

# ПРИРОДНЫЙ ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР В НЕДРАХ ЗЕМЛИ

**А.А. Безбородов, Н.В. Гусев, И.Р. Суслов, В.И. Фоломеев**

*ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*



Исследуется возможность длительного протекания цепных ядерных реакций деления в недрах Земли на протяжении 4 млрд. лет вплоть до настоящего времени. Природный реактор на быстрых нейтронах в виде «озер» мог образоваться при оседании урана из жидкого слоя на твердое ядро Земли. Приведен механизм концентрирования урана в ядре Земли. В таком слое могла протекать цепная ядерная реакция с воспроизводством новых делящихся нуклидов. Рассчитаны некоторые нейтронно-физические характеристики природного реактора. Наиболее вероятна его работа в импульсном режиме, как это было в случае природного ядерного реактора в Окло (Габон).

## ВВЕДЕНИЕ

Земля излучает примерно в два раза больше тепла ( $\sim 45$  ТВт), чем могла бы отдавать в результате остывания и радиогенного энерговыделения [1,2].

В 1956 г. Курода [3] пришел к выводу, что около 2 млрд. лет назад и ранее, когда доля  $^{235}\text{U}$  превышала 3%, в местах концентрации урана и в присутствии замедлителей нейтронов (например, воды) могли возникать самопроизвольные цепные ядерные реакции деления. В 1972 г. французские специалисты нашли остатки природного ядерного реактора, который работал 1,8 млрд. лет назад в подземном урановом месторождении в Окло (Габон, Африка) [4, 5]. Позже было найдено примерно два десятка реакторных зон в том же районе [6]. Начались исследования других мест концентрации актиноидов и работы природных ядерных реакторов, причем не только в коре, но и в ядре Земли, и в самом центре Земли [7, 8].

Для анализа характеристик геореактора косвенным методом исследования и доказательства его существования служит выход продуктов деления, мигрирующих из зоны реакции и достигающих земной поверхности. Представляет интерес атомное отношение  $^3\text{He}/^4\text{He}$  [8]. Тритий является основным продуктом тройного деления,  $\beta$ -распад которого формирует  $^3\text{He}$ . Отношение  $^3\text{He}/^4\text{He}$  в различных местах земной коры в 6–11 раз выше [9], чем в атмосфере (в среднем в 7,55 раз, в мантии в – 10 раз, в вулканической лаве на Гавайях – в 30 раз). Ведется изучение и других продуктов деления актиноидов природного ядерного реактора, достигших вулканической лавы. Например,  $^{10}\text{Be}$ , присутствие которого в земной атмосфере обусловлено только космическим излучением [10]. Прямым методом исследования природного реактора являются электронные антинейтрино, возникающие в результате  $\beta$ -распада продуктов деления, образующихся после деления тяжелых ядер в ходе цепной ядерной реакции [11]. В мире имеются нейтринные детекторы способные решить эту задачу [12].

© А.А. Безбородов, Н.В. Гусев, И.Р. Суслов, В.И. Фоломеев, 2008

Работа природного ядерного реактора в импульсном режиме, как это было в реакторе Окло [6], может пояснять многие глобальные процессы на Земле как в прошлом, так и в настоящем: смена полюсности магнитного поля Земли (в среднем 1 раз в 200 тыс. лет, например, [7, 8]), изменение климата – локальные ледниковые периоды (за последние 2 млн. лет зафиксировано 20 ледниковых периодов: примерно 90 тыс. лет похолодания и 10 тыс. лет потепления [13,14]).

### МЕХАНИЗМ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ УРАНА НА ТВЕРДОЕ ЯДРО ЗЕМЛИ

Ядро Земли на ~90% состоит из железоникелевой смеси, причем ~80% приходится на железо, ~10% – на никель [15, 16]. Остальное – легкие химические элементы в составе земного ядра, которые должны уменьшать суммарную плотность ядра до геофизических значений, по сравнению с чистой железоникелевой смесью. Указывается [16], что такими легкими элементами могут быть достаточно распространенные в Солнечной системе C, N, O. В работах [17, 18] приведены обоснования того, что основным таким элементом может быть углерод в количестве до 10% масс. Как указывается, например, в монографии [19] в силикатной магне (первоисточнике всех месторождений) уран находится в виде  $UO_2$ .

Для определения поведения урана в недрах планеты была проведена серия экспериментов при давлении 5, 7 и 10 ГПа и температуре 1900–2500 К, в которых исследовано взаимодействие диоксида урана с железоникелевым расплавом [20]. Эксперименты проведены на многопуансонном аппарате высокого давления типа «разрезная сфера». Исходные образцы диаметром 5, высотой 10 мм прессовали из урансодержащих порошков и механической смеси железа и никеля в различной пропорции. Трубчатый графитовый нагреватель, внутри которого в оболочке на основе диоксида циркония помещали исследуемый образец, поддерживал высокую температуру. Время выдержки при высоком давлении и температуре составляло 4–6 ч. На рис. 1 показано полученное в экспериментах распределение диоксида урана по высоте образцов, разрезанных вдоль оси. Образцы состояли из однородных смесей спрессованных порошков железа и частиц диоксида урана размером 2–3 мкм. Видно, что при давлении 5 ГПа растворилось больше диоксида урана, чем при давлении 10 ГПа (при одинаковой исходной концентрации  $10^{-2}\%$

