о сложностях, возникающих на пути исследователей в начале XX века, и о том, как их общая работа над советским атомным проектом стала плодородной теоретической научной почвой, на которой родилась и при непосредственном участии Ю. А. Шуколюкова начала развиваться фундаментальная отечественная изотопная геология.

Научные идеи Ю. А. Шуколюкова и начатые им исследования продолжают его многочисленные ученики и коллеги, с чувством глубокого уважения хранящие память о своем учителе и талантливом ученом.

О. В. Якубович

1. Vita brevis — ars longa

Я хотел бы капельку злоупотребить своим днем рождения и вероломно вынудить коллег немного послушать мои старческие воспоминания: рассказ о нескольких эпизодах своей такой длинной и горестно короткой жизни, отпускаемой людям. Возможно, мой опыт будет в каком-то смысле интересен молодым ученым. Ну, а те, кто постарше — быть может, вместе со мной немного ностальгически полетают на машине времени. Это не систематический рассказ о научной работе, это всего лишь эпизоды из жизни: восемь эпизодов из истории двух институтов и моей собственной и эпилог.

1.1 Эпизод первый: Как я сюда попал?



За окном 1948 год. Кончаю школу, что на улице Пестеля. В портфеле — аттестат и серебряная медаль. Поступай без экзаменов — куда хочешь. Мама советует идти в медицинский. Но, после того как повидал в войну мертвых людей, как-то неохота. Отец рекомендует — на восточный факультет университета. Семь довоенных лет мы провели в Иране: отец-ихтиолог был приглашен туда в качестве «советского специалиста». Отец уверен в моих филологических способностях. Действительно, мальчишки — дети наших специалистов, — болтаясь по территории советской колонии, в «совершенстве» овладели фарси. Вот вам пример:

Али Баба
Геты бага.
Бергуш туты.
Буд гурбага.

Этот чертовый стих на фарси — языке Омара Хайама! — и содержащий неперебиваемые в присутствии дам выражения, удивительным образом намертво сидит в моей голове до сих пор...

А на дворе уже август 1948 года. Надо срочно как-то определиться с профессией. Иду на Невский в Магазин книги. В отделе химии среди томов, напичканных формулами органической химии,

попадает только одна книга почти без формул: практикум по коллоидной химии. Прочитав ее дома, испытываю симпатию к коллоидным частицам. Они беспорядочно, свободно плавают в растворе. Мило слипаются. Образуют причудливые агрегаты, электрически заряженные. Оседают дно... Эврика! Решаю, что химия — это моё. На следующий день мои документы — в деканате химфака.



Дом Книги в Ленинграде.

Первые 3 года на химфаке пролетают, словно один миг. Замечательные профессора: С. А. Щукарев, Б. П. Никольский, Б. Н. Долгов, И. Н. Бушмакин, А. Г. Морачевский, А. В. Сторонкин... Бесчисленные химические практикумы... Зачеты, зачеты, экзамены за экзаменом... Соревнования по академической гребле между тринадцатью факультетами с неизменным тринадцатым местом... Полные энтузиазма поездки на стройки сельских электростанций в разваливающиеся колхозы... Каждому колхозу — маленькая электростанция... Кому-то сегодня это может показаться странным, но мы были счастливы...

Но вот наступил 1951 год. Нас, человек пятьдесят юношей и девушек, внезапно переводят с Химфака на Среднем проспекте на третий курс закрытого факультета, замаскированного в здании НИХИ в университете. Готовят к работе в атомной промышленности.



Команда четверки Химфака по академической гребле на межфакультетских соревнованиях: 13-е место среди тринадцати команд. Слева направо: Толя Орлов, Ю. Ш., Тренер, Загребной — Витя Моисеев, № 2?

Сплошные курсы по радиохимии. Секретность на каждом шагу. Все рабочие записи сдаются вечером в отдел кадров. Без разрешения нельзя выносить даже переведенные с английского книги, касающиеся радиоактивности.

В один прекрасный день университетский профессор А. Н. Мурин в ответ на просьбу профессора Э. К. Герлинга из ЛАГЕД, рекомендует ему студента для работы на масс-спектрометре — меня. И вот — первая встреча. Э. К. Герлинг приглашает меня вместе с ним заняться исследованием возможности изотопной неоднородности химических элементов в Солнечной системе: изучить изотопный состав калия в метеоритах на масс-спектрометре НИХИ. Это уникальный масс-

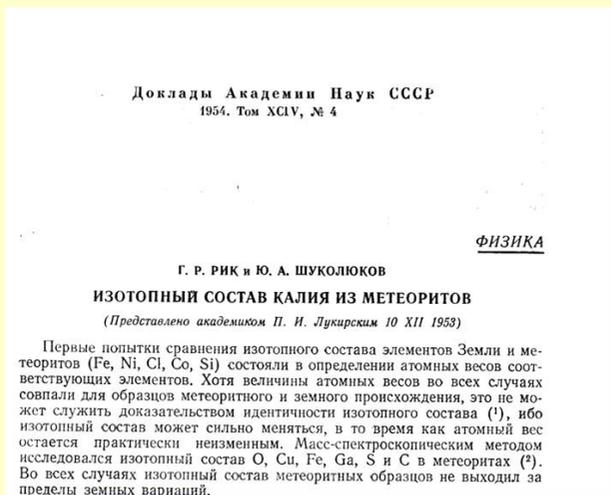


спектрометр, третий по счету из серии сотни приборов для атомной промышленности, выпуск которой впервые в Европе начат в СССР незадолго до этого. Его выделили специально для нас — студентов, будущих работников атомной промышленности.

Э. К. Герлинг преподает мне первый урок: в науке обязательно надо стараться исследовать новые природные явления, новые объекты, и не надо бояться грандиозности проблемы. Он опережает научную мысль на двадцать лет, когда старая парадигма однородности изотопного состава химических элементов уступит представлениям о гетерогенности изотопного состава Солнечной системы...

А тогда — увы!.. Вместе с моим научным руководителем Г. Р. Риком мы не находим никаких аномалий в калии (точности измерений было недостаточно). Тем не менее, результаты дипломной работы публикуют «Доклады Академии наук». Конечно, надуваюсь от гордости собой...

Первая, студенческая публикация....:



И вот окончание университета. Приказ: явиться тогда-то в Москву в Министерство среднего машиностроения СССР с теплыми вещами. Жёну с собой не привозить. Позже разберемся. С огромным тяжеленным чемоданом, набитым зимней одеждой для переселения в Сибирь, являюсь в Министерство. Получаю бумажку — направление на работу: «Адрес: Ленинград, улица Рентгена, дом 2, Радиевый институт Академии Наук СССР, сокращенно РИАН». Везу чертовый чемодан обратно в Ленинград. В институте начинаю работать по экстракции урана и редкоземельных элементов с помощью совершенно секретного тогда экстрагента — трибутилфосфата. В общем, интересно.

Через пару месяцев вызывают в отдел кадров: «Командируетесь

в Москву в Министерство Среднего машиностроения, а дальше в Челябинск. В Москве все объяснят. Возьмите чемодан с теплыми вещами». Со знакомым чемоданом приезжаю вместе с товарищем Колей Орловым в Министерство. Нас уже ждут командировочные удостоверения и билеты на поезд. Спрашиваем: по какому адресу явиться-то? Отвечают: адрес — нельзя. Доедете до Челябинска. Выйдете из поезда на площадь, первая улица направо, затем улица налево, третий переулок налево, снова направо и... увидите дом с белыми колоннами. Позвоните в дверь, там все расскажут.

В Челябинске мы сбиваемся с пути. Бродим по вечерним незнакомым улочкам меж приземистых домов. В отчаянии начинаем спрашивать прохожих. Сбивчиво темним, что же мы ищем. Прохожие на нас подозрительно смотрят и отходят. Уже в сумраке старушка спасает: «А-а, дом-то с колоннами-то? Дык это ж атомная контора-то, вона за углом-то!»

Звоним в дверь. Говорят: хорошо, что успели, сейчас автобус отходит на Челябинск-40, садитесь живо. Часа четыре скрипучий маленький автобус трясется по ухабам разбитой вдрызг дороги.

Стоп! Неожиданно резкие голоса, фонари в лицо, колючая проволока: проверка документов. КПП — контрольно-пропускной пункт. Через двадцать минут — еще один, затем — еще... Автобус кряхтя карабкается в гору. И вдруг внизу в долине чудо: до горизонта море огней, многоэтажные дома, огромное подсвеченное классическое здание — театр, наверное. Широкие улицы, уютный свет в окнах. Понимаем — секретный город Челябинск-40, которого нет на картах.

Начинается новая жизнь. Ежедневно в семь утра ждем на зябком морозе автобус, который отвозит нас на объект. Странное совпадение: в сумраке за невысоким горным хребтом — городишко Карабаш, родина отца. Полчаса езды до объекта, и вот огромное здание с вытяжными трубами. Кладу дозиметр в карман комбинезона, чтобы вечером сдать. Получишь дозу — лишат премии. Говорят, рабочие свои дозиметры прячут на время работы в укромные места здания. Идем длинными коридорами. В начале и в конце каждого — по охраннику. Многократно проверяют фото на пропуске, сравнивают с оригиналом.

В цехе хроматографическая колонка высотой в три этажа и диаметром с водосточную трубу. Ежедневное задание: стоять возле колонки, изредка в нужное время поворачивая вентили. Или запрягшись вдвоем отвозить здоровую цистерну с радиоактивными отходами в соседний цех. И все. После смены — рабочая столовая. Бесплатные обеды с добавкой. В буфете знакомое по гражданской жизни объявление: «Пива нет». Но странный аромат: рабочие с пивными кружками задумчиво пьют... шампанское.

Идет четвертый месяц работы. Звереем. Ежедневно требуем возвращения в Ленинград — хотим заниматься наукой. Заведующий лабораторией отказывает раз за разом. И вдруг телеграмма: отец умер. Начальник не пускает на похороны — надо выполнять рабочий план. Телеграмму в институт не послать — только через канцелярию. А она телеграмму не пропускает. И все же по телефону добиваюсь разрешения директора Радиевого института. Успеваю в Ленинград. Хороню отца.

Через неделю вызывают к директору академику В. М. Вдовенко: надо снова ехать в Челябинск-40. Возражаю: не для того учился — не посылайте. Дайте заниматься наукой. — Нет, поедешь. — Нет, не поеду! — Поедешь! — Нет! — Уволю с отрицательной характеристикой! — Увольняйте! И увольняют. Характеристика дирекции, парткома и месткома сурова: личное ставит выше общественного. Ищу новую работу. Обращаюсь в ГИПХ. — О! Очень рады, нам нужен масс-спектрометрист. Давайте документы. Через два дня — оказывается, нет штатных единиц. В Институте каучука — аналогично. Еще где-то — тоже. Понимаю: характеристика-то плохая. Остаюсь без работы и без денег. Неля — учительница в школе. Мама — больна. Младший брат — школьник. И... снова добрый ангел: А. Н. Мурин. Звонит его жена, приглашает во ВСЕГЕИ. В лабораторию изотопной геохронологии, ею недавно созданную.

Встречаемся: Наталья Иосифовна Полевая спортивна, активна, подвижна словно ртуть. В зубах вечная папироска. Позже узнаю, что у нее четверо или пятеро детей. Объясняю: у меня отрицательная характеристика. Чуть меняется в лице, но тут же: «Ничего, мы это устроим — я член партбюро». Устроила инженером. Работать



Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П.Карпинского (ВСЕГЕИ)

хорошо — но K/Ar без изотопного анализа аргона. Навески по 100–200 граммов породы или минерала, чтобы элиминировать воздушное загрязнение аргона... Аргон измеряем манометром Мак-Леода: 20 килограммов ртути переливаются из одной тонкостенной стеклянной колбы в другую. Иногда колбы лопаются — вся ртуть на полу. Но ничего: и сейчас зубы в общем целы.

Добрые два года мечтаю об изотопном масс-спектрометре... Придумываю измерять концентрацию аргона в граммовых пробах с помощью термистера. Сооружаю метровую логарифмическую линейку для быстрого расчета K/Ar возраста по экспериментальным данным. Получаю дурацкие авторские свидетельства на них. Но все это от нечего делать — с тоски. Очень хочется заниматься изотопными исследованиями... А тут еще призыв в армию. Четыре месяца в Вязниках под Москвой на учебном аэродроме. Буду мастером по электрооборудованию истребителей. Призыв совпадает с амнистией заключенных. Служу с мелкими уголовниками, освобожденными из лагерей. Дедовщиной и не пахнет. Относятся уважительно — и офицеры, и сослуживцы. Особенно, когда в свободное время делаю на природе чертежи своих вакуумных «изобретений». Некоторых ребят до сих пор вспоминаю с теплом. Исковерканные жизнью судьбы. Мальчишки порассказали такое...

Возвращаюсь — и опять — А. Н. Мурин. Передает через знакомых: профессор Герлинг ищет желающих в аспирантуру. Наталья Иосифовна очень огорчена, но отпускает меня. И сейчас я сердечно



Вид на ЛАГЕД АН со стороны Петропавловской крепости.

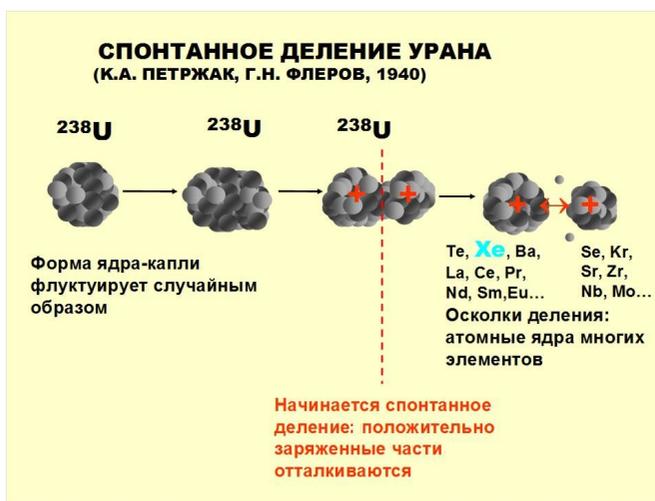
благодарен ей за все сделанное для меня, за ее светлую доброту.

В 1956 году начинается моя аспирантская жизнь в ЛАГЕД АН СССР, продолжающаяся уже в ИГГД до сегодняшнего дня... Вот так сюда я и попал.

Главный ее итог, думаю, состоит в том, что под руководством Э.К.Герлинга — сначала реальным, а спустя годы незримым, духовным — мы с моими коллегами и аспирантами сумели кое-что сделать для соединения важнейших отраслей мирового естествознания: геологии, ядерной физики и радиохимии. Но все по порядку.

1.2 Эпизод второй: Делиться надо!

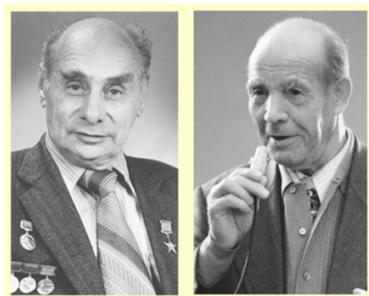
Все начинается на станции метро «Динамо». Через год после открытия Э. Ферми, О. Ханом, Ф. Штрассманом, Л. Майтнер и О. Фришем способности атомных ядер урана под действием нейтронов к делению на два осколка с выделением громадной энергии. То есть открытия принципиальной возможности создания атомной бомбы и ядерных энергетических реакторов.



Радиевый институт АН СССР, лето 1939 года. Двадцати шестилетний Г. Н. Флеров и тридцати трехлетний К. А. Петржак обнаруживают странное явление: уран даже в отсутствии нейтронов дает непонятные редкие импульсы в счетчике. По настоянию И. В. Курчатова исследователи размещают свою установку на станции метро «Динамо» в Москве, чтобы защититься от космических нейтронов.

Эффект воспроизводится — снова обнаружены импульсы каких-то тяжелых частиц. Становится ясным: ядра природного урана способны без всяких нейтронов к самопроизвольному (спонтанному) делению на две почти равные «половинки»! И это замечательное открытие сделали два выдающихся советских физика — Г. Н. Флеров и К. А. Петржак.

По предложению директора РИАНА знаменитого радиохимика

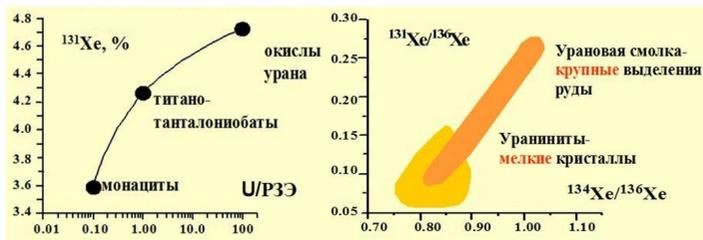


Первооткрыватели спонтанного деления урана.
Г. Н. Флеров (слева), К. А. Петржак (справа).

В. Г. Хлопина молодой тогда Э. К. Герлинг готовит эксперимент по поискам продуктов спонтанного деления в геологических объектах. Но 22 июня 1941 года опрокидывает все планы. Радиевый институт оказывается в эвакуации в Казани. Без аппаратуры. Без лабораторий.

Только через шесть бесконечно долгих лет в Радиевом институте, снова вернувшись в Ленинград из эвакуации, академик В. Г. Хлопин и Э. К. Герлинг, расплавив 500 граммов уранинита, выделяют из него благородный газ. С помощью оптического спектрографа (масс-спектрометра у них нет) по спектру свечения ученые впервые в мире доказывают, что это ксенон, каким-то образом связанный со спонтанным делением урана-238 в минерале.

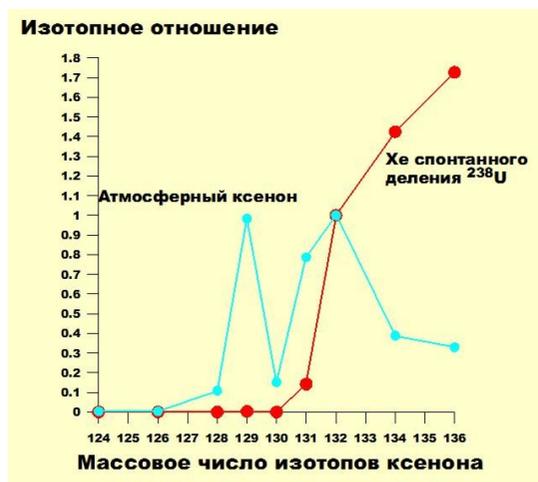
По воле судьбы именно мне доводится заняться изучением этого вопроса в аспирантуре нашего института под руководством Э. К. Герлинга. Сначала обнаруживаю, что распространенность некоторых изотопов ксенона в минералах во много раз меняется в зависимости



Изотопный состав ксенона зависит от химического состава и размеров уранового проявления!

от концентрации редкоземельных элементов. А еще — от размеров минерализации.

Причина понятна: у редкоземельных элементов огромная способность к поглощению медленных нейтронов. А поток последних зависит от размеров минерализации. Значит, в минералах происходит не только спонтанное, но и нейтронно-индуцированное деление! Но деление какого изотопа? Конечно, урана-235. Вношу поправку на деление 235-го и определяю изотопный состав ксенона собственно спонтанного деления урана-238.



Сравнение изотопного состава ксенона спонтанного деления ^{238}U и атмосферного ксенона.

Он очень отличается от состава атмосферного ксенона. А по его концентрации впервые нахожу геохимическим методом и скорость спонтанного деления урана-238 в природе. Спустя много лет из Швейцарии и Германии присылают докторские диссертации двух незнакомых молодых исследователей. Сообщают, что получили такие же результаты по спонтанному делению урана-238, как и мы. Не стану скрывать: узнать об этом было очень приятно.

По всем полученным материалам защищаю кандидатскую диссертацию. Оппонент — первооткрыватель спонтанного деления К. А. Петржак. Нужно ли объяснять, как горд молодой аспирант... Теперь

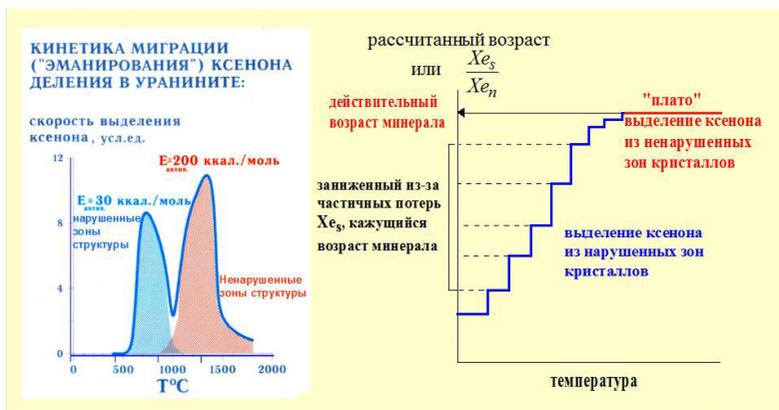
Скорость спонтанного деления ^{238}U		
авторы	минералы	Число распадов на 1 грамм урана в день
Герлинг, Шуколюков	урановая смолка, самарскит	825
“	“	748
Shukolyukov	урановая смолка, хлопинит, самарскит, гатчетолит, гадолинит, монацит	693
Шуколюков, Ашкинадзе	хлопинит, самарскит, гатчетолит, гадолинит, монацит	655
Shukolyukov, Mirkina	монацит	797
Raggety et al.	урановая смолка, уранинит, коффинит, ксенотим	784
Eikenberg et al.	цирконы	655
Среднее		736±69

пытаюсь определять возраст урановых минералов ксенон-урановым методом: по соотношению концентраций радиогенного ксенона и радиоактивного урана. Увы! Из многих десятков урансодержащих минералов подходит лишь монацит. Его структура, словно клещами, удерживает атомы радиогенного ксенона. Остальные минералы — теряют от 10 до 70% этого продукта спонтанного деления. Выходит, уран-ксеноновые часы «отстают» из-за потерь ксенона. Как же определять возрасты минералов по таким отстающим часам? В отличие от нашей повседневной жизни, в изотопной геологии можно определять время, имея часы, казалось бы, безнадежно испорченные самой природой. Вскоре удастся придумать, как это сделать.

