

# ЯДЕРНАЯ ТОПКА ЗЕМЛИ

В. Ф. АНИСИЧКИН, А. А. БЕЗБОРОДОВ

Общеизвестно, что Солнце и другие звезды черпают свою колоссальную энергию из пылающего в их недрах «термоядерного котла». Но и относительно холодная Земля излучает тепла заметно больше, чем можно было бы предположить на основе таких широко распространенных в природе процессов, как, например, естественный радиоактивный распад. Некоторые ученые считают, что причина этого кроется в работе гигантского атомного реактора в земных глубинах. Только в нашем геореакторе происходит не термоядерный синтез, как в звездах, а цепные реакции деления



АНИСИЧКИН Владимир Федорович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск). Область научных интересов: физика взрыва, космогония. Автор и соавтор 75 научных работ



БЕЗБОРОДОВ Александр Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-энергетического института (Обнинск). Область научных интересов: физика ядра, математическое моделирование. Автор и соавтор около 60 научных работ

В 1972 г. на заводе во Франции, производящем обогащенное ядерное топливо, случилось ЧП. До сих пор считалось, что изотопный состав природного урана повсюду на Земле одинаков. Однако в одной партии исходного сырья обнаружилось заметно меньше урана-235, чем обычно. Комиссариат по атомной энергии начал расследование.

Специалисты увидели в случившемся не злой умысел, но потрясающий природный феномен. Оказалось, что около 1,8 млрд лет назад на нескольких участках уранового месторождения в Окло (Габон), откуда поступила партия урана, происходили *цепные ядерные реакции деления*. Иными словами, там работал настоящий ядерный реактор, только не рукотворный, а природный! В частности, при изучении продуктов деления одного из таких реакторов было установлено, что он действовал в течение нескольких сотен тысяч лет в *импульсном режиме* – с рабочим циклом в полчаса и перерывом 2,5 часа, – выжигая уран-235.

Почему вообще так важна роль урана-235? Дело в том, что именно этот изотоп охотно делится под воздействием медленных нейтронов в отличие от преобладающего изотопа – урана-238, который может делиться только быстрыми нейтронами (а быстрые – в среде замедляются, и цепная реакция гаснет, не успев начаться).

Таким образом, за миллиарды лет до появления человека природа уже освоила технологию, над реализацией которой в середине XX в. бились лучшие умы планеты.

Сама идея атомного реактора в земных недрах возникла примерно в это же время – и почти за двадцать лет до открытия феномена Окло! В 1953 г. американские физики Дж. Везерилл и М. Ингрэм выдвинули смелую гипотезу, что в древнейшие времена в скоплениях радиоактивных элементов, главным образом урана и тория, могли протекать цепные ядерные реакции.

## ИЗОТОПЫ УРАНА И ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ

Природный уран состоит, в основном, из смеси двух изотопов:  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$  (99,3% и 0,7% соответственно). Период полураспада урана-238 – 4,5 млрд лет, урана-235 – около 700 млн лет. Из-за разной скорости естественного распада соотношение изотопов в природе изменяется со временем: доля более легкого урана-235 неуклонно уменьшается.

$^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$  – родоначальники длинных радиоактивных рядов. Например, уран-238, распадаясь, сначала превращается в торий-234, который, в свою очередь, также распадается. Конечными (стабильными) нуклидами для естественных цепочек распада урана являются изотопы свинца. Суммарное количество энергии, выделяющейся во всей цепочке реакций, около 50 МэВ.

Суть цепной ядерной реакции деления заключается в том, что ядро радиоактивного элемента, например урана-235, захватывая нейтрон, становится неустойчивым и распадается преимущественно с образованием двух крупных осколков и – самое важное! – нескольких нейтронов. Эти нейтроны могут инициировать деление уже нескольких ядер – возникает цепная реакция.

Если потери нейтронов в такой разветвленной цепи реакций будут меньше, чем число вновь образовавшихся, то выделение энергии будет нарастать лавинообразно. В одном акте деления урана высвобождается энергии в 4 раза больше, чем при естественном распаде, причем скорость энерговыделения очень велика. Самые известные примеры процессов такого типа – реакции в атомной бомбе и реакторах АЭС.



Датируя эти предположительные процессы эпохой более 2 млрд лет назад, авторы исходили из соображения, что в середине геологической истории Земли доля изотопа  $^{235}\text{U}$  в общем уране была существенно выше, чем сейчас, и составляла более 3% – как в топливе современных АЭС.

Поиски *геореакторов*, подобных оклоскому, предпринимались впоследствии и в других древних месторождениях, но они успехом не увенчались. Может быть, африканский реактор – это шутка Бога, результат случайного стечения обстоятельств и он действительно уникален? Даже если это так, идея, что в Земле могут идти – причем и в далеком прошлом, и в настоящее время! – ядерные реакции деления, не оставляет ученых.