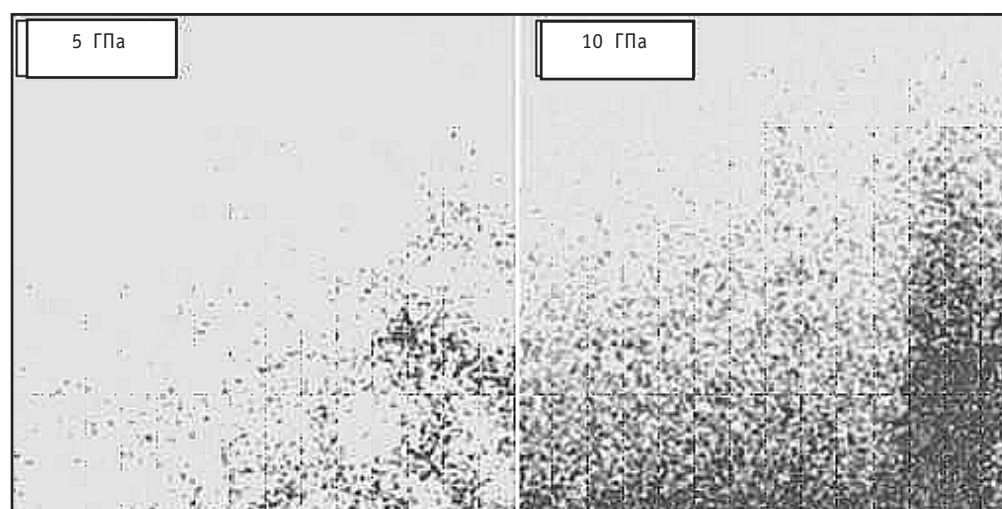


Рис. 1. Распределение  $UO_2$  в железе после охлаждения и снятия давления, полученное методом масс-спектрометрии вторичных ионов

по массе) и что более тяжелые частицы диоксида оседают на дно рабочей ячейки в расплаве железа. Растворимость диоксида урана, которая уже при 5 ГПа оказалась менее чем  $10^{-2}\%$  по массе, была определена лазерно-люминесцентным методом и составила  $3,2 \cdot 10^{-4}\%$  по массе при 10 ГПа и 2300 К. Таким образом, она снижается с ростом давления.

Аналогичные эксперименты с той же целью были проведены и канадскими специалистами [21].

После образования Земли в магме, состоящей в основном из смесей растворов и расплавов железа и силикатов, были и соединения урана. Силикаты, кристаллизуясь при очень высоком давлении, вытесняют из своей решетки соединения актиноидов. Соединения урана в виде кристаллов оказываются в железоникелевом расплаве. Со снижением интенсивности бомбардировки планеты выпадающим веществом [16] и уменьшением выделения тепла короткоживущими радиоактивными элементами магма относительно успокаивается, и становится все более интенсивной гравитационная дифференциация вещества по плотности. Силикатные частицы поднимаются вверх, железоникелевый расплав с взвешенными в нем кристаллами актиноидов опускается к ядру Земли. С повышением давления кристаллизуется и оставшаяся часть растворенных в металлическом расплаве актиноидов. Как более плотные такие частицы оксидов урана с уменьшением тепловой конвекции в жидком слое оседают на твердое ядро планеты.

В результате анализа большого количества сейсмических трасс (более 300 тыс.), проходящих через земное ядро, обнаружено явление анизотропии волновых свойств внутреннего ядра [22], связанное с наличием относительно тонкого слоя повышенной плотности на границе жидкого и твердого ядра [23, 24], который может являться средоточием для актиноидов, препятствуя их проникновению вглубь твердого ядра.

При гравитационной дифференциации вещества планеты химически устойчивые и высокоплотные соединения актиноидов могли опускаться и концентрироваться на твердом ядре Земли (рис. 2).

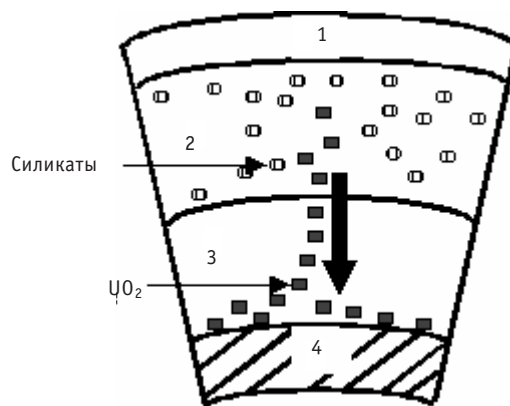


Рис. 2. Механизм оседания диоксида урана на внутреннее ядро Земли: 1 – кора Земли, 2 – магма, 3 – жидкое ядро Земли, 4 – твердое ядро Земли

## РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Моделируемая среда представляет собой область железоникелевоуглеродного расплава (в соотношении 80:10:10% по массе) плотностью  $12 \text{ г/см}^3$ , и взвешенных в нем кристаллов диоксида урана плотностью  $19,5 \text{ г/см}^3$ , при температуре 5000 К и давлении 330 ГПа. Плотности получены специалистами из Новосибирска [17, 25] по ударно-волновым данным и обобщенным ударным адиабатам. Время начала моделирования 4 млрд. лет назад. Вследствие недостатка эффективно-го замедлителя цепная реакция деления идет в основном на быстрых нейтронах. Такая среда является совокупностью «озер» актиноидов на неровной поверхности [24, 26] твердого ядра Земли.