Сначала в минерале присутствует только ксенон, накопленный за геологическое время при спонтанном делении. Часть его уже потеряна за геологическое время. Облучим минерал в ядерном реакторе дозой медленных нейтронов. Образуется ксенон вынужденного деления урана-235. Соотношение концентраций ксенона этих двух видов: «стрелки часов». Но стрелки пока показывают неверное, заниженное время. Ведь ксенон спонтанного деления частично потерян.

Мы давно замечаем: при нагревании минералов в лабораторных условиях возникает не менее двух пиков на кривых скорости выделения.

Следовательно, атомы радиогенного ксенона занимают в структу-

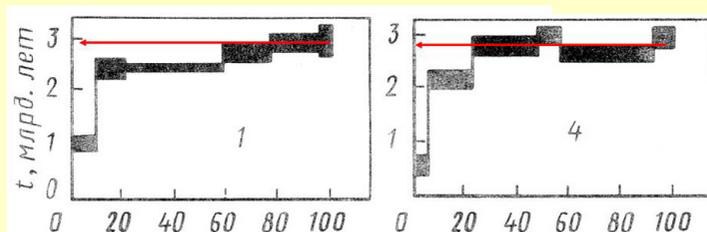


Было обнаружено, что атомы радиогенного Xe_s находятся в структуре минералов в разных кристаллохимических положениях: в нарушенной кристаллической структуре они мигрируют, в ненарушенной фазе атомы сохраняются миллиарды лет.

ре два или несколько энергетических положений. Каждый пик соответствует своему энергетическому положению. Ключ для удержания радиогенных атомов ксенона — энергия активации, мера прочности удержания. Ее мы определяем в лаборатории для каждого из пиков. Для низкотемпературного пика энергия активации получается маленькой — 30 ккал/моль. Следовательно, здесь ксенон выделяется из недоброкачественной, полуразрушенной части минеральной структуры. Оттуда ксенон спонтанного деления уже почти весь ушел за геологическое время. Там почти только новообразованный в реакторе ксенон вынужденного деления. Потому первые ступеньки низкие — соотношение Xe_s/Xe_n мало. Если минерал нагревать дальше, при высоких температурах, можно заставить ксенон выделяться из все более сохранных частей минерала. Здесь энергия активации чуть больше. Постепенно по такой лестнице мы приходим к таким температурам, при которых энергия активации достигает 200 ккал/моль. Мы заставляем ксенон выделиться из полностью сохранных участков структуры. Здесь, на плато, стрелки часов показывают верное время.

Так и есть: по уранинитам с Балтийского щита получается именно так. Вместе с Г. Ашкинадзе, А. Комаровым, И. Толстихиным публикуем сначала статью в «Докладах АН СССР», а затем данные

Первые Xe_2 - Xe_n датировки цирконов Балтийского щита.



По оси x доля выделенного Xe_n , в %

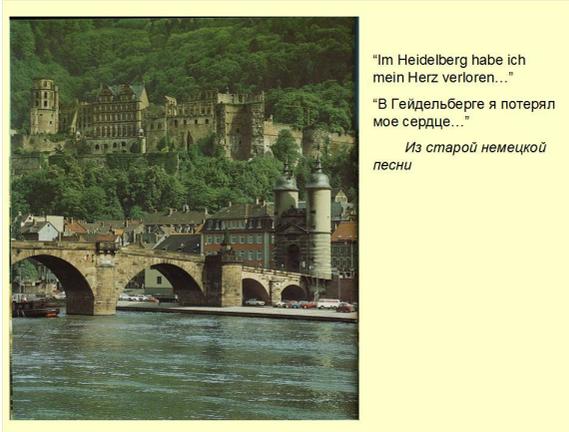
по цирконам — в других изданиях.

Но как сделать, чтобы о новом методе узнали и зарубежные коллеги? Ведь пока наши работы не опубликованы в международных журналах, нас для мировой науки словно и нет... Пишу в Гейдельберг Т. Кирстену, который был в нашем институте недавно. С ним подружился: умный, ироничный, жестковатый. Охотно присылает приглашение — приезжай! Получаю положительную характеристику от партбюро (Ф. П. Митрофанов), месткома и дирекции (К. О. Кратц). Прохожу инструктаж в райкоме партии. Объясняют, сколько опасностей поджидает за границей. Возможны провокации, попытки выведать наши секреты, переманивание на разлагающийся бездуховный Запад. Особенно опасны женщины-шпионки, умело соблазняющие наших мужчин... Но, несмотря на опасность, райком партии... благословляет на поездку.

Я в сказочном Гейдельберге, Мекке дореволюционных русских ученых. «Im Heidelberg habe ich mein Herz verloren...» Иногда кажется, что я перенесся лет на четыреста назад...

В Институте ядерной физики рассказываю о своей идее Тиллу Кирстену. Рассказывает, что слышал, что нечто подобное пытаются сделать в Париже, в лаборатории Клода Аллегра. Нам надо торопиться. Говорит: «Я хочу, чтобы тебе удалось первым».

Быстро собираемся и едем в Юлих — атомный центр ФРГ с ядерными реакторами. Скорость на автобане: много больше 150 км/час. В правой руке у Тилла — банка с пивом, левая — на ру-



ле. Непривычно... Вот и Юлих. У ворот атомного центра суровый охранник. Обращается к Тиллу: «Ihre Ausweisen!» («Ваши документы!»). Тилл роется в карманах: «Leider habe ich meinen Pass zu Hause vergessen». («Забыл дома, к сожалению»). Охранник: «Naturlich, haben Sie die Führescheine?» («Наверняка у Вас есть водительские права с собой?») Нет, Тилл и автомобильные права забыл дома. «Und Sie, – обращается ко мне, – bitte Ihre Dokumenten!» («А у Вас? Есть



Профессор Тилл Кристен.

документы?») Протягиваю мой молоткастый, серпастый загранпаспорт. Удивленно крутит в руках: «Aber was ist das?!» («Но что это?») «Sowietischer Pass», — отвечаю я. Шульцман поражен. Недоверчиво: «Von wo sind Sie gekommen?» («Откуда Вы приехали?») «Aus Moskau» («Из Москвы»), — отвечаю. Удивлен несказанно. Мгновение думает и машет рукой: «Ah! Fahren sie!» («Ладно, проезжайте!»). Так мы заезжаем с моими ленинградскими урановыми минералами в кармане прямо в главный атомный центр Германии.

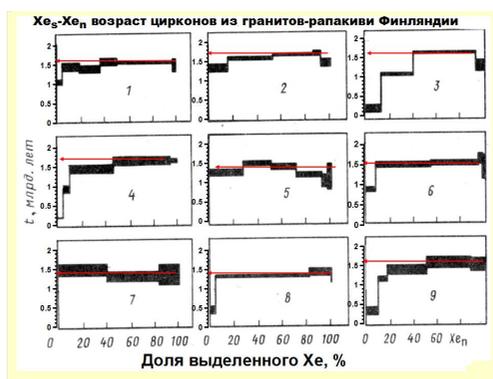
Серию облученных в центре урановых минералов днем и ночью исследую в Гейдельберге. Помогает мне молодой тогда Элмар Йессбергер, с которым мы дружим, как и с Тиллом, до сих пор. Все получилось — метод работает! Тилл переводит на английский статью, правит мой текст и договаривается в редакции «Earth and Planetary Science Letters» о быстрой публикации нашей статьи.

Он очень доволен, что работа заносчивых французов из лаборатории Аллегра выходит в «Nature» месяца на три позже... В прошлом году я получил от Аллегра письмо, где он просит прислать ссылки на наши работы для его будущей книги. Интересно, помнит ли он об этом смешном советско-французском маленьком соревновании. Вообще-то,



с Аллегром я сталкивался часто: и в лаборатории Э. К. Герлинга, когда он юным бунтарем-аспирантом сидел на столе, болтая ногами, и много позже у него дома в Париже, и в его огромном кабинете в его бытность министром образования Франции, которым он тогда как-то совсем по детски очень гордился. Это исключительно талантливый в науке и яркий до сих пор человек.

В течение многих лет я занимаюсь ксеноновым методом геохронологии. С его помощью мы вместе с аспирантом Я. Капустой и А. Верховским впервые датируем по цирконам граниты-рапакиви Финляндии:

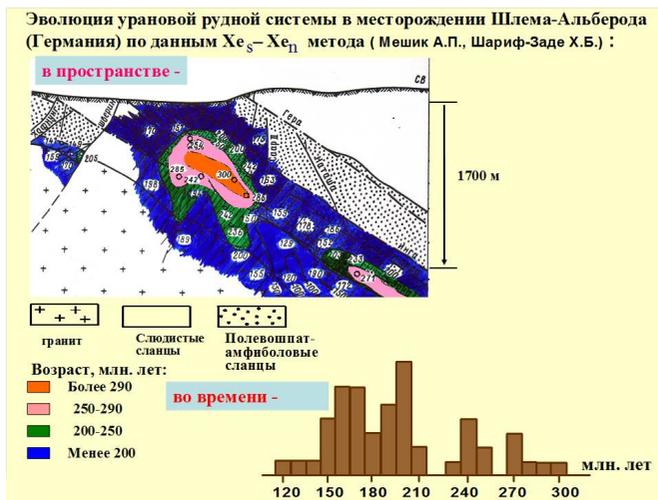
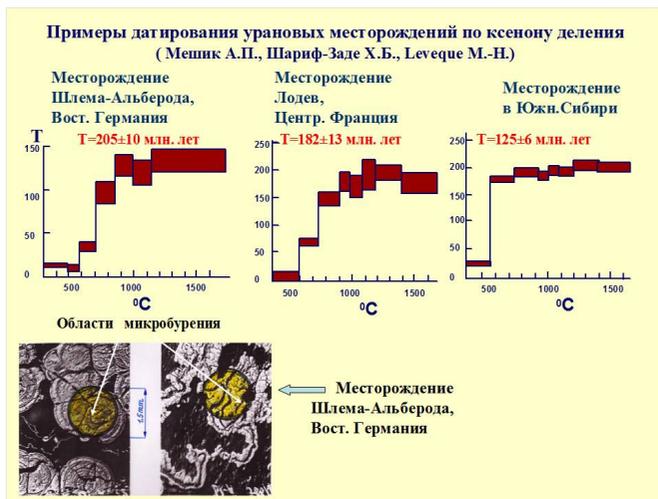


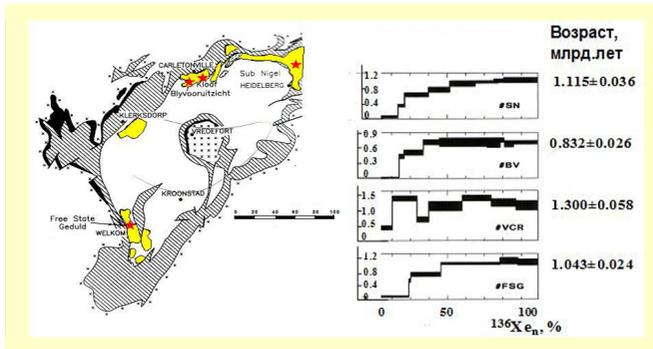
Позже уже в Москве с аспирантам А. П. Мешиком, Хасаном Шариф-Заде и Олей Правдивцевой определяем по настурану возраст промышленных урановых месторождений: отечественных и восточноевропейских (Германия, Чехия). С московской аспиранткой Мари-Элен Левек определяем уран-ксеноновым методом возраст месторождения урановой житницы Франции — месторождения Левек, а также наших сибирских месторождений.

С удивлением обнаруживаем, что гидротермальная история месторождений может длиться полтора миллиона лет и четко определяется в пространстве месторождения.

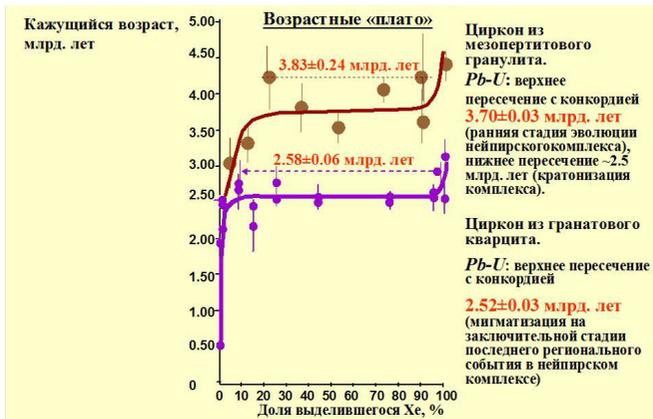
Примером исследований золоторудных месторождений оказывается работа с А. Мешиком и У. Реймолдом по определению возраста золоторудных отложений Витватерсранда в Африке.

Вместе с Д. П. Крыловым исследуем уран-ксеноновым методом по цирконам геологическую временную историю метаморфизованных комплексов древнейших пород Антарктиды. Данные совпадают с результатами уран-свинцового датирования.





Результаты датирования золоторудного месторождения Витватерсранд по ксенону деления.



Применение Xe_s/Xe_n метода для датирования древних (первичных) событий в истории докембрийских высокометаморфизованных пород (на примере нейпирского комплекса Восточной Антарктиды).

Предложенный в ИГГД РАН новый метод изотопной геохронологии работает! Но человек предполагает, а Господь располагает... Нежданно-негаданно в изотопной геологии происходят интереснейшие события...

1.3 Эпизод третий: Чернобыль 2 миллиарда лет назад...

Однажды, просматривая поступившие в Библиотеку Академии наук в Петербурге журналы, я — тогда еще молодой исследователь — натываюсь на маленькую, всего в две страницы, странную статью некоего П. Куроды. Со свойственным многим молодым ученым высокомерием я несу статью Эриху Карловичу Герлингу: посмеяться над глупым автором, утверждающим, что в природе возможно самопроизвольное возникновение ядерных реакторов в урановых месторождениях. Однако мой учитель, будучи гораздо прозорливее ученика, буквально *заставляет* меня провести аналогичные вычисления. Как и при рас-

При каких условиях может начаться в минерале цепная реакция деления ядер урана?

η — среднее число быстрых нейтронов деления, испускаемое при захвате ураном 1 медленного нейтрона

ϵ — коэффициент размножения на быстрых нейтронах

P — вероятность для нейтронов избежать резонансный захват изотопом ^{238}U

f — коэффициент теплового использования, то есть доля нейтронов, приходящаяся на ядерное топливо

K_{∞} — мера возможности цепной реакции деления, коэффициент размножения нейтронов

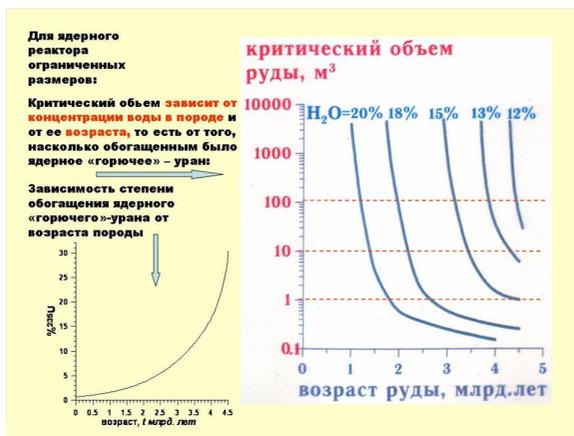
$$K_{\infty} = \eta \epsilon p f$$

Если $K_{\infty} < 1$ — цепная реакция не может начаться

Если $K_{\infty} = 1$ — реакция деления идет с постоянной скоростью

Если $K_{\infty} > 1$ — начинается цепная реакция !!!

чете обычного ядерного реактора, рассчитываю четыре коэффициента, зависящие от состава минерала и вмещающей породы и от ее размеров. Ключ к ответу о возможности существования в породах ядерных реакторов — их произведение, коэффициент размножения нейтронов. Если коэффициент размножения меньше 1, цепная реакция не может начаться, число нейтронов уменьшается. Если он в точности равен 1, реакция идет с постоянной скоростью. Но если коэффициент размножения хоть на тысячную долю больше единицы, число нейтронов и соответственно актов деления ядер урана лавинообразно, катастрофически увеличивается. Происходит все нарастающая цепная реакция, подобная той, что произошла в Чернобыле. В принципе, все может кончиться ядерным взрывом в горных породах.



После получения результатов нашему изумлению нет конца: коэффициент размножения нейтронов в породах действительно может быть больше единицы! Два миллиарда лет назад и ранее изотопная распространенность урана-235 — ядерного горючего была в семь раз больше современной. Ядерное горючее было обогащенным.

Поэтому в урановых месторождениях действительно могла самопроизвольно возникать цепная реакция деления урана! Расчет показывает: в течение первого миллиарда лет существования Земли критическая масса рудных тел могла составлять доли м³. Это должно было приводить к выгоранию ядерного горючего ²³⁵U и накоплению ксенона деления, особенно в древних, богатых ураном и водой и обедненных редкоземельными элементами месторождениях.

Получив подобные расчетные результаты, Комиссия по атомной энергии США их засекречивает. Американские коллеги усердно ищут экспериментально выгорание ²³⁵-урана в тысячах образцов урановых руд со всего света.

Когда они рассекречивают свои данные, мы убеждаемся, что они не нашли сколько-нибудь заметного выгорания ²³⁵U ни в одном из тысяч исследованных образцов урановых минералов...

Мы же (редкий случай в те времена — без всякой секретности!) идем иным путем, применив на три порядка более чувствительный

Американские исследователи пытались найти признаки выгорания изотопа ^{235}U в тысячах проб.

Table 3. Constancy of $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ ratio compared with the standard*

Sample number	Mineral formation	Mine location	Ratio†	95% confidence limits
542 640–651	Autunite in granite Arsenical in sandstone	Marysvale, UT Camp Bird Mine, Temple Mountain, UT	1.0002 ± 0.0004 0.9999 ± 0.0002 (0.9997 ± 0.0002)	
1235	Uraninite-fluorite- tyuyamunite in Todilto limestone	Haystack Mountain, McKinley County, NM	0.9993 ± 0.0002 (0.9994 ± 0.0003)	
1487	Uraninite in sandstone	Big Indian Wash, UT	1.0001 ± 0.0001 (1.0000 ± 0.0002)	
1740	Low-vanadium oxide ore from sandstone, Petrified Forest, Chinle Formation	Ramco No. 17 Mine, Cameron, AZ	0.9997 ± 0.0002	
1757	Uraninite-copper- vanadium in sandstone Shinarump, Chinle Formation	C-3 Mine, Monument Valley, Utah-Arizona	0.9994 ± 0.0002 (0.9995 ± 0.0002)	
1762	Partly oxidized coffinite in sandstone, Brushy Basin, Morrison Formation	Jackpile Mine, Valencia County, NM	0.9993 ± 0.0002 (0.9993 ± 0.0002)	
2294	Arsenical uraninite- coffinite in volcanic rocks	White King Mine Lakeview, OR	1.0002 ± 0.0002	
3033	Uraninite-copper in sandstone	White Canyon, UT	0.9995 ± 0.0002 (0.9992 ± 0.0002)	
3034	Uraninite in sandstone, Upper Wind River Formation	Aljob Claims, Natrona County, WY	0.9996 ± 0.0003	
3035	Uranium-vanadium in Salt Wash Sandstone, Morrison Formation	Paradox D Mine, Montrose County, CO	0.9998 ± 0.0003	
3036	Uraninite (some coffinite) in metamorphic rocks	Schwartzwalder and Mena mines, Denver, CO	1.0001 ± 0.0002 (0.9999 ± 0.0002)	
3039	Schroekingerite in mudstone, Lost Creek deposit	Sweetwater County, WY	0.9995 ± 0.0002 (0.9995 ± 0.0002)	
Lot 19	Orange oxide	Belgian Congo (Zaire)	1.0000 ± 0.0001	
Lot 305	Orange oxide	Port Hope, Canada	0.9998 ± 0.0001	

метод идентификации природных ядерных реакторов — по изотопным сдвигам ксенона.

Исследованы образцы из всех доступных нам месторождений СССР, Чехословакии, ГДР, но тщетно! В минералах присутствует лишь ксенон спонтанного деления ^{238}U с примесью таких количеств ксенона нейтронно-индуцированного деления ^{235}U , что о цепной реакции не может быть и речи.

На всякий случай мы повторяем американскую работу: исследуем совместно с ВИМСом изотопный состав урана в большой коллекции образцов. Но в исследованных и нами образцах нет признаков выгорания урана-235.

Поэтому и мы, и американские коллеги приходим независимо к выводу: в природе, по-видимому, нет и не было условий для самопроизвольного начала цепной реакции деления.