### Красноречивый гелий

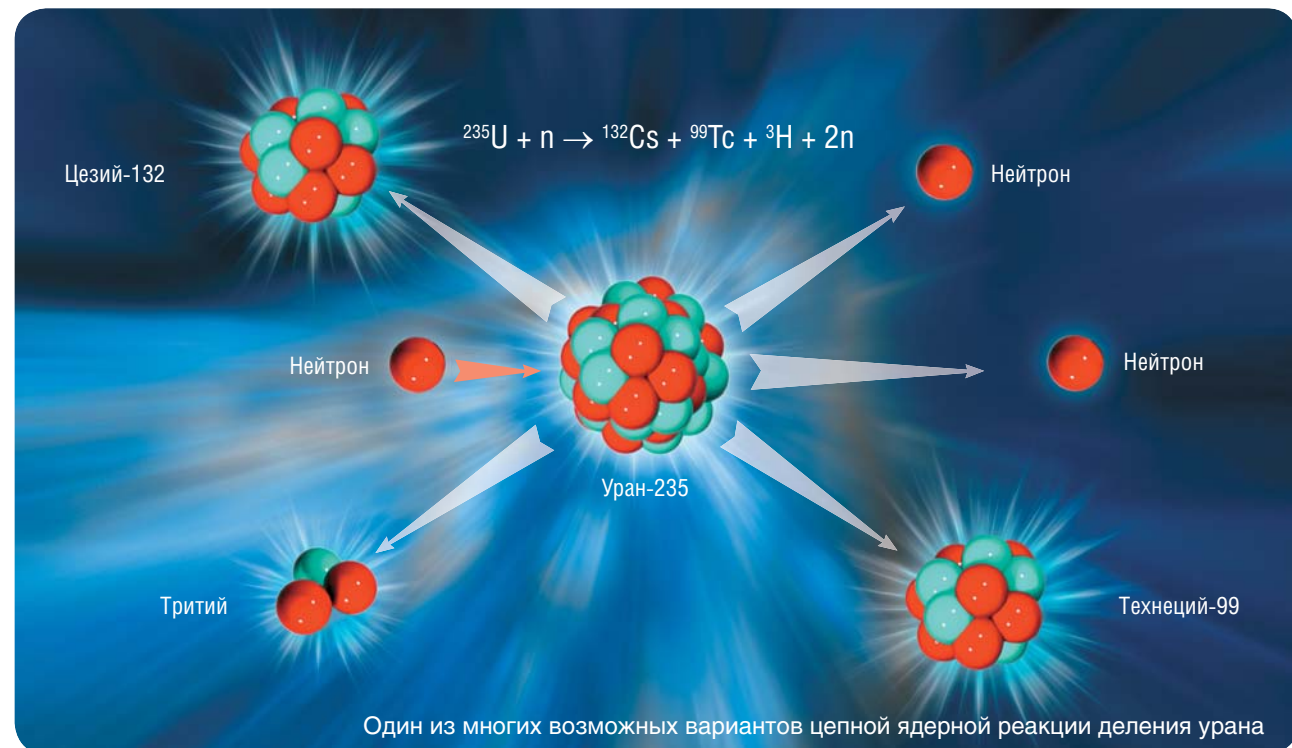
Признаки работы природных реакторов ищут не только в земной коре, но и в недрах планеты. Одна из причин упорства исследователей заключается в том, что Земля излучает тепла примерно в 2,5 раза больше, чем должна отдавать в результате естественного распада радиоактивных элементов в коре (*радиогенное тепло*) и первичного нагрева. (Тепловая энергия, получаемая от Солнца, в этом балансе не учитывается). Если такую большую разницу пытаться объяснить только радиоактивным теплом из внутренних областей планеты, то Земля в целом должна иметь нереально большие запасы радиоактивных элементов.

Но вот в цепных ядерных реакциях как раз выделяется тепла в несколько раз больше, чем при естественном радиоактивном распаде. Цепной механизм выделения энергии мог бы объяснить и упомянутый тепловой дисбаланс, и многие другие необычные явления. И если гипотетические реакторы расположены глубоко в недрах, то понятно, почему следы их активности не удалось найти в урановых месторождениях (за исключением Окло). Искали где ближе, но, может, стоит «копнуть вглубь»?

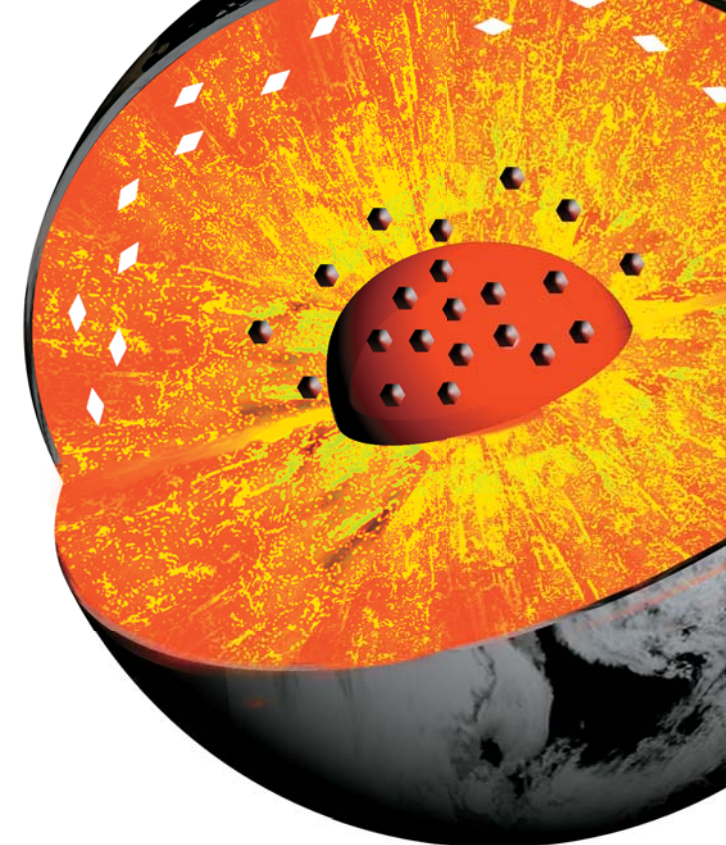
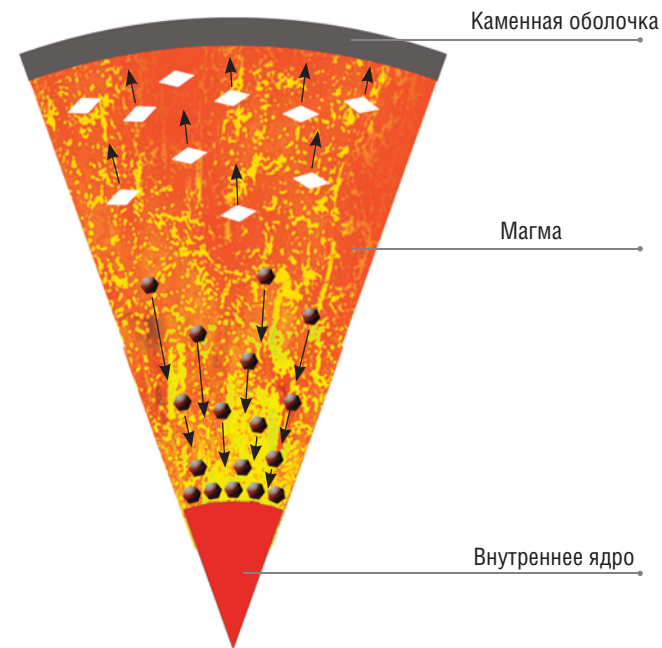
Итак, предположим, что где-то в теле Земли действует такой реактор. По каким признакам его можно обнаружить? Один из методов поиска – анализ продуктов деления, мигрирующих из зоны реакции и достигающих земной поверхности. В частности, очень интересен изотопный состав «солнечного элемента» – гелия.

