

## ANOMALOUS XENON OF THE EARTH

Yu. A. SHUKOLYUKOV

*A new explanation of the origin of Earth xenon has been suggested. The excess  $^{129}\text{Xe}$  originated from  $^{129}\text{I}$  that was a product of neutron induced fission of  $^{235}\text{U}$ . The correlation between the excess of  $^{129}\text{Xe}$  and excesses other Xe isotopes has been found. This xenon is the result of chemical migration, fractionation and the subsequent decay of its radioactive precursors of  $^{235}\text{U}$  fission products.*

**Представлено новое объяснение аномалии изотопного состава ксенона Земли. Избыток  $^{129}\text{Xe}$  возникает при  $\beta^-$ -распаде  $^{129}\text{I}$  – продукта деления  $^{235}\text{U}$  в земной коре. Избыток изотопов  $^{132}\text{Xe}$ ,  $^{131}\text{Xe}$ ,  $^{129}\text{Xe}$ ,  $^{134}\text{Xe}$  также вызван миграцией, разделением и последующим распадом их радиоактивных предшественников – продуктов деления  $^{235}\text{U}$ .**

## АНОМАЛЬНЫЙ КСЕНОН ЗЕМЛИ

Ю. А. ШУКОЛЮКОВ

Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова

Считается, что летучие элементы, среди них и ксенон, были принесены на Землю при ее рождении из вещества протопланетного газо-пылевого облака. Предполагается, что транспортом, доставившим летучие элементы на самых последних стадиях формирования Земли, был один из видов первичного материала Солнечной системы, близкий по составу метеоритам углистым хондритам, падающим и ныне на Землю [1]. Имеется много геохимических доказательств такого представления. Кроме того, изотопный состав, например, криптона или аргона в углистых хондритах и в атмосфере Земли полностью совпадает, что указывает на родство первичного вещества Земли и углистых хондритов:

	Земля	Углистые хондриты
$^{86}\text{Kr}/^{84}\text{Kr}$	$0,2014 \pm 0,0002$	$0,2017 \pm 0,0008$
$^{82}\text{Kr}/^{84}\text{Kr}$	$0,2022 \pm 0,0001$	$0,2015 \pm 0,0008$
$^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$	$5,32 \pm 0,01$	$5,31 \pm 0,05$

Однако есть странное исключение — ксенон Земли: его изотопный состав резко отличается от среднего изотопного состава ксенона углистых хондритов [2]. Еще больше он непохож на первичный ксенон Солнечной системы — на “солнечный ксенон”, содержащийся в лунном грунте и попадающий туда при испускании Солнцем газов его атмосферы в виде потока ионов солнечного ветра (рис. 1).

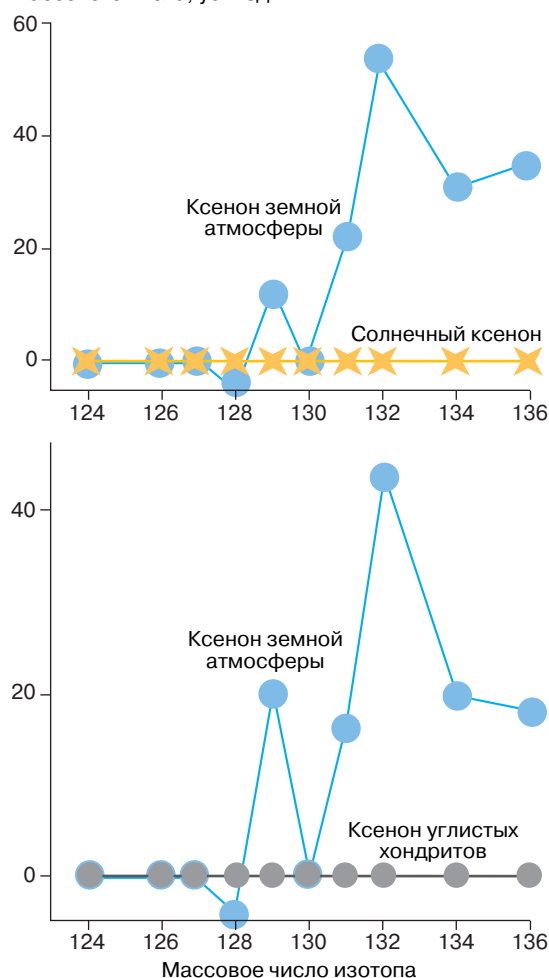
Цель статьи — рассказать о новой идее происхождения изотопной аномальности земного ксенона, которую я и мои сотрудники развиваем в течение нескольких лет. Нам кажется, мы решили загадку ксенона Земли.

### БЛАГОРОДНЫЙ ПОТОК ВЫМЕРШЕГО ИЗОТОПА?

Есть несколько отличий изотопного состава земного ксенона от состава метеоритного или солнечного ксенона. Первое из них состоит в том, что в ксеноне земной атмосферы наблюдается всплеск, пик изотопной распространенности  $^{129}\text{Xe}$  в сравнении с

*От редакции.* Публикуемая статья посвящена изложению в основном собственных результатов автора, его лаборатории и разработанной профессором Ю.А. Шуколюковым гипотезы, а не рассказу о последних достижениях в этой области науки. Однако Экспертный совет журнала счел возможным опубликовать эту статью, учитывая исключительное значение гипотезы, разработанной профессором Ю.А. Шуколюковым.

Избыток изотопа данного  
массового числа, усл. ед.