Из-за тепловыделения и конвективных потоков происходит разрыхление актив-

ного слоя, что вызывает уменьшение объемной концентрации кристаллов урана и приводит к подкритичности и медленному уменьшению потока нейтронов. Энерговыведение снижается, конвективные потоки уменьшаются, уран оседает, его объемная концентрация увеличивается, что приводит к надкритическому состоянию. Таким образом, конвективное разрыхление слоя действует как отрицательная обратная связь по мощности нейтронного процесса, который может идти в квазистационарном режиме. Естественный процесс генерации и удаления продуктов деления за счет гравитационной сепарации представляет управляющий механизм, который может альтернативно останавливать и возобновлять работу реактора, как отмечается в работе [7]. За счет энергии, аккумулированной радиационными дефектами, атомы могут получать энергию, превышающую энергию связи. Образующиеся первично выбитые атомы способствуют появлению вторично выбитых, и в результате возникает каскад смещенных атомов. Накопление дефектов увеличивает потенциальную энергию вещества. Этот процесс известен для графита и при определенных условиях (повышение температуры) энергия может спонтанно выделиться [27, 28]. Для природного реактора наличие углерода приведет к выбросу вещества из зоны реакции и последующему восстановлению его работы за счет гравитации. Таким образом, количество актиноидов в кристаллах урана поддерживается постоянным, несмотря на деление. При фиксированной доле расплава количество делящегося материала в единице объема зоны ядерной реакции постоянно, за счет выгорания меняется лишь изотопный состав и толщина слоя. Работу природного ядерного реактора можно сравнить с высокотемпературным реактором – подача топлива (сверху) в активную зону в виде шаровых твэлов [29].

### ВОЗМОЖНЫЕ СЦЕНАРИИ РЕАКЦИИ

Можно приближенно оценить диапазон изменения выделившейся энергии в зависимости от сценария реакции.

Пусть  $E_\alpha$  – энергия выделяющаяся при  $\alpha$ -распаде всего урана,  $E_f$  – благодаря делению (200 МэВ выделяется при делении ядра урана; около 50 МэВ во всей цепочке  $\alpha$ -распада).  $E_f = 4E_\alpha$ . Тогда суммарное выделение энергии находится в пределах  $E_\alpha \leq E_s \leq 4E_\alpha$ . С учетом того, что за 4 млрд. лет распалась по  $\alpha$ -каналу примерно половина всего урана, можно считать, что выделилась энергия  $E_{\alpha,4} = 0,5E_\alpha$ .

*Сценарий 1.* Цепная реакция деления невозможна из-за больших конвективных потоков и большой объемной доли расплава. Изотопная кинетика осуществляется по каналу  $\alpha$ -распада;  $E_{s,4} = 0,5E_\alpha$ .

*Сценарий 2.* Цепная реакция деления невозможна, когда концентрация  $^{235}\text{U}$  падает ниже критического уровня. Появление новых делящихся нуклидов мало. Оставшийся делящийся материал продолжает выделять тепло.  $E_{s,4} = f E_{f,4} + 0,5(1 - f) E_\alpha$ , где  $f$  – доля разделившихся ядер,  $f = x_5 f_5$ ,  $x_5$  – доля ядер  $^{235}\text{U}$  в исходной композиции,  $f_5$  – разделившийся  $^{235}\text{U}$ . 4 млрд. лет назад  $x_5$  было ~ 16,5%. Возможно, что около половины ядер  $^{235}\text{U}$  выгорело до потери критичности. Тогда  $E_{s,4} = 0,6E_\alpha$ .

*Сценарий 3. Режим размножения.* При начальном этапе деления  $^{235}\text{U}$  новые делящиеся нуклиды появляются с высокой скоростью. Получается нестандартный быстрый бридер.  $^{238}\text{U}$  превращается в  $^{235}\text{U}$  за счет  $\alpha$ -распада  $^{239}\text{Pu}$ . Если реакция продолжается до настоящего времени, то по каналу деления энергию может выделить также примерно половина актиноидов.  $E_{s,4} = 2,25E_\alpha$ , т.е. увеличение примерно в 5 раз.