Природный гелий состоит из двух стабильных изотопов:  $^4\text{He}$  и  $^3\text{He}$ . Некоторая часть гелия-3 поступает в атмосферу Земли с солнечным ветром и при  $\beta$ -распаде трития – тяжелого водорода, образующегося при соударении космических частиц с ядрами атомов, входящих в состав воздуха. Гелий-4 попадает в атмосферу в результате естественного распада урана и тория.

В воздухе на миллион атомов гелия-4 приходится всего полтора атома гелия-3. Но в базальтах срединно-океанических хребтов изотопа  $^3\text{He}$  больше уже в 8 раз, а в некоторых изверженных магматических горных породах – в 40!



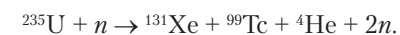
Гравитационное разделение вещества Земли более 4 млрд лет назад. Силикаты, преимущественно  $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$ , – как более легкие, всплывают; тяжелые оксиды урана  $\text{UO}_2$  оседают на твердое внутреннее ядро



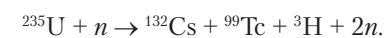
|                                     |                                     |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| ◇                                   | ●                                   |
| Силикаты                            | Оксиды урана                        |
| $\rho \sim 3,5 \text{ г/см}^3$      | $\rho \sim 11 \text{ г/см}^3$       |
| $T_{\text{пл}} \sim 2000 \text{ К}$ | $T_{\text{пл}} \sim 3100 \text{ К}$ |

Как объяснить происхождение гелия с высоким содержанием изотопа  $^3\text{He}$ ? Какие физические процессы могут быть ответственны за это? Обычный радиоактивный распад явно не годится, так как он продуцирует исключительно гелий-4. Попробуем привлечь на помощь ядерные реакции деления.

Известно, что при работе реактора тяжелые ядра, поглощая нейтрон, становятся неустойчивыми и могут делиться на два крупных осколка с испусканием легких заряженных частиц и 2–3 нейтронов. Среди легких заряженных частиц доминируют ядра гелия-4 ( $\alpha$ -частицы); их доля выхода около 90%. Эту реакцию можно записать, например, так:



В реакциях несколько другого типа образуется тритий (доля выхода до 10%):



Радиоактивный тритий, в свою очередь, распадается, испуская электрон ( $\beta$ -распад) и антинейтрино, с образованием гелия-3:



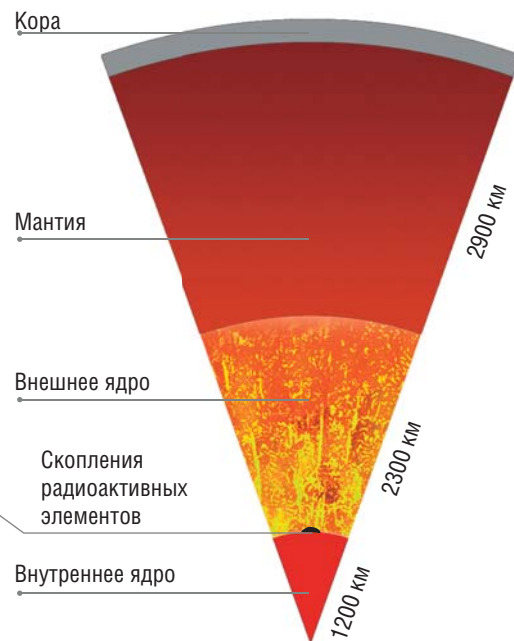
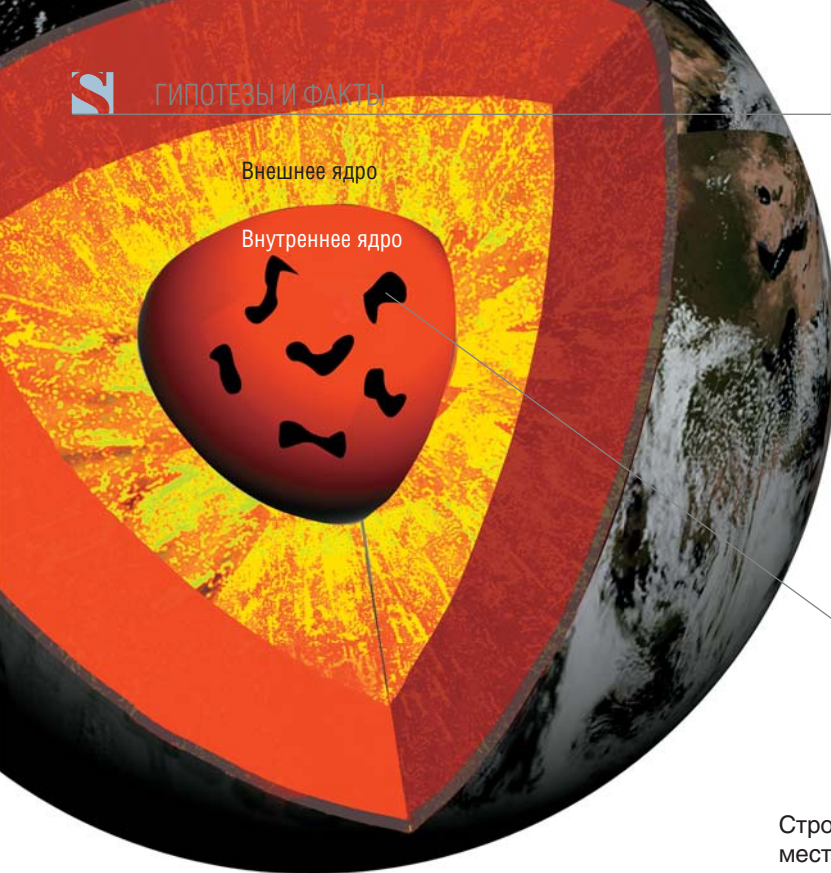
В конечном продукте совокупности таких реакций доли обоих изотопов гелия хотя и отличаются, но представляют собой величины одного порядка. Напомним, что в «стандартном» атмосферном гелии их концентрации различаются на шесть порядков! Таким образом, относительно высокое содержание гелия-3, наблюдаемое в магматических породах, поднявшихся на поверхность из земных недр, может служить косвенным свидетельством работы глубинного геореактора.