**Рис. 1.** Сравнение изотопного состава ксенона Земли, Солнца (солнечного ветра) и углистых хондритов, предполагаемых аналогов первичного вещества Земли. Видно, что земной ксенон резко отличается от двух других типов ксенона избытком  $^{132}\text{Xe}$ ,  $^{131}\text{Xe}$ ,  $^{129}\text{Xe}$ ,  $^{134}\text{Xe}$  и  $^{136}\text{Xe}$

солнечным ксеноном. Такой же пик распространенности  $^{129}\text{Xe}$  виден и в изотопном составе ксенона метеоритов — углистых хондритов в сравнении с солнечным ксеноном. Последнее обстоятельство объясняется существованием радиоактивного, ныне вымершего изотопа  $^{129}\text{I}$  в юной Солнечной системе. Вероятно, этот изотоп образовался при вспышке сверхновой звезды и был “впрыснут” в протопланетное газопылевое космическое облако, когда его достигла ударная волна от взрыва. Из облака сформировалось вещество углистых хондритов. В его состав вошел  $^{129}\text{I}$ . Период полураспада этого изотопа всего 17 млн лет — очень короткий по сравнению с возрастом Солнечной системы  $\approx 4,6$  млрд лет. Поэтому изотоп  $^{129}\text{I}$  очень быстро (в масштабе кос-

мического времени) распался в веществе метеоритов. При его  $\beta$ -распаде образовался изотоп ксенона  $^{129}\text{Xe}$ , накапливающийся в метеоритах. Поэтому в ксеноне метеоритов—углистых хондритов появился избыток: пик распространенности  $^{129}\text{Xe}$  в сравнении с ксеноном Солнца, в состав которого вошли газы исходного облака, более бедные  $^{129}\text{I}$ , чем твердое вещество метеоритов.

Казалось бы, всплеск распространенности  $^{129}\text{Xe}$  и в земном атмосферном ксеноне можно объяснить так же: избыток  $^{129}\text{Xe}$  — порождение первичного вымершего изотопа  $^{129}\text{I}$ , некогда бывшего на Земле. Если это так, то изотоп  $^{129}\text{Xe}$  можно было бы использовать для решения важных проблем геохимии.

### БЫЛ ЛИ У АТМОСФЕРЫ “ДЕНЬ РОЖДЕНИЯ”?

Одна из глобальных проблем [2, 3]: был ли процесс образования атмосферы нашей планеты катастрофически быстрым, или он медленно продолжается с образования Земли до настоящего времени? Предположим, что первичный  $^{129}\text{I}$  действительно присутствовал в исходном веществе Земли. При аккреции (объединении) этого вещества в огромную массу нашей планеты и на самых первых стадиях существования новорожденной Земли температура могла быть столь высокой, что ее вещество дегазировалось: летучие элементы (включая ксенон) в значительной мере уходили из минералов и началось быстрое образование атмосферы. При этом иод, хотя также довольно летучий элемент, оставался в основном в твердом веществе Земли. Естественно, что и первичный изотоп  $^{129}\text{I}$  также оставался там. За время, составляющее 8–10 периодов полураспада  $^{129}\text{I}$ , он должен полностью превратиться в изотоп ксенона  $^{129}\text{Xe}$  (140–170 млн лет). Это должно было привести к важному различию в изотопном составе ксенона, перешедшего в атмосферу, и того ксенона, который сохранился в твердом веществе Земли.

Итак, если дегазация была быстрой, в атмосфере должен содержаться первичный ксенон, а в глубинных породах Земли ксенон должен быть обогащен в сравнении с атмосферным ксеноном, изотопом  $^{129}\text{Xe}$  — продуктом радиоактивного распада первичного  $^{129}\text{I}$ . И действительно, когда исследовали образцы глубинных магматических пород, собранные на Срединно-Атлантическом подводном хребте, в них обнаружился явный избыток  $^{129}\text{Xe}$  [2, 3]. Значит, дегазация вещества Земли была быстрой? Она должна была бы завершиться в основном спустя  $\approx 60$  млн лет после образования нашей планеты, то есть очень быстро, если вспомнить, что возраст Земли 4,6 млрд лет. Таким образом, казалось бы, можно установить приблизительно “день рождения” атмосферы Земли:  $\approx 60$  млн лет после образования планеты. Но все оказалось сложнее, потому что обнаружили новые странные обстоятельства.

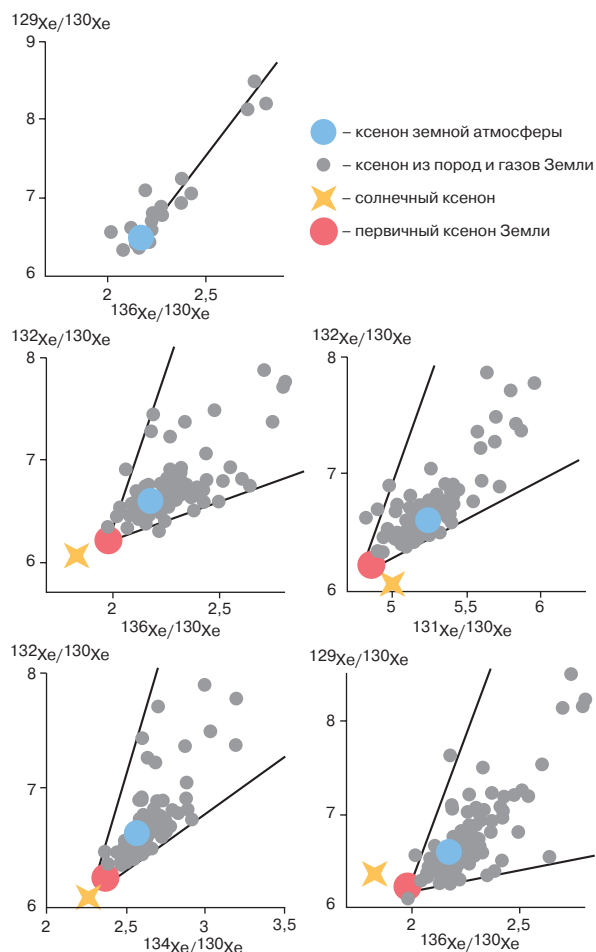
## НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ДРЕВНИЙ КСЕНОН