*Сценарий 4. Импульсный режим.* Похож на предыдущий. Цепная реакция деления происходит в течение короткого времени, и затем в течение длительного вре-

мени происходит процесс осаждения делящегося вещества на твердое ядро. Затем процесс повторяется. Энерговыведение такое же, как и в сценарии 3.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗОТОПНОЙ КИНЕТИКИ

Используются сечения взаимодействия нейтронов с материалами среды БНАБ [30, 31] 26 энергетических групп. Для описания изотопной кинетики делящихся нуклидов методом конечных разностей решается система уравнений вида [32]:

$$dN_i/dt = -C_i - f_i - \lambda_i N_i + C_{i-1} + \lambda_{j \rightarrow i} N_j,$$

где  $N_i$  – концентрация нуклида  $i$  в рассматриваемом материале;  $C_i$  – радиационный захват;  $f_i$  – деление;  $\lambda_i$  – константа распада  $i$ -го нуклида;  $\lambda_{j \rightarrow i}$  – константа  $j$ -го нуклида, из которого при распаде получается нуклид  $i$ . Поскольку все протекающие процессы приводят к медленным изменениям, удовлетворительные результаты дает использование явной схемы:

$$N(t + \Delta t) = N(t) + F(t)\Delta t,$$

где  $F(t)$  – правая часть вышеприведенного уравнения, вычисленная для момента времени  $t$ . Активный слой описывается гомогенизированной смесью железоникелевоуглеродного расплава и кристаллов диоксида урана. Зависящие от времени макроконстанты гомогенизированной среды определяются как

$$\Sigma(t) = (1 - C(t))\Sigma_{fuel}(t) + C(t)\Sigma_{melt},$$

где  $C(t)$  – объемная доля расплава в слое в момент времени  $t$ ,  $\Sigma_{fuel}(t)$  – макроконстанты актиноидов в момент времени  $t$ ,  $\Sigma_{melt}$  – независимые от времени макроконстанты расплава. Макроконстанты актиноидов  $\Sigma_{fuel}(t)$  получаются умножением ядерных коцнтраций нуклидов актиноидов, вычисляемых из уравнений изотопной кинетики, на их не зависящие от времени микроконстанты и суммированием по всем рассматриваемым нуклидам. По аналогии с рекомендациями из работы [33, с.68] наряду с общим временным циклом предусматривается дополнительное разбиение на временные интервалы. Изменяющаяся по времени доля расплава  $C(t)$  выбирается из условия критичности слоя – равенства эффективного коэффициента размножения единице. Пространственно-энергетическое распределение нейтронов в активном слое описывается в приближении пространственно-независимой утечки ( $B^2$ -приближении), сводящей задачу к эффективной нульмерной. Использование  $B^2$ -приближения для целого ряда задач моделирования воспроизводства ядерного топлива в быстрых реакторах [34, 35] показывает, что данное приближение позволяет получить достаточно адекватные качественные оценки основных эффектов, определяющих динамику моделируемого процесса. Утечка рассчитывается по толщине слоя  $H$  по формуле  $B^2 = \pi^2/H^2$ . При заданном значении  $C(t)$  эффективный коэффициент размножения определяется из уравнения баланса в многогрупповом  $B^2$ -приближении. Критическая доля расплава итерационно находится из условия  $k_{эф} = 1$  с использованием итерационного метода Ньютона:

$$C^{(i+1)} = C^{(i)} + (1 - k_{эф}^i) / (dk_{эф}^i / dC),$$

в котором значение производной  $dk_{эф}^i / dC$  определяется по разностной формуле на двух последовательных итерациях. Условно-критическое уравнение переноса нейтронов определяет нейтронные потоки с точностью до умножения на произвольную константу, которая выбирается из условия нормировки на заданную мощность, выделяемую при делении. Поскольку в модели выделяемая энергия отводится через поверхность неизменной площади, то предполагается, что мощность реакции на единицу этой поверхности постоянна.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

«Глубина озера»  $Z$  равна сумме эффективной толщины слоя актиноидов  $Z_f$  и перемешанного с актиноидами расплава  $Z_m$  с соотношением объемов  $1 - C(t)$  и  $C(t)$ . Максимально возможный при заданном состоянии озера актиноидов и их нуклидном составе эффективный коэффициент размножения  $k_{эф}^{max} > 1$  определяется толщиной слоя актиноидов  $Z_f$  – глубиной озера. В табл. 1 представлены суммарное энерговыделение и продолжительность критичности в зависимости от глубины озера актиноидов  $Z_f$  для нейтронной мощности  $10^{-4}$  Вт/см<sup>3</sup>, соответствующей сценарию 4 – выгоранию основной массы актиноидов по каналу деления.

Энерговыделение и продолжительность критичности показывают, что при начальной толщине в десятки метров они очень слабо влияют на качественные характеристики процесса. Поэтому результаты для начальной толщины 30 м являются представительными.

Таблица 1

**Суммарное энерговыделение и продолжительность критичности в зависимости от глубины озера актиноидов для нейтронной мощности  $10^{-4}$  Вт/см<sup>3</sup>**

Начальная толщина слоя актиноидов, м	Энерговыделение в относительных единицах	Продолжительность критичности, млрд. лет
30	1	0,47
60	2,01	0,54
90	3,02	0,59

Зависимость от времени  $k_{эф}^{max}$  от задаваемого уровня мощности представлена на рис. 3. Четыре млрд. лет назад стартовый  $k_{эф}^{max} = 1,36$  во всех случаях один и тот же.