### Уран выпал в осадок?

Прежде чем продолжить разговор, хочется еще раз подчеркнуть принципиальное различие между естественным радиоактивным распадом и ядерной реакцией деления, ибо разница эта не всегда очевидна на неисключенный взгляд. Обычная радиоактивность – это самопроизвольный распад атомных ядер; для реакции деления обязательно требуется взаимодействие с внешней частицей (нейтроном). По этой причине для осуществления ядерной реакции нужна достаточная концентрация активного вещества; для спонтанного распада концентрация не имеет никакого значения.

Если в недрах Земли действительно идут цепные реакции, значит, там должны присутствовать скопления радиоактивных элементов (*актиноидов*). Как и где





Строение Земли и предполагаемое месторасположение скоплений радиоактивных элементов – «островов» на поверхности внутреннего ядра

именно они образовались? На этот счет существует множество разных точек зрения: от мантии до геометрического центра Земли.

На рубеже XX–XXI вв. В.Ф. Анисичкин с соавторами предложили обоснованную гипотезу, согласно которой местом критической концентрации урана и тория могла быть поверхность твердого внутреннего ядра Земли. Эта

концепция во многом базируется на работах по растворимости диоксида урана ( $UO_2$ ), проведенных в конце 1990-х гг. в Институте геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск). В экспериментах на аппарате высокого давления типа «разрезная сфера» А. И. Туркиным было показано, что растворимость  $UO_2$  в расплавах на основе железа с ростом давления уменьшается. Исследуемый

диапазон давлений составлял 5–10 ГПа (для сравнения: в центре Земли давление около 360 ГПа). Поскольку в природе уран встречается преимущественно в виде оксидов, то логично сделать вывод: чем глубже, тем хуже будет растворяться уран!

Этот важный экспериментальный факт наводит на мысль, что миграция актиноидов в теле Земли могла быть следующей. После образования планеты в океане магмы, состоящей, в основном, из расплавов железа и силикатов, присутствовали и соединения урана. Со временем магма остывала, и происходило гравитационное разделение вещества по плотности. Силикаты, кристаллизуясь, всплывали в магме, плотность которой за счет железа была выше. Соединения же тяжелых актиноидов, выделяясь из расплава по мере роста давления и кристаллизуясь, оседали на внутреннее твердое железоникелевое ядро планеты.

Из сейсмологических исследований известно, что переходная зона между внешним жидким и внутренним твердым ядром Земли толщиной 2–3 км имеет мозаичную структуру. При этом основными структурными элементами являются относительно тонкие взвешенные слои протяженностью до нескольких десятков километров. Возможно, именно они и являются областями концентрации тяжелых радиоактивных элементов.

### Не можешь найти – моделируй!

Когда речь идет о процессах на глубинах в тысячи километров, следует иметь в виду, что, с одной стороны,

они недоступны непосредственному экспериментальному исследованию, с другой – их не всегда возможно изучать и в лабораторных установках, где трудно создать аналогичные физические условия. Но в современной науке существует еще один универсальный инструмент познания – компьютерное моделирование.

В 2005 г. ученые из Института гидродинамики СО РАН (Новосибирск) и Физико-энергетического института (Обнинск) численно смоделировали различные режимы работы геореакторов, начиная со времени образования Земли. Задача была не из легких, поскольку методы теории реакторов традиционно применяются для расчета процессов длительностью максимум в годы, а здесь потребовалось просчитывать интервалы в миллиарды лет!

Моделируемая среда представляла собой железоникелевый расплав с примесью углерода, в котором находились взвешенные кристаллы диоксида урана. Время начала моделируемых процессов – 4 млрд лет назад (содержание делящегося изотопа  $^{235}U$  в природном уране тогда составляло 16%, т. е. в 20 раз превышало современное значение).

Расчеты показали, что теоретически существуют разные сценарии работы реактора. По некоторым из них его активность могла давно прекратиться, по другим – продолжаться до настоящего времени. Максимальная продолжительность возможна в режиме воспроизводства делящихся нуклидов. При этом уран-238, захватывая нейтрон деления, превращается в плутоний, а плутоний, испуская  $\alpha$ -частицу, – в уран-235:

### КОММЕНТАРИЙ ГЕОЛОГА

В статье популярно изложена гипотеза, предложенная авторами для объяснения энергетической активности Земли. Согласно их идее при кристаллизации магматического океана происходило «гравитационное разделение вещества по плотности», в результате которого силикаты, кристаллизуясь, всплывали, а соединения тяжелых актиноидов оседали на внутреннее ядро планеты. В дальнейшем сконцентрировавшаяся таким образом масса актиноидов, и в первую очередь соединения урана, играла роль ядерного реактора, генерирующего энергию, обусловленную цепными реакциями деления.