Избыточный  $^{129}\text{Xe}$  был найден не только в породах, происходящих из глубинных слоев Земли — из мантии, но и совершенно неожиданно в некоторых природных газах, выделяющихся из пород земной коры. Это был первый подводный камень, на который неожиданно натолкнулись сторонники представления о происхождении  $^{129}\text{Xe}$  из первичного  $^{129}\text{I}$ . Но обнаружился и второй: в глубинных породах, там, где есть избыток изотопа  $^{129}\text{Xe}$ , почти всегда есть и избыточный  $^{136}\text{Xe}$  [4]. Между относительными концентрациями этих изотопов, как сообщалось [4], есть корреляция (рис. 2). Для объяснения этой непонятной связи был предложен такой выход: если  $^{129}\text{Xe}$  происходит из вымершего первичного  $^{129}\text{I}$ , то и избыток  $^{136}\text{Xe}$  обязан тоже вымершему изотопу плутония  $^{244}\text{Pu}$ .

Среднее время жизни атомов  $^{244}\text{Pu}$  для  $\alpha$ -распада — 122 млн лет. Но этот изотоп одновременно распадается и путем спонтанного, самопроизвольного деления с образованием  $^{136}\text{Xe}$ . В мантии Земли образуются  $^{129}\text{Xe}$  и  $^{136}\text{Xe}$ , затем они смешиваются с атмосферным ксеноном в той или иной пропорции в разных образцах: вот и появляется их линейная корреляция. Это представление многим казалось, да и сейчас кажется достаточно убедительным. На его базе было предложено несколько геохимических моделей для совершенствования теории рождения и развития атмосферы Земли [3–5]. В них одновременно использовали две изотопные пары: вымерший радиоактивный изотоп ( $^{129}\text{I}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ ) и его потомок, радиогенный стабильный изотоп ксенона ( $^{129}\text{Xe}$  или  $^{136}\text{Xe}$  соответственно).

Но удивительно, что авторы всех этих моделей, основанных на корреляционной зависимости для ограниченного числа проб (верхняя часть диаграммы рис. 2), почему-то совершенно игнорировали остальные, помимо  $^{136}\text{Xe}$ , изотопы ксенона, которые тоже непременно образуются при спонтанном делении  $^{244}\text{Pu}$  в соотношениях:  $^{134}\text{Xe}/^{136}\text{Xe} = 0,939$ ,  $^{132}\text{Xe}/^{136}\text{Xe} = 0,885$ ,  $^{131}\text{Xe}/^{136}\text{Xe} = 0,246$ ,  $^{129}\text{Xe}/^{136}\text{Xe} = 0,05$ . Их тоже нужно учитывать.

Когда я нанес на график данные для изотопных отношений  $^{134}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$ ,  $^{132}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$  и  $^{131}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$ , вместо линейной корреляции получились *области*, заполненные экспериментальными точками [6]. Да и для пары изотопных отношений  $^{136}\text{Xe}/^{130}\text{Xe}$  и  $^{129}\text{Xe}/^{130}\text{Xe}$ , если использовать все опубликованные в литературе данные, получается такое же поле точек, а не линейная зависимость. В этом поле расположена и точка атмосферного ксенона. Точки находятся в пределах угловой области, образуемой двумя лучами, исходящими из общего начала. Это может означать, что в породах, природных газах и в атмосфере Земли присутствуют по крайней мере три типа ксенона. Координаты начальной точки ( $\text{Xe}_0$ ) — это изотопные отношения в первичном ксеноне. Нижний луч — это линия смешения первич-



**Рис. 2.** Избыток  $^{129}\text{Xe}$  и других изотопов ксенона в породах мантии Земли. На верхней диаграмме — корреляция относительной распространенности  $^{129}\text{Xe}$  и  $^{136}\text{Xe}$  для ограниченного числа образцов. На нижних диаграммах нанесены все опубликованные данные. Видно, что ксенон представляет собой смесь трех компонентов: первичного ксенона, компонента деления тяжелых ядер (нижний луч) и третьего неизвестного компонента (верхний луч)

ного ксенона ( $\text{Xe}_0$ ) и ксенона деления урана—плутония: ведь в ксеноне деления нет изотопа  $^{130}\text{Xe}$ , а изотопы  $^{136}\text{Xe}$ ,  $^{134}\text{Xe}$ ,  $^{132}\text{Xe}$  и  $^{131}\text{Xe}$  при делении ядер образуются в определенном соотношении. Добавление к первичному ксенону, например, изотопа  $^{136}\text{Xe}$  обязательно сопровождается прибавкой пропорционального количества другого продукта деления, скажем  $^{132}\text{Xe}$ . Поэтому при добавлении разных порций ксенона деления к  $\text{Xe}_0$  получается прямая линия, тангенс угла наклона которой и есть соотношение пары изотопов — продуктов деления.

Все получалось вроде бы красиво, да вот незадача: что за третий компонент ксенона должен был добавиться к первичному ксенону, чтобы получился

верхний луч на графике? Если рассчитать его изотопный состав, то он выглядит очень необычно:

$$^{134}\text{Xe}/^{136}\text{Xe} = 1,58; \quad ^{132}\text{Xe}/^{136}\text{Xe} = 4,52;$$

$$^{131}\text{Xe}/^{136}\text{Xe} = 9,1; \quad ^{129}\text{Xe}/^{136}\text{Xe} = 25,1.$$

Ни один среди известных тяжелых химических элементов не может дать такой изотопный состав продуктов деления. Это оставалось загадкой. Решение этой загадки пришло в результате исследований на первый взгляд абсолютно разнородных объектов: урановой руды из месторождения Окло в Африке — природного ядерного реактора, метеорита Алленде, сплавленной почвы из эпицентра испытательного атомного взрыва в пустыне Аламогордо (США), очень тонкозернистого уранового минерала и искусственно облученных в реакторе образцов [7].