Даже максимально возможные отклонения в изотопном составе урана, по данным американцев, не значимы:

Table 2. Constancy of $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ ratio presented as deviations from the standard*

Ore deposit	Location	Maximum possible percentage of deviation in $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$
Wheal Edward	Cornwall, England	0.025
Magnesia uranium concentrate	Portugal	0.041
Shinkolobwe pitchblende	Belgian Congo (Zaire)	0.046
Shinkolobwe "ionex"	Belgian Congo (Zaire)	0.046
Mindola, lot 1	Northern Rhodesia	0.028
Mindola, lot 4 (high copper content)	Northern Rhodesia	0.024
South African concentrate	The Rand, South Africa	0.033
Rum Jungle	Northern Australia	0.038
Mary Kathleen	Queensland, Australia	0.043
Radium Hill	South Australia	0.033
Blind River	Ontario, Canada	0.028
Beaver Lodge	Alberta, Canada	0.028

Ирония судьбы состоит в том, что через два года французские технические специалисты Комиссариата по атомной энергии случайно обнаруживают поразительный природный феномен...

7 июня 1972 года они выполняют рутинный технологический контроль изотопного состава гексафторида урана. Он изготовлен из сырья, поступившего во Францию из промышленного уранового месторождения Окло в Республике Габон в Центральной Африке. Французы обнаруживают маленький, в 0.003%, но хорошо воспроизводимый дефицит изотопной распространенности ^{235}U .

Расследование показывает, что из Габона в течение нескольких лет поступает руда, в которой изотопная распространенность ^{235}U иногда падает против обычной на 20% и много более. За несколько лет получено и переработано 700 тонн обедненного урана. Общий дефицит изотопа ^{235}U в нем составляет 200 килограммов, чего хватило бы на изготовление десятка атомных бомб.

Все изотопные признаки показывают: два миллиарда лет назад в месторождении Окло происходила цепная реакция деления, подобная той, что идет в рукотворных ядерных реакторах сегодня. И не в

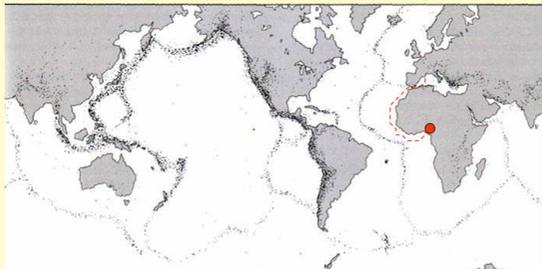
Номер образца	Образец	Содержание U, %	Возраст, млн.лет	Xe, 10 ⁹ см ³ /г	Xe _n , %	Xe _n /U 10 ⁹ , см ³ /г	поток нейтронов, 10 ¹³ /год
Оксиды							
Уранинит:							
1	Большой лапоть	59,0	1950	803	0±1	7±7	12
2	рудник Чкалова, № 1	64,5	1950	825	25±4	320±55	570
3	рудник Чкалова, № 2	56,5	1950	1120	2±2	39±39	69
4	Черная Салма	55,5	1950	811	11±5	160±70	280
5	МФ	64,1	1950	571	9±2	80±17	140
6	Чупа-1	59,7	1950	872	30±6	421±79	750
7	Чупа-2	62,7	1950	977	23±3	359±46	649
8	измененная фракция, Лалсиева губа	74,3	1950	420	7±3	18±18	32
9	измененная фракция, там же	6,7	?	75	0±1	15±15	26
10	К10у, восточная часть СССР	71,0	~2000	1380	8±4	157±79	280
11	М10а60, фр. <0,16 мм	69,7	250	217	9±6	29±15	990
12	М10а60, 0,25 > фр. > 0,16 мм	64,1	250	177	13±2	36±3	1150
13	К-36-60, фр. <0,1 мм	79,45	400	262	7±4	23±13	740
14	К-36-60, 0,1 < фр. < 9,2 мм	80,45	400	391	5±4	25±18	800
15	К-21-63, фр. <0,1 мм	80,50	215	193	10±7	24±16	830
16	К-21-63, 0,1 < фр. < 0,2 мм	82,45	215	250	22±2	6±6	190
Настуран:							
17	Украина, С	29,4	2100	450	22±2	337±30	600
18	Украина	~50	~2000	He опр.	7±2	He опр.	He опр.
19	Г1	67,8	230	298	16±4	71±18	2300
20	Г2	52,0	230	192	27±8	100±29	3200
Титанаты							
21	Г3	69,0	230	262	26±4	99±15	3200
22	Г4	18,8	230	54,5	16±2	48±21	1500
23	Н230	70,5	230	281	22±4	88±15	2800
24	Яхимов	53,8	~200	8,6	22±3	3,5±0,6	110
25	Найгебори	45,4	200	5,4	1±1	0,11±0,11	35
26	Н-23	36,2	200	39,8	29±9	32±10	1000
27	Нт	61,8	200	148	17±9	41±22	1300
28	Вп	70,5	200	240	14±5	48±16	1500
29	Дальний Восток	11,6	~150	17,8	5±5	7,7±7,7	250
30	Бреггерит (Украина)	44,9	2100	441	15±5	147±51	270
31	Клевент (восточная часть СССР)	72,8	~2000	1050	10±8	144±10	290
Титанаты							
32	Браннерит (Украина)	37,4	1950	183	30±5	147±24	270
33	Браннерит (Средняя Азия)	40,1	380	170	6±6	25±25	3600
Танталониобаты							
34	Колумбит (Украина)	0,071	1950	2,02	17±6	480±180	850
Самарскит:							
35	К-2	13,5	~2000	3,68	14±4	3,85±1,15	120
36	Кп	5,08	293	11,8	14±4	32±9	1000
37	МФ	7,81	293	21,1	8±4	22±11	700

Попытки обнаружить в СССР избыток нейтронно-индуцированного ксенона и признаки резко повышенных потоков нейтронов.

одном месте, а в четырнадцати зонах этого месторождения работали природные ядерные реакторы!

Природа слепа, а законы развития науки подчас жестоки: ведь счастье — экспериментально открыть природный ядерный реактор было так близко, так возможно...

- проверка изотопного состава **U** в полуфабрикате (**UF₆**), поступившем с завода атомной промышленности. Дефицит изотопа ^{235}U еще больше!
- спецслужбы организуют «химическое следствие»: за 2 недели проанализировано 350 образцов урана, представляющих разные стадии технологической цепочки
- сильно обедненный уран обнаружен сначала в концентратах, а затем и в сырой руде, поставляемой во Францию из Республики Габон в экваториальной Африке:



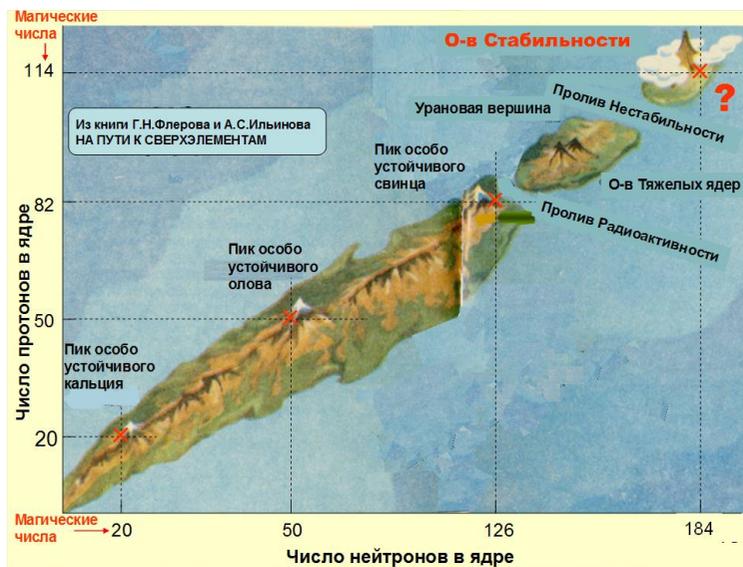
**Источник обедненного урана – месторождение
Окло:**



Здесь крупные рудные тела толщиной до 0.5-1.0 м и протяженностью в десятки метров содержали до 60% урана.

1.4 Эпизод четвертый: Погоня за призраком...

В лабораторию Э. К. Герлинга неожиданно приезжает молодой исследователь из далекого Вьетнама — Данг Ву Минь. Отвоевав на Американско-вьетнамской войне, окончив университет, он узнает о нашей лаборатории из статей. Как раз в это время по моей просьбе Комиссариат по атомной энергии Франции присылает нам в институт пробы из эпицентра ядерной цепной реакции в Окло. Моя тайная мысль: а что, если при больших потоках нейтронов в природном ядерном реакторе синтезированы изотопы сверхтяжелых элементов?!



Ведь на это как раз требуются годы, когда физики-теоретики предсказывают возможность существования в природе «острова стабильности» — «магических» сочетаний протонов и нейтронов в ядрах, которые делают устойчивыми не только обычные, но и, может быть, очень тяжелые, трансурановые ядра.

Теоретически могут существовать долгоживущие монстры, во много раз тяжелее известных химических элементов. Например, химические элементы с атомным весом в 300–400. Именно тогда к нам с Геной Ашкинадзе обращается академик Г. Н. Флеров — директор Лаборатории ядерных реакций в Дубне. В этой всемирно известной лаборатории-институте искусственные трансурановые элементы со 102

по 107 один за другим синтезируют на ускорителе. Однако их устойчивость все меньше и меньше. По просьбе Георгия Николаевича мы с Геней ищем в радиоактивных минералах атомные ядра с «острова стабильности». Напрасно — ничего не находим.

Только в прошлом году американцам удалось обнаружить в древнейшем цирконе Австралии ксенон деления от вымершего близкого трансуранового изотопа ^{244}Pu , но это всего лишь близкий трансурановый элемент. Другой группе исследователей удастся зарегистрировать несколько десятков атомов элемента №111 рентгениума в самородном золоте.



Ну, а тогда давно в поисках сверхтяжелых химических элементов мы с Минем плавим пробу из природного ядерного реактора: увы, в



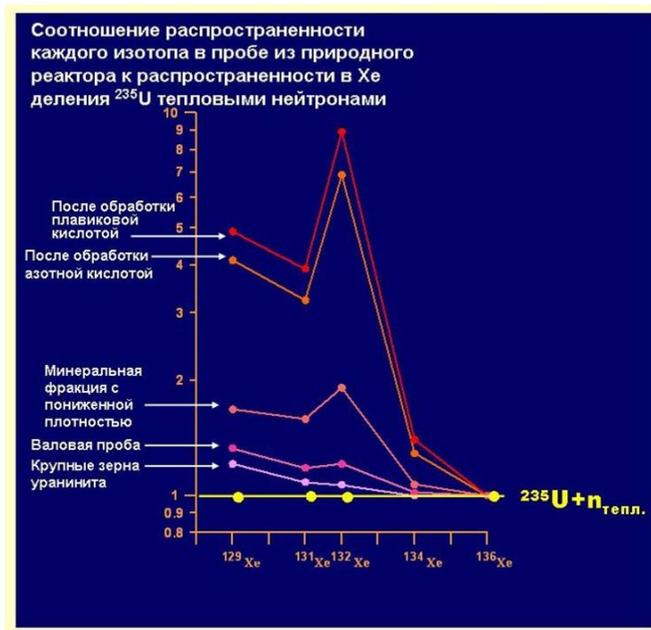
ней содержится на 99% обычный ксенон, продукт деления изотопа урана-235 в цепной реакции. Делаем ступенчатый отжиг валовых проб руды. И вот что-то забрезжило: явные избытки всех изотопов, особенно ^{132}Xe , относительно ^{136}Xe . Становится совершенно очевидным — этот ксенон обладает совершенно необычным изотопным составом. Пытаясь понять природу этого изотопного сдвига, мы растворяем шаг за шагом вещество руды и анализируем ксенон.



Как при разборе матрешек, мы получаем все меньшие по массе минеральные фазы. Но в них все ярче обогащение удивительным ксеноном. Он прячется в каких-то минеральных фазах: по мере растворения минералов точки смещаются все выше. В конце концов, выделен какой-то минерал с совершенно необыкновенным изотопным составом ксенона. Светлой памяти И. Крылов — участник этой работы — определяет рентгеноструктурным методом, что это диоктаэдрическая слюда.

В ней огромное, десятикратное обогащение изотопами ^{132}Xe , ^{131}Xe , ^{134}Xe и ^{129}Xe относительно ^{136}Xe по сравнению с нормальным ксеноном деления ^{235}U , который должен был бы образоваться в природном ядерном реакторе.

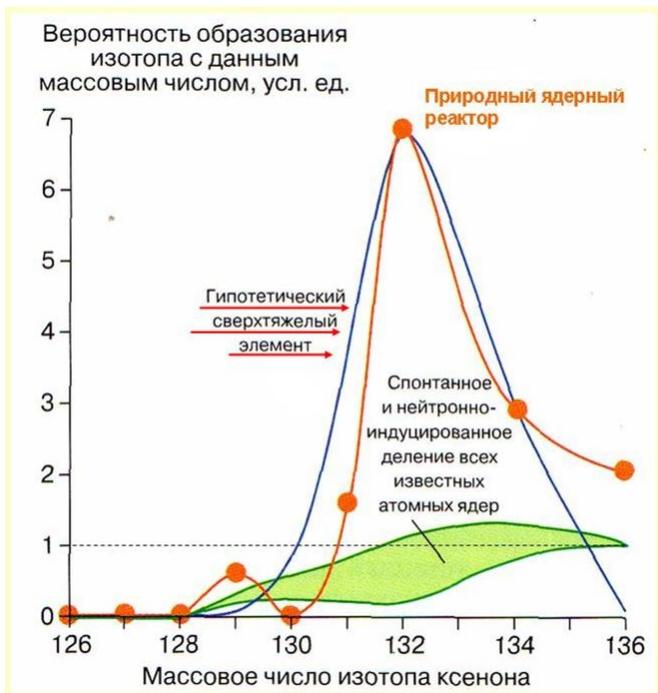
Вновь открытый компонент не похож на ксенон деления ни одного из известных элементов. Ни одна из известных ядерных



нейтронных реакций на барии или теллуре — соседей ксенона в Периодической системе — не может дать такие изотопные сдвиги. Изотопное масс-фракционирование тоже отпадает: нет необходимой зависимости величины эффекта от массового числа изотопа. Да и эффект гигантский. Как раз в эти месяцы физики-теоретики рассчитывают вероятный изотопный состав Хе гипотетических сверхтяжелых элементов.

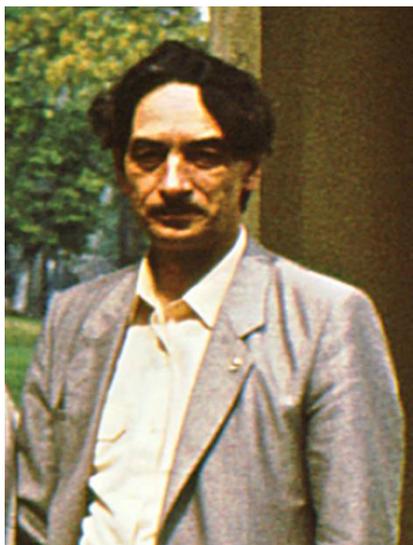
Мы заворожены удивительным подобием структуры изотопного состава ксенона и расчетной кривой выходов осколков деления гипотетического сверхтяжелого элемента №114. Трудно удержаться от соблазна предположить: не образуется ли при естественной цепной реакции деления сверхтяжелый элемент?! Но что-то нас удерживает от преждевременной публикации...

Кончается срок трехлетнего пребывания Миня в лаборатории. Защитив кандидатскую диссертацию, он уезжает домой. Провожаем всей лабораторией. Целых три года его терпеливо ждет жена Зун. А впереди — приближающаяся Китайско-вьетнамская война...



1.5 Эпизод пятый: Путешествие из Петербурга в Москву...

Нахожусь в Москве в командировке. Лев Львович Шанин, заведующий Лабораторией изотопной геологии ИГЕМа, передает просьбу директора ГЕОХИ заехать к нему. Впервые встречаюсь с В. Л. Барсуковым.



Директор ГЕОХИ им. В. И. Вернадского РАН, академик Валерий Леонидович Барсуков.

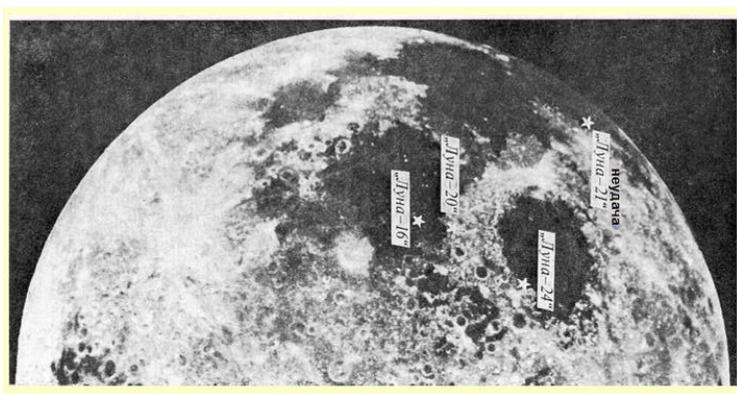
Высокий, худощавый, обаятельный, красивый человек. Чувствуется — очень волевой. Тонкие подбривные усики, как у актеров из старых американских фильмов. Умные, внимательные глаза. Тихий приятный голос. Задает вежливые вопросы о работе. Потом — главный вопрос: не хотел бы я переехать в Москву и поработать заведующим Лабораторией геохимии изотопов. Ведь недавно скончался ее заведующий Алексей Иванович Тугаринов. Оторопело соображаю — уж очень неожиданно. Ляпаю: я ведь не член партии, разве это возможно... Мягко улыбается: в ЦК я это уже согласовал, там не будет возражений (позже узнаю: он долго работал в аппарате ЦК). Прошу время подумать и посоветоваться с женой. Да и с квартирой все не просто... — Этот вопрос решим: квартиру неплохую вам найдем. А лаборатория хорошая — ее ведь создал академик А. П. Виноградов.

Так я оказываюсь в Москве. Огромное уважение и теплая память о В. Л. Барсукове остается в моем сердце до сих пор. Мало людей такого масштаба и ума доводилось встречать в жизни. Жесткость и холодноватость в отношениях с коллегами, включая и начальство, сочеталась в нем с редкостной душевной теплотой и добротой. Но к этим своим чертам он мало кого подпускал. Мне повезло; я испытал на себе эти его качества.



А предложенная лаборатория действительно оказалась сильная: выдающийся ученый мирового уровня Е. В. Бибикова, замечательные исследователи стабильных изотопов В. А. Гриненко, В. И. Устинов, А. М. Девирц, прекрасный экспериментатор С. Ф. Карпенко. Позже подсоединился к нам сектор космохимии в Черноголовке под Москвой во главе с известным космохимиком А. К. Лаврухиной и Лаборатория масс-спектрометрии с доктором Г. И. Рамендиком. Всего около шестидесяти человек, четыре научных сектора. Получаю зеленую улицу на покупку трех масс-спектрометров для исследований по гео-

космохимии благородных газов. А в нагрузку — просьбу Валерия Леонидовича Барсукова стать его заместителем, руководителем одного из двух научных отделов института — геохимического. Отказывать Валерию Леонидовичу не принято. Соглашаюсь. Отдел большой — человек шестьсот. Не соскучишься! Самые разнообразные лаборатории. От Лаборатории геохимии осадочных пород (член-корреспондент А. Б. Ронов) и геохимии щелочных пород (академик Л. Н. Когарко) до Лабораторий кристаллографии (академик В. С. Урусов), Лаборатория сравнительной планетологии и Лаборатория геохимии планет, обеспечивающие научную часть космической программы СССР.



Места на поверхности Луны, откуда доставлены пробы в ГЕОХИ АН СССР.

В институте хранятся и исследуются пробы лунных пород, доставленных советскими автоматическими станциями Луна-16, -20, -24. Лаборатории получают и исследуют снимки Венеры, выполняют дистанционный химический анализ пород. Незабываемы минуты и часы ожидания результатов.

Есть и еще пара лабораторий, занимающихся деликатными вопросами обнаружения американских подводных лодок и скрытого ядерного оружия на борту иностранных коммерческих судов... А потом и Чернобыльской проблемой. Работа интересная и многоплановая.

Начиная от обсуждения научных результатов рейсов институтского исследовательского судна «Академик Петров» и заканчивая участием в экстренных совещаниях в Генштабе в связи с возможным падением на территорию северной Америки советского аварийного



спутника с ядерной установкой на борту. Вопросы военных: «Что делать с радиоактивными изотопами?», «Уничтожить спутник ракетой?», «Высадить десант спецназа ГРУ и вывезти упавший спутник из-под носа американцев?», «Дезактивировать?» К счастью, аппарат упал в океан...



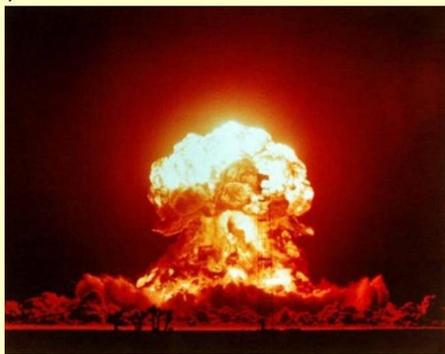
Но, несмотря на множество повседневных забот, свои исследования я бросать не хочу. И, конечно, первое, что делаю — продолжаю изучать загадочный ксенон природного ядерного реактора. Приглашаю на работу физика А. П. Мешика. Думаем вместе: этот ксенон

в природном ядерном реакторе — результат деления сверхтяжелого элемента или что-то иное? Прежде всего, нелегко придумать разумный механизм генерации сверхтяжелого элемента. Расчет показывает: поток нейтронов в месторождении Окло все же для этого недостаточен. Кроме того, нельзя отбросить еще одну возможность. Для ее проверки нам нужен объект, где явления, наблюдаемые в Окло, могли бы быть проявлены самым экстремальным образом.