К сожалению, в самой основе этой занимательной гипотезы лежит недоразумение. Кристаллизация каких-либо соединений актиноидов в виде самостоятельных минеральных фаз, которые могли бы погружаться в недра планеты, в магматическом океане невозможна. Прежде всего, это обусловлено исключительно низкими концентрациями урана и других актиноидов в протопланетном веществе. При кристаллизации

расплава, который возникает на основе такого вещества, весь уран распределяется в кристаллической решетке породообразующих минералов или на их границах в виде примеси, как и многие другие редкие и рассеянные элементы.

Конечно, образование скоплений редких элементов в природе возможно (вспомним, например, самородное золото), только это происходит в коре и не в результате кристаллизации магматических расплавов, а за счет разгрузки гидротермальных растворов, транспортирующих эти элементы и сбрасывающих их при изменении физических условий.

В ходе геологических процессов зарождающиеся в недрах планеты магматические расплавы вследствие более низкой плотности по сравнению с твердым веществом перемещаются к поверхности. В тех случаях, когда они прорываются на поверхность, возникает вулкан. Когда такой расплав застревает на глубине и кристаллизуется в магматической камере, образуется твердое магматическое тело, называемое *интрузивом*.

Дифференциация вещества по плотности при формировании магматических тел принципиально ничем не отличается от такой дифференциации при затвердевании расплава в магматическом океане. Однако кристаллизующиеся силикаты магния и железа в этих расплавах вопреки предположению авторов обсуждаемой гипотезы не всплывают, а тонут, потому что их плотность всегда выше плотности жидкой фазы. Утверждая, что плотность магмы увеличится за счет железа, авторы упускают из виду, что в магматическом океане металл сразу образует самостоятельную жидкую фазу, не смешивающуюся с силикатной, которая опустится на дно задолго до начала кристаллизации силикатов.

Возвращаясь к интрузивам, заметим, что никаких скоплений минералов, сложенных актиноидами, на дне соответствующих магматических камер нет, несмотря на то, что концентрация урана как в самих интрузивных телах, так и в исходных расплавах зачастую на два порядка превосходит его концентрацию

в протопланетном веществе и магматическом океане. Все происходит ровно наоборот: основная часть урана концентрируется в остаточной жидкости, которая, как правило, собирается в верхней части магматической камеры, после того как основной объем расплава уже затвердел. Поэтому, даже если бы в этих последних порциях расплава и возникли какие-то тяжелые урансодержащие минералы, опускаться им было бы некуда.

Конечно, для объективной оценки обсуждаемой гипотезы необходимы исследования специалистов в различных областях науки. Что касается геологической составляющей, то я считаю, что предложенная концепция пока не подтверждается фактическим материалом.

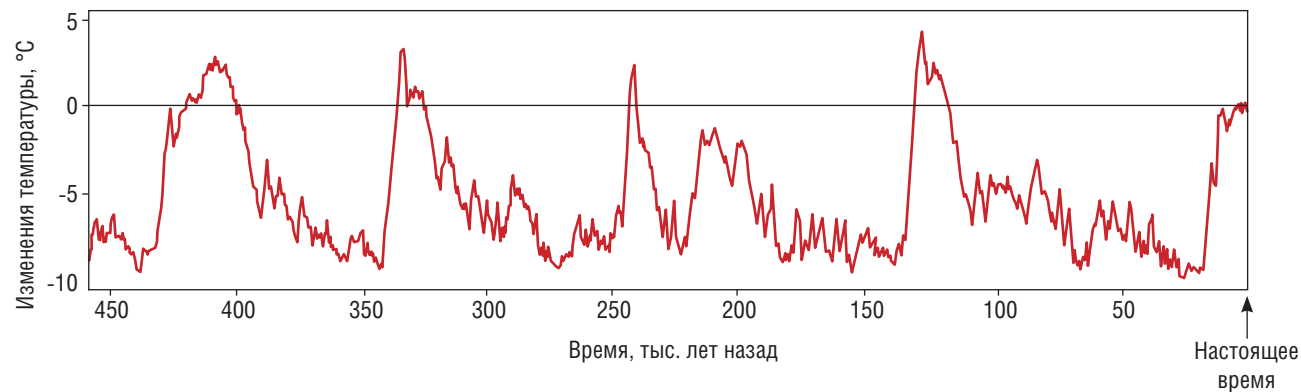
*Ю.Д. Пушкарев, д.г.-м.н., главный научный сотрудник Института геологии и геохронологии докембрия РАН (Санкт-Петербург)*

Ряд глобальных явлений на Земле носит циклический характер с периодом в сотни тысяч и миллионы лет. О причинах этих колебаний нет единого мнения.

**ТО ХОЛОДНО, ТО ЖАРКО**

Отполированные скалы, огромные валуны посреди равнин... Еще в XIX в. эти явления были объяснены воздействием ледников, покрывавших некогда поверхность нашей планеты. По обломочным окаменевшим моренам и ледниково-морским осадкам, обнаруженным на всех континентах, ученые восстановили ледниковую историю Земли за последние 2,5 млрд лет.

В течение этого времени Земля пережила четыре ледниковые эры, каждая эра состояла из ледниковых периодов, а период – из ледниковых эпох. Периодичность потеплений-похолоданий, соответствующая смене ледниковых эпох, составляет около 100 тыс. лет. Подробнейшая информация о палеоклимате получена при бурении ледниковых щитов в Антарктиде. Регулярность потеплений (~ 10 тыс. лет) и похолоданий (~ 90 тыс. лет), надежно установленная в этих исследованиях, может свидетельствовать в пользу импульсного режима работы геореакторов, тепловые потоки от которых достигают поверхности Земли.