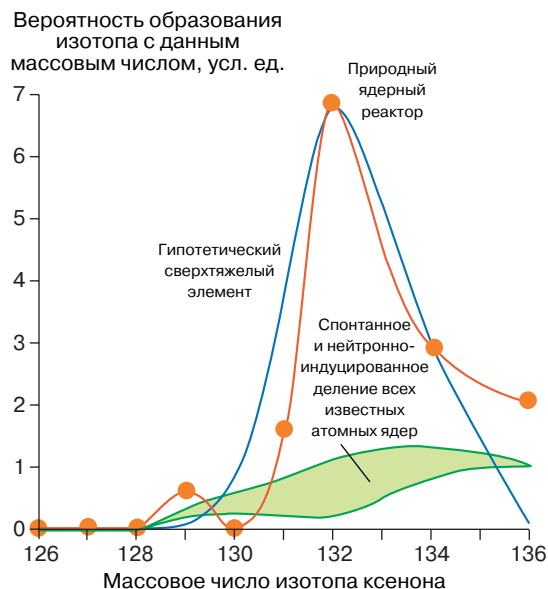
### СТРАННЫЙ КСЕНОН В ПРИРОДНОМ ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ

Началось все тогда, когда мой бывший аспирант Данг Ву Минь, ныне руководитель Национального центра исследований Вьетнама, начал изучение интересного феномена — природного ядерного реактора, самопроизвольно функционировавшего в течение 500 тыс. лет 2 млрд лет тому назад в крупном урановом месторождении Окло (Республика Габон). Сам по себе этот феномен уникален. Он был открыт французскими специалистами. Но когда Данг Ву Минь исследовал пробы руды из Окло, обнаружилось еще одно интересное явление. При нагревании урановой руды из нее выделилось огромное количество ксенона с изотопным составом, очень похожим на тот, какой имеет ксенон в технических реакторах. Это означало, что в месторождении происходило интенсивное деление изотопа  $^{235}\text{U}$  под действием гигантского потока тепловых нейтронов. Собственно, это и было одним из доказательств самопроизвольного протекания цепной реакции деления урана в месторождении.

Однако главное состояло в том, что во фракциях газа, выделившихся при 400–800°C, ксенон был немного необычен. Он был обогащен изотопами  $^{132}\text{Xe}$ ,  $^{131}\text{Xe}$ ,  $^{129}\text{Xe}$  и  $^{134}\text{Xe}$  относительно  $^{136}\text{Xe}$ . Нужно было прежде всего понять, связан ли этот слегка аномальный ксенон с обычным ксеноном деления  $^{235}\text{U}$ , или же это независимый компонент, возможно содержащийся не в самом урановом минерале, а в какой-то примеси. Мы фракционировали вещество руды по цвету и размерам зерен минералов, их магнитным свойствам, плотности, чтобы выделить фазу — носитель странного ксенона. И по мере того как мы это делали, ксенон получался все более удивительным, все более обогащенным названными изотопами. Особенно резкими стали изотопные аномалии, когда применили метод селективного растворения. Обработывая вещество кислотами, мы удаляли часть минералов и исследовали ксенон в нерастворимых остатках. Рекордсменом оказалась

минеральная фаза после обработки вещества соляной, азотной и плавиковой кислотами. Избыток  $^{132}\text{Xe}$ ,  $^{131}\text{Xe}$ ,  $^{134}\text{Xe}$  и  $^{129}\text{Xe}$  был ураганным. Столь же необычным оказался и криптон, резко обогащенный изотопами  $^{84}\text{Kr}$ ,  $^{83}\text{Kr}$  относительно  $^{86}\text{Kr}$  (рис. 3). Рентгеновский анализ показал, что эти невиданные ксенон и криптон сконцентрированы во вторичном слюдоподобном минерале.

Возможность образования аномальных ксенона и криптона в побочных ядерных реакциях нейтронов с барием, теллуром и селеном мы исключили, проверив содержание этих элементов в руде. Уж не образовались ли эти странные незнакомцы при самопроизвольном делении неизвестных ядер, возникших в ходе цепной реакции деления в месторождении Окло? На эту заманчивую мысль нас с Данг Ву Минем натолкнуло то обстоятельство, что при делении далеких трансурановых “сверхтяжелых” [8] элементов изотопный состав ксенона качественно должен был бы быть именно таким, как в месторождении Окло, — с огромным избытком изотопа  $^{132}\text{Xe}$  [9]. Однако не так просто было объяснить механизм возникновения сверхтяжелых элементов в месторождении. И главное, откуда бы там взялся аномальному криптону, который в рамках представлений о делении сверхтяжелых элементов объяснить также было сложно? Поэтому мы не могли исключить и вторую возможность образования аномальных ксенона и криптона.



**Рис. 3.** Ураганный избыток  $^{132}\text{Xe}$ ,  $^{131}\text{Xe}$ ,  $^{134}\text{Xe}$  и  $^{129}\text{Xe}$  относительно  $^{136}\text{Xe}$  в природном ядерном реакторе — месторождении Окло (Республика Габон). Синим цветом показана кривая выходов этих же изотопов при делении гипотетического сверхтяжелого элемента N114 с атомной массой около 300. Зеленым цветом выделена область изотопных отношений при делении известных ядер



## НОВЫЙ МЕХАНИЗМ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ В ПРИРОДЕ

Ксенон и криптон образуются при делении атомных ядер урана не сразу. Сначала возникают изотопы других элементов, унаследовавшие от родительских ядер урана большой избыток нейтронов. Поэтому новорожденные изотопы иода, теллура, сурьмы, селена очень радиоактивны. Путем  $\beta^-$ -распада они освобождаются от избыточных нейтронов: при испускании  $\beta^-$ -частицы число нейтронов в ядре уменьшается, а протонов увеличивается на единицу. Но одного  $\beta^-$ -распада недостаточно для ликвидации избытка нейтронов. Поэтому возникающие радиоактивные изотопы снова претерпевают  $\beta^-$ -распад: образуются цепочки последовательно распадающихся изотопов, например:

Олово		$^{132}\text{Sn}$ (2,2 мин)	$^{131}\text{Sn}$ (3,4 мин)		
		↓	↓		
Сурьма	$^{134}\text{Sb}$ (50 с)	$^{132}\text{Sb}$ (2,1 мин)	$^{131}\text{Sb}$ (23 мин)	$^{129}\text{Sb}$ (4,6 ч)	
	↓	↓	↓	↓	
Теллур	$^{134}\text{Te}$ (43 мин)	$^{132}\text{Te}$ (77 ч)	$^{131}\text{Te}$ (24 мин)	$^{129}\text{Te}$ (72 мин)	
	↓	↓	↓	↓	
Иод	$^{136}\text{I}$ (86 с)	$^{134}\text{I}$ (52 мин)	$^{132}\text{I}$ (2,3 ч)	$^{131}\text{I}$ (8 дней)	$^{129}\text{I}$ (17 млн лет)
	↓	↓	↓	↓	↓
Ксенон	$^{136}\text{Xe}$	$^{134}\text{Xe}$	$^{132}\text{Xe}$	$^{131}\text{Xe}$	$^{129}\text{Xe}$

В конце концов получаются стабильные изотопы ксенона и криптона в соотношениях, типичных для деления  $^{235}\text{U}$  под действием медленных нейтронов или спонтанного деления  $^{238}\text{U}$ .

Пытаясь найти разгадку природы ураганных изотопных аномалий в природном ядерном реакторе, мы с Данг Ву Мином вспомнили об одной статье канадских ученых Кеннета и Тода. В ней была высказана интересная идея: радиоактивные предшественники ксенона — иод, теллур, сурьма могут, не успев распасться, мигрировать из места своего образования и превратиться в ксенон совсем не там, где возникли.

Мигрируют эти элементы по-разному. Время, отпущенное каждому для миграции, — тоже различно. Чем больше период полураспада, тем дальше (при прочих равных условиях) может мигрировать изотоп. В одном месте может образоваться  $^{134}\text{Xe}$  из  $^{134}\text{I}$  (период полураспада  $T_{1/2} = 52,5$  мин), в другом —  $^{132}\text{Xe}$  из  $^{132}\text{Te}$  ( $T_{1/2} = 77$  ч), еще дальше  $^{131}\text{Xe}$  из  $^{131}\text{I}$  ( $T_{1/2} = 8$  дней), и уж совсем далеко мог бы мигрировать  $^{129}\text{Xe}$  из  $^{129}\text{I}$  ( $T_{1/2} = 17$  млн лет), превращающийся затем в  $^{129}\text{Xe}$ . Поэтому могут возникать ксенон и криптон с аномальным изотопным составом, обогащенные тем или иным изотопом.

Нужно было проверить наряду с гипотезой о сверхтяжелых элементах как источниках аномальных ксенона и криптона и эту идею миграционного разделения изотопов. Но к тому времени Данг Ву Минь должен был возвратиться во Вьетнам. Поэтому продолжать работу пришлось с другим помощником, А.П. Мешиком. Он был физиком, и в качестве кандидатской диссертации я предложил ему исследовать физико-химический процесс — миграцию ксенона в урановых минералах, в том числе и в руде из природного ядерного реактора.

Что способствует миграции? Во-первых, температура, во-вторых, размер зерен минералов: чем выше температура и чем мельче зерна, тем миграция из них интенсивнее. В каких минералах происходит деление урана с образованием ксенона и криптона при максимальной температуре? Конечно, при взрыве атомной бомбы под землей или на поверхности. Было заманчиво получить образцы горных пород из мест ядерных испытаний, но в 80-е годы это было невозможно. Поэтому я обратился к коллекционеру метеоритов и всяких минеральных редкостей В. Цейтшелю, живущему в Ханане (Германия). Он прислал ценнейший образец — пробу почвы из эпицентра первого атомного взрыва, произведенного в 1945 году в пустыне Аламогордо (США). Атомная бомба была размещена в стальной башне, которая при взрыве испарилась, а почва под ней под действием огромной температуры наполовину сплавилась, спеклась. Несколько граммов этой почвы я и получил для исследования.

Под действием огромного потока нейтронов, возникших при атомном взрыве, естественный уран в почве делился, образовывались радиоактивные предшественники ксенона и криптона. Благодаря очень высокой температуре они должны были интенсивно мигрировать с различной скоростью на разные расстояния от мест образования и оказаться в разных кристаллохимических позициях в породе. И действительно, когда мы проанализировали ксенон и криптон, выделившиеся при нагреве пробы из Аламогордо, они оказались необычными. При некоторых температурах, когда эти газы извлекались из определенных микроскопических участков породы, куда вскоре после атомного взрыва успели мигрировать их радиоактивные предшественники, изотопные отношения в десятки раз превосходили нормальные для деления  $^{235}\text{U}$  под действием нейтронов или спонтанного деления  $^{238}\text{U}$ . А.П. Мешик подметил закономерность: чем больше времени существуют радиоактивные предшественники, тем получающиеся из них ксенон и криптон все более аномальны.