Такой объект — эпицентр взрыва атомной бомбы. Наши попытки получить подобный материал на Родине тщетны из-за непреодолимой секретности.

Но германские друзья — коллекционеры метеоритов супруги Цейтшель — добывают для нас образец породы прямо из-под испарившейся при атомном взрыве стальной башни, на которой американцы в 1945 году взорвали первую бомбу.

Идею можно было проверить в объектах, где интенсивно образуются цепочки осколков деления, и где одновременно возможна высокая температура. Таким объектом оказалась порода в эпицентре экспериментального ядерного взрыва в пустыне Аламогордо, США:

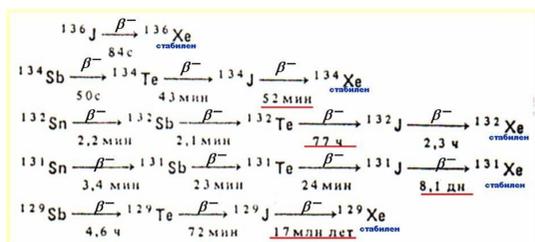


Исследуем ксенон и криптон оттуда. Ура! наш выбор — правилен! Изотопные сдвиги в этом образце рекордно велики и достигают тысячи процентов!

Ведь шкалы здесь логарифмические, и изотопные вариации измеряются порядками величин. Однако самое важное открывается



нам, когда мы обращаемся к изотопам-предшественникам ксенона и криптона в радиоактивных цепочках осколков деления. Подоб-



Цепочки осколков деления. Изотопы с большим временем жизни могут успеть до превращения в стабильный изотоп ксенона интенсивно мигрировать и войти в состав новообразующихся или уже существующих минералов. Скорость геохимической реакции очень сильно зависит от химических свойств элементов и особенно от температуры.

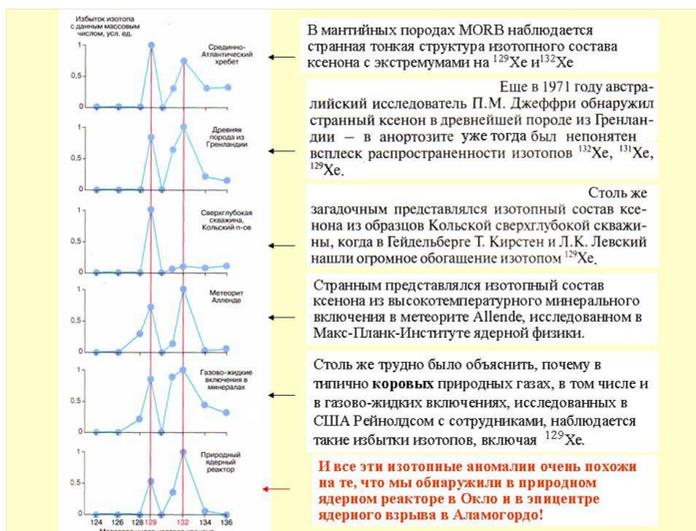
но тому, как в обычных радиоактивных семействах урана и тория превращение урана и тория в стабильные изотопы свинца проходит через ряды распадов радиоактивных изотопов разных химических элементов, стабильные изотопы ксенона и криптона также возникают после распада нескольких изотопов-предшественников (precursors). Эти предшественники — изотопы с различным периодом полураспада разных по геохимическим свойствам элементов: теллура, йода, сурьмы.

В породе из эпицентра атомного взрыва между величиной изотоп-

ного сдвига и суммарным средним временем жизни осколков деления — β -радиоактивных предшественников ксенона в цепочках деления — обнаруживаем жесткую корреляцию.

Следовательно, «виноват» в возникновении изотопных сдвигов ксенона в различных природных объектах один общий для них процесс. Это миграция этих предшественников, их концентрирование во вторичных минералах в соответствии с их геохимическими свойствами; и только после этого — превращения в стабильные изотопы ксенона в аномальных соотношениях.

Чем больше природой отпущено изотопам времени жизни, тем успешнее они успевают мигрировать и сконцентрироваться каждый в геохимически подходящем ему минерале. Таким образом, нам с А. Мешиком удастся открыть новый, ранее неизвестный в геохимии радиохимический процесс и новый тип ксенона (и криптона тоже) — CFF-Xe (Chemically Fractionated Fission Xenon). Необходимые условия для его возникновения — генерация продуктов деления при повышенной в течение длительного времени температуре в горных породах (в обычных породах, не в ядерных реакторах!) или же образование в мелкодисперсных минералах. Его изотопный состав зависит от температуры и химического состава породы или минерала.



Но общая тенденция остается неизменной. Даже в атмосферном ксеноне, в мантийных, некоторых древних породах, в газожидких включениях и природных глубинных газах можно видеть явственную типичную изотопную «память» ксенона необычного типа.

Это объясняет все ранее казавшиеся непонятными изотопные странности в очень разнообразных объектах. В итоге мы с А. Мешиком разрабатываем и публикуем численную геохимическую модель, решающую многолетнюю загадку аномальности изотопного состава ксенона атмосферы, мантии и природных газов Земли.

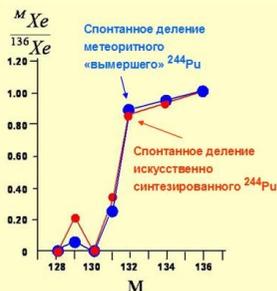
1.6 Эпизод шестой: Сквозь тернии — к звездам...

В один из дней 1983 года в ГЕОХИ неожиданно снова появляется Минь: хочет работать над темой докторской диссертации. На этот раз приезжает с женой и дочкой. Позади кровавая война. Атаки китайских танков. Рассказывает: жуткие минуты, сидит в окопе, слышит приближающийся гул китайских танков Т-34. Думает, что это последние минуты его жизни. Вспоминает родных, ленинградских коллег и меня. Танки прорывают соседний участок фронта. И потому он все еще жив.

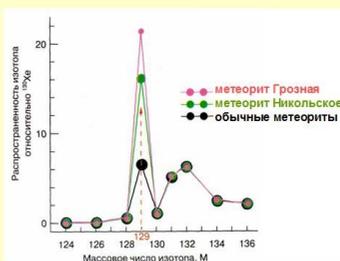
Начинает работать над проблемой спонтанного деления. Но теперь уже в космохимии. В институте широким фронтом ведутся космические исследования, ведь В. Л. Барсуков — руководитель научной части советской космической программы, а я его заместитель.

Одно из направлений моей работы — изотопная космохимия. С Минем изучаем изотопные ископаемые: плутоногенный ксенон в метеоритах-ахондритах, содержащийся в магматических породах с малых планет-астероидов.

В метеоритах-ахондритах, магматических пород с малой планеты-астероида Веста обнаруживается «ископаемый» ксенон-продукт радиоактивного распада «вымершего» изотопа плутония - ^{244}Pu .

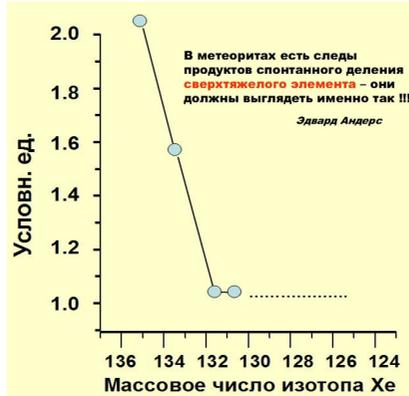


В метеоритах-хондритах, остатках первичного вещества Солнечной системы, есть и другой «ископаемый» ксенон-продукт радиоактивного распада «вымершего» изотопа йода - избыток ^{129}I . Он успел вымереть потому, что среднее время «жизни» его атомов 0.1 млрд. лет, а Солнечная система существует 4.6 млрд. лет



Изотопный состав в точности такой, как при спонтанном делении искусственно созданного изотопа ^{244}Pu , полученного от физиков. В метеоритах это память о вымершем короткоживущем плутонии-244. По нему рассчитываем время образования магматических пород на малой планете-астероиде Веста: они в числе первых в Солнечной

системе. Удивительно коротко время между рождением Солнечной системы и дифференциацией вещества малых планет: первые миллионы лет, в тысячи раз меньше возраста Солнечной системы. Находим в метеоритах огромные избытки еще одного изотопного ископаемого — ^{129}Xe , продукта β -распада вымершего йода-129. Этот изотоп широко используется для оценок скорости образования земной атмосферы.

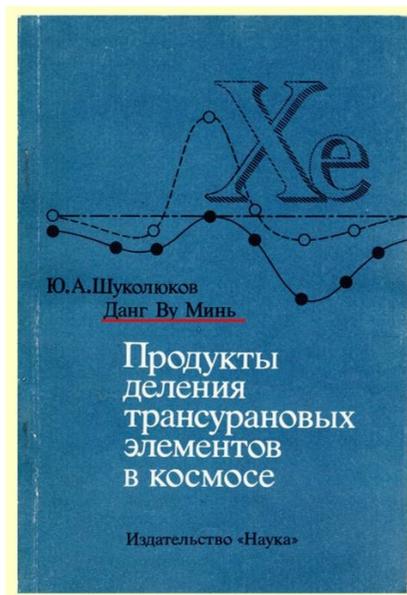


Захвачены гипотезой Э. Андерса о присутствии в метеоритах ксенона — продукта спонтанного деления гипотетического сверхтяжелого элемента. Вроде бы изотопный состав его такой, какой ожидается согласно теории. Но вслед за Оливером Мануэлом понимаем, что это не ксенон деления сверхтяжелого элемента. Ведь вместе с ним всегда присутствует избыток легких, нейтронно-дефицитных изотопов, кото-



рые по закону сохранения энергии не могут возникать при делении.

Они рождаются в процессах в оболочках звезд. Возникает возможность совершать мысленные путешествия в недра звезд — сверхновых, предсверхновых, красных гигантов... Вместе с коллегами из нашего сектора космохимии растворяем вещество метеоритов и ищем минералы — носители звездного ксенона — прах древних взорвавшихся звезд. Действительно, удастся исследовать и этот материал. Экспериментальных данных огромное количество. Минь беспрецедентно усердный исследователь. Он защищает докторскую диссертацию. Вскоре вместе с Минем мы выпускаем книгу.

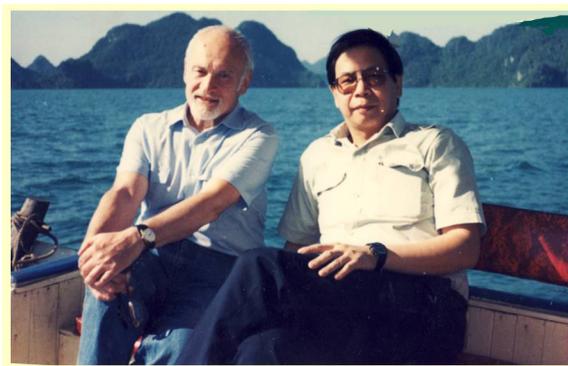


Это первая и единственная книга в СССР с уникальными данными в области изотопной космохимии тяжелых благородных газов. К сожалению, мы работаем в одиночестве в стране. Прощаемся с Минем. Теперь уже до встречи во Вьетнаме, где он окажется в новом статусе директора Института геологии и президента Академии наук.

Прощальная поездка по сказочному архипелагу Ха Лонг с бывшим аспирантом ИГГД – Минем...

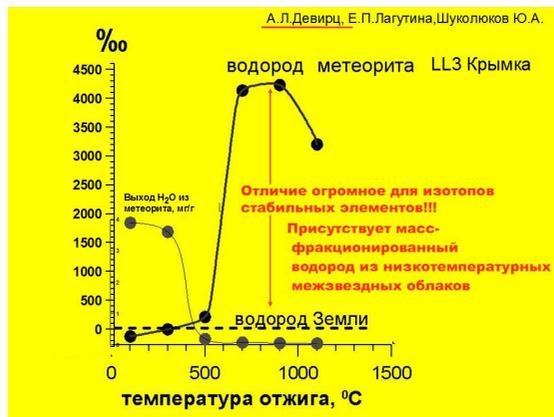


Прием у президента Академии Наук СРВ профессора Данг Ву Миня.



Президент Академии Наук СРВ иностранный действительный член (академик) РАН, доктор химических наук, профессор Данг Ву Минь.

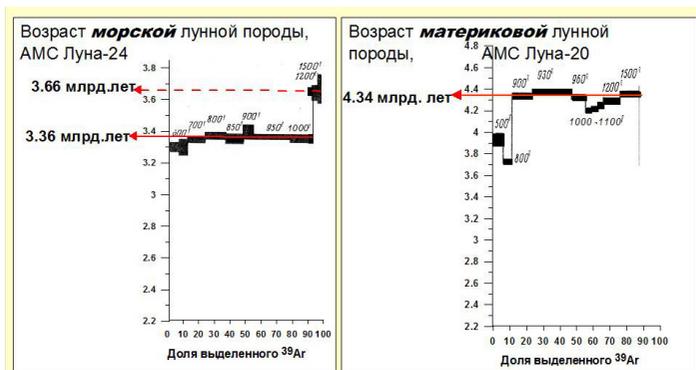
А мы в Москве с Миррой Фугзан, Толей Фисенко, Аркадием Львовичем Девирцем, аспирантом Сережей Асоновым продолжаем в ГЕОХИ исследования проблем общей космохимии: по изотопам благородных газов, азота, водорода и кислорода внесемного вещества. Исследуем досолнечные, межзвездные минералы с отличиями изотопного состава от земного на десятки, сотни, тысячи процентов...



Институт ведет исследования и по изотопной планетологии — прежде всего вещества Луны. С помощью метода ^{39}Ar – ^{40}Ar , разработанного нами с Г. Ашкинадзе и Б. Гороховским в ИГГД, определяем вместе с М. Фугзан возраст проб, доставленных в ГЕОХИ советскими межпланетными станциями: Луной–16, и –24 из морских районов и Луной–20 — с лунного материка.



Получаем множество интересных возрастных спектров для этих пород.



Но нужно признаться: здесь мы не достигаем принципиально нового, а скорее повторяем американские геохронологические результаты. Утешает лишь то, что наша группа — единственная в стране в этой области. Но очень жаль, что с нашим уходом работы по ^{39}Ar – ^{40}Ar хронологии Луны вообще прекращаются в СССР и не ведутся в России.

После кончины в 1984 году Е. Л. Кринова мне выпадает поработать в должности председателя Комитета по метеоритам АН СССР. Работа необычайно интересная.



В коллекции Комитета имеется свыше шестисот метеоритов разного типа, представленных несколькими тысячами осколков — и кусками «окаменевшего» протопланетного облака, и реголитами с малых планет, и их силикатными магматическими породами, и фрагментами слоев между железными ядрами и силикатными оболочками, да и кусками самих ядер астероидов... Обмениваемся метеоритами с другими коллекциями и с коллекционерами. Даем образцы на исследования. Но в 1990-е годы — своя специфика. Е. Л. Кринов — интеллигентный и доверчивый человек — при жизни заключает договор о хранении двадцати трех тонн Сихотэ-Алинского железного метеорита в подвале какой-то торговой конторы. Но наступают тревожные времена.

В Комитете по метеоритам решаем перевести метеорит в ГЕОХИ. На двери подвала — висячий замок. Хозяева не знают, где ключ. Несколько раз приезжаю — не хотят разговаривать. Почти насильно врываюсь в кабинет, требую ключ. Отвечают: метеорит не отдадим — срок договора вышел, теперь все, что на складе — наше. Что делать — звоню куратору КГБ по ГЕОХИ, ответственному за режим секретности.

Несколько лет знакомы по работе в институте с симпатичным молодым парнем, да и живем рядом. Рассказываю при бандитах о ситуации. Просит передать телефонную трубку хозяину склада. Объясняет, что, если не отдаст ключ, немедленно прибудет со взводом автоматчиков. Хозяин — в бешенстве, но ключ отдает. Срочно вывозим метеорит. Украли, наверное, килограммов пятьдесят из двадцати трех тонн... Слава Богу!

В другой раз — телефонный звонок. Говорят — из ГРУ — Главного разведывательного управления армии. Просят о встрече. Приходят двое с корочками ГРУ. Готовы организовать продажу за границу метеоритов. Транспорт обещают обеспечить. Объясняю: продавать метеориты — все равно, что картины из Эрмитажа. Нельзя! Предлагаю: помогите с экспедицией на корабле за метеоритами в Антарктиду. Что там найдем, справедливо разделим. Задумчиво уходят — навсегда. Конечно, было множество интересных встреч с людьми, более достойными, чем эти типы...

Вот лишь некоторые примеры.



Профессор Альфред Нир — создатель современной масс-спектрометрии.

Знакомство и переписка с удивительно мягким, доброжелательным, каким-то домашним, создателем современной масс-спектрометрии Альфредом Ниром. Тесные официальные контакты ГЕОХИ с НАСА. Но много и в домашней обстановке, если нет официоза.

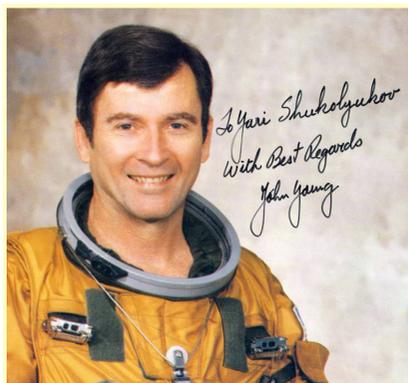
С первой женщиной—космонавтом Кэтти Саливан. Контактная, как почти все американки, смешливая женщина. Первая в мире среди женщин вышла в скафандре в открытый космос.

С удивительно обаятельным и красивым, сильным и добрым парнем Джоном Янгом. Он совершил шесть космических полетов в космос и входил в экипажи четырех различных космических экспедиций. В 1972 году Янг побывал на Луне в качестве командира космического корабля «Аполлон 16». Тогда его экипажу удалось собрать уникальные пробы лунного грунта. Завершив космические полеты, Янг на протяжении тринадцати лет возглавлял отряд космонавтов НАСА, а затем работал в должности заместителя главы Космического центра им. Джонсона.

Не менее важны и интересны встречи с друзьями—космохимиками. Командировка в Японию в предвкушении удовольствия повидаться с мягким, добрым и твердым как истинный самурай Минору Озимой, профессором Токийского университета. Дружим давно. Его многие у

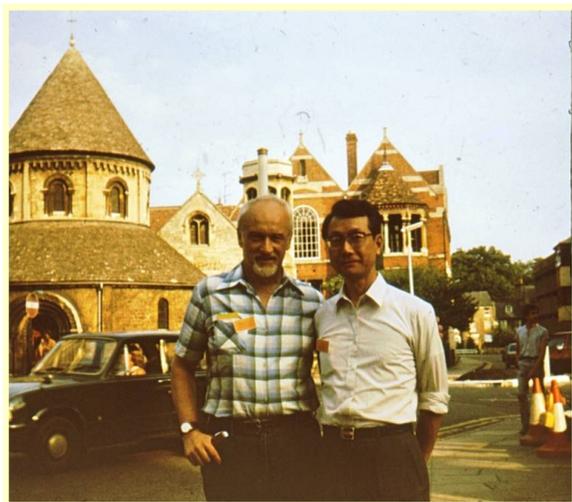


В первом ряду слева направо: В. Л. Барсуков, Ю. А. Сурков (заведующий Лабораторией геохимии планет ГЕОХИ), Кэтти Салливан (американская космонавтка, первая женщина, вышедшая в открытый космос), Ю. А.



нас знают по общей книге с Фрэнком Подосеком, переведенной на русский в ИГГД.

Так хочется поделиться с вами впечатлениями от Японии — чуда природы, от ее науки и необыкновенного ее народа — да времени нет. В Индии в Ахмедабаде с профессором Гоелом мы исследуем благородные газы железных метеоритов, которые он нам предоставляет для поиска атмосфероподобных компонентов в них. Конечно, побывав в Индии, нельзя не посетить их главное архитектурное чудо — комплекс Тадж-Махал. Да и многое другое бесконечно интересное.



Ю. А. и профессор Минору Озима.

Если бы было время, то рассказал бы и о других встречах и поездках: во Вьетнам, в Перу, Бразилию, Англию, Германию, Швецию, Францию... Но я отвлекся от главного рассказа и возвращаюсь к космохимическим работам в ГЕОХИ.

Чувствую к метеоритам странную душевную привязанность. Что это: стремление постичь бесконечность? Обрести сладкое ощущение несбыточной своей вечности? Вот и в последние годы странно держать в руках и исследовать благородные газы из фрагмента марсианской породы — метеорита Дхофар 019.

Коллеги из Комитета по метеоритам привозят его из пустыни Омана. Анализ космогенных изотопов показывает — рекордсмен длительности межпланетного путешествия: целых девятнадцать миллионов лет летел с Марса в межпланетном пространстве, чтобы вот теперь я подержал его в руках... Еще одно чудо природы — метеорит Кайдун.

Падает в Йемене, вызвав своим ярким полетом маленький переполох военных, стоявших тогда там большим числом. Командир военной части генерал-полковник А. Павлов и заместитель начальника Генерального штаба Вооруженных сил СССР генерал армии



Известный космохимик Индии, профессор П. С. Гоел.