При первом сценарии изотопной кинетики (при нулевой мощности деления, кривая 1) за счет более быстрого распада <sup>235</sup>U по сравнению с <sup>238</sup>U  $k_{эф}^{max}$  становится меньше единицы примерно через 1 млрд. лет (т.е. 3 млрд. лет назад) и цепная реакция деления прекращается. При втором сценарии (мощность  $0,3 \cdot 10^{-5}$  Вт/см<sup>3</sup>, кривая 2) первые 700 млн. лет  $k_{эф}^{max}$  убывает быстрее, чем при отсутствии деления, однако затем происходит частичная компенсация выгорания и  $\alpha$ -распада накоплением, и кривая идет выше, чем в предыдущем случае. При третьем сценарии (мощ-

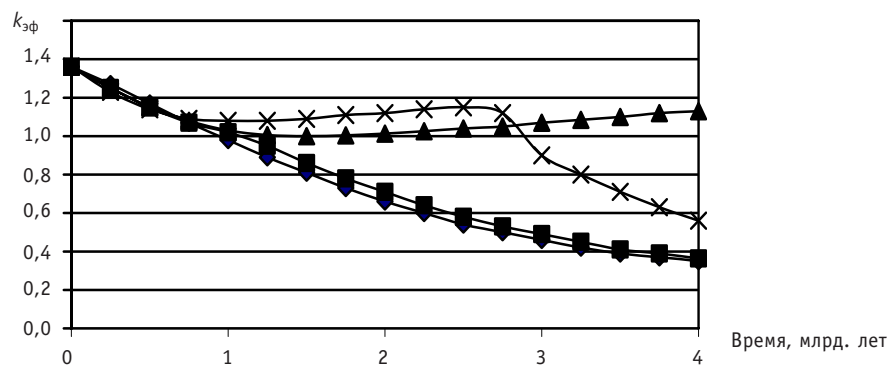


Рис. 3. Изменение  $k_{эф}$  при различной мощности деления: —◆— — кривая 1; —■— — кривая 2; —▲— — кривая 3; —×— — кривая 4



ность  $0,3852 \cdot 10^{-5}$  Вт/см<sup>3</sup>, кривая 3) вначале  $k_{\text{эф}}^{\text{max}}$  падает в течение 1 млрд. лет, затем стабилизируется и остается значительно выше единицы весь рассматриваемый интервал времени. При дальнейшем увеличении мощности (мощность  $0,8 \cdot 10^{-5}$  Вт/см<sup>3</sup>, кривая 4) наблюдается спад на начальном этапе. В интервале 800–2750 млн. лет  $k_{\text{эф}}^{\text{max}}$  стабилизируется на высоком уровне 1,10–1,15. Однако затем из-за более быстрого выгорания становится ниже, чем в предыдущем случае и после 2800 млн. лет становится меньше единицы. Процесс определяется в основном <sup>235</sup>U и <sup>238</sup>U, вклад остальных нуклидов незначителен. На рис. 4 представлена зависимость от времени обогащения по <sup>235</sup>U.  $C = {}^{235}\text{U}/({}^{235}\text{U}+{}^{238}\text{U})$  для того же набора мощности. Стартовое значение 4 млрд. лет назад во всех случаях одно и то же – 0,165. При нулевой мощности деления  $C$  (кривая 1) монотонно падает до современного уровня 0,0072. При повышении мощности деления в первые 500 млн. лет происходит более быстрое снижение обогащения, затем оно замедляется (кривая 2) и даже стабилизируется либо до настоящего времени (кривая 3), либо до момента, когда количество актиноидов уменьшается ниже уровня, необходимого для поддержания цепной реакции (кривая 4).

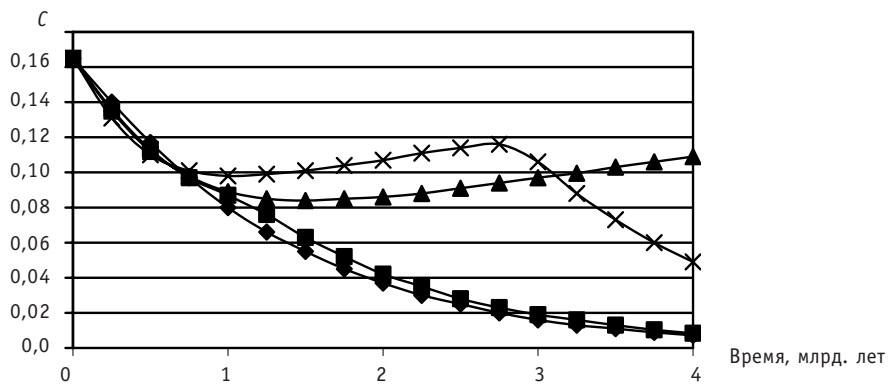


Рис. 4. Изменение обогащения  $C$  при различной мощности деления: —◆— кривая 1; —■— кривая 2; —▲— кривая 3; —×— кривая 4

В табл. 2 приведена зависимость отношения суммарного энерговыделения к энерговыделению при сценарии 1, отношения числа делений к числу альфа-распадов и  $k_{\text{эф}}^{\text{max}}$  в настоящее время от нейтронной мощности. Видно, что процесс деления может продолжаться до настоящего времени при попадании отношения числа делений к числу альфа-распадов в узкий диапазон 0,7–0,9. При этом суммарное энерговыделение увеличивается в 3,5–4,5 раз.

Выше были приведены результаты для непрерывно протекающей реакции. Однако наиболее вероятным представляется реакция в импульсном режиме, когда периоды критичности перемежаются периодами отсутствия цепной реакции, как это было в природном реакторе Окло [6]. В табл. 3 представлен ряд макроскопических параметров для реакции в импульсном режиме.

### ЭКСПЕРИМЕНТЫ С АНТИНЕЙТРИНО

Подтверждением существования геореактора являются экспериментальные работы на нейтринных детекторах в целом ряде стран. Электронные антинейтрино образуются в результате  $\beta$ -распада продуктов деления тяжелых ядер. В работе [36] на основе реакции

Таблица 2

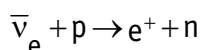
**Отношение суммарного энергосвечения к энергосвечению при сценарии 1, отношение числа делений к числу  $\alpha$ -распадов,  $k_{\alpha\phi}^{\max}$  в настоящее время в зависимости от нейтронной мощности**

Мощность, $10^{-6}$ Вт/см <sup>3</sup>	Энергосвечение в относительных единицах	Отношение числа делений к числу $\alpha$ -распадов	$k_{\alpha\phi}^{\max}$
0	1	0	0,350
0,3	1,54	0,15	0,364
0,375	1,82	0,23	0,384
0,3833	1,89	0,25	0,393
0,3852	3,67	0,68	1,130
0,49	4,37	0,90	1,082
0,493	4,39	0,905	1,046
0,49567	4,40	0,91	1,006
0,6	4,57	1,03	0,748
0,8	4,81	1,23	0,560
1,0	4,98	1,41	0,465

Таблица 3

**Изменение макроскопических параметров среды в импульсном процессе выгорания и  $\alpha$ -распада до настоящего времени (при мощности деления  $8 \cdot 10^{-6}$  Вт/см<sup>3</sup>)**

Параметры	Время, млрд. лет назад								
	4	3,5	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0
Обогащение по <sup>235</sup> U, %	16,5	11,2	8,9	8,5	8,7	9,2	9,8	10,4	11
Толщина слоя, см	3000	2469	2030	1650	1311	1006	731	483	262
Коэффициент воспроизводства	0,59	0,94	1,2	1,27	1,23	1,16	1,09	1,03	0,96



даются рекомендации по поиску сигналов от источников: 1) работающих энергетических ядерных реакторов; 2) от урана и тория в пределах коры Земли; 3) от геореактора, создающего сигналы по всей земной поверхности. И обосновывается возможность отделения первых двух (из-за разных направлений) от сигналов геореактора. В Садберийской нейтринной обсерватории (SNO, Канада) было установлено существование осцилляций (превращений) электронных нейтрино [36]. Построенный в Камиока (Западная Япония) детектор KamLAND с массой мишени 1 тыс. т первоначально был использован для определения нейтринных осцилляций от промышленных ядерных реакторов, что было определено. Используется для поиска геонейтрино. Исследования планируются в подземной лаборатории Гран-Сассо на детекторе Borexino (Италия). Планируется строительство детектора на острове Кюрасао (Нидерланды) [37]. Аналогичные исследования ведутся на Южном полюсе (проект Geomanda, США), на американском континенте (Homestake), на подводном детекторе на Гавайях [38]. Перспективная работа делается на Баксанской нейтринной обсерватории (Институт ядерных исследований РАН, Россия), с использованием большого сцинтилляционного спектрометра [39].



Работа геореактора подтверждает объяснение феномена (Ю.А. Шуколюков [40]) аномального ксенона Земли (превышение отношения количества младших изотопов ксенона к  $^{136}\text{Xe}$  от обычного их отношения) как продукта нейтронно-индуцированного деления  $^{235}\text{U}$  – не только в минералах земной коры в прошлом, но и в породах, происходящих из глубинных слоев Земли – из мантии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Соединения урана могли концентрироваться над твердым внутренним ядром Земли в количествах, достаточных для начала цепных ядерных реакций млрд. лет назад. Самоподдерживающаяся цепная ядерная реакция деления на границе жидкого и твердого ядра Земли начавшись в прошлом, при определенных уровнях мощности может продолжаться до настоящего времени, напоминая бридерный режим ядерного реактора на быстрых нейтронах.

Авторы признательны акад. В.Е. Фортову и проф. В.В. Митрофанову за внимание к данной работе.