Изотопы	$^{131}\text{Xe}$	$^{132}\text{Xe}$	$^{83}\text{Kr}$
Изотопное отношение	$^{131}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$	$^{132}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$	$^{83}\text{Kr}/^{86}\text{Kr}$
Сумма времени жизни радиоактивных предшественников	80 дней	83 часа	6,7 часов
Отклонение от нормального соотношения изотопов	35 000%	15 000%	4000%

Изотопы	$^{134}\text{Xe}$	$^{84}\text{Kr}$
Изотопное отношение	$^{134}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$	$^{84}\text{Kr}/^{86}\text{Kr}$
Сумма времени жизни радиоактивных предшественников	2 часа	0,7 часа
Отклонение от нормального соотношения изотопов	1200%	400%

Мало того, А.П. Мешик использовал ранее опубликованную идею немецкого исследователя Э. Йессбергера: если при облучении образца в ядерном реакторе его поместить в запаянную заранее вакуумированную ампулу, то можно измерить изотопный состав газа, оставшегося в облучаемом минерале, и газа, мигрировавшего из него в объем ампулы. Такие измерения проделали с облучением урановых минералов в техническом ядерном реакторе при повышенной температуре. Оказалось, что в урановом минерале содержится аномальный ксенон, обогащенный  $^{132}\text{Xe}$ ,  $^{131}\text{Xe}$  и  $^{134}\text{Xe}$  относительно  $^{136}\text{Xe}$ , а в объеме ампулы тоже аномальный ксенон, но обедненный теми же изотопами. Своеобразное зеркальное изображение. Если же просуммировать эти два компонента, получается нормальный ксенон деления  $^{235}\text{U}$ . Следовательно, это еще один аргумент в пользу того, что аномальные ксенон и криптон возникают в результате миграции, разделения на радиоактивных предшественников под действием высокой температуры.

Мы получили доказательства и влияния размеров зерен на миграцию радиоактивных предшественников, а следовательно, и на изотопный состав ксенона. Для этого я обратился к геологам, и они раздобыли для наших исследований необычную урановую руду так называемого типа Колорадо. Ее особенность — исключительно мелкие зерна оксида урана, вкрапленные во вмещающую породу. И здесь в ходе выделения газов при нагреве образцов мы снова встретились с большими аномалиями изотопного состава ксенона. Например, соотношение  $^{132}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$  на  $\approx 30\%$  превышало нормальное.

Итак, был открыт новый механизм разделения изотопов ксенона и криптона в искусственных и природных условиях — миграционное фракционирование их радиоактивных предшественников в цепочках осколков деления. Однако насколько широко распространено оно в природе?

## НЕОЖИДАННЫЕ ВСТРЕЧИ ПОВТОРЯЮТСЯ

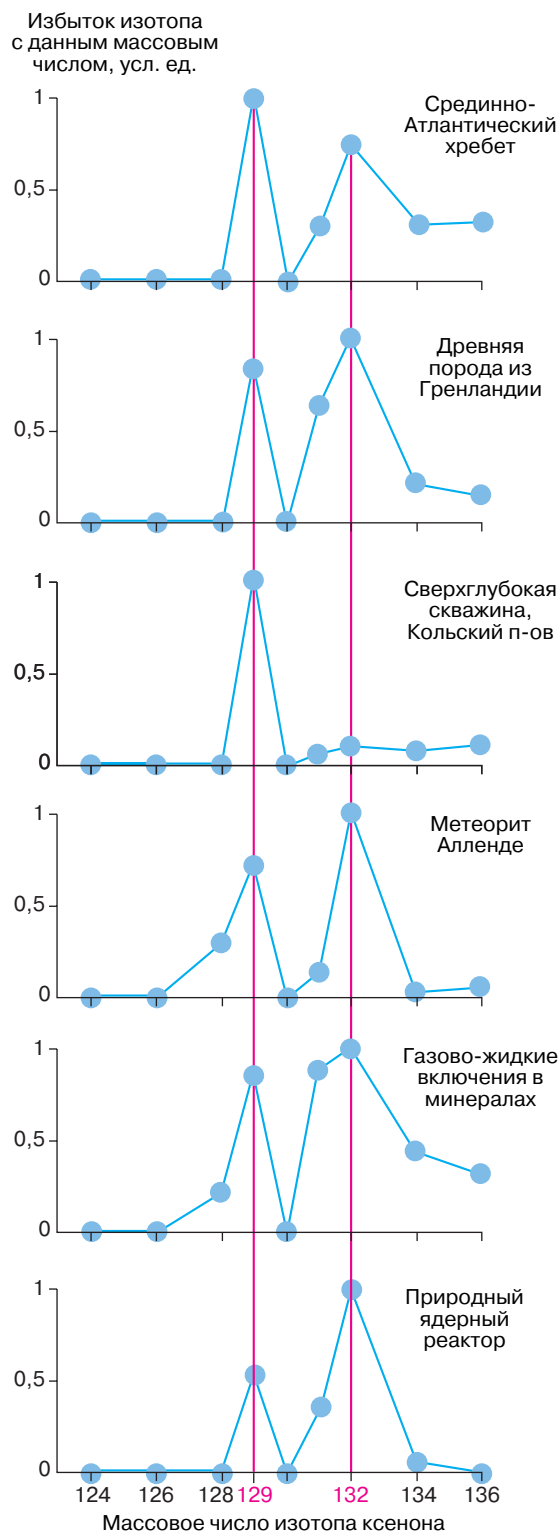
Исследователи столкнулись с проявлениями этого эффекта давно, задолго до того, как мы нашли объяснение этому явлению. Еще в 1971 году австралийский исследователь П.М. Джеффри обнаружил странный ксенон в древнейшей породе из Гренландии — в анортозите (рис. 4): был непонятен и всплеск распространенности изотопов  $^{132}\text{Xe}$ ,  $^{131}\text{Xe}$ ,  $^{129}\text{Xe}$  и  $^{134}\text{Xe}$ . Также трудно было объяснить, почему в некоторых природных газах наблюдается наряду с нормальным ксеноном от спонтанного деления  $^{235}\text{U}$  также и избыток  $^{129}\text{Xe}$ : ведь эти газы образовались в земной коре и откуда бы в них взяться  $^{129}\text{Xe}$  от распада, как думали, первичного  $^{129}\text{I}$  (рис. 5)? Столь же загадочным представлялся изотопный состав ксенона из образцов Кольской сверхглубокой скважины, когда в Гейдельберге Т. Кирстен и Л.К. Левский нашли огромное обогащение изотопом  $^{129}\text{Xe}$  (рис. 4). И уж совсем тупиковой казалась ситуация с объяснением изотопного состава ксенона высокотемпературного минерального включения в метеорите Алленде, исследованного на высокочувствительном масс-спектрометре Макс-Планк-Института ядерной физики (Max-Planck-Institut für Kernphysik) в Гейдельберге Дж.Л. Иоарданом, Э. Йессбергером и Т. Кирстеном (рис. 4).

Последняя по времени (в 1994 году) встреча с необычным ксеноном состоялась в лаборатории классика изотопной геохимии благородных газов Дж. Рейнолдса в Беркли (США). Выделенный из микроскопических газовой-жидких включений в минералах ксенон по изотопному составу оказался почти близнецом аномального ксенона из Ок-ло (рис. 4).

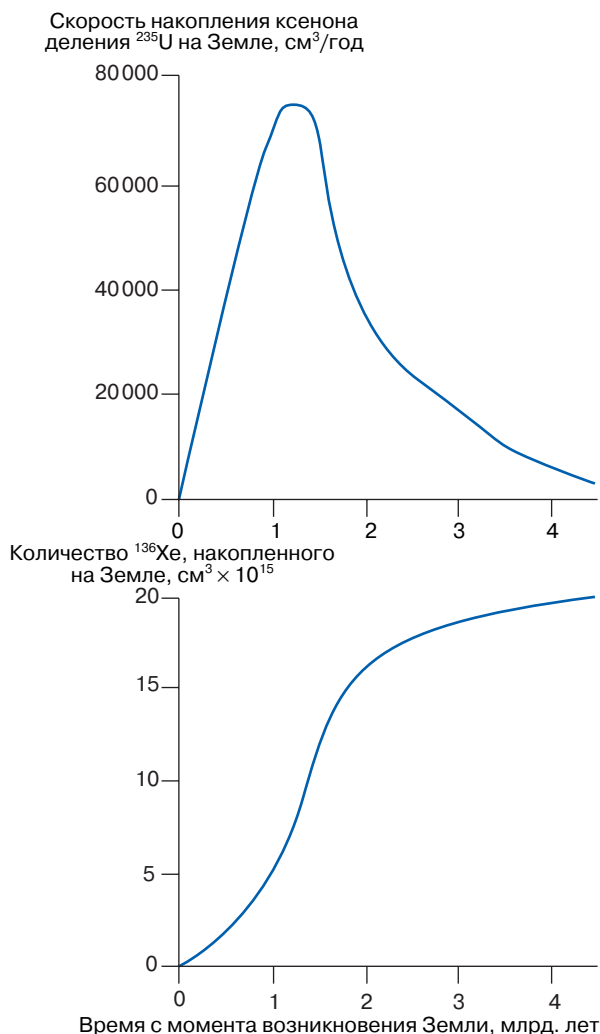
Теперь нам понятны изотопные чудеса: все эти изотопные сдвиги вызваны разделением в ходе миграции радиоактивных предшественников ксенона. Каждый из них мигрирует и задерживается в тех или иных минералах соответственно с собственными геохимическими свойствами. Распадаясь они создают в этих минералах избытки того или иного изотопа ксенона — их радиогенного потомка. Но тут возникает вопрос: откуда берутся сами предшественники? Первое, что приходит в голову, — от спонтанного деления  $^{238}\text{U}$ . Однако при таком процессе генерируется очень мало  $^{129}\text{I}$  — предшественника  $^{129}\text{Xe}$ . Между тем во многих случаях аномальный ксенон сильно обогащен именно этим изотопом. Приходится обратиться к другой возможности — к делению  $^{235}\text{U}$  под действием тепловых нейтронов, при котором выход  $^{129}\text{I}$  в десятки раз больше.

## МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО КСЕНОНА

В горных породах всегда существует поток тепловых нейтронов. Они образуются в различных ядерных реакциях. Эти нейтроны и могут вызвать деление  $^{235}\text{U}$  с образованием аномального ксенона.



**Рис. 4.** Аномальный ксенон в различных объектах. Характерны всплески относительной распространенности на  $^{132}\text{Xe}$ ,  $^{131}\text{Xe}$ ,  $^{129}\text{Xe}$



**Рис. 5.** Результат расчетов скорости генерации и закона накопления ксенона нейтронно-индуцированного деления  $^{235}\text{U}$  в земной коре. Видно, что 4,0–2,5 млрд лет назад условия для генерации этого ксенона были особенно благоприятны из-за того, что общая концентрация урана в земной коре была уже достаточно большой, а изотопная распространенность  $^{235}\text{U}$  была еще высокой

Вопрос состоит в том, достаточно ли интенсивен этот процесс, чтобы обеспечить то количество аномального ксенона в атмосфере, которое наблюдается, — 3,4 млрд м<sup>3</sup>. Если исходить из современных потока нейтронов, концентрации урана и изотопной распространенности в нем  $^{235}\text{U}$  в горных породах, то они слишком малы. А в прошлом?

Недавно я разработал расчетную модель [6] для оценки генерации аномального ксенона на Земле, учитывающую концентрацию и изотопный состав урана, а также поток нейтронов в земной коре в геологическом прошлом. В качестве начальной точки эволюции изотопного состава земного ксенона

принят рассчитанный состав первичного ксенона (см. рис. 2).

Это позволило устранить многолетнее противоречие между представлениями о привносе летучих элементов на Землю веществом типа углистых хондритов и существенным различием изотопного состава земного ксенона и ксенона этих метеоритов. Действительно, по нашей оценке, изотопный состав первичного ксенона Земли близок изотопному составу ксенона углистых хондритов:

	$^{124}\text{Xe}$	$^{126}\text{Xe}$	$^{128}\text{Xe}$	$^{129}\text{Xe}$	$^{130}\text{Xe}$
Рассчитанный изотопный состав первичного Xe Земли	—	—	0,47	6,22	$\equiv 1$
Изотопный состав Xe углистых хондритов	0,0285	0,0251	0,507	6,29	$\equiv 1$
Современный изотопный состав ксенона Земли	0,0233	0,0218	0,4715	6,496	$\equiv 1$

	$^{131}\text{Xe}$	$^{132}\text{Xe}$	$^{134}\text{Xe}$	$^{136}\text{Xe}$
Рассчитанный изотопный состав первичного Xe Земли	4,86	6,22	2,36	1,98
Изотопный состав Xe углистых хондритов	5,04	6,15	2,36	1,99
Современный изотопный состав ксенона Земли	5,213	6,607	2,563	2,176

В ходе геологической истории первичный ксенон Земли претерпел значительные изменения благодаря добавлению радиогенных изотопов. В модели предполагается, что уран поступает в земную кору из первичного вещества (из мантии Земли) так, что его концентрация пропорциональна времени  $t$ . Учитывается также, что в прежние геологические эпохи изотопная распространенность  $^{235}\text{U}$  (следовательно, и вероятность его деления под действием потока нейтронов  $\Phi$ ) была в десятки раз большей. Причина этого — относительно короткий период полураспада  $^{235}\text{U}$ : всего 720 млн лет. Поэтому 3 млрд лет тому назад изотопная распространенность  $^{235}\text{U}$  была в  $\approx 20$  раз больше, чем сейчас, 4 млрд лет тому назад — в  $\approx 50$  раз больше, а в момент рождения Земли на долю ядерного горючего  $^{235}\text{U}$  приходилось  $\approx 60\%$  всего количества урана (сегодня 0,7%). Поток нейтронов в веществе земной коры также был много больше, чем сейчас, потому что он пропорционален концентрации  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , а она для урана сильно зависит от времени.

В результате удалось рассчитать скорость генерации и выявить закон накопления ксенона нейтронно-индуцированного деления на Земле (рис. 5). Оказывается, если почти весь  $^{129}\text{I}$ , образованный при нейтронно-индуцированном делении  $^{235}\text{U}$  в минералах земной коры, мигрировал и возникший

из него  $^{129}\text{Xe}$  перешел в атмосферу, то это объясняет наблюдаемое количество аномального ксенона в атмосфере.

Таким образом, удалось объяснить, откуда взялся в атмосфере Земли странный аномальный ксенон и оценить его вклад в общее количество ксенона в атмосфере нашей планеты:

Тип ксенона	Содержание в атмосферном ксеноне, %
Первичный	92,5
Обычный ксенон деления $^{238}\text{U}$ и $^{235}\text{U}$	2,2
Аномальный	5,3

Можно объяснить также, почему нет аномального криптона. Дело в том, что выход криптона при делении урана в 4–10 раз меньше, чем ксенона. В атмосфере же концентрация криптона в  $\approx 10$  раз больше. Поэтому добавка криптона деления в атмосфере пренебрежимо мала. Атмосферный криптон сохранил первичный изотопный состав, который почти полностью совпадает с составом криптона углистых хондритов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Додд Р.Т. Метеориты: Петрология и геохимия. М.: Мир, 1986. 383 с.
2. Озума М., Подосек Ф. Геохимия благородных газов. Л.: Недра, 1987. 343 с.
3. Толстикхин И.Н. Изотопная геохимия гелия, аргона и редких газов. Л.: Наука, 1986. 200 с.
4. Staudacher Th., Allegre C.J. // Earth and Planet. Sci. Lett. 1982. Vol. 60. P. 389–406.
5. Azbel I.Ya., Tolstikhin I.N. // Meteoritics. 1993. Vol. 28. P. 609–620.
6. Шуколюков Ю.А., Мешик А.П. // Геохимия. 1995. № 8. С. 1072–1093.
7. Shukolyukov Yu.A., Jessberger E.K., Meshik A.P. et al. // Geochim. et cosmochim. acta. 1994. Vol. 58. P. 3075–3085.
8. Флеров Г.Н., Ильинов А.С. На пути к сверхэлементам. М.: Педагогика, 1982. 180 с.
9. Шуколюков Ю.А. Продукты деления тяжелых элементов на Земле. М.: Энергоиздат, 1982. 128 с.

\* \* \*

Юрий Александрович Шуколюков, доктор химических наук, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, зав. лабораторией изотопной геохимии, космохимии и геохронологии Института геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, награжден медалью В.И. Вернадского РАН. Область научных интересов: изотопная геохимия, космохимия и геохронология. Автор более 300 работ, включая восемь монографий.