П. Ивашутин оказываются умным и порядочными людьми и приказывают передать камень к нам в Комитет по метеоритам.

В уникальном метеорите фантастическое сочетание несовместимых компонентов: частицы первичного вещества Солнечной системы, смесь наиболее окисленных и наиболее восстановленных типов метеоритного вещества, продукты ранних небулярных процессов, минералообразования в горячих растворах, более позднего водного изменения и высокотемпературного минералообразования в магматических

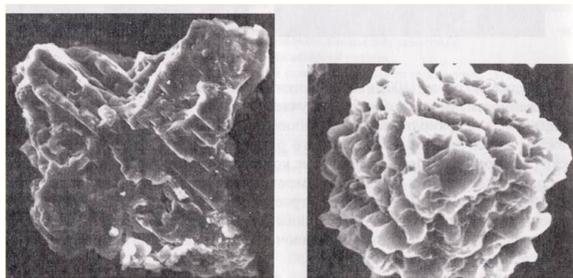


Метеорит Кайдун, масса 850 г. Упал 3 декабря 1980 г. на советскую военную базу в Южном Йемене. Еще до образования его родительского тела (вероятно, Фобоса) различные типы его вещества перемешивались в различных условиях и в разных местах межпланетного пространства. Содержит много фрагментов магматических горных пород, возможно, с Марса. Орбита Фобоса проходит на расстоянии всего 6000 км от Марса. Радиационный возраст по космогенным изотопам благородных газов составляет не менее 4 млрд лет.

расплавах, включая пегматитообразование. Рабочая гипотеза, подтвержденная совсем недавними нашими изотопными публикациями с А.В.Ивановым: это чудо природы — фрагмент породы с Фобоса, спутника Марса.

1.7 Эпизод седьмой: «Не счесть алмазов пламенных в пещерах каменных...»¹

Но и на Земле природа щедра на чудеса. К нам в лабораторию ГЕОХИ приходит Лидия Дмитриевна Лаврова и рассказывает о масштабных месторождениях с большими запасами и высокой концентрацией мельчайших алмазов в метаморфических породах. Особенно в Кумдыкольском месторождении в Кокчетавском массиве в Казахстане.



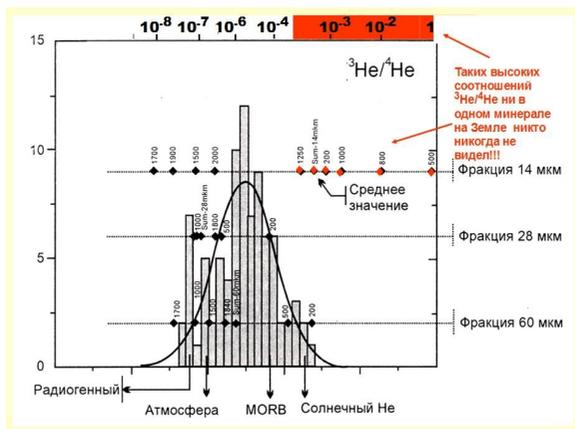
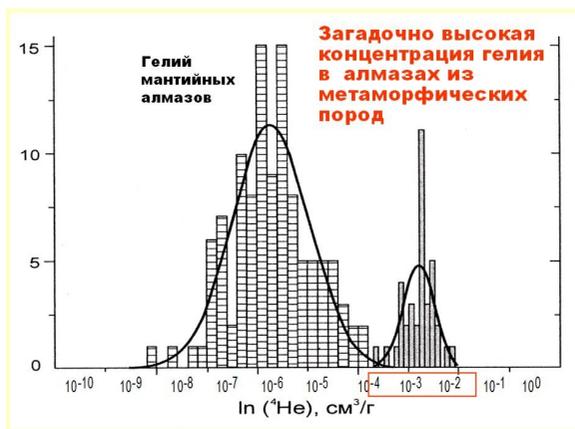
Метаморфогенные алмазы. Преобладание кристаллов с неполностью заросшими пористыми поверхностями является характерной особенностью, отличающей их от кимберлитовых алмазов.

Мы — Андрей Плешаков, Саша Верховский и я — изучаем гелий в алмазах. Очень заинтригованы, прежде всего, невиданно большой концентрацией гелия в них.

Еще загадочнее изотопный состав гелия. А. М. Плешаков в ходе диссертационной работы обнаруживает, что в самой мелкой фракции алмазов изотопное отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ при низких температурах уникально высокое: нигде на Земле не встречалось такого!

Мало того, ^3He и ^4He в алмазах — совершенно независимые компоненты — они выделяются при очень разных температурах. ^4He удастся выгнать из алмаза только при температуре более 1500°C . А ^3He выделяется при небольшом нагреве до $400\text{--}600^\circ\text{C}$. Что за механизм порождает такой гелий в алмазах метаморфических пород? Как образуются сами алмазы?

¹Остап Бендер



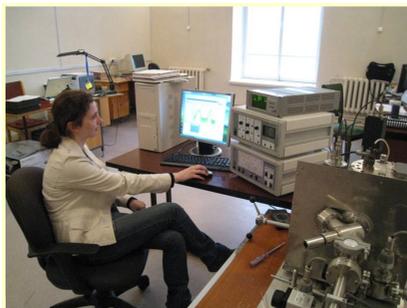
Академик Ф. А. Летников предлагает очень интересную гипотезу: алмазы образуются в разломных зонах сдвиговых деформаций, где на границах двух трущихся поверхностей возникают микрозонки сверхвысоких температур и давлений с образованием так называемой «магмы-плазмы».

Не может ли температура здесь повыситься до таких значений, что атомные ядра дейтерия и протия начнут сливаться? Все прошлые годы меня гложет безумная мысль: не идет ли здесь термоядерный наносинтез?! Не держим ли мы в руках новый неограниченный источник ядерной энергии для человечества? Но этим можно поделиться только



с друзьями. Иначе попадешь в отряд интернетовских фантазеров-безумцев...

Сегодняшние мои надежды греет то, что магистрант кафедры изотопной геологии Оля Якубович имеет в руках научный инструмент для проверки и этой безумной идеи: новый масс-спектрометр для исследований гелия. Мы уже знаем: масс-спектрометр позволяет успешно исследовать кинетику выделения гелия в цирконе и самородном золоте. На очереди — Кумдыкольские алмазы...



Магистрант кафедры изотопной геологии Оля Якубович за работой на масс-спектрометре МСУ-Г-01.

1.8 Эпизод восьмой: В компании с Э. Резерфордом и Э. Ферми...

И в заключение короткий рассказ еще об одном очень интересном и неожиданном природном явлении. Очень давно, более пятидесяти лет назад в урановых минералах американцы и канадцы обнаруживают избыточные концентрации изотопов аргона и неона.

Спустя много лет мне удастся экспериментально подтвердить это: избыток аргона-38 огромен и достигает тысяч %. При ступенчатом нагреве минералов избыток еще больше.

Почему?!

Мы с коллегами А. Б. Верховским и Восе Шариф-Заде также подтверждаем давнее наблюдение В. Флеминга, Г. Тодда и Г. Везерилла об аномальном неоне в урансодержащих минералах. В них неон сильно обогащен изотопами ^{21}Ne и ^{22}Ne относительно ^{20}Ne .

Избыток ^{21}Ne и ^{22}Ne относительно ^{20}Ne в урановых минералах:

Избыток ^{21}Ne в бетафите – 221%
в монаците – 3 514%
эвксените – 13 574%

Избыток ^{22}Ne в бетафите – 113%
в гатчетолите – 121%
в эвксените – 4 527%

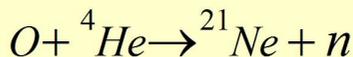
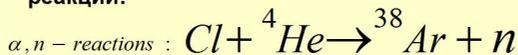
В чем причина избытков ^{38}Ar , ^{21}Ne , ^{22}Ne ?...

Американские и канадские исследователи интерпретируют появление аномалий изотопного состава как результат ядерных реакций под действием альфа-частиц на элементы-мишени...

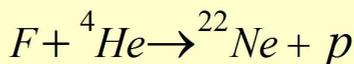
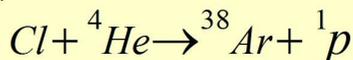
Нет сомнений, что такие ядерные реакции действительно могут идти в породах и минералах.

Однако изучение благородных газов в урановых минералах приводит меня к мысли: не существует ли в природе еще и неизвестный параллельный ядерный процесс, генерирующий изотопы Ne и Ar?

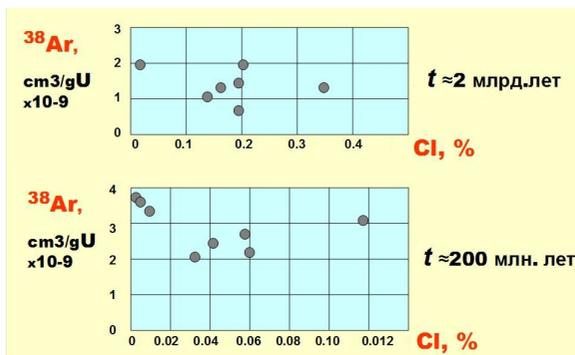
Объяснение W.H.Fleming, H.G.Thode и независимо G.Wetherill – возможные ядерные реакции:



$\alpha, p - \text{reactions} :$



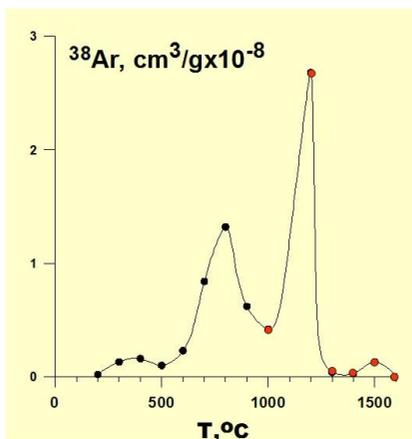
Действительно, почему между концентрациями избыточного ${}^{38}\text{Ar}$ и хлора (элемента-мишени) нет корреляции?



Отсутствие корреляции между концентрацией ${}^{38}\text{Ar}$ и концентрацией хлора (элемента-мишени).

Ведь она должна была бы быть, если бы аргон образовался из хлора: чем больше хлора — тем больше аргона... Почему значительная часть избыточного ${}^{38}\text{Ar}$ выделяется при термическом отжиге уранинитов при высокой температуре (800–1000°C)?

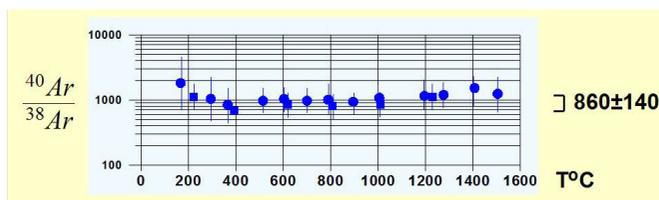
Ведь хлор попадает в ураниниты, вероятно, в составе гидротермальных флюидов. Если бы весь аргон-38 был генетически связан



Кинетика выделения ^{38}Ar из уранинита (Сев. Карелия) при термическом отжиге, показывающая, что большая часть избыточного аргона выделяется при температуре выше 1000°C .

с хлором, он выделялся бы при низкой температуре. Мы видим, что это не так.

В чем причина удивительной связи избыточного аргона-38 с впервые обнаруженным нами избытком аргона-40 в урансодержащих минералах?

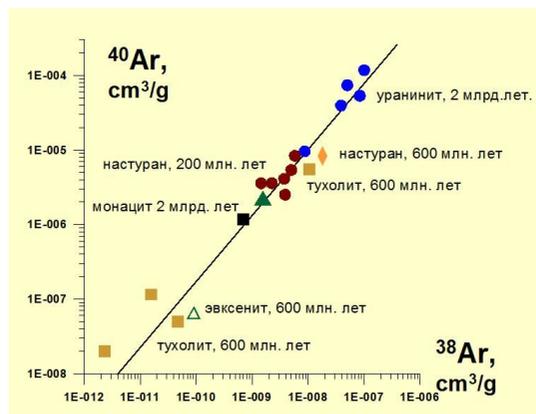


Корреляции между избыточным содержанием ^{38}Ar и ^{40}Ar в двух пробах уранинита (Сев. Карелия) при термическом отжиге.

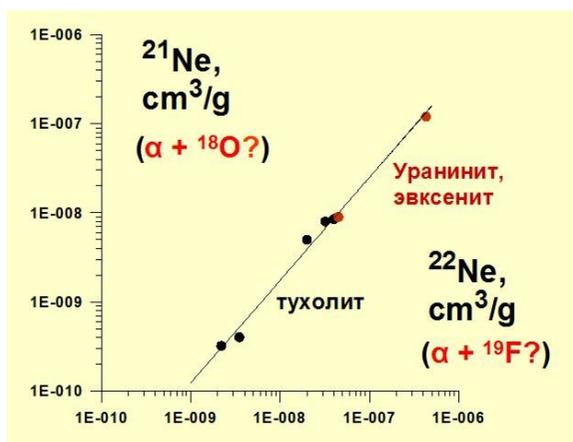
Кинетика выделения избыточных аргона-38 и аргона-40 сложна. А их соотношение остается удивительно постоянным, словно они возникли в одном процессе.

И в урановых минералах самого разного возраста и состава между концентрациями аргона-38 и аргона-40 существует хорошая

корреляция! Выходит, механизм их образования один и тот же?! Разве не удивительно, что между избыточными неон-21 и неон-22 в урановых минералах также есть отчетливая корреляция?



Связь между избытками ^{38}Ar и ^{40}Ar в урансодержащих минералах разного химического состава и возраста.

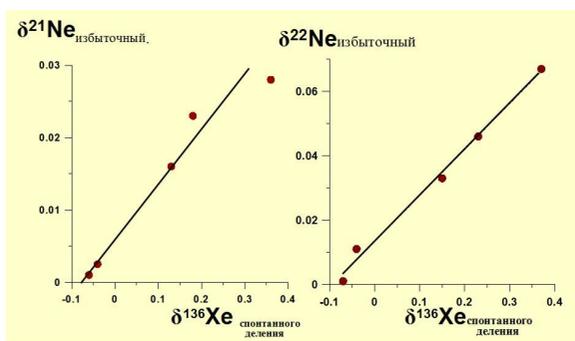


Связь между концентрацией ^{21}Ne и ^{22}Ne «разного происхождения» в урансодержащих минералах.

Ведь по общепринятым представлениям неон-21 образуется при взаимодействии альфа-частиц с атомными ядрами кислорода. А неон-

^{22}Ne возникает при действии альфа-частиц на фтор. Ясно, что концентрация фтора никак не зависит от концентрации кислорода в минерале. Не свидетельствует ли эта корреляция о едином механизме образования избыточных изотопов неон-21 и неон-22?

Мало того, между ксеноном, заведомо образующимся в спонтанном делении урана, и загадочным избытком изотопов неон-21 и неон-22 наблюдается связь. Получается, что неон как-то связан с делением атомных ядер урана?



Связь между концентрациями ^{21}Ne и ^{22}Ne неясного происхождения и ^{136}Xe спонтанного деления ^{238}U в урансодержащих минералах.

Все рассказанное приводит меня уже очень давно к предсказанию нового вида радиоактивного распада урана, опубликованного в книге «Деление ядер урана в природе».

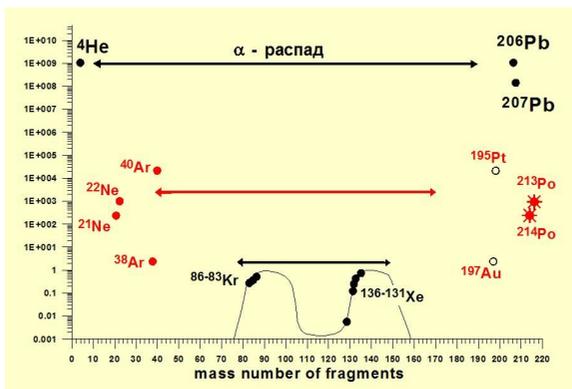
Наряду с двумя известными конкурирующими процессами распада тяжелых ядер — альфа-распадом и спонтанным делением на два тяжелых осколка — предполагается существование и такого типа радиоактивности (сильно асимметричного деления), когда ядра испускают частицы, промежуточные по массе между альфа-частицей и тяжелым осколком: ^{21}Ne , ^{22}Ne , ^{38}Ar , ^{40}Ar и другие.

Скорость такого радиоактивного превращения определяется проходимостью потенциального барьера распадающегося ядра, и по величине она должна быть меньше скорости альфа-распада и больше скорости спонтанного деления. Эксперименты показывают: из двух изотопов урана к такому распаду способен легкий — уран-235. Мож-



Ю.А. Шухолоков
**ДЕЛЕНИЕ
ЯДЕР
УРАНА
В ПРИРОДЕ**

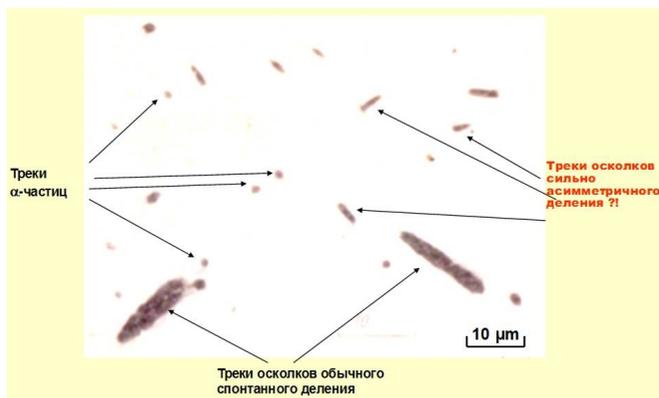
«Наряду с двумя известными конкурирующими процессами распада тяжелых ядер – альфа-распадом и спонтанным делением на два тяжелых осколка – предполагается существование и такого типа радиоактивности, когда ядра испускают частицы, промежуточные по массе между альфа-частицей и тяжелым осколком: ^{21}Ne , ^{22}Ne , ^{38}Ar , ^{40}Ar и др. Скорость такого радиоактивного превращения определяется проницаемостью потенциального барьера распадающегося ядра, и по величине она должна быть меньше скорости альфа-распада и больше скорости спонтанного деления. Из двух изотопов урана к такому распаду способен легкий – уран-235... Можно предсказать период полураспада для такого деления: $\dots 10^{11}$ – 10^{14} лет. Полная энергия такого процесса порядка 50-60 МэВ...»



но предсказать период полураспада для такого деления: 10^{11} – 10^{14} лет. Полная энергия такого процесса около: 50–60 МэВ. Это позволяет с помощью счетчика зафиксировать образующиеся осколки. Однако число актов сильно асимметричного деления в единицу времени должно быть слишком малым. У нас нет нужных счетчиков для таких экспериментов. Остается поискать их следы с помощью метода, который позволяет увидеть в микроскоп следы деления атомных ядер.

В ИГГД А. Н. Комаров создал метод треков. В качестве детектора треков он использует особый пластик — дифлон. Он способен регистрировать не только обычные осколки деления с массовыми числами от семидесяти до ста шестидесяти, но и альфа-частицы. Сле-

довательно, способен зарегистрировать и частицы с промежуточными массами, то есть осколки сильно асимметричного деления вроде неона и аргона. И нам удастся их засечь!



Треки ядерных частиц, зафиксированные детектором из дифлона под действием излучения искусственного изотопа кюрия ^{244}Cm (А. Н. Комаров).

Вы видите полученные А. Комаровым крупные треки осколков спонтанного деления. Вы видите также точки — следы альфа-частиц. Кроме того, четко видны небольшие полоски — по-видимому, следы осколков сильно асимметричного деления. Теперь я уверен: в природе действительно существует неизвестный вид радиоактивного распада урана. Но его надо подтвердить физическими методами с использованием счетчиков частиц. Много раз обращаюсь в ведущие центры ядерной физики Советского Союза. Делаю доклады и рассказываю об идее. Коллеги-физики единодушно говорят: все это очень интересно. Но ни один из них не хочет начинать эксперимент по окончательному доказательству нового типа радиоактивности. В науке действует жестокий закон: каждое научное открытие воспринимается только тогда, когда приходит его время, но не раньше. Мы слишком опережаем это время. После наших публикаций проходит еще восемнадцать лет!

И вот в журнале «Nature» появляются редакционная статья и оригинальное сообщение.

В них сообщается: с помощью телескопической системы кремниевых детекторов (счетчиков) доказано образование изотопов углерода

NATURE VOL.307, 19 JANUARY, 1984

NEWS AND VIEWS

Exotic nuclear decay discovered

The discovery, nearly a century after Becquerel, of a novel mode of radioactive decay is a surprise, but one that confirms a decay as the chief means by which heavy nuclei shed mass.

Открыт экзотический распад ядер ...