Температурные изменения в Антарктиде за последние 450 тыс. лет (относительно современного значения). Результаты получены на основе анализа содержания различных примесей (прежде всего, дейтерия и изотопа кислорода <sup>18</sup>O) в осадках, выпадающих в виде снега и сохранившихся на глубинах до нескольких километров. По: (Jouzel, Masson-Delmotte et al., 2007)



В результате содержание легко делящегося урана-235 поддерживается на достаточно высоком уровне, и получается реактор-размножитель на быстрых нейтронах.

Вполне естественно предположить, что при работе реактора из-за тепловыделения возникают конвективные потоки, вызывающие разрыхление активной зоны. В какой-то момент цепная реакция деления останавливается. Когда выделение тепла прекращается и конвективные потоки ослабевают, уран медленно оседает – цепная реакция возобновляется. Таким образом, геореактор может работать и в импульсном режиме.

Определяющим показателем хода цепной реакции является коэффициент размножения нейтронов *k*, который равен отношению числа нейтронов, вновь образовавшихся в реакциях деления, к количеству нейтронов, поглощенных в ходе реакции либо покинувших активную зону.

Чтобы цепная реакция была возможна, должно выполняться неравенство  $k \geq 1$ . Тогда в каждом новом

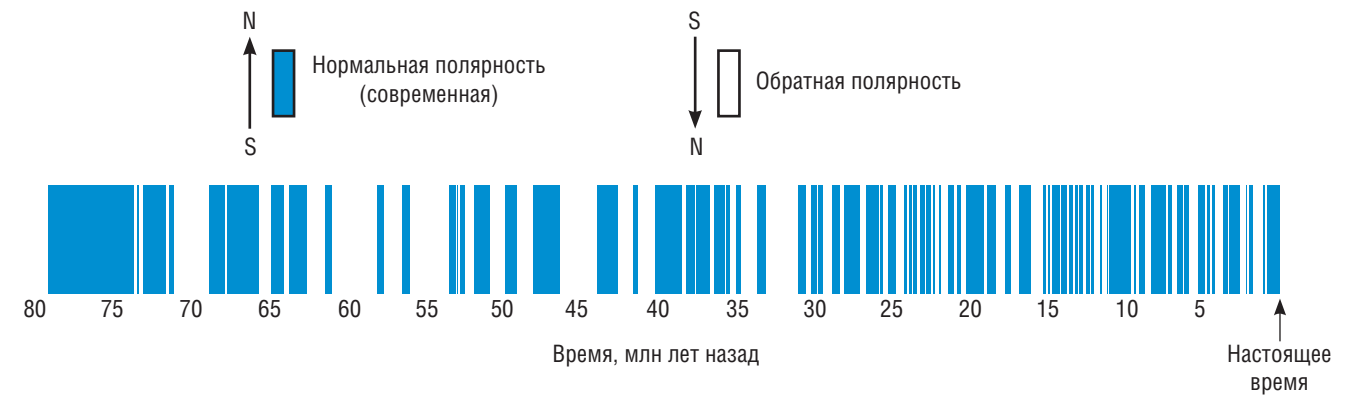
поколении нейтронов становится все больше, и они, в свою очередь, вызывают все больше делений ядер. Возникает лавинообразный процесс. Согласно проведенным расчетам максимально возможный коэффициент размножения ведет себя следующим образом: вначале он падает в течение 1 млрд лет, однако затем более-менее стабилизируется и остается больше единицы вплоть до настоящего времени.

Представляется, что более вероятен импульсный сценарий работы реактора, когда периоды активности перемежаются периодами «простоя». Так, как это было в маленьком природном реакторе Окло, но только с большей продолжительностью циклов. По мнению авторов, временные характеристики рассчитанного импульсного режима можно соотнести с рядом периодических явлений, наблюдаемых на поверхности Земли, таких как глобальные изменения климата или смена магнитных полюсов.

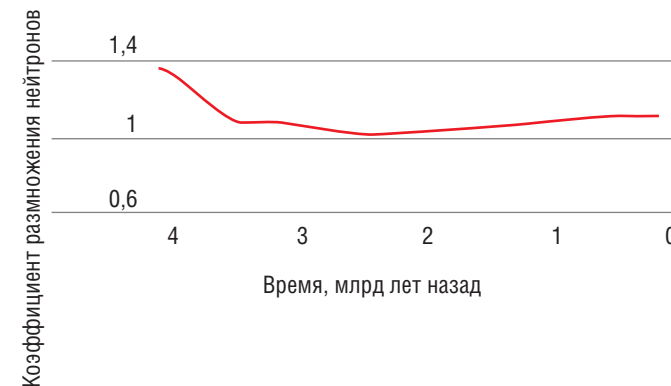
**МАГНИТНЫЙ ШТРИХКОД ПЛАНЕТЫ**

В 1906 г. было обнаружено, что намагниченность неогеновых лав в центральной Франции противоположна направлению современного магнитного поля Земли. Каково значение этого факта? Дело в том, что изверженные породы, застывая, намагничиваются в соответствии с существующим на тот момент направлением магнитного поля. Таким образом, эта «законсервированная» в породе намагниченность наглядно продемонстрировала, что в прошлом поле было другим. Замеры следов магнитного поля в горных породах различного возраста показали, что на протяжении геологической истории Земли оно меняло знак много-

много раз. Инверсии происходили через интервалы времени от десятков тысяч до миллионов лет (средний период – 250 тыс. лет). Почему происходит смена магнитных полюсов? Магнитное поле планеты формируется благодаря циркуляции расплавленного железа во внешнем ядре. Движение электропроводящей жидкости в магнитном поле создает самоподдерживающуюся систему, своего рода геодинамо. Но для образования мощных переменных течений в ядре, приводящих к изменению магнитного поля, необходимы и мощные нестационарные источники тепла. Вполне подходящими кандидатами на эту роль опять-таки являются природные ядерные реакторы.



