

Гафниевая бомба — ядерное оружие нового поколения (радиационно-гигиенические аспекты)*

И. Я. Василенко

доктор медицинских наук,

Государственный научный центр — Институт биофизики

О. И. Василенко[†]

доктор физико-математических наук,

физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова

В последнее время отмечается изменение концепции возможного применения ядерного оружия. В США ведутся работы по созданию ядерных боеприпасов (ЯБП) нового поколения. Акцент делается на создании эффективных ЯБП малой мощности, применение которых, например при проведении антитеррористических операций, в сочетании с высокоточными средствами доставки, может получить юридическое международное признание. При использовании таких ЯБП предполагается учитывать безопасность как персонала при его создании и обслуживании, так и населения при его использовании. Особое значение придаётся возможности таких ЯБП проникать в землю с целью поражения сооружений глубокого заложения. По существу это будут подземные ядерные взрывы со вскрытием котловой полости и известными особенностями радиоактивного загрязнения внешней среды [1, 2].

Одновременно появились сведения, что Министерство обороны США активно финансирует разработку принципиально нового оружия, которое должно занять промежуточное положение между обычным и ядерным оружием. В основу создания такого оружия предполагается положить явление искусственного стимулирования распада (девозбуждение) долгоживущих изомерных состояний ядер.

Изомеры — это ядра, находящиеся в возбуждённых метастабильных состояниях, время жизни которых превышает $T_{1/2} = 10^{-13} \div 10^{-9}$ с (типичные времена жизни возбужденных состояний ядер). При распаде они испускают γ -кванты, переходя в другие изомеры с меньшей энергией возбуждения E_m . Цепочка распадов заканчивается при достижении ядром основного состояния. В настоящее время известно уже более 100 долгоживущих изомерных состояний с временами жизни более 1 с. Среди них $^{99}_{43}\text{Tc}$ ($T_{1/2} = 6,0$ час., $E_m = 145$ кэВ), $^{178m2}_{72}\text{Hf}$ ($T_{1/2} = 31$ год, $E_m = 2,447$ МэВ),

*И. Я. Василенко, О. И. Василенко. “Ядерное оружие нового поколения и его радиационно-гигиенические аспекты.” // Бюллетень по атомной энергии. 2004, N 1, С. 60-62.

[†]E-mail address: vasilenko@depni.sinp.msu.ru

$^{180}_{73}\text{Ta}$ ($T_{1/2} \geq 1015$ лет, $E_m = 76$ кэВ). Значительное увеличение времен жизни метастабильных состояний в ядрах происходит, когда для распада ядра необходима заметная перестройкой его структуры, что является маловероятным процессом. Это имеет место при большой разнице угловых моментов или их проекций на ось симметрии ядра по отношению к нижележащим изомерным и основному состояниям. В ряде случаев причиной изомерии может быть различие форм ядра в разных состояниях, а также некоторых квантовых характеристик возбуждённых уровней, таких как орбитальный момент оболочки, изотопический спин и другие.

Повлиять на время жизни изомерного состояния в принципе возможно. Один из способов — сообщение ядру дополнительной энергии путём облучения его иницирующими γ -квантами, в результате чего ядро переходит на более высокий энергетический уровень (т.н. активационный уровень), имеющий короткий период полураспада. Распад активационного уровня сопровождается излучением γ -квантов, суммарная энергия которых превышает энергию перехода изомера на активационный уровень, поскольку после распада ядро находится в основном (энергетически наименьшем) состоянии. При облучении изомеров только часть энергии иницирующих γ -квантов передаётся ядрам, остальная энергия уносится непровазимодействовавшими и рассеянными γ -квантами.

Практический интерес представляет ситуация, когда к.п.д. процесса, равный отношению энергии, выделяющейся при распаде изомеров, к общей энергии, затраченной на генерацию иницирующего облучения, заметно превышает единицу. Однако, в наиболее важном случае долгоживущих изомеров, те же факторы, которые способствуют увеличению времени жизни ядер-изомеров, приводят к уменьшению вероятности их взаимодействия с γ -квантами. Поэтому интерес вызвали работы [3], в которых сообщалось об искусственном увеличении скорости распада $^{178m2}\text{Hf}$ на 2 % при его облучении γ -квантами с энергией $9 \div 13$ кэВ. Механизм ускорения распада неясен, предполагается, что он носит резонансный характер и определяющую роль в нём играет возбуждение ближайших к ядру электронов с последующей передачей энергии возбуждения ядру. Полученные результаты не нашли независимого подтверждения в аналогичных экспериментах других исследователей [4].

Положение в целом пока развивается аналогично истории с холодным термоядерным синтезом, закончившейся ничем. Подобные ситуации в науке нередки, но только некоторые из них привлекают широкое внимание в силу больших последствий предполагаемой успешной научной реализации предлагаемых идей. Значимость данного случая в том, что изомеры могут рассматриваться как источник запасённой энергии, плотность которой в $10^4 \div 10^5$ больше химической. Если будет найден способ управляемого высвобождения этой энергии, то появится возможность создания интенсивных источников γ -излучения, двигателей космических аппаратов, бомб нового типа.

Последнее приложение вызывает особый интерес. Речь идёт об оружии, сравнимым по эффективности с ЯБП малой мощности, не вызывающем радиоактивного загрязнения, не приводящем к большим физическим разрушениям и, что особенно важно, не подпадающем ни под какие международные ограничения. Энергию излучения легко регулировать изменением количества изомера в боеприпасе. Для США, новейшая военная доктрина которых допускает, под предлогами борьбы с т.н. международным терроризмом, установления "демократии", уничтожения якобы существующих средств массового поражения и т.п., нанесение точечных ударов по объектам любого достаточно

беззащитного государства, подобное оружие явилось бы просто неоценимой находкой. По некоторым данным на исследования в этой области уже выделено 2 млрд. долларов.

Одним из наиболее подходящих для этих целей изомеров является $^{178m2}\text{Hf}$, один грамм которого по запасаемой энергии — 1.3 ГДж/г эквивалентен более 50 килограммам тринитротолуола. В настоящее время его получают, облучая протонами тантал-181. Количество получаемого таким образом гафния невелико, образцы, исследовавшиеся в работе [4] содержали примерно 10^{15} атомов $^{178m2}\text{Hf}$ ($\sim 10^{-7}$ г). Предполагается, что в течение пяти лет может быть разработана технология получения граммов гафния по цене, сравнимой со стоимостью обогащённого урана (тысячи долларов за килограмм).

При взрыве боеприпаса гафний будет рассеиваться в окружающей среде, вызывая её загрязнение, изучению последствий которого большого внимания до настоящего времени не уделялось. Поэтому приведём основные ядерно-физические характеристики гафния и его гигиенические нормативы.

Гафний (Hf) — химический элемент IV группы периодической системы элементов, атомный номер — 72, атомная масса — 178,49. Природный гафний состоит из 6 стабильных изотопов с массовыми числами 174, 176 ÷ 180, из них ^{174}Hf обладает слабой α -активностью ($T_{1/2} = 2 \cdot 10^{15}$ лет).

Гафний был открыт венгерским химиком Д. Хевеши и голландским физиком Д. Костером в 1922 г. Существование гафния в своё время было предсказано Д. И. Менделеевым. Он не имеет собственных минералов и присутствует в основном в минералах циркония. В большинстве циркониевых концентратов гафния содержится от 1 ÷ 2 до 6 ÷ 7 %. В земной коре содержание гафния составляет $3,2 \cdot 10^{-4}$ % по массе. В поверхностных речных водах гафний содержится в концентрациях 0,0004 мкг/л, в морской воде $7 \cdot 10^{-8}$ мг/л. Гафний присутствует и в атмосферных осадках, его концентрация в дождевой и снеговой воде составляет 0,05 и 0,125 мкг/л. Он содержится во всех растительных и животных организмах, в том числе и в организме человека, куда гафний поступает с пищевыми продуктами и водой. Биологическое значение гафния остаётся неясным. Гафний, как металл, нашёл в последнее время широкое применение в авиации, ракетной технике, атомной энергетике. Антропогенным источником загрязнения внешней среды гафнием является добыча и переработка циркониевых руд и различные технологические процессы. В атмосферу он поступает в виде многокомпонентных аэрозолей.

Известны и искусственные радиоактивные изотопы гафния с массовыми числами 157 ÷ 173, 175, 181 ÷ 183. Ядерно-физические характеристики изотопов приведены в таблице 1.

Радиоактивные изотопы гафния ^{175}Hf и ^{181}Hf получают при облучении стабильного гафния нейтронами. Радиоизотопы с меньшими массовыми числами получают, облучая нейтронами лутеций, претерпевающий затем бета-распад [5]. Радиоизотопы ^{175}Hf и ^{181}Hf нашли практическое применение в исследованиях методом меченых атомов.

Широкое применение гафния в промышленности стимулировало исследования его биологического действия. В промышленных условиях нуклид может поступать персоналу ингаляционным путём. Величина всасывания принята равной 0,002 [6]. Из всего количества всосавшегося гафния половина накапливается в минеральной части кости, остальное равномерно распределяется в других органах и тканях [7]. Из организма

гафний выводится главным образом с мочой. Гигиенические нормативы приведены в таблицах 2 и 3.

Токсическое действие гафния исследовалось в опытах на животных. ЛД₅₀ (доза, вызывающая 50 % смертность) для крыс при внутрижелудочном введении составляла около 2400 мг/кг массы тела. В желудке развивались некротические изменения, а при ингаляционном введении такие изменения на слизистой бронхов, отмечали и отёк лёгких. Хронические отравления развивались у животных при ежедневном введении в течение 5 часов карбида и нитрида гафния в концентрации 10,8 мг/м³ в продолжении 6 и 9 месяцев [10].

Список литературы

- [1] Василенко И. Я. *Токсикология продуктов ядерного деления*. — М.: Медицина, 1999, 200 с.
- [2] О. И. Василенко. *“Радиационная экология.”* М.: Медицина, 2004 — 216 с.
- [3] Collins C. B. et al. *γ -emission from the 31-yr Isomer of ¹⁷⁸Hf Induced by X-Ray Irradiation.* // Phys. Rev. C. **61**, 5, 054305/1-6 (2000); Collins C. B. et al. *Tunable synchrotron radiation used to induce γ -emission from the 31 year isomer of ¹⁷⁸Hf.* // Europhys. Lett., **57**, 5, 677-682 (2002).
- [4] Ahmad I. et al. *Search for X-ray Induced Acceleration of the Decay of the 31-yr Isomer of ¹⁷⁸Hf Using Synchrotron Radiation.* // Phys. Rev. Lett. **87**, 072503/1-4 (2001).
- [5] Гайсинский М., Адлов Ш. *Радиохимический словарь элементов*. — М.: Атомиздат, 1968, 256 с.
- [6] *Пределы поступления радионуклидов для работающих с радиоактивными излучениями.* Публикация № 30 МКРЗ. — М.: Энергоатомиздат, 1984, 94 с.
- [7] Баженов В. А., Булдаков Л. А., Василенко И. Я. и др. *Вредные химические вещества. Радиоактивные вещества.* Справочник. — Л.: Химия, 1990, 464 с.
- [8] *Схемы распадов радионуклидов. Энергия и интенсивность излучения.* Публикация № 38 МКРЗ: В 2 ч. Ч. 2. Кн. 1.— М.: Энергоатомиздат, 1987, 432 с.
- [9] *Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы.* — М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999, 116 с.
- [10] Бандман А. Л., Гудзовский Г. А. и др. *Вредные химические вещества. Неорганические соединения элементов I–IV групп.* Справочник. Под ред. Филова В. А. и др. — Л.: Химия, 1988, 512 с.

Таблица 1

Ядерно-физические свойства основных изотопов гафния [8]

Радио- нуклид	$T_{1/2}$	Тип распада	Средняя энергия излучения, МэВ/(Бк·с)		Дочерний радио- нуклид (выход)
			характери- стическое, γ - и аннигиля- ционное излучение	β -излучение, конвер- сионные электроны и электроны Оже	
^{170}Hf	16.01 час.	ЗЭ	$5.39 \cdot 10^{-1}$	$8.65 \cdot 10^{-2}$	^{170}Lu радиоакт.
^{172}Hf	1.87 г.	ЗЭ	$1.18 \cdot 10^{-1}$	$1.17 \cdot 10^{-1}$	^{172}Lu радиоакт.
^{173}Hf	24 час.	ЗЭ; β^+	$4.04 \cdot 10^{-1}$	$5.20 \cdot 10^{-2}$	^{173}Lu радиоакт.
^{175}Hf	70 сут.	ЗЭ	$3.68 \cdot 10^{-1}$	$4.55 \cdot 10^{-2}$	^{175}Lu стаб.
^{177m}Hf	51.4 мин.	ИП	2.24	$4.78 \cdot 10^{-1}$	^{177}Hf стаб.
^{178m}Hf	31 г.	ИП	2.36	$2.93 \cdot 10^{-1}$	^{178}Hf стаб.
^{179m}Hf	25.1 сут.	ИП	$9.01 \cdot 10^{-1}$	$1.86 \cdot 10^{-1}$	^{179}Hf стаб.
^{180m}Hf	5.5 час.	ИП	1.01	$1.38 \cdot 10^{-1}$	^{180}Hf стаб.
^{181}Hf	42.4 сут.	β^-	$5.55 \cdot 10^{-1}$	$2.01 \cdot 10^{-1}$	^{181}Ta стаб.
^{182m}Hf	61.5 мин.	ИП; β^-	$9.29 \cdot 10^{-1}$	$2.29 \cdot 10^{-1}$	^{182}Ta радиоакт. ($5.40 \cdot 10^{-1}$); ^{182}Hf радиоакт. ($4.60 \cdot 10^{-1}$)
^{182}Hf	$9 \cdot 10^6$ г.	β^-	$2.39 \cdot 10^{-1}$	$8.21 \cdot 10^{-2}$	^{182}Ta радиоакт.
^{183}Hf	64 мин.	β^-	$7.48 \cdot 10^{-1}$	$4.48 \cdot 10^{-1}$	^{182}Ta радиоакт.
^{184}Hf	4.12 час.	β^-	$2.50 \cdot 10^{-1}$	$4.75 \cdot 10^{-1}$	^{184}Ta радиоакт.

Примечание:

ЗЭ — захват электрона; ИП — изомерный переход;

 β^- — электронный захват; β^+ — позитронный захват.

**Пределы годового поступления гафния с воздухом
и допустимая объёмная активность в воздухе для персонала [9]**

Радионуклид	$T_{1/2}$, сут.	Класс соединения	Предел годового поступления, Бк/год	Допустимая объёмная активность ДООА, Бк/м ³
¹⁷⁵ Hf	70	Б	$2.8 \cdot 10^7$	$1.1 \cdot 10^4$
		П	$1.8 \cdot 10^7$	$7.3 \cdot 10^3$
¹⁸¹ Hf	42.4	Б	$1.4 \cdot 10^7$	$5.7 \cdot 10^3$
		П	$4.3 \cdot 10^6$	$1.7 \cdot 10^3$

Примечание:

К классу "Б" (быстрый) относятся соединения с периодом биологического полувыведения $T_{эфф.}$ менее 10 суток, к классу "П" (промежуточный) — с $T_{эфф.}$ от 10 до 100 суток.

**Пределы годового поступления (ПГП) и допустимая
объёмная активность гафния в воздухе и воде для населения [9]**

Радио- нуклид	$T_{1/2}$, сут.	Класс соеди- нения	Поступление с вдыхаемым воздухом		Поступление с водой и пищей	
			Предел годового поступления, Бк/год	Допустимая объёмная активность ДООА, Бк/м ³	Предельное годовое поступление, Бк/год	Допустимая удельная активность ДУА, Бк/м ³
¹⁷⁵ Hf	70	Б	$1.4 \cdot 10^6$	$1.9 \cdot 10^2$	$2.4 \cdot 10^6$	$3.0 \cdot 10^3$
		П	$9.1 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^2$		
¹⁸¹ Hf	42.4	Б	$7.4 \cdot 10^5$	$9.8 \cdot 10^1$	$9.1 \cdot 10^5$	$1.1 \cdot 10^3$
		П	$2.1 \cdot 10^5$	$2.9 \cdot 10^1$		

Примечание:

К классу "Б" (быстрый) относятся соединения с периодом биологического полувыведения $T_{эфф.}$ менее 10 суток, к классу "П" (промежуточный) — с $T_{эфф.}$ от 10 до 100 суток.