LETTERS TO NATURE

A new kind of natural radioactivity

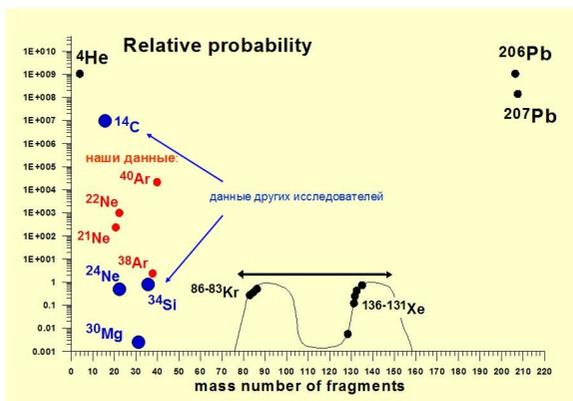
H. J. Rose & G. A. Jones
Department of Nuclear Physics, University of Oxford,
Oxford OX1 3RH, UK

From a systematic study of the properties of nuclei heavier than lead, we have concluded that, in one or two cases, radioactive

The obvious problem in is to distinguish between α -particle pulses. Us experimentation, we were provided that individual α -in time by over ~ 100 ns. rate of $\sim 4,000$ s $^{-1}$ we o several months, events ext

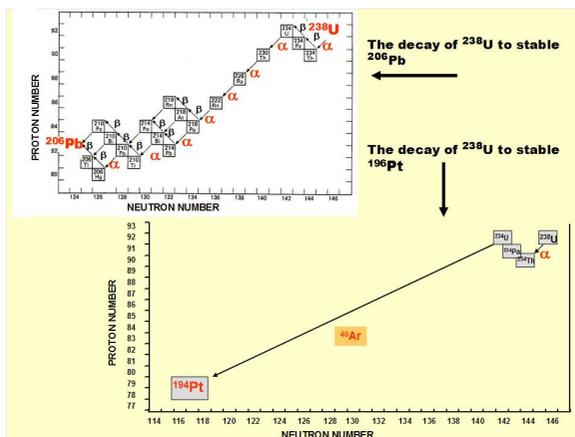
Новый тип природной радиоактивности ...

при распаде радия-223. Он член радиоактивного семейства урана-235. То есть подтверждено существование в природе третьего типа



радиоактивного распада. В течение последующих лет появляется множество статей физиков с результатами, подтверждающими этот факт. Показано, что изотопы урана и члены их радиоактивных семейств способны испускать атомные ядра радиоуглерода, азота, магния, кремния и неона.

Сегодня уже никто не сомневается, что радиоактивные семейства урана могут выглядеть иначе, чем при альфа-распаде. Иными словами, распад урана может идти не только традиционно — в виде последовательного альфа- и бета-распадов членов радиоактивных цепочек до стабильных изотопов свинца, — но и с выбросом из одного из чле-



нов цепочки тяжелой частицы вроде ядра аргона-40 с образованием, например изотопа платины, как на рисунке ниже. Или стабильного иридия, или же иттербия.

А сейчас хочу привести цитату из работы одного из наших ведущих историков естествознания. Уж поверьте, дорогие коллеги: не из мелкого постыдного тщеславия ради. В моем возрасте оно уже не играет существенной роли. Да мне хватает и чувства юмора, чтобы оценить комичность помещения ученым историком моей фамилии в компанию с Резерфордом, Кюри, Ферми и другими. Привожу эту цитату для того, чтобы обратить внимание на мое примечание красным цветом.

Главное в том, что именно в нашем институте был поставлен вопрос о новом виде природной радиоактивности. Мне хочется, чтобы мы, особенно молодые коллеги, знали и помнили не только об этом... А еще и о том, что в ИГГД Э. К. Герлингом и Л. К. Левским было открыто новое направление естествознания — изотопная космохимия благородных газов, что И. Н. Толстихин экспериментально открыл важнейший изотоп мантийный ^3He , что Т. В. Кольцова впервые в изотопной геологии синтезировала в лаборатории газгидратное химическое соединение радиогенного изотопа инертного аргона.

Что ни в каком другом отечественном институте, а именно в на-

ЛЕТОИШЬ ВАЖНЫХ ВПЕЧАТЛИВАНИЙ ОТКРЫТИЙ **Д.Н.ТРИФОНОВ Становление и развитие современной атомистики** ХИМИЯ, № 5, 2004

... Э.Резерфорд и Ф.Содди окончательно убедились в протекании процессов естественной трансмутации элементов, ... У.Рамзай и Ф.Содди с помощью спектрального анализа доказали, что в ходе радиоактивного распада радона образуются гелий В 1899 г. Резерфорд ... ввел понятие об α - и β -лучах... Особняком стоит открытие позитронной, или β^+ -радиоактивности (П. и Ф.Жолио-Кюри)... Э.Ферми, облучая уран медленными нейтронами, пришел к выводу, что может иметь место синтез изотопов трансурановых элементов... О.Ган вместе с Ф.Штрассманом открыл явление деления ядер урана под действием медленных нейтронов... В 1939 г. Н.Бор и Дж.Уилер ... предсказали возможность спонтанного деления ядер... Она была открыта в 1940 г. российскими физиками К.А.Петражком и Г.Н.Флёровым... Важную роль сыграл цикл работ отечественного химика [сотрудника ИГГД РАН, премо. Ю.А.Ш.] Ю.А.Шуколюкова. Вывод, сделанный Шуколюковым в 1970 г., звучал так: «Наряду с двумя известными конкурирующими процессами распада тяжелых ядер – α -распадом и спонтанным делением на два тяжелых осколка — можно предположить существование и такого типа радиоактивности, когда ядра испускают частицы, промежуточные по массе между α -частицей и тяжелым осколком..... Скорость такого радиоактивного превращения определяется проникаемостью потенциального барьера распадающегося ядра, и по величине она должна быть меньше скорости α -распада и больше скорости спонтанного деления». Фактически этот вывод постулировал возможность так называемой «фрагментарной» радиоактивности.

Экспериментально обнаружить этот вид радиоактивной превращаемости удалось английским физикам Г.Робу и Г.Джоунсу в конце 1983 г. Дальнейшее изучение «фрагментарной» радиоактивности в значительной степени подтвердило правоту ученых. В настоящее время этот тип радиоактивности обнаружен более чем у 30 ядер тяжелых элементов.

шем открыты и разработаны два² ядерно-физических метода мировой изотопной геохронологии (калий-аргоновый и ксенон-ксеноновый) из существующих основных семи-восьми методов.

Что именно в нашем институте впервые в стране были поставлены исследования по Rb-Sr, трековому и ^{39}Ar – ^{40}Ar -методам.

Что именно в ИГГД РАН впервые в стране разработаны для изотопной геологии новые экспериментальные приемы: темперинг, изотопное разбавление, селективное растворение минералов, методы датирования по отдельным минеральным зернам — всего не перечислишь. Для меня было счастьем работать в этой области знания — в месте стыка двух замечательных наук: геологии и ядерной физики.

²на момент написания этого доклада Ю. А. Шуколюковым еще не был предложен ^{190}Pt – ^4He метод.

Методы изотопной геохронологии			
1	$^{238,235}\text{U}-^{232}\text{Th}-^4\text{He}$	Уран-торий гелиевый	ВЕЛИКОБРИТАНИЯ
2	$^{238,235}\text{U}-^{232}\text{Th}-^{206,207,208}\text{Pb}$	Уран-торий свинцовый	США
3	$^{147}\text{Sm}-^{143}\text{Nd}$	Самарий-неодимовый	США
4	$^{40}\text{K}-^{40}\text{Ca}$	Калий-кальцевый	США
5	$^{39}\text{Ar}-^{38}\text{Ar}$	Аргон-39 — аргон-40 нейтронно-индукционный	США
6	$^{176}\text{Lu}-^{176}\text{Hf}$	Лютеций-гафниевый	США
7	$^{190}\text{Pt}-^{186}\text{Os}$	Платина-осмиевый	США
8	^{238}U — треки осколков деления	Трековый	США
9	$^{14}\text{C}_t-^{14}\text{C}_0$	Радиоуглеродный	США
10	$^{87}\text{Rb}-^{87}\text{Sr}$	Рубидий-стронциевый	ГЕРМАНИЯ
11	$^{187}\text{Re}-^{187}\text{Os}$	Рений-осмиевый	ГЕРМАНИЯ
12	$^{138}\text{La}-^{138}\text{Ce}$	Лантан-цериевый	ЯПОНИЯ
13	$^{40}\text{K}-^{40}\text{Ar}$	Калий-аргоновый	РОССИЯ, ИГГД РАН
14	$^3\text{H}-^3\text{He}$	Тритий-гелиевый ³	РОССИЯ, ИГГД РАН
15	Xe_s-Xe_n	Уран-ксеноновый нейтронно-индукционный	РОССИЯ, ИГГД РАН
16	$^{190}\text{Pt}-^4\text{He}$	Платина-гелиевый	РОССИЯ, ИГГД РАН

Хочется надеяться, что традиции фундаментальных экспериментальных исследований в институте сохранятся и в будущем.

1957

ГЕОХИМИЯ

№ 3

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ АБСОЛЮТНОГО ВОЗРАСТА
ПО СООТНОШЕНИЮ ИЗОТОПОВ $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ В ОСАДОЧНЫХ
ПОРОДАХ

Э. К. ГЕРЛИНГ и Ю. А. ШУКОЛЮКОВ

Лаборатория геологии докембрия АН СССР, Ленинград

В 1948 г. Ф. Викман [1] предложил метод определения возраста морских осадков по соотношению изотопов $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$. Допустив, что в земной коре содержание Rb и Sr соответственно равны 310 г/т и 300 г/т, Викман рассчитал изменение величины отношения $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ во времени. При образовании морского осадка происходит полное разделение Rb и Sr. Прекращается накопление радиогенного Sr^{87} , и величина отношения $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$, таким образом, является мерой возраста данного образования.

³ добавлен составителями.

— **Опережая время...** Радиоактивный распад изотопа ^{87}Rb обеспечивает увеличение количества дочернего изотопа ^{87}Sr в земной коре. Теоретическая идея определения возраста хемогенных осадков на основе их Sr-изотопной характеристики была впервые предложена Ф. Е. Викманом в 1940-х годах, который ввел термин «морской геохронологии». В этом случае, измеренное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в хемогенных осадках, не содержащих Rb, является функцией времени «стареющей» коры. Викман предполагал, что отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в океане формировалось при выветривании пород земной коры и монотонно увеличивалось во времени. Рост этого отношения с момента образования Земли должен был составлять около 40%.

Ю. А. Шуколюков первым в стране предпринял попытку определить вариации отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в древних осадках. В рамках своей аспирантской работы он изучил изотопный состав Sr в целестине пермского возраста, кальцитом мраморе ладожской серии (ранний протерозой) и доломите с о-ва Мраморный в Беломорье (архей). Его работа дополнила два независимых исследования проведенные Герцогом и Гастом в те же годы. Однако их попытки показали, что реальное повышение отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в хемогенных породах Земли было намного меньшим, чем ожидал Викман. Как выяснилось позже даже во внеземном веществе (метеоритах) вариации отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ не превышали 2%, по сравнению с земными образцами. Как следствие, реальное изменение отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в земном резервуаре не превышало 1.4%, что оказалось соизмеримо с точностью используемых масс-спектрометров (0.1–0.5%).

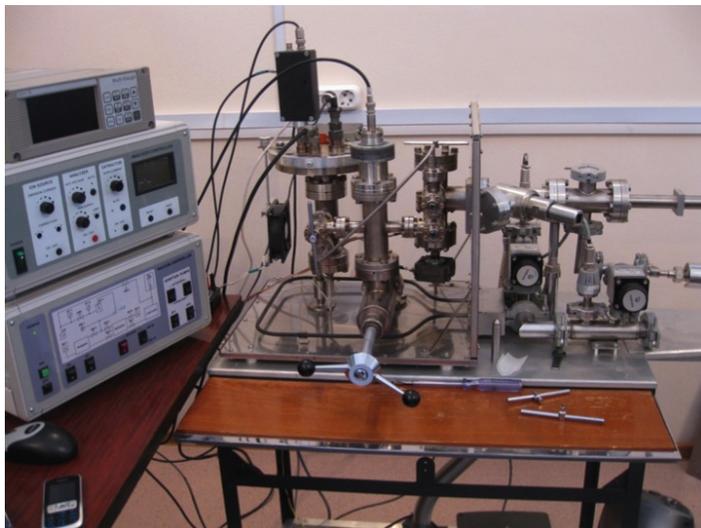
Отсутствие в те годы технической базы для прецизионного изучения вариаций отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в древних осадках заставило Ю. А. Шуколюкова изменить тему диссертации. После чего он успешно защитил новую тему в жесткие сроки. Лишь много десятилетий спустя совершенствование аналитических возможностей масс-спектрометров в 1980–1990 годах, частично возродили идею Викмана. Уточненная кривая вековых вариаций отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в океане все же позволила «датировать» карбонаты морского происхождения, хотя и на ограниченных возрастных интервалах. Была доказана латеральная выдержанность изотопного состава Sr в палеоокеанах и в сообщающихся с ним морях в каждый момент геологического времени. Было установлено, что отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в хемогенных осадках отражает интегральную величину изменения тектонической обстановки в глобальном масштабе, что позволяет фиксировать изменения в областях континентального и подводного выветривания и оценивать вклад корового и мантийного материала в океаны. В начале нового тысячелетия Ю. А. Шуколюков придирчиво и с большим интересом рецензировал подобные статьи, неизменно подчеркивая «удивительный феномен морского стронция».

А. Б. Кузнецов

1.9 Эпизод девятый: Когда, казалось бы, все уже известно...⁴

К началу XXI века стало ясно: отечественная наука на двадцать пять — тридцать лет отстает от зарубежных исследований по развитию и применению изотопной геотермохронологии — научной области, занимающейся изучением количественной термической истории геологических объектов с использованием радиогенных изотопов благородных газов.

В ИГГД в 2009–2010 годах возникло понимание необходимости быстрого развития в нашей науке этого перспективного направления. Однако к этому времени в институте уже давно было ликвидировано научное направление мирового уровня, созданное двумя лауреатами Ленинской премии профессором Э.К. Герлингом и академиком А.А. Полкановым, — геохимия изотопов благородных газов. Масс-спектрометры и вакуумное оборудование были списаны и выброшены, а это направление исчезло из планов... Нам пришлось начинать заново — с нуля...



Масс-спектрометрический комплекс МСУ–Г–01.

⁴на основе доклада Ю. А. Шуколюкова на ученом совете ИГГД РАН 24 апреля 2012 года.

В ЗАО «СПЕКТРОН-АНАЛИТ» А. П. Ивановым, В. А. Ледневым, Б. М. Ворониным и В. В. Манойловым по техническому заданию ИГГД был изготовлен пилотный экземпляр масс-спектрометрического комплекса МСУ-Г-01 для измерения микроколичеств радиогенного ^4He .

С инсталляцией этого комплекса в ИГГД возобновились работы по геохимии изотопов благородных газов: начались экспериментальные исследования механизма миграции радиогенного гелия в минералах-геохронометрах.

Зачем?! Разве не все об этом уже известно?

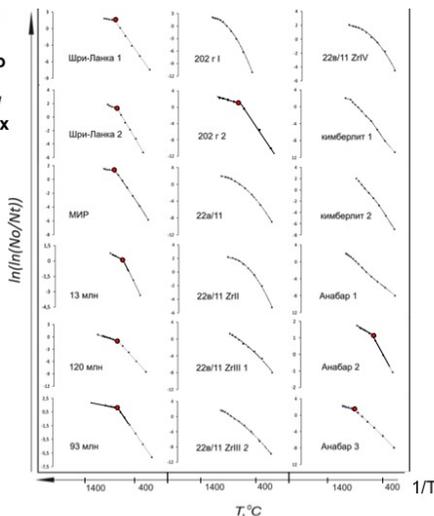
Современная общеупотребительная парадигма геотермохронологии по U-Th-He – изотопной системе и её математический аппарат вызывают немало вопросов из-за множества принимаемых допущений... К применению теории классической диффузии в геотермохронологии тоже много вопросов... Не корректнее ли будет использовать механизм односкачковой миграции, предложенный Э. К. Герлингом?

Мы начали работу по созданию U-Th-He-геохронологии в нашей науке с исследования цирконов. Однако в ходе изучения множества цирконов разного возраста (от десятки миллионов до миллиардов лет)

В цирконах обнаружено нарушение линейной зависимости $\ln(\ln(^4\text{He}_r/{}^4\text{He}_t) - 1/T^\circ\text{K})$: на прямых – точки перелома!

Тангенс угла наклона резко меняется – **изменяется характер миграции?!**

При **высоких** температурах энергия активации миграции и частотный множитель **меньше**, чем при **низких** !



с разной степенью метамиктности нас ожидал «сюрприз» — ранее неизвестное явление!..

При высоких температурах энергия активации миграции и частотный множитель оказывался неожиданно меньше, чем при низких! Такое поведение атомов радиогенного гелия не может быть объяснено с точки зрения классической диффузии. По-видимому, это свидетельствует о какой-то особой форме нахождения гелия в минерале, отличной от растворенных единичных атомов.

О. В. Якубович, Ю. А. Шуколюков, А. Б. Котов, С. З. Яковлева, Е. Б. Сальникова
Геотермохронология по благородным газам: II. Исследование устойчивости уран-торий-гелиевой изотопной системы в цирконе.

ПЕТРОЛОГИЯ, 2010, том 18, № 6, с. 1–16

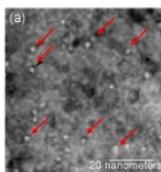
- изложены новые представления о возможном механизме миграции ^4He :
- радиогенный ^4He при умеренных температурах мигрирует по «стокам» в кристаллической решетке к различного рода объемным дефектам (границы зерен, радиационные дефекты) или же покидает кристалл;
 - накопление ^4He в области стока приводит к образованию гелиевых кластеров (пузырьков). Миграция гелия из подобных кластеров – отрыв от центра накопления, требует значительно больших энергий активации (~ 40 ккал/моль), чем необходимо для диффузии по кристаллической решетке минерала;
 - поэтому процесс выхода атомов гелия из дефектов-кластеров – это отжиг самих дефектов, разрушающихся при достижении температуры $\sim 1100^\circ\text{C}$;
 - после разрушения кластера атомы ^4He , оказавшиеся в кристаллическом пространстве, мигрирует по диффузионному механизму;
 - этим и объясняется излом прямолинейной зависимости в системе координат $\ln(N_0/N_e - 1/T)$, сопровождающийся уменьшением энергии активации миграции радиогенного гелия из решетки минерала при увеличении температуры.

Чем же можно подтвердить новую концепцию миграции радиогенного изотопа гелия ^4He в кристаллических решетках? Мы направили свои поиски в ... смежную область науки — в физику металлов атомной энергетики. Почему же именно туда?!

Изотоп ^4He так же, как в природных минералах, часто образуется *in situ* в технических металлах или искусственно внедряется в их кристаллические решетки:

- в ядерном «горючем» — искусственном плутонии-244 при его α -распаде с образованием радиогенного ^4He ;
- в конструкционных металлах, куда продифундировал радиоактивный изотоп водорода тритий, дающий затем при β -распаде изотоп радиогенного гелия ^3He ;
- изотоп ^4He в виде высокоэнергетических ионов искусственно

Гелиевые кластеры («пузырьки») в кристаллической структуре технических металлов – это не умоглядный образ, а реально существующие и наблюдаемые объекты:



Стрелками показаны гелиевые кластеры («пузырьки») размером около 1 нм в стали. Фотография получена с помощью трансмиссионного электронного микроскопа.

[*https://www.llnl.gov/str/May07/Schwartz.html](https://www.llnl.gov/str/May07/Schwartz.html)



Гелиевые кластеры («пузырьки») размером 5-10 нм в алюминии. Фотография получена с помощью трансмиссионного электронного микроскопа.

PHYSICAL REVIEW LETTERS VOLUME 68, NUMBER 26 1992

внедряют в металлы в ускорительной технике.

Физики глубоко исследовали миграцию гелия в кристаллических решетках технических металлов... И доказали, что гелий в них собирается в «пузырьки» — гелиевые кластеры. Причем это не умоглядный образ, а реально существующие и наблюдаемые объекты.

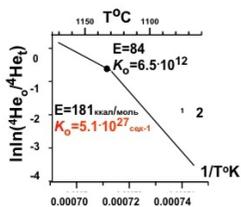
Миграция гелия из таких кластеров в металлах требует очень высоких температур, близких к температуре его плавления. Это приводит нас к мысли о том, не могут ли самородные металлы: золото, серебро, медь быть U-Th-He-минералами — геохронометрами?

Начинаем ряд работ по исследованию миграции гелия в них. И действительно, главный результат изучения кинетики миграции гелия в самородном золоте таков: сохранность радиогенного ^4He в кристаллической структуре самородного золота очень высока...

Подобные данные подвели нас к идее изотопно-геохронологических исследований самородной платины — ее точка плавления много выше (1770°C), чем золота (1063°C), поэтому термическая устойчивость радиогенного гелия в ней должна быть еще лучше!

Но это при условии, что в платине есть радиогенный ^4He ...

Об α -радиоактивности изотопов платины известно уже давно. Но достаточно ли в самородной платине накапливается радиогенного ^4He , чтобы осуществить необходимые измерения? Ведь α -распад идет



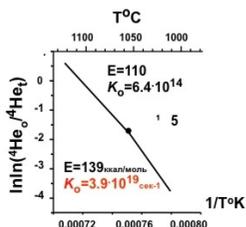
– для самородного золота, как и для технических металлов, получается резкий перелом прямолинейной зависимости;

в низкотемпературном диапазоне энергия активации до достижения температуры плавления в разы больше, чем в высокотемпературном диапазоне;

– частотный множитель уравнения миграции в низкотемпературном диапазоне достигает аномальных значений: вместо теоретически возможных для классической диффузии 10^{13} сек⁻¹ – огромные величины 10^{21} + 10^{25} сек⁻¹;

– это доказывает, что до точки плавления гелий находится в кластерах с большим числом атомов газа и потому очень прочно связан в структуре золота;

– соответственно сохранность радиогенного ⁴He в кристаллической структуре самородного золота очень высока....



очень медленно, период полураспада $^{190}\text{Pt} \sim 450$ млрд лет. Нужно ли учитывать возможное присутствие урана в самородной платине? Делаем расчеты, определяем содержание урана... и приходим к неожиданному выводу.

Количество образуемого при распаде изотопа платины–190 гелия достаточно для надежных измерений, а вкладом урана и тория можно пренебречь. Значит, существует принципиальная возможность создания нового метода изотопной геохронологии — $^{190}\text{Pt}-^4\text{He}$.

ПЕТРОЛОГИЯ, 2012, том 20, № 6, с. 545–559

УДК 553.411.071

НОВЫЙ ИЗОТОПНЫЙ ГЕОХРОНОМЕТР ДЛЯ ПРЯМОГО ДАТИРОВАНИЯ САМОРОДНЫХ МИНЕРАЛОВ ПЛАТИНЫ ($^{190}\text{Pt}-^4\text{He}$ МЕТОД)

© 2012 г. Ю. А. Шуколюков*, **, О. В. Якубович*, **, А. Г. Мочалов*, А. Б. Котов*, Е. Б. Сальникова*, С. З. Яковлева*, С. И. Корнеев**, Б. М. Гороховский*

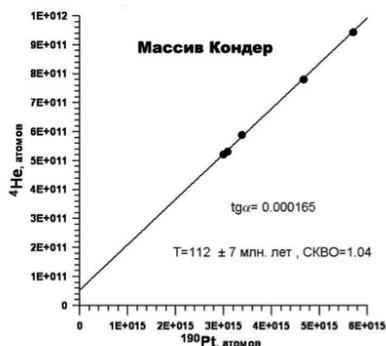
*Институт геологии и геохронологии докембрия РАН
наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034, Россия;
e-mail: xekrame@gmail.com

**Санкт-Петербургский государственный университет, Геологический факультет,
Университетская наб. 7/9, Санкт-Петербург, 199042, Россия
Поступила в редакцию 30.03.2012 г.

Но как в лабораторных условиях извлечь радиогенный изотоп гелия ^4He из самородной платины, если температура ее плавления

(вскрытия гелиевых кластеров) 1770°C , а экстрактор обеспечивает нагрев только до $\sim 1500^{\circ}\text{C}$?! Находим решение этой задачи. При добавлении к Pt меди кинетика миграции радиогенного изотопа гелия ${}^4\text{He}$ существенно изменяется: температура плавления с 1770°C падает до $1450\text{--}1500^{\circ}\text{C}$. Первыми в мире реализуем ${}^{190}\text{Pt}\text{--}{}^4\text{He}$ метод!

Изучаем самородную платину (изоферроплатину) из месторождений Дальнего Востока России: Гальмоэнан и Кондёр. Получаем первые данные о возрасте платиновой минерализации...⁵ Таким образом, на основе применения ранее никогда не изучавшейся ${}^{190}\text{Pt}\text{--}{}^4\text{He}$ изотопной системы самородной платины в России создан и успешно опробован новый метод изотопной геохронологии: ${}^{190}\text{Pt}\text{--}{}^4\text{He}$ метод.



Полученное по тангенсу угла наклона изохроны ($\text{tg}\alpha = 0.000165$) значение возраста самородной платины равно 112 ± 7 млн. лет (СКВО = 1.04). Оно находится в диапазоне величин ряда изотопных датировок, полученных К-Аг методом для минералов из массива Кондёр. Мало того, полученная ${}^{190}\text{Pt}\text{--}{}^4\text{He}$ датировка изоферроплатины совпадает с наиболее вероятным значением К-Аг возраста этого массива $110\text{--}120$ млн. лет.

⁵ В дальнейшем определение ${}^{190}\text{Pt}\text{--}{}^4\text{He}$ возраста платины из массива Кондёр будет уточнено и составит 129 ± 6 млн лет.

1.10 Эпилог: Жизнь была бы куда лучше, если бы мы рождались в возрасте восьмидесяти и постепенно приближались к своему восемнадцатилетию.⁶

Не открою секрета: стареть — очень неприятно. И тем не менее, я счастлив и бесконечно благодарен судьбе, что мне выпал шанс работать с моими молодыми аспирантами и соискателями в ИГГД и ГЕОХИ. Я не только помогал им в работе, но и учился у них, мы вместе радовались победам и огорчались поражениям.

С теплом на сердце вспоминаю совместную работу с коллегами:

Ассоновым Сережей	Матвеевой Инной
Ашкинадзе Геной	Мешиком Сашей
Верховским Сашей	Нгуен Трунг Минем
Гороховским Борей	Плешаковым Андрюшей
Данг Ву Минем	Правдивцевой Олей
Капустой Яшей	Пуховым Валерой
Колесниковым Женей	Симоновским Володей
Каменским Игорем	Толстихиным Игорем
Комаровым Аликом	Фугзан Мирой
Левек Мари Элен	Шариф-Заде Восе
Макеевым Сашей	Шариф-Заде Хасаном
Матуковым Димой	Житковым Сашей

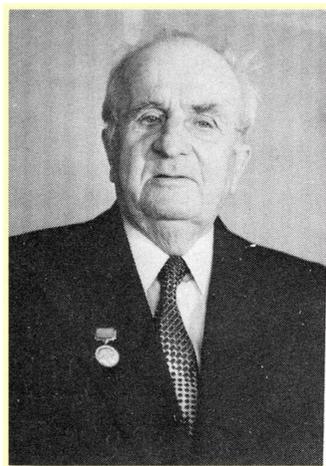
Я также благодарен всем коллегам и друзьям, с которыми в прошлые годы и сейчас имел и имею счастье заниматься той экспериментальной наукой, о которой рассказал.

Со словами благодарности и пожеланиями здоровья и успехов сегодня я обращаюсь к моим товарищам, с которыми, кажется, только вчера поступали в университет, а на самом деле прошли вместе всю жизнь!

⁶Марк Твен



Слева направо: С. З. Яковлева, И. М. Горохов, Г. В. Овчинникова, Э. С. Варшавская, Ю. А. Шуколюков.



Э. К. Герлинг.

Спасибо вам, дорогие!

Я с благодарностью сегодня вспоминаю нашего общего с вами учителя Э. К. Герлинга.

2. Становление изотопной геологии в России

Как все начиналось...

Выдающиеся открытия явления радиоактивности, над которыми работали такие ученые как А. Беккерель, В. Рентген, Э. Резерфорд, М. Кюри и П. Кюри, Ф. Содди, и другие стали известны и нашим физикам, химикам, геохимикам, геологам. Некоторые из них включились в экспериментальные исследования. Например, в научной литературе можно встретить упоминание об экспериментальном исследовании нашего соотечественника Г. Н. Антонова, который в Англии измерил период полураспада радиоактивных висмута (по старой номенклатуре RaE и RaD соответственно) и доказал, что между ними нет никаких промежуточных радиоактивных элементов.

Большую научную прозорливость проявил Н. Н. Бекетов. В статье «О химической энергии в связи с явлениями, представляемыми радием», опубликованной в 1903 году (ЖРФХО. 1903. Т.35. ч. Хим. С. 189–197), он независимо от Э. Резерфорда и Ф. Содди сформулировал гипотезу о том, что радиоактивность — это самопроизвольный распад атомов радиоактивных веществ.

В начале XX века физики и химики России так же, как и

Франции, Англии, Германии, Австрии, США с увлечением получали все новые и новые экспериментальные данные о свойствах радиоэлементов, определяли скорость их распада, закономерности взаимопревращений и химического поведения, исследовали испускаемые радиоактивные излучения.

В потоке новой, ранее невиданной информации, в море необычных и непривычных данных впервые В. И. Вернадский обнаруживает очертания нового грандиозного природного явления — высвобождения внутриатомной энергии. Именно в этот момент глубже всех не только в нашей, но, наверное, и в мировой науке, он осознал все огромное значение открытия явления радиоактивного распада в познании природы. Уже 29 декабря 1910 года в речи, произнесенной на публичном заседании Российской академии наук, В. И. Вернадский, пожалуй, первым в мире приходит к ошеломляющим выводам, которыми делится с членами академии и которые он повторяет в других выступлениях и статьях тех лет: обнаружение распада атомных ядер «...произвело огромный переворот в научном мировоззрении, вызвало создание новой науки, отличной от физики и химии, — учения о радиоактивности...», «...самое понятие химического единства мира претерпевает глубочайшее изменение и расширение». «Благодаря открытию явлений радиоактивности мы узнали новый негаданный источник энергии». Исследования радиоактивности «...заставили вскоре сгладить неизбежную, казалось, пропасть между энергией и материей, привели к созданию энергетической электронной теории материи, дали почву допущению о распадении атома химического элемента... Чрезвычайно быстро были созданы новые представления о материи, о химическом элементе, о взаимных соотношениях между материей и электричеством».

Напоминая читателю о фундаментальных, в большой степени — гносеологических, то есть изучающих источники, средства и условия истинности научного познания, умозаклчениях гениального «естествоиспытателя-пророка» В. И. Вернадского, мы хотели бы этим обратить внимание читателя, на какой плодородной теоретической научной почве родилась и начала развиваться наша фундаментальная отечественная изотопная геология в начале XX века.

Если вернуться к началу рождения изотопной геологии в нашей стране, нужно подчеркнуть, что В. И. Вернадский первым в России понял необходимость практически исследовать проявления радиоактивности в породах и минералах России. В выступлении в Российской академии наук 29 декабря 1910 года он говорит о применениях радиоактивности: «Уже теперь в картине реальной природы выдвинуто значение радиоактивности для объяснения теплоты земного шара, для определения его возможного возраста, для исчисления годами геологических периодов, для образования горных цепей...».

Однако для обеспечения научных исследований в названных областях — фактически в рождающейся изотопной геологии — необходимы были денежные средства. Поэтому, для того, чтобы значение проблемы стало понятнее власти предрезающим, ученый акцентирует в 1910 году внимание на еще одной стороне дела: «Благодаря открытию явлений радиоактивности мы узнали новый негаданный источник энергии... И в вопросе о радии ни одно государство и общество не может относиться безразлично, как, каким путем, кем и когда будут использованы и изучены находящиеся в его владениях источники лучистой энергии. Ибо владение большими запасами радия¹ даст владельцам его силу и власть, пред которыми может побледнеть то могущество, какое получают владельцы золота, земли и капитала... Теперь, когда человечество вступает в новый век лучистой — атомной — энергии, мы, а не другие должны знать, должны выяснить, что хранит в себе в этом отношении почва нашей родной страны».

В 1911 году в речи на II-м Съезде деятелей практической геологии он подчеркивает: «В радиоактивных рудах человечество имеет перед собой формы энергии и проявления сил, какие... ясно стоят совершенно особняком в истории научного познания. Особенно нам, русским, необходимо с самого начала быть на уровне современных знаний и стремлений в этой области, так как на огромной территории нашего государства мы имеем многочисленные признаки радиоактивных руд».

Наша изотопная геология сделала первые шаги именно в этом

¹мы позволим себе предполагать, что В. И. Вернадский имел в виду не только собственно радий, но и вообще радиоактивные вещества. — Прим. Ю. Ш.

направлении — нужно было собрать геологический материал для первых исследований. С этой целью В. И. Вернадский в 1910 году составил план изучения месторождений радиоактивных минералов России и запросил от правительства России соответствующее финансирование. В течение 1910–1914 годов было организовано несколько таких экспедиций, хотя денег российское правительство выделяло много меньше, чем было необходимо. Экспедиции исследовали месторождения урана в Средней Азии (Фергана и Бухара), Кавказа и Закавказья, Урала и Предуралья, Сибири (Байкал и Забайкалье), Алтая. Первыми исследовали месторождения радиоактивных минералов России К. А. Ненадкевич, А. Е. Ферсман, Е. Д. Ревуцкая, В. И. Крыжановский, Д. С. Белянкин, М. Е. Лезедова, Б. А. Линденер, Л. А. Кулик, М. Е. Владимирова, В. Н. Лодочников, В. К. Котульский, В. А. Зильберминц, А. К. Мейстер, К. Ф. Егоров, В. П. Зверев, К. К. Матвеев, Д. И. Мушкетов, Д. В. Наливкин, И. М. Москвин, Е. В. Иванов, В. И. Лучицкий и др. Был получен огромный фактический материал о геологии и минералогии радиоактивных минералов и их месторождений.

Параллельно с организацией экспедиций В. И. Вернадский начал работу по созданию в России исследовательских лабораторий для изучения радиоактивности. Еще в 1911 году он понял решающее значение для этого специализированных «радиевых институтов», способных исследовать новое для науки явление радиоактивности. В том же году он впервые выступил с этой идеей в журнале «Русская мысль». Уже в следующем году в России появилась первая отдельная Минералогическая, а позже Радио-геохимическая лаборатория при Геологическом и Минералогическом музее Российской академии наук, через несколько лет, в 1918 году, благодаря активности видного российского исследователя радиоактивности Л. С. Коловрат-Червинского были созданы Коллегия по организации и эксплуатации пробного Радиевого завода (позже называлась Радиевой лабораторией при Академии наук) и Радиевое отделение Государственного Рентгенологического и Радиологического института. В 1918–1921 годах был организован «радиевый завод» и получен первый русский радий под руководством В. Г. Хлопина.

С 1918 по 1922 год, невзирая на тяжелейшее экономическое

положение, на продолжающуюся Гражданскую войну, разруху в экономике и голод, в стране было создано около семидесяти научных институтов. В их числе Радиевый Институт Российской Академии Наук — РИАН (1922), состоявший из физического, химического и минералогическо-геохимического отделов, который был создан по инициативе В. И. Вернадского. В планах работ нового института появились исследования, которые вполне уже можно отнести к изотопной геологии: изучение радиоактивных излучений, исследования строения атомных ядер, определение геологического времени с помощью явлений радиоактивного распада, изучение рассеяния и миграции элементов и изотопов. Однако в течение первых пяти лет существования института из-за недостатка средств и оборудования продолжалось отставание от мирового уровня. Удавалось осуществлять лишь отдельные интересные и важные исследования. Так в 1925–1926 году был впервые в России определен возраст уранинитов из пегматитов Карелии и минералов беломорской свиты К. А. Ненадкевичем по соотношению концентраций свинца и урана в образцах минералов и В. Г. Хлопиным с помощью уран-гелиевого метода.

В этот период были проведены исследования радиоактивных изотопов в природных водах, изучение больших концентраций природных радиоактивных изотопов. Между тем в Государственном радиевом институте Российской Академии наук, директором которого был В. И. Вернадский, именно в те годы вырос коллектив выдающихся исследователей природной радиоактивности и геологии изотопов: В. Г. Хлопин, А. П. Виноградов, И. Д. Старынкевич-Борнеман, И. Е. Старик, Б. А. Никитин, Б. К. Бруновский, А. Е. Полесицкий, П. И. Толмачев, С. А. Боровик, В. И. Баранов и многие другие. А средств на оборудование все не было.

С отчаянием и возмущением обращается в ноябре 1927 года В. И. Вернадский к одному из тогдашних крупных советских чиновников — начальнику Главнауки: «...Вся деятельность нашего учреждения заторможена его чрезвычайно бедною обстановкою... Идет шестой год существования Радиевого института и за эти пять лет не только люди старятся, приборы изнашиваются, но за эти пять лет наука [мировая] двигается. И как двигается! Мы сейчас являемся наихуже оборудованным — по обстановке, не по людям — самым отсталым

радиевым институтом в мире — мы обладаем громким именем и не отвечающими этому имени реальными возможностями. Высокие качества персонала тратятся во многом даром, ибо он поставлен в условия, в которых производится наименьшее, а не наибольшее использование его знаний... Если бы нам дали те возможности, которые существуют даже в небогатых странах Запада и Америки... то есть настоящую оплату труда и стоящее на уровне современной науки оборудование — страна наша воспользовалась бы высоким сосредоточением в институте личностей... Происходит... безумная трата самого дорогого достояния народа — его талантов... Положение наше нестерпимо-катастрофическое, требующее экстренных мер...»

И тем не менее в очень трудных условиях, работая то за границей (Франция, Англия, Чехословакия, Польша), то дома, В. И. Вернадский шаг за шагом создавал в нашей стране новую тогда науку — радиogeологию, объектом которой были искусственные и природные радиоактивные изотопы. Дома это делать было очень непросто. Поэтому им были прочитаны лекции в Парижской академии наук и в университете в Сорбонне, которые затем были изданы в виде книги.

В. И. Вернадскому стало ясно: появилась совершенно новая возможность для количественного измерения геологического времени с использованием таких превращений. Значение этого научного прорыва в геологии он сформулировал так: «Когда изучение геологической истории строилось на принципах *относительной* геохронологии, представлялось, что наука достаточно хорошо знает геологическую историю Земли. Но с развитием изотопной геохронологии и ее внедрением в геологию оказалось, что история геологического развития Земли расшифрована только с палеозоя, то есть всего 1/8 истории нашей планеты».

«...Изучение радиоактивных свойств минералов быстро привело к выяснению основных величайших понятий о строении вещества нашей планеты, о которых не мыслил никто...» Один из результатов революционного развития науки в этом направлении — разработка методов количественного измерения геологического времени — изотопной геохронологии. «Введение числового геологического измерения времени есть первый решительный шаг — шаг к количественной геологии

ближайшего будущего...Полевая работа геологов будет в корне изменена...Геологическая карта примет совершенно новую форму... Настал момент, чтобы начать организованную систематическую работу по определению геологического времени...» — говорил В. И. Вернадский в 1932 году.

В 1932 году на общем собрании Академии наук В. И. Вернадский выступил с докладом «Проблема времени в современной науке». Говоря о развитии изотопной геологии, он закончил его словами: «Мы переживаем ... величайший перелом научной мысли человечества, совершившийся лишь раз в тысячелетия, переживаем научные достижения, равных которым не видели долгие поколения наших предков...».

В декабре того же года в Радиевом институте состоялась первая в нашей стране большая научная конференция по радиоактивности. Одним из важных ее результатов было создание Комиссии по геологическому времени. Это была вторая в мире (после американской) комиссия, которая начала руководить пионерскими исследованиями в области изотопной геохронологии, то есть определениями возраста горных пород и минералов, метеоритов, земной коры и самой Земли. В ее задачи входила координация исследований по определению изотопного («абсолютного») возраста пород и составление геохронологической шкалы. В комиссию входили все крупные специалисты Радиевого института, работавшие по этой проблеме: В. Г. Хлопин, И. Е. Старик, В. И. Баранов, Л. В. Комлев, Э. К. Герлинг и другие. После создания комиссии по определению изотопного («абсолютного») возраста под руководством В. И. Вернадского и его заместителя В. Г. Хлопина удалось в 1931 году начать систематические работы по определению возраста, продолжить исследования по химии естественных радиоактивных элементов (И. Е. Старик, Э. К. Герлинг).

Однако общественно-политические условия в стране мешали развитию изотопной геологии. В 1934 году малообразованные философы и некоторые геологи, руководившие планированием работы Геологического Комитета (фактически бывшего неким подобием министерства геологии), пытались доказать «путем диалектического материализма», что определение возраста горных пород с помощью радиоактивных изотопов диалектически недостижимо, что научные эмпирические фак-

ты диалектически невозможны, а потому нереальны и неверны... Они задержали работы В. И. Вернадского и всего Радиевого института на несколько лет.

В острой борьбе В. И. Вернадскому удалось организовать публичную дискуссию относительно совместимости диалектического материализма с выводами тогдашней изотопной геохронологии («радиологии»). В присутствии нескольких сот геологов и философов неопровержимо для всех выяснилось поразительное незнание основных фактов и достижений в области радиогеологии всеми философами и многими геологами... Агрессивные «философы» — руководители Геологического Комитета все же были сняты со своих постов и были удалены из комитета.

Но в последующие несколько лет в условиях политического террора немало талантливых ученых, развивавших нарождавшуюся в стране изотопную геологию («радиогеологию») были репрессированы и погибли в тюрьмах и концлагерях. Попытки В. И. Вернадского облегчить их судьбу почти всегда были безуспешны.

В такой атмосфере летом 1937 года в Москве состоялся Международный геологический конгресс — главное собрание геологов мира. Именно на нем произошло окончательное утверждение «радиогеологии» (в современном понимании — изотопной геологии) как важнейшего научного направления, без которого невозможна вся геологическая деятельность.

На первом заседании В. И. Вернадский выступил с докладом «О значении радиогеологии для современной геологии», в котором показал, что изотопная геология позволяет осуществить прорыв в представлениях о *времени* в геологии: 1) прежде геологическая история прослеживалась лишь качественно: раньше — позже; рождение изотопных методов определения возраста пород и минералов позволяет выразить историю Земли в астрономических единицах — годах; 2) если прежде геологические представления исходили из огненно-жидкого состояния Земли в начале ее эволюции, изотопная геология позволяет объяснить природу основных геологических преобразований выделением колоссальной энергии радиоактивного распада изотопов в недрах планеты; 3) «радиогеология» (изотопная геология) реши-

тельным образом изменила представления об истории Земли, так как позволяет узнать о действительном возрасте нашей планеты.

По предложению В. И. Вернадского на заседании конгресса была создана Международная комиссия по определению геологического времени радиоактивными методами во главе с американским геологом А. Лейном. В. И. Вернадский был избран его заместителем, в Комиссию вошли также В. Г. Хлопин и И. Е. Старик.