Магнитостратиграфическая шкала показывает инверсии магнитного поля Земли за последние 80 млн лет. По: (Cande, Kent, 1995)



Результаты расчета коэффициента размножения нейтронов в гипотетическом геореакторе. Моделируемая среда – железоникелевый расплав с примесью углерода и взвешенных кристаллов диоксида урана. Температура – 5000 К, давление – 330 ГПа, удельная мощность реактора –  $0,385 \cdot 10^{-5}$  Вт/см<sup>3</sup>

**Откуда летят геонейтрино?**

Сторонники точки зрения, что Земля является ядерным реактором, сегодня связывают особые надежды с электронным антинейтрино. Эта частица в больших количествах образуется в цепных реакциях, при последовательных β-распадах осколков деления тяжелых ядер.

Нейтрино практически не реагируют с веществом и поэтому обладают огромной проникающей способностью, почти без потерь проходя через все тело Земли. Их регистрация – сложная научная и техническая задача.

В 2005 г. группа исследователей, работавшая на нейтринном детекторе KamLAND (Япония), сообщила о первых результатах регистрации антинейтрино из недр Земли – геонейтрино. В течение двух лет ученые зафиксировали 152 события, но после отсеивания фона осталось всего 25 – по одному в месяц. (Главными источниками фона оказались промышленные реакторы Японии и Южной Кореи).



Полное число антинейтрино может быть частично связано с мощностью действующего геореактора и частично – с естественным распадом различных нестабильных ядер в недрах Земли. Из данных KamLAND следует, что полная плотность потока геонейтрино составляет примерно 16 млн частиц в секунду на кв. см. Это соответствует источнику тепла, порождаемого ядерными реакциями, мощностью от 24 до 60 ТВт. Первое из двух чисел оказалось близким к величине «избыточного» тепла, излучаемого Землей, о котором шла речь выше. И многие специалисты склоняются к мнению, что это объяснение наиболее правдоподобно.

Энергетические спектры нейтрино, образующихся при делении разных ядер, отличаются. При интерпретации данных KamLAND в 2007 г. В.Д. Русов с коллегами выполнили компьютерное моделирование и определили спектральные составляющие геонейтрино от различных внутренних источников – урана-238, тория-232, плутония-239. Суммарную мощность геореактора они оценили в 30 ТВт. Результаты этой работы также свидетельствуют в пользу импульсного режима размножения.

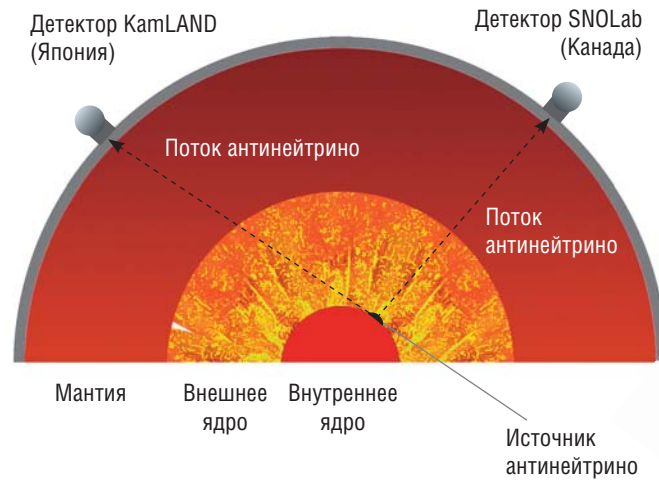
У замечательных экспериментов на KamLAND есть один существенный недостаток: в них нельзя определить расстояние до источника частиц, только направление. Для решения этой и других задач предполагается создать глобальную сеть детекторов. Подобный опыт у международного научного сообщества уже есть: в 2005 г. был запущен проект интеграции четырех нейтринных детекторов на четырех континентах – в Японии, Канаде, Италии и Антарктиде – для прогнозов вспышек сверхновых в Галактике.

Таким образом, в ближайшее десятилетие планируется зарегистрировать геонейтрино в нескольких точках земного шара. Объединение данных разных детекторов позволит наконец установить точное месторасположение источников этих частиц внутри нашей планеты и даст еще один повод «за» или «против» гипотезы «ядерной топки» Земли.

### Вместо послесловия

Известно, что на атомной электростанции может произойти взрыв, если не регулировать ход цепной реакции в реакторе. Есть веские основания полагать, что в далеком прошлом по разным причинам – внутренним или внешним, например при столкновении с астероидом, – медленные ядерные реакции в недрах Земли могли трансформироваться во взрывные.

Если бы взорвался весь уран Земли, событие было бы эквивалентно взрыву тротила в количестве, сравнимом с массой планеты! И Земля перестала бы существовать. Однако даже теоретически трудно представить меха-