**Исследования проведены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (проект № 07-02-96410).**

## Литература

1. Montelli R., Nolet G., Dahlen F.A. et al. Finite-Frequency Tomography Reveals a Variety of Plumes in the Mantle//Science. – 2004. – V. 303. – P. 338-343.
2. Anderson O.L. The power balance at the core-mantle boundary//Physics of the Earth and Planetary Physics. – 2002. – V. 131. – P. 1-17.
3. Kuroda P.K. On the Nuclear Physical Stability of the Uranium Minerals//Journal of Chemical Physics. – 1956. – V. 25. – № 4. – P. 781-782.
4. Cowan G.A. A Natural Fission Reactor//Scientific American. – 1976. – V. 235. – P. 36-47.
5. Петров Ю.В., Назаров А.И., Онегин М.С., Петров В.Ю., Сахновский Э.Г. Нейтронно-физический расчет свежей зоны природного ядерного реактора Окло//Атомная энергия. – 2005. – Т. 98. – Вып. 4. – С. 306-316.
6. Meshik A., Hohenberg C., Pravdivtseva O.V. Record of cycling operation of the natural nuclear reactor in the Oklo/Okelobondo area in Gabon//Physical Review Letters. – 2004. – V. 93. – № 18. – P. 182-190.
7. Hollenbach D.F., Herndon J.M. Deep-Earth reactor: Nuclear fission, helium, and the geomagnetic field//Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2001. – V. 98. – № 20. – P. 11085-11090.
8. Herndon J.M. Nuclear georeactor origin of oceanic basalt  $^3\text{He}/^4\text{He}$ , evidence, and implications//Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2003. – V. 100. – № 6. – P. 3047-3050.
9. Anderson D.L. The statistics of helium isotopes along the global spreading ring system and the central limit theorem//Geophysics Research Letters. – 2000. – V. 27. – № 16. – P. 2401-2404.
10. Raisbeck G.M., Yiou F., Bourles D. et al. Evidence for two intervals of enhanced  $^{10}\text{Be}$  deposition in Antarctic ice during the last glacial period//Nature. – 1987. – V. 326. – P. 273-277.
11. Rusov V.D., Pavlovich V.N., Vaschenko V.N., Tarasov V.A., Zelentsova T.N., Bolshakov V.N., Litvinov D.A., Kosenko S.I., Byegunova O.A. Geantineutrino spectrum and slow nuclear burning on the boundary of the liquid and solid phases of the Earth's core//Journal of Geophysical Research. September, 2007. – V. 112. – B09203, – doi:10.1029/2005JB004212. – P. 116.
12. Araki T., Enomoto S., Furuno K. et al. Experimental investigation of geologically produced antineutrinos with KamLAND//Nature. – 2005. – V. 436. – P. 499-503.

13. *Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D. et al.* Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica//Nature. – 1999. – V. 399. – P. 429-436.
14. *Pollard D.* An investigation of the astronomical theory of the ice ages using a simple climate-ice sheet model//Nature. – 1978. – V. 272. – P. 233-235.
15. *Birch F.* Density and composition of the mantle and core//Journal of Geophysical Research. – 1964. – V. 69. – № 20. – P. 4377-4390.
16. *Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С.* Планеты земной группы. – М.: Наука, 1990.
17. *Anisichkin V.F.* Shock-wave data as evidence of the presence of carbon in the earth's core and lower mantle//Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2000. – V. 36. – № 4. – P. 516-522.
18. *Титов В.М., Анисичкин В.Ф., Бордзиловский С.А., Караханов С.М., Туркин А.И.* Измерение скорости звука за фронтом ударной волны в смесях железа с алмазом//Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40. – № 4. – С. 117-130.
19. *Синев Н.М.* Экономика ядерной энергетики. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
20. *Mitrofanov V.V., Anisichkin V.F., Voronin D.V., Turkin A.I.* Possibility of the atomic explosion energy release in planets bowels/Proceedings of the International Conference «V Zababakhin Scientific Talks», Snezhinsk, Russia, September 21-25, 1998. RFNC-VNIITF. – 1999. – Part I. – P. 67-76.
21. *Xuezhao Bao and Secco R.A.* U solubility in Earth's core//arXiv:astro-ph/0606634, 2006.
22. *Кузнецов В.В.* Анизотропия свойств внутреннего ядра Земли//Успехи физических наук. – 1997. – Т. 167. – № 9. – С. 1001-1012.
23. *Адушкин В.В., Ан В.А., Овчинников В.М., Краснощеков Д.Н.* О скачке плотности на внутренней границе земного ядра по наблюдениям волн PKiKP на расстояниях около 6°//Доклады Академии наук. – 1997. – Т. 354. – № 3. – С. 382-385.
24. *Krasnoshchekov D.N., Kaazik P.B., Ovtchinnikov V.M.* Seismological evidence for mosaic structure of the surface of the Earth's inner core//Nature. – V. 435. – № 5. – P. 483-487.
25. *Voronin D.V., Anisichkin V.F.* Simulation of the behaviour of mixture of heavy particles behind a shock-wave front//Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2001. – V. 37. – № 4. – P. 470-474.
26. *Anderson D.L.* Theory of the Earth. – Boston: Blackwell Scientific Publications, 1989.
27. *Глушков Е.С., Демин В.Е., Пономарев-Степной Н.Н., Хрулев А.А.* Тепловыделение в ядерном реакторе. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
28. *Гончаров В.В., Бурдаков Н.С., Вергильев Ю.С. и др.* Действие облучения на графит ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1978.
29. *Филиппов Г.А., Богоявленский Р.Г., Пономарев-Степной Н.Н., Гольцев А.О.* Высокотемпературный гелиевый модульный ядерный реактор с шаровыми твэлами для производства электроэнергии и водорода//Атомная энергия. – 2004. – Т. 96. – Вып. 3. – С. 175-182.
30. *Абагян Л.П., Базазян Н.О., Николаев М.Н., Цибуля А.М.* Групповые константы для расчета реакторов и защиты. – М.: Энергоатомиздат, 1981.
31. *Manturov G.N.* CONSYST2 Abstract. ABBN-90: Multigroup Constant Set for Calculation of Neutron and Photon Radiation Fields and its Functionals, Including the CONSYST2 Program. – Oak Ridge, RSICC DLC-182, 1995.
32. *Усынин Г.Б., Кусмарцев Е.В.* Реакторы на быстрых нейтронах. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
33. *Казанский Ю.А., Матусевич Е.С.* Экспериментальные методы физики реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
34. *Уолтер А., Рейнольдс А.* Реакторы-размножители на быстрых нейтронах. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
35. *Suslov I.R.* An improved Transport Theory Schemes Based on the Quasi-Stationary Derivatives Principle/Proceedings of International Conference on Mathematical Methods and Supercomputing in Nuclear Applications, Saratoga Springs, USA, October 5-9, 1997. Part B. P. 132-136.
36. *Макдональд А., Клейн Д., Вок Д.* Разгадка тайны солнечных нейтрино//В мире науки. – 2003. – № 9. – С. 68-77.
37. *de Meijer R.J., van der Graaf, Jungmann K.P.* Quest for a nuclear georeactor//Nuclear Physics News. – 2004. – № 14. – P. 20-25.
38. *Raghavan R.S.* Detecting a Nuclear Fission Reactor at the Center of the Earth//Hep-ex/0208038. 2002.

39. *Domogatsky G.V., Kopeikin V.I., Mikaelyan L.A., Sinev V.V.* Neutrino Geophysics at Baksan I: Possible Detection of Georeactor Antineutrinos//Ядерная физика. – 2005. – №1. – С. 70-73.

40. *Шуколюков Ю.А.* Новый взгляд на древний ксенон//Соровский образовательный журнал. – 1997. – №9. – С. 63-70.

Поступила в редакцию 10.07.2007

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.039.58

*Methodology of Erosion-Corrosion Wear Prediction by Neuron Net Modeling* \ V.I. Baranenko, O.M. Gulina, D.A. Dokukin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 6 pages, 1 table, 3 illustrations. – References – 5 titles.

There is discussed the problem of ECW in NPP equipment, also the classification of prediction models is performed. The methodology of NPP equipment ECW prediction by using of neuron net models is observed.

### УДК 621.039.5

*The Conservatism Estimations Providing of Reliability of Nuclear Technologies Objects Including Low Statistics of Failures* \ Y.V. Volkov, D.S. Samohin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 8 pages, 1 table, 5 illustrations. – References – 7 titles.

The method of the analysis of a degree of the conservatism estimations of reliability and safety parameters of nuclear technologies objects is developed and shown on data of reactor VVR-C emergency shutdowns. Opportunities of the offered approach are shown by the analysis of statistical data on failures of the equipment, including low statistics of failures.

### УДК 621.039.564

*Automatic Complex Control System of Condition of Technological Channels of the RBMK-1000 Reactor* \ A.I. Trofimov, A.V. Nahabov, M.G. Kalenishin, S.I. Minin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 6 pages, 5 illustrations. – References – 2 titles.

The results of development the algorithm and software for the complex control system have been shown in the article. The system allows to control diameter, linearity and thickness of technological channels. Also defects of a channel's metal are detected by the system.

### УДК 519.7:574

*Analyze of the Distribution Functions Soils Biological Activity in Technogenic Contaminated Areas* \ N. Pavlova, V. Romancov, E. Sarapul'seva; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 7 pages, 3 illustrations. – References – 13 titles.

In this work a lot of biological activity parameters have been analyzed. The results were processed statistically. This work demonstrates that CO<sub>2</sub> flux, metanogenic and denitrificated activities of soil microorganisms are statistically significant for biological analysis of technogenic contaminated areas.

### УДК 621.039.5

*Georeactor in Bowels of the Earth* \ A.A. Bezborodov, N.V. Gusev, I.R. Suslov, V.I. Folomeev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 11 pages, 4 illustrations, 3 tables. – References – 40 titles.

The possibility of long proceeding of nuclear fission chain reactions in Earth's bowels during 4 gygarears up to date is researched. Natural fast breeder in state of "lakes" may have been formed in settling down of uranium oxides or uranium carbides from liquid layer onto a solid Earth's core. Mechanism of uranium concentration at the Earth's core have been given. Corresponding experiments have carried out. In this layer chain nuclear reaction could occurred with new fissile nuclides breeding. Neutron physics performance data of the georeactor have been calculated. It is possible that it takes place pulse mode operation haw it was in case of natural nuclear reactor in Oklo (Gaboon). International set neutrino detectors are available to detect georeactor characteristics.