Конгресс стимулировал развитие изотопной геохронологии в нашей стране. Так, через год после него, И. Е. Стариком была опубликована первая монография по изотопной геологии: «Радиоактивные методы определения геологического времени». В 1937–1939 годы активно развивались исследования по применению (уран-торий)–гелиевого метода изотопной геохронологии. Прежде всего, были получены обширные новые данные об устойчивости гелия в кристаллической структуре разных минералов (В. Г. Хлопин, Э. К. Герлинг, 1937–1940). Была предложена новая концепция механизма миграции (термодесорбции) радиогенного гелия из структуры минералов разного состава — однокачковый механизм движения атомов, описываемый экспоненциальным законом, аналогичным закону кинетики мономолекулярной химической реакции первого порядка. Эта концепция широко используется российскими исследователями и ныне для оценки устойчивости изотопных систем при воздействии повышенной температуры в геологических процессах. Она более адекватно описывает поведение изотопных систем, нежели концепция диффузии изотопов по законам классической диффузии. Были разработаны понятия об энергии активации миграции (Э. К. Герлинг, 1936–1940), обнаружены минералы, содержащие избыточные, ураганные количества радиогенного гелия (В. Г. Хлопин, Ш. А. Абидов, 1941).

Но решающим обстоятельством, заставившим в нашей стране кардинально пересмотреть отношение к изотопной геологии («радиогеологии») явились открытия в ядерной физике. И. Жолио-Кюри и П. Савич (I. Joliot-Curie, P. Savitch, 1938) во Франции, и почти одновременно О. Хан и Ф. Штрассман (O. Hahn, F. Strassmann, 1938) в Германии облучая уран нейтронами обнаружили новый ядерный процесс. Через год Л. Майтнер и О. Фриш (L. Meitner, O. Frisch,

1939) нашли объяснение этому: под действием нейтронов происходит деление атомных ядер урана на пару соизмеримых по массе ядер-осколков.

В 1939 году физики Г. Н. Флеров и К. А. Петряков, при непосредственном участии и поддержке И. В. Курчатова, открыли и самопроизвольное, спонтанное деление в природном уране, не требующее облучения нейтронами. Это открытие послужило базой для разработки в последующие годы двух новых методов изотопной геохронологии уран-кислородного и треккового (о них речь дальше).

Открытие деления урана с высвобождением огромной внутриядерной энергии означало переход человечества к ядерной эре. Этот переход В. И. Вернадский первым осознал очень рано – вскоре после открытия радиоактивности. Еще 5 мая 1910 года в выступлении на общем собрании Академии наук В. И. Вернадский обращает внимание научного сообщества России на то, что «...теоретически мы сознаем неизбежность колоссального изменения условий человеческого существования, если только человек овладеет радиоактивными явлениями, хотя бы в той мере, в какой он овладел силой пара или электричества...», «...внимание ученых обратилось к явлениям, которым, по-видимому, суждено оказать огромное влияние на жизнь человечества, на новую эру его истории. Едва ли был в истории человечества момент, когда бы больше оправдывались затраты государственных средств в стадии предварительных исследований, чем в этой вновь открытой области науки. Ибо здесь характер открывающихся перед человечеством возможностей, в случае даже частичного осуществления, должен самым могущественным образом отразиться на общественной и государственной жизни». В. И. Вернадский первый в мире остро осознал возможную опасность овладения энергией радиоактивного распада: «Мы подходим к великому перевороту в жизни человечества, с которым не могут сравниться все им раньше пережитые. Недалеко время, когда человек получит в свои руки атомную энергию, такой источник силы, который даст ему возможность строить свою жизнь, как он захочет. Это может случиться в ближайшие годы, может случиться через столетие. Но ясно, что это должно быть. Сумеет ли человек воспользоваться этой силой, направить ее на добро, а не на самоуничтожение? Дорос ли он до умения использовать ту

силу, которую неизбежно должна дать ему наука? Ученые не должны закрывать глаза на возможные последствия их научной работы, научного прогресса. Они должны себя чувствовать ответственными за все последствия их открытий. Они должны связать свою работу с лучшей организацией всего человечества». (В. И. Вернадский Предисловие к сборнику «Очерки и речи» М. 1922).

Эти слова были написаны за тринадцать лет до открытия американским физиком А. Дж. Демпстером (A. J. Dempster) (1886–1950) в США первого ядерного горючего для атомной бомбы и ядерных реакторов. Они написаны за восемнадцать лет до того, когда летом 1940 года именно В. И. Вернадский и его помощники и соратники А. Е. Ферсман и В. Г. Хлопин, узнали об открытии в Дании в 1939 году О. Фришем (O. Frish), деления урана под действием нейтронов, сопровождающегося выделением энергии, в десятки раз большей, чем при обычном радиоактивном распаде. Сразу поняв все значение этого открытия, в 1940 году они обратились в правительство СССР о срочном развертывании работ в стране по использованию внутриатомной энергии. В. И. Вернадский, А. Е. Ферсман и В. Г. Хлопин в своем письме, в правительство предложили создать в СССР методы обогащения урана изотопом ^{235}U , сконструировать для этого соответствующие установки и исследовать возможность регулировать процесс деления урана для использования в прикладной энергетике страны. Тогдашние руководители страны сперва холодно отнеслись к предложению ученых и фактически «спустили его на тормозах», ничего не предприняв, потому что в письме ученых речь шла о «прикладной энергетике». Но лед все-таки медленно тронулся. Радиевый институт начал оснащаться по последнему слову техники отечественной аппаратурой и оборудованием. Началось строительство самого мощного в Европе циклотрона с электромагнитом массой 75 тонн. В 1939 году Курчатов обратил особое внимание на возможность получения трансуранового элемента с массовым числом 239, который будет схож по своим свойствам с ураном-235, новый элемент может быть использован как в мирных, так и военных целях. Это было предвидение будущего ядерного горючего — изотопа плутония ^{239}Pu .

На совещании по физике атомного ядра в 1940 году присутствовало более двухсот человек. Доложенные на нем работы И. Е. Тамма

и Л. Д. Ландау не уступали мировому уровню науки того времени. Огромным достижением явилось то, что к началу сороковых годов наша атомная наука вплотную подошла к практическому осуществлению цепной ядерной реакции. В этой связи В. И. Вернадский и В. Г. Хлопин написали в Совнарком письмо, в котором сообщали, что новые открытия позволяют использовать энергию атомного ядра, которая столь велика, что один килограмм урана может быть эквивалентен нескольким тысячам тонн тротила. Газета «Известия» в статье «Уран-235» писала в то время: «Мы будем иметь горючее, которое заменит нам истощающиеся запасы угля и нефти <...> человек сможет получить энергию в любых количествах и применить ее там, где найдет нужным».

В июле 1940 года была учреждена Комиссия по проблеме урана при Академии наук СССР. Председателем комиссии стал В. Г. Хлопин, членами — видные ученые: И. В. Курчатов, П. Л. Капица и другие. В 1939 году Ю. Б. Харитон и Я. Б. Зельдович разработали методы расчета цепной реакции деления тяжелых атомов, и весной 1941 года Урановой Комиссией были представлены эти расчеты, описания методов разделения изотопов урана и другие важные материалы.

С началом войны с Германией работа прекратилась. И. В. Курчатов оказался во флоте, где занимался разработкой методов противоминного размагничивания кораблей, а лейтенант Г. Н. Флеров нес аэродромную службу: готовил к полетам пикирующие бомбардировщики. Но мысли об атомной бомбе не давали ему покоя. Он не раз обращался к ученым и в правительственные органы с предложениями о возобновлении прерванных войною работ по урану. В декабре 1941 года Г. Н. Флеров пишет письмо И. В. Курчатову, где на последней странице помещает от руки сделанный собственный чертеж урановой атомной бомбы... такой же, какая была взорвана над Хиросимой! В апреле 1942 года Г. Н. Флеров обращается непосредственно к И. В. Сталину. Это, наконец, подействовало. В разгар Сталинградской битвы начались консультации по вопросам возобновления ядерных исследований с учеными атомщиками, вызванными в Москву: А. Ф. Иоффе, П. Л. Капицей, В. Г. Хлопиным, В. И. Вернадским, затем и Г. Н. Флеровым. для продолжения ядерных исследований. В 1943 году была организована Лаборатория №2

Академии наук СССР, преобразованная позднее в Институт атомной энергии. В том же году И. В. Курчатов провел систематический анализ разведывательных материалов НКВД СССР по развитию атомных проектов в США и Великобритании и выработал предложения о развитии работ по атомному проекту в СССР. Общим руководителем по созданию советского атомного оружия был утвержден сорокаоднолетний И. В. Курчатов.

В связи с тем, что спрос на урановую руду возрос в десятки раз, была создана комиссия по разведке урановых руд в составе: В. И. Вернадского, А. П. Виноградова, В. Г. Хлопина. К концу войны в поисках урановой руды участвовало девяносто геологоразведочных партий, в дальнейшем их число довели до двухсот пятидесяти.

Был проведен гигантский объем научно исследовательских, конструкторских и промышленных ядерно-физических, химических, инженерных, геологических работ, чтобы 25 декабря 1946 года был пущен первый ядерный реактор, а 25 августа 1949 года — испытана первая советская атомная бомба...

Эта страница истории российской науки и техники сыграла важнейшую роль в создании и развитии нашей изотопной геологии. Прежде всего, многие выдающиеся отечественные ученые, работавшие над атомным проектом: В. И. Вернадский, А. Е. Ферсман, В. Г. Хлопин, И. Е. Старик, А. П. Виноградов, Д. И. Щербаков, Л. В. Комлев — в последующие годы приняли самое активное личное участие в развитии изотопной геологии. Это обстоятельство повысило авторитет и практические возможности прогресса изотопной геологии.

С широким развитием ядерной физики возросло понимание исследователями роли естественных радиоактивных и стабильных изотопов в геологических процессах и в науках о Земле в целом. Повысился интерес к изотопным исследованиям в геологии.

Но нужно было иметь сложные приборы для изотопного анализа природных изотопов — масс-спектрометры. В довоенные годы в изотопных лабораториях использовали самодельные масс-спектрометры с очень невысокими аналитическими возможностями.

В годы же осуществления атомного проекта разработка и про-

изводство масс-спектрометрических приборов были приравнены к оборонной технике. Наша страна оказалась лидером в Европе в разработках масс-спектрометров.

Работы по созданию серийных промышленных масс-спектрометров для изотопного анализа начались в конце войны в Сухумском физико-техническом институте созданием прототипа масс-спектрометра — МС-1. В его проектировании участвовали и немецкие ученые, вывезенные из Германии и успешно работавшие в этом институте в особом режиме и весьма благоприятных бытовых условиях. Затем работы были продолжены в одном из научно-исследовательских институтов в поселке Фрязино под Москвой и в Ленинграде. Впервые в Европе начался выпуск серийных масс-спектрометров.

Исследователи, начинавшие послевоенное развитие изотопной геологии, как раз и воспользовались такими изотопным масс-спектрометрами, созданными для нужд атомной промышленности, а также новыми радиохимическими аналитическими приемами, например методом изотопного разбавления или хроматографическим методом выделения нужных изотопов, при разработке методов изотопного анализа природных образцов.

В 1954 году правительство страны поручило дальнейшее развитие разработки и производства масс-спектрометров в стране Специальному конструкторскому бюро аналитического приборостроения Академии наук в Ленинграде (СКБ АП АН СССР). Здесь были созданы новые отечественные серийные масс-спектрометры для изотопного анализа в изотопной геологии (Р. Н. Галль, Л. Н. Галль). Среди них были масс-спектрометры как относительно простые, так и с уникальными параметрами. Прежде всего, прибор МВ2302 со способностью различать пики в масс-спектрах, отличающиеся на $1/5000$ от массового числа. Это позволяло разделять пики нужного изотопа и посторонних масс. На этом приборе впоследствии впервые в стране удалось исследовать ксенон и криптон в метеоритах, реализовать новый метод изотопной геохронологии по изотопам ксенона — продуктам спонтанного деления, исследовать благородные газы лунного грунта, доставленного на Землю.

В 1960 году была закончена разработка изотопного масс-спектро-

метра МИ1306 для анализа твердых проб урана. Прибор позволял измерять ионные токи в интервале $5 \times 10^{-11} - 2 \times 10^{-18}$ ампер и обладал рекордной по тому времени чувствительностью по урану — 10^{-12} г. Разработанный для него трехленточный источник ионов с поверхностной ионизацией до настоящего времени применяется не только в отечественных, но и в зарубежных масс-спектрометрах аналогичного назначения. После вступления на Украине в строй Сумского завода электронных микроскопов и масс-спектрометров ему в 1959 году был поручен выпуск изотопного масс-спектрометра МИ1305 и ряда других приборов, разработанных в Ленинграде. С середины 1960-х годов в Сумах был разработан и первый собственный изотопный масс-спектрометр МИ1201, который в последующие годы широко использовался российской наукой для определения возраста калий-аргоновым, рубидий-стронциевым, уран-свинцовым методами. За период с 1960 по 2004 годы это предприятие выпустило свыше 7200 масс-спектрометров для атомной промышленности и научных исследований, в том числе и для изотопной геологии. В Ленинграде же в СКБ АП АН СССР был разработан и изготовлен магнитно-резонансный масс-спектрометр МИ9302 с уникальными параметрами. Он позволил впервые в мире осуществить широкие исследования малораспространенного изотопа гелия в мантийных и коровых породах и минералах, в природных газах и водах.

Интенсивное развитие изотопной масс-спектрометрии шло параллельно с быстрым прогрессом изотопной геологии в нашей стране. Прежде всего, сформировалась школа советской изотопной геохронологии (В. И. Вернадский, Л. В. Хлопин, А. П. Виноградов, И. Е. Старик, Э. К. Герлинг, А. И. Тугаринов, В. В. Чердынцев, В. И. Баранов). Важным шагом в деле ее будущего, перспективного развития была организация кафедр, призванных готовить специалистов в области радиохимии и геологии урана для поисков и изучения урановых месторождений. Одним из первых шагов на этом пути была организация в Ленинградском университете первой в СССР кафедры радиохимии, возглавляемой В. Г. Хлопиным, а с 1949 года — И. Е. Стариком. Она готовила не только радиохимиков, но и специалистов в области изотопной геологии. В 1950 году один из ведущих сотрудников Радиевого института Л. В. Комлев был приглашен в Ленинградский

государственный университет, где возглавил кафедру «Геохимия-2», на которой готовили специалистов в области геологии месторождений урана и методов их поисков.

Для координации изотопно-геохронологических исследований при Академии наук СССР в 1950 году была воссоздана Комиссия по определению абсолютного возраста геологических формаций (председатель И. Е. Старик). Комиссия регулярно проводила всесоюзные конференции, где исследователи выступали с научными докладами по изотопной геохронологии. Основной задачей исследований считалось создание отечественной шкалы геологического времени на основе изотопно-геохронологических данных.

Для этого в 1950–1970 годы была создана сеть изотопно-геохронологических лабораторий в институтах АН СССР, ее филиалах и в Министерстве геологии по всей стране.

Начало этой работе было положено в Ленинграде. Помимо лаборатории под руководством И. Е. Старика, в 1950 году была образована Лаборатория геологии докембрия (ныне Институт геологии и геохронологии докембрия РАН) под руководством академика А. А. Полканова. Здесь Э. К. Герлинг начал практическое внедрение предложенного им калий-аргонового метода изотопной геохронологии. Во Всесоюзном научно-исследовательском геологическом институте имени А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ) начала активно работать лаборатория изотопной геохронологии (Н. И. Полевая).

В Москве интенсивно развернулись исследования в области изотопной геохронологии также в трех научно-исследовательских организациях: Институте геохимии и аналитической химии (ГЕОХИ) им. В. И. Вернадского АН СССР (А. П. Виноградов, А. И. Тугаринов), в Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии АН СССР (ИГЕМ РАН) (Г. Д. Афанасьев, Л. Л. Шанин) и несколько позже — в Геологическом институте АН СССР (ГИН РАН) (В. В. Чердынцев, В. И. Виноградов).

За десять-пятнадцать лет были созданы изотопно-геохронологические лаборатории и в других городах страны, например, в Киеве в Институте геологических наук АН Украинской ССР (Н. П. Щербак),

в Баку в Институте геологии НАН Азербайджана (Р. Н. Абдулаев), в Тбилиси в Геологическом институте АН Грузии (М. М. Рубинштейн), в Ереване в Институте геологии АН АрмССР (Г. П. Багдасарян), в Киеве в Институте геологических наук АН Украинской ССР (Н. П. Щербак), в Махачкале, Дагестанском филиале АН СССР (Х. И. Амирханов, Сардаров С. С.), в Сыктывкаре в Институте геологии Коми филиала АН СССР (Ю. П. Ивенсен), в г. Апатиты в Геологическом институте Кольского филиала АН СССР (Е. К. Козлов), в Иркутске в Институте земной коры (С. Б. Брандт), в Магадане в Северо-Восточном комплексном научно-исследовательском институте (СВКНИИ) (Л. В. Фирсов), в Уфе в Горно-геологическом институте Башкирского филиала Академии наук СССР (М. В. Гаррис) и в других регионах страны.

Особое место в создании нового направления науки заняли радиоуглеродные лаборатории. Их задачей было использование для измерения времени радиоактивного изотопа углерода — ^{14}C . Он образуется под действием космического излучения в верхних слоях земной атмосферы. Среднее время существования атомов ^{14}C сравнительно невелико (8270 лет). Поэтому метод начал применяться для определения относительно коротких отрезков времени в истории Земли: в четвертичной геологии и палеогеографии, палеоклиматологии, вулканологии, океанологии, гидрогеологии, почвоведении, гляциологии, археологии и в некоторых других областях науки. Первые радиоуглеродные лаборатории нашей страны были созданы в Институте геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского АН СССР, в Радиевом институте им. В. Г. Хлопина АН СССР, в Ленинградском отделении Института археологии АН СССР. Через двадцать-двадцать пять лет у нас работало больше тридцати радиоуглеродных лабораторий — более трети от числа подобных лабораторий мира!

Таким образом, в стране за четверть века была создана российская школа изотопной геохронологии; организована система подготовки высококвалифицированных научных кадров; налажено серийное производство изотопных масс-спектрометров; создана сеть изотопно-геохронологических лабораторий; осуществлена активная организационная деятельность Комиссии по определению изотопного возраста геологических формаций.

В переломные для нашей страны 1990-е годы произошел резкий спад интенсивности изотопно-хронологических исследований. Была разрушена единая сеть изотопно-геохронологических лабораторий на территории бывшего СССР. В критическом состоянии оказались предприятия по выпуску изотопных масс-спектрометров. Произошло ухудшение кадрового и финансового обеспечения исследований... Однако в начале XXI века положение несколько выправилось, и сейчас изотопная геохронология России снова занимает заметное место в мировой науке.

Можно привести в качестве примеров как прошлые, так и настоящие ее достижения и вклад отечественной изотопной геохронологии в мировую науку. Так в свое время в стране на основе огромного экспериментального материала об изотопном возрасте горных пород была создана уникальная отечественная Шкала геологического времени. Это геологический «календарь» истории горных пород на территории России для промежутков времени от сотен тысяч до сотен миллионов лет. В нем записаны главнейшие геологические события и соответствующие им значения возраста горных пород, выраженные в годах.

Российские исследователи дали мировой науке новые методы определения возраста минералов — ранее неизвестные «изотопные часы» на миллионы и миллиарды лет. Это, прежде всего, широко применяемый в мировой науке калий-аргоновый метод изотопной геохронологии.

На основе открытого в СССР особого вида радиоактивного распада — самопроизвольного (спонтанного) деления одного из изотопов урана — в нашей стране предложен и впервые применен новый уран-ксеноновый метод изотопной геохронологии. Он позволяет определять возраст минералов как из промышленных месторождений урана, так и акцессорных минералов из горных пород — циркона и монацита.

Исследователи России предложили принципиально новый метод определения изотопного возраста подземных и приповерхностных вод в озерах: гелиево-тритиевый, основанный на применении техногенного трития.

Кроме того, в нашей стране запатентован изотопный метод опре-

деления возраста очень молодых урановых минералов по соотношению продуктов деления урана — изотопов ксенона ^{129}Xe и ^{132}Xe .

В недавнее время в России предложен еще один новый метод изотопной геохронологии — платино-гелиевый, основанный на том, что изотоп платины ^{190}Pt радиоактивен. Начато впервые в мире его применение для определения возраста важного стратегического сырья — платиноидов.

Большое значение для современного применения методов изотопной геохронологии имеют исследования российских ученых закономерностей миграции радиогенных изотопов в кристаллических структурах минералов.

Был сделан также вклад и в развитие методов измерения изотопного состава. Так, например, хорошо известен эмиттер ионов, повышающий интенсивность ионных пучков радиогенного свинца в тысячи раз, или уникальный магнитный масс-спектрометр для получения рекордной разрешающей способности при измерениях изотопного состава гелия.

Развитие российской изотопной геохронологии продолжается.

Шуколюков Юрий Александрович

Vita brevis — ars longa (Жизнь коротка — наука безгранична)

Сверстано в системе L^AT_EX 2_ε на базе макета © 2014 Andrea Hidalgo (оригинальный макет the Legrand Orange Book Template) и изображений с сайта © Nasa.gov.

Отпечатано в типографии:

ООО “Спринтер”

197343 Россия, Санкт-Петербург

улица Матроса Железняка, 57

Заказ №26606

Подписано в печать 05.04.2019

Тираж 200 экз.