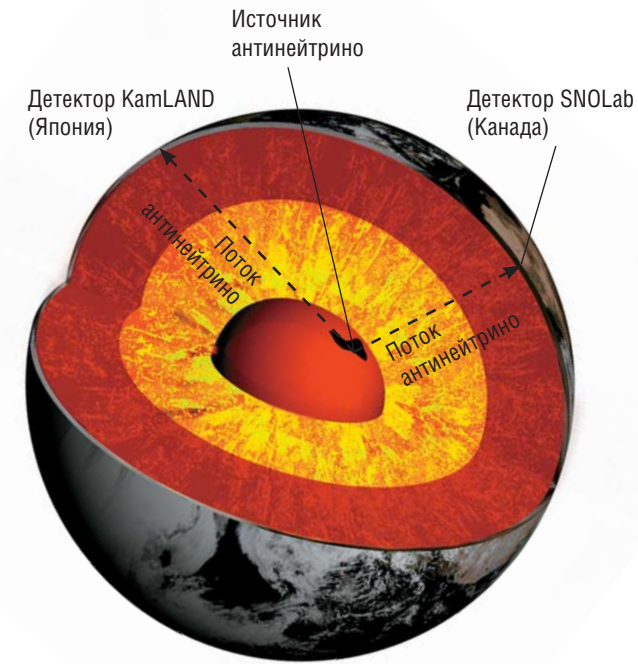
Будущая сеть нейтринных детекторов позволит установить точное месторасположение внутри Земли источников антинейтрино (геореакторов). Из рисунка видно, что источник должен находиться на пересечении траекторий, по которым частицы приходят, по крайней мере, на два детектора

**1 ТВт = 1000 ГВт = 10<sup>12</sup> Вт**  
**Мощность геореактора = 30 000 ГВт**  
**Мощность Саяно-Шушенской ГЭС = 6,4 ГВт**

низм, по которому бы земной уран мог сконцентрироваться и одновременно прореагировать. Но взрыва даже нескольких процентов актиноидов вполне достаточно, чтобы отделить от Земли фрагмент размером с Луну.

Этот «апокалиптический» пассаж касается не только нашей планеты, но и других. Ведь большие тела Солнечной системы образовались из одного протопланетного облака, поэтому и содержание радиоактивных элементов в них может быть схожим. Все планеты, вероятно, прошли стадию гравитационного разделения вещества по плотности, в результате которого тяжелые актиноиды могли сконцентрироваться в их недрах.

Катастрофические ядерные события хорошо объясняют ряд так называемых нерегулярностей в Солнечной системе, казалось бы, ничем между собой не связанных. Среди них аномально большая масса спутника Земли – Луны, малая масса Марса, обратное суточное вращение Венеры, множество хаотично движущихся астероидов и комет... Не исключено, что исследования нашего «домашнего» земного реактора заставят нас по-новому взглянуть и на вопросы эволюции планет.



*Литература*  
 Анисичкин В.Ф. // *Физика горения и взрыва*. – 1997. – Т. 33. – С. 138.  
 Анисичкин В.Ф., Бордзиловский С.А., Караханов С.М. и др. // *Физика горения и взрыва*. – 2009. – Т. 45. – С. 100.  
 Митрофанов В.В., Анисичкин В.Ф., Воронин Д.В. и др. // *V Забавинские научные чтения*. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ ВНИИТФ, 1999. (Тр. междунар. конф.)  
 Овчинников В.М., Краснощеков Д.Н., Каазик П.Б. // *Докл. РАН*. – 2007. – Т. 417. – С. 389.  
 Anisichkin V.F., Bezborodov A.A., Suslov I.R. // *Transport Theory and Statistical Physics*. – 2008. – V. 37. – P. 624.  
 Araki T. et al. // *Nature*. – 2005. – V. 436. – P. 499.  
 Rusov V.D., Pavlovich V.N., Vaschenko V.N. et al. // *Journ. Geophys. Res.* – 2007. – V. 112. – P. 1.

Авторы признательны академику В.М. Титову за поддержку проводимых в СО РАН исследований по цепным ядерным реакциям в недрах планет

### КОММЕНТАРИЙ СПЕЦИАЛИСТА ПО ГЕОДИНАМИКЕ

Сегодня вопрос о природе источника тепла в недрах Земли и его расположении является дискуссионным. Этим темой активно занимаются геологи, химики, физики, математики.

Так, в Институте геологии и минералогии СО РАН разработана модель термохимического плюма – канала, заполненного магматическим расплавом, который простирается из земных недр до поверхности (Н.Л. Добрецов, А.А. Кирдяшкин, А.Г. Кирдяшкин, 2001, 2004). Данные по удельным расходам излияния магм мантийных плюмов за последние 150 млн лет, а также их корреляция с инверсиями магнитного поля Земли (Larson, Olson, 1991) подтверждают наш тезис, что плюмы зарождаются на ядро-мантийной границе.

Плюм формируется при обязательном наличии теплового потока из жидкого ядра. Изучение тепло- и массообмена на подошве термохимического плюма и взаимодействия канала плюма со свободными конвективными течениями в мантии приводит к заключению, что источник тепла действительно расположен в ядре, как и предполагают авторы гипотезы глубинного геореактора.

Что касается изотопного состава гелия, то повышенное содержание гелия-3, обнаруженное в плюмах, указывает на то, что в ядре Земли идут какие-то процессы, связанные с ядерными превращениями. Но, к сожалению, мы очень мало знаем о том, что происходило в начальный момент формирования планеты, и существовал ли, как считают авторы, «океан магмы». Поэтому вопрос о скоплениях актиноидов в ядре еще предстоит разрешить.

Причиной же климатических изменений, о которых упоминают авторы статьи, на мой взгляд, не могут быть колебания температуры в ядре Земли. Ведь глубинные температурные флуктуации передаются на поверхность мантийными конвективными течениями примерно через 100 млн лет, а плюмы могут донести эти изменения за 1–5 млн лет. За это время флуктуации с периодом всего 100 тыс. лет просто исчезнут в восходящем конвективном потоке из-за теплообмена с окружающей мантией.

В любом случае модель природного ядерного реактора на границе внутреннего и внешнего ядра интересна геологам уже тем, что не противоречит имеющимся знаниям в области геодинамики и фактам плюмового магматизма. Безусловно, предложенная гипотеза подлежит дальнейшей разработке, и достоверность ее должны подтвердить новые геологические, геофизические и геохимические данные о планете Земля.

А.Г. Кирдяшкин, д.т.н., главный научный сотрудник Института геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск)