

# Радиоактивный йод\*

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*

Среди известных 26 изотопов йода только природный  $^{127}\text{I}$  является стабильным. Остальные изотопы техногенного происхождения с массовыми числами  $115 \div 126$  и  $128 \div 141$  радиоактивны.

$^{127}\text{I}$  относится к рассеянным микроэлементам и является одним из наиболее важных биоэлементов. Он входит в состав гормонов, синтезируемых в щитовидной железе. Гормоны щитовидной железы играют ключевую роль в поддержании гомеостаза организма. Регулирующая роль их осуществляется на всех уровнях: клетка—ткань—орган—организм.

В организм человека  $^{127}\text{I}$  поступает с пищей, водой и воздухом. Среднее кларковое содержание йода составляет в земной коре по массе —  $4 \cdot 10^{-5} \%$ , в почве — около  $3 \cdot 10^{-4} \%$ , в растениях —  $2 \cdot 10^{-5} \%$ , питьевой воде —  $10^{-9} \div 10^{-7} \%$ . Основным резервуаром йода для биосферы служит мировой океан, где в 1 л воды в среднем содержится  $5 \cdot 10^{-5} \%$  йода.

Многие регионы на Земле характеризуются пониженным содержанием йода в местных продуктах питания и питьевой воде. В России к таким регионам относится 50 % её территории. Недостаточное поступление йода человеку приводит к базедовой болезни и другим нарушениям, а у детей к нарушению физического и психического развития.

По данным МКРЗ в теле человека содержится до 40 мг стабильного йода. Из этого количества на долю щитовидной железы приходится до  $20 \div 50 \%$ . В зависимости от содержания йода в пище суточное его по-

---

\* И. Я. Василенко, О. И. Василенко. “Радиоактивный йод.” // Энергия: экономика, техника, экология. 2003, № 5, С. 57–62.

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

ступление человеку может колебаться от 10 до 1000 мкг. Минимальная суточная потребность составляет  $50 \div 75$  мкг.

## 1 Источники поступления йода во внешнюю среду

Источником поступления радиоактивного йода во внешнюю среду были испытания ядерного оружия и выбросы промышленных и энергетических реакторов АЭС. Среди 20 радиоизотопов йода, образующихся в реакциях деления урана и плутония, особое место занимают  $^{131\div 135}\text{I}$  ( $T_{1/2} = 8.04$  сут.; 2.3 ч.; 20.8 ч.; 52.6 мин.; 6.61 ч.), характеризующиеся большим выходом в реакциях деления, высокой миграционной способностью и биологической доступностью.

$^{131\div 135}\text{I}$  составляют значительную часть активности молодых продуктов ядерного деления (ПЯД). На их долю приходится около 20 % активности. Соотношение активности  $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{135}\text{I}$  во время деления урана и плутония составляет 1:3:9:5, а кумулятивный выход  $^{131-135}\text{I}$  равен 4.4; 6.02; 7.8; 6.04 % соответственно. В реакциях деления образуется и "вечный" радиоизотоп йода —  $^{129}\text{I}$  ( $T_{1/2} = 1.57 \cdot 10^7$  лет). Токсикологическое значение других изотопов йода с малыми сроками жизни (секунды, часы) невелико.

Радиоизотопы йода  $^{131\div 135}\text{I}$  при испытаниях ядерного оружия выпадали в основном в ближних зонах. В полуглобальных и глобальных выпадениях радиоактивный йод практически отсутствовал, ибо он распадался до выпадения на земную поверхность. В глобальном масштабе рассеялось около 700 ЭБк  $^{131}\text{I}$ .

Источником поступления радиойода во внешнюю среду являются также предприятия ядерно-топливного цикла. В реакторах в процессе их эксплуатации накапливаются значительные количества радиоактивного йода. В качестве примера в таблице 1 приведена удельная активность радиоизотопов йода в облучённом топливе реактора РБМК в течение первых суток после начала облучения.

Таблица 1

**Удельная активность (в Бк/г) радиоизотопов  
йода в облучённом топливе реактора РБМК  
в течение первых суток**

<b>Ра- дио- нук- лид</b>	<b>0 мин.</b>	<b>1 ч.</b>	<b>12 ч.</b>	<b>24 ч.</b>
<sup>129</sup> I	$9.18 \cdot 10^8$	$9.18 \cdot 10^8$	$9.18 \cdot 10^8$	$9.18 \cdot 10^8$
<sup>130</sup> I	$5.58 \cdot 10^{14}$	$5.30 \cdot 10^{14}$	—	—
<sup>131</sup> I	$1.67 \cdot 10^{16}$	$1.67 \cdot 10^{16}$	$1.61 \cdot 10^{16}$	$1.56 \cdot 10^{16}$
<sup>132</sup> I	$2.37 \cdot 10^{16}$	$2.36 \cdot 10^{16}$	—	—
<sup>133</sup> I	$3.29 \cdot 10^{16}$	$3.24 \cdot 10^{16}$	$2.27 \cdot 10^{16}$	$1.52 \cdot 10^{16}$
<sup>134</sup> I	$3.58 \cdot 10^{16}$	$2.49 \cdot 10^{16}$	—	—
<sup>135</sup> I	$3.07 \cdot 10^{16}$	$2.77 \cdot 10^{16}$	$8.79 \cdot 10^{15}$	$2.48 \cdot 10^{15}$

В обычном режиме эксплуатации АЭС выбросы радионуклидов, в том числе радиоизотопов йода, невелики. Для отечественных ВВЭР и РБМК нормализованный выброс оценивался в 130 и 360 ГБк/(Гвт·год). Сейчас в связи с проводимыми работами по совершенствованию реакторов и увеличением радиационной безопасности они ниже. В выбросах радиоактивный йод в основном представлен органическими соединениями ( $\text{CH}_3\text{I}$ ,  $\text{CH}_2\text{I}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4\text{I}_2$ ). В форме элементарного йода находится лишь 5 %. Примерно 90 % составляют короткоживущие изотопы <sup>132÷135</sup>I.

В аварийных условиях, как свидетельствуют крупные аварии (Уиндсгейл, 1957 г.; Тримайл Айленд, 1979 г.; Чернобыль, 1986 г.), радиоактивный йод, как источник внешнего и внутреннего облучения, был основным поражающим фактором в начальный период аварии. При аварии на ЧАЭС из общего количества 50 МКи выброшенных из разрушенного реактора радионуклидов (без РБГ) на долю радиоизотопов йода пришлось 7.3 МКи. Распространение радионуклидов, включая радиоизотопы йода, приняло огромные масштабы.

## 2 Миграция во внешней среде

Как и стабильный <sup>127</sup>I, радиоизотопы йода характеризуются высокой миграционной способностью. Поступая во внешнюю среду и включаясь в биологические цепи миграции, радиоактивный йод становится источни-

ком облучения растений и животных, включая человека. Миграция зависит от физико-химических свойств изотопов радиойода, условий внешней среды, биологических особенностей растений и животных. Важное значение имеет биологическая доступность нуклида (растворимость, транспортабельность).

Основным источником поступления радиойода населению в зонах радионуклидного загрязнения были местные продукты питания растительного и животного происхождения. Человеку радиойод может поступать по цепочкам: растения→человек, растения→животные→человек, вода→гидробионты→человек. Молоко, свежие молочные продукты и листовые овощи, имеющие поверхностное загрязнение, обычно являются основным источником поступления радиойода населению. Усвоение нуклида растениями из почвы, учитывая малые сроки его жизни, не имеет практического значения.

У коров, выпасаемых на загрязнённых пастбищах, с молоком  $^{131}\text{I}$  выводился в количестве  $0.4 \div 1.0$  %, что составляло в среднем  $0.7$  % суточного поступления. У коз и овец содержание радиойода в молоке в несколько раз больше. В мясе животных накапливаются сотые доли поступившего радиойода. В значительных количествах радиойод накапливается в яйцах птиц. Коэффициенты накопления (превышение над содержанием в воде)  $^{131}\text{I}$  в морских рыбах, водорослях, моллюсках достигает соответственно  $10, 200 \div 500, 10 \div 70$ .

### 3 Процессы метаболизма

В организм человеку радиойод может поступать через органы дыхания, с пищей и водой, кожные покровы, раны и ожоговые поверхности. Основное значение имеют два первых пути. Поступивший в организм радиойод включается в те же метаболические процессы, что и стабильный йод  $^{127}\text{I}$ . Различия касаются лишь временных параметров, связанных с физическим распадом радиоактивных изотопов.

Величина и скорость всасывания, накопление в органах, выведение из организма поступившего в него радиойода зависят от физико-химических характеристик нуклида, возраста и пола человека, содержания стабильного йода в организме и потребляемых пищи и воде и др. Независимо от пути поступления, радиойод быстро всасывается. В течение первого часа в верхнем отделе кишечника всасывается до  $80 \div 90$  % поступившего количества. Это следует учитывать при оказании первой помощи.

Из крови радиойод быстро поступает в органы депонирования. По концентрации нуклида органы можно расположить в убывающий ряд:

щитовидная железа, почки, печень, мышцы, кости. Накопление радионуклида в щитовидной железе протекает быстро. Через 2 и 6 часов в железе содержится  $5 \div 10$  и  $15 \div 20$  %, а к концу суток  $25 \div 30$  % от поступившего в организм количества. При гипертиреозе (повышенной функции железы) процессы накопления протекают быстрее и нуклид накапливается в большем количестве, а при гипотиреозе (пониженная функция железы) напротив, более медленно и в меньшем количестве —  $5 \div 10$  %.

Выводится радиоiod из организма в основном через почки. О процессах выведения можно судить по поведению стабильного йода  $^{127}\text{I}$ . По данным МКРЗ при поступлении взрослому человеку 200 мкг йода с пищей и водой и  $0.5 \div 35$  мкг с воздухом в сутки с мочой выводится 170 мкг, с калом 20 мкг, с потом 6 мкг, прочими жидкостями и волосами 3 и 2 мкг. Часть йода выводится через лёгкие, однако доля этого выведения не установлена. Из целостного организма, щитовидной железы, печени, почек, селезёнки, скелета  $^{127}\text{I}$  выводится с  $T_6$  равным 138, 138, 7, 7, 7 и 12 суток. Выведение йода из организма можно описать двухкомпонентным уравнением: 0.7 выводится с  $T_6$  равным 0.35 суток и 0.3 с  $T_6$  равным 100–120 суток. Учитывая малые сроки жизни  $^{131}\text{I}$ – $^{135}\text{I}$  время эффективного выведения их существенно ниже. Так  $T_{\text{эфф}}$  для  $^{131}\text{I}$  и  $^{133}\text{I}$  составляет 7.6 и 0.87 суток соответственно.

Процессы формирования поглощённых доз в щитовидной железе протекают быстро, учитывая сроки жизни изотопов. За сутки энерговыделение короткоживущих изотопов  $^{132,134,135}\text{I}$  достигает 85 %,  $^{133}\text{I}$  — 50 % и лишь 10 % для  $^{131}\text{I}$ . К концу первой недели доза от  $^{131}\text{I}$  формируется примерно на 50 %, а к концу 3 недели на  $80 \div 85$  %. Дозы облучения щитовидной железы в первые часы аварии от поступившего  $^{131}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$  и  $^{132,134,135}\text{I}$  могут составить 60, 30 и 10 % соответственно. В железе 90 % дозы формируется за счёт  $\beta$ -излучения и 10 % за счёт  $\gamma$ -излучения.

Параметры обмена и величины поглощённых доз при поступлении взрослому человеку 37 кБк (1 мкКи) различных радиоизотопов йода приведены в таблице 2.

Таблица 2

**Величины поглощённых доз  
при поступлении взрослому человеку  
37 кБк различных радиоизотопов йода**

Показатели	Радиоизотопы					
	<sup>125</sup> I	<sup>129</sup> I	<sup>131</sup> I	<sup>132</sup> I	<sup>133</sup> I	<sup>133</sup> I
Время максимального накопления радиойода в щитовидной железе, ч.	24	24	24	0.9	10	13
$T_{эфф}$ — эффективный период полувыведения, сут.	100	100	7.6	0.096	0.87	0.28
Поглощённая доза, сГр						
$\beta$ -излучение	1.2	9.1	1.7	0.022	0.0365	0.066
$\gamma$ -излучение	0.4	0.2	0.1	0.0065	0.017	0.013

Следует отметить, что дозы облучения щитовидной железы у детей вследствие малой её массы при поступлении одинаковых количеств радиойода значительно больше, чем у взрослых (масса железы у детей в зависимости от возраста равна  $1.5 \div 7$  г., у взрослых — 20 г.).

## 4 Токсичность

Биологическое действие радиойода зависит от физико-химических свойств, пути поступления, возраста и пола человека и действия других нерадиационных факторов. Ядерно-физические характеристики основных изотопов йода приведены в таблице 3.

Как отмечалось, практический интерес представляют изотопы <sup>131</sup>I–<sup>135</sup>I. Их токсичность невелика по сравнению с другими радиоизотопами, особенно  $\alpha$ -излучающими. Острые радиационные поражения тяжёлой, средней и лёгкой степени у взрослого человека можно ожидать при пероральном поступлении <sup>131</sup>I в количестве 55, 18 и 5 МБк/кг массы тела. Токсичность радионуклида при ингаляционном поступлении примерно в два

раза выше, что связано с большей площадью контактного  $\beta$ -облучения. В патологический процесс вовлекаются все органы и системы, особенно тяжёлые повреждения в щитовидной железе, где формируются наиболее высокие дозы. Практический интерес представляют поступления человеку небольших количеств радиойода, особенно в составе ПЯД, где содержатся и другие радионуклиды. Токсичность ПЯД в зависимости от возраста приведена в таблице 4 на с. 10.

Таблица 3

**Ядерно-физические свойства  
основных радиоактивных изотопов йода**

Радионуклид	$T_{1/2}$	Тип распада	Средняя энергия излучения, МэВ/(Бк·с)		Дочерний радионуклид (выход)
			характеристическое, $\gamma$ - и аннигиляционное излучение	$\beta$ -излучение, конверсионные электроны и электроны Оже	
$^{120m}\text{I}$	53 мин.	$3\beta, \beta^+$	5.28	1.24	$^{120}\text{Te}$ стаб.
$^{120}\text{I}$	81 мин.	$3\beta, \beta^+$	2.70	1.42	$^{120}\text{Te}$ стаб.
$^{121}\text{I}$	2.12 час.	$3\beta, \beta^+$	$4.12 \cdot 10^{-1}$	$8.20 \cdot 10^{-2}$	$^{121}\text{Te}$ радиоакт.
$^{122}\text{I}$	3.62 мин.	$3\beta, \beta^+$	$9.33 \cdot 10^{-1}$	1.05	$^{122}\text{Te}$ стаб.
$^{123}\text{I}$	13.2	$3\beta$ , час.	$1.71 \cdot 10^{-1}$	$2.8 \cdot 10^{-2}$	$^{123}\text{Te}$ (0.99) радиоакт.

$^{124}\text{I}$	4.18 сут.	$3\beta, \beta^+$	1.08	$1.93 \cdot 10^{-1}$	$^{124}\text{Te}$ стаб.
$^{125}\text{I}$	60.14 сут.	$3\beta,$	$4.20 \cdot 10^{-2}$	$1.94 \cdot 10^{-2}$	$^{125}\text{Te}$ стаб.
$^{126}\text{I}$	13.02 сут.	$3\beta, \beta^+, \beta^-$	$4.54 \cdot 10^{-1}$	$1.57 \cdot 10^{-1}$	$^{126}\text{Xe}$ стаб. (0.437)
$^{128}\text{I}$	24.99 мин.	$3\beta, \beta^+, \beta^-$	$8.49 \cdot 10^{-2}$	$7.47 \cdot 10^{-1}$	$^{128}\text{Xe}$ стаб. (0.9)
$^{129}\text{I}$	$1.57 \cdot 10^7$ лет	$\beta^-$	$2.46 \cdot 10^{-2}$	$6.38 \cdot 10^{-2}$	$^{129}\text{Xe}$ стаб.
$^{130}\text{I}$	12.36 час.	$\beta^-$	2.13	$2.95 \cdot 10^{-1}$	$^{130}\text{Xe}$ стаб.
$^{131}\text{I}$	8.04 сут.	$\beta^-$	$3.80 \cdot 10^{-1}$	$1.90 \cdot 10^{-1}$	$^{131}\text{Xe}$ стаб. (0.9889)
$^{132m}\text{I}$	83.6 мин.	ИП, $\beta^-$	$3.21 \cdot 10^{-1}$	$8.41 \cdot 10^{-4}$	$^{132}\text{Xe}$ стаб. (0.131)
$^{132}\text{I}$	2.3 час.	$\beta^-$	2.24	$6.55 \cdot 10^{-3}$	$^{131}\text{Xe}$ стаб.
$^{133}\text{I}$	20.8 час.	$\beta^-$	$6.02 \cdot 10^{-1}$	$4.09 \cdot 10^{-1}$	$^{133}\text{Xe}$ радиоакт. (0.971)
$^{134}\text{I}$	52.6 мин.	$\beta^-$	2.57	$6.16 \cdot 10^{-1}$	$^{134}\text{Xe}$ стаб.
$^{135}\text{I}$	6.61 час.	$\beta^-$	1.55	$3.64 \cdot 10^{-1}$	$^{135}\text{Xe}$ радиоакт. (0.846)

Таблица 4

**Токсичность ПЯД для человека  
в зависимости от их возраста [Василенко, 1999]**

Тяжесть поражения	Возраст ПЯД, количество ( $10^{10}$ Бк)			
	1 час	1 сутки	10 суток	> 30 суток
тяжёлая	1,9 ÷ 3,7	0,4 ÷ 0,8	0,2 ÷ 0,4	0,1 ÷ 0,2
средняя	1,1 ÷ 1,9	0,2 ÷ 0,4	0,1 ÷ 0,2	0,05 ÷ 0,1
лёгкая	0,3 ÷ 1,1	0,05 ÷ 0,2	0,03 ÷ 0,1	0,02 ÷ 0,05
лучевая реакция	десятки МБк			

Облучение при поступлении ПЯД носит крайне неравномерный характер, связанный с различной тропностью радионуклидов, входящих в состав продуктов. Различия в поглощённых дозах в отдельных органах достигают нескольких порядков. Особенно интенсивному облучению подвергается щитовидная железа при поступлении молодых продуктов. Радиационное повреждение щитовидной железы имеет большое значение в формировании клиники острого поражения, процессах выздоровления и отдалённой патологии.

Облучение щитовидной железы в дозе несколько грей может вызвать в начальный период повышение её функции, которое может смениться состоянием гипofункции. Облучение железы в дозах десятков грей вызывает снижение её функции с возможным переходом в состояние гипотиреоза. Радиационное повреждение щитовидной железы связано не только с повреждением тиреоидного эпителия, где синтезируются гормоны, но и повреждением сосудистых и нервных образований железы и особенно с аутоиммунными нарушениями. Повреждение железы клинически проявляется снижением синтеза гормонов и их активности, что имеет большое значение в нарушении гомеостаза организма.

Повреждение щитовидной железы может быть начальным звеном нарушения эндокринного статуса организма — в патологический процесс вовлекаются и другие эндокринные железы. Особенно опасным является повреждение железы у детей. Следует отметить, что радиационное повреждение железы может находиться в скрытом состоянии и проявиться при действии других вредных агентов (болезни, интоксикации и др.), а также в период полового созревания.

Опасность облучения щитовидной железы в малых дозах связана с

возможностью бластомогенных эффектов. Статистически значимое увеличение опухолей железы наблюдали при дозах облучения 0.5 Гр. Риск смерти оценивается в  $5 \cdot 10^{-6}$  на 1 сГр. У детей и женщин опухоли возникают в 2–2.5 раза чаще, чем у мужчин. Опухоли характеризуются медленным ростом и редким метастазированием. В зависимости от дозы облучения скрытый период может достигать 25 и более лет. У детей он короче — около 10 лет. При аварии на ЧАЭС опухоли возникли через 2–3 года и в значительно большем количестве по сравнению с первоначальными прогнозными оценками. Очевидно это связано с эпидемиологическими особенностями радиоактивного загрязнения — эндемичностью по зубу. Зобизменённая железа оказалась более чувствительной к облучению. Вопросы эти, имеющие важное практическое значение, остаются недостаточно изученными.

Бластомогенез можно представить в последовательности развивающихся процессов:

- радиационное повреждение железы;
- снижение секреции тиреоидных гормонов;
- снижение концентрации гормонов в крови;
- усиление функции гипофиза;
- гиперплазия сохранившейся ткани железы;
- развитие аденом (доброкачественных опухолей);
- развитие рака.

В экспериментах регистрировали опухоли не только в щитовидной железе, но и других эндокринных органах (гипофиз, надпочечники, предстательная железа и др.), а также в органах, имеющих тесную функциональную связь с щитовидной железой (гонадах, молочных железах). Для индукции опухолей в этих органах характерен низкий пороговый уровень облучения. При введении животным ПЯД большого возраста, в которых основную активность составляли радиоизотопы стронция, цезия, церия и др., спектр опухолей был иной — лейкозы, саркомы.

## 5 Неотложная помощь

При работе с радиоизотопами необходимо соблюдать правила и нормы радиационной безопасности и применять средства защиты. При поступлении радиоактивного йода в организм необходимо срочное промывание

верхних дыхательных путей, желудка, назначение рвотных, мочегонных препаратов и препаратов стабильного йода (йодидов калия или натрия, настойки йода, раствора Люголя):

- йодид калия
  - взрослым и детям от 2 лет и старше по 1 таблетке по 0.125 г на приём ежедневно;
  - детям до 2 лет по 1 таблетке по 0.040 г на приём ежедневно;
  - беременным женщинам по 1 таблетке по 0.125 г с одновременным приёмом перхлората калия 0.75 г.
- 5 % настойка йода (при отсутствии йодида калия):
  - взрослым и подросткам старше 14 лет по 40 капель 1 раз в день или по 20 капель 2 раза в день после еды в 1/2 стакана молока или воды;
  - детям от 5 лет и старше в 2 раза меньших количествах;
  - детям до 5 лет настойку йода внутрь не назначают;
  - детям наносят 2.5 % раствор йода на кожу предплечий или голени из расчёта: от 2 до 5 лет — 20 капель, до 2 лет — 10 капель в день.
- раствор Люголя:
  - взрослым и подросткам старше 14 лет по 20 капель 1 раз в день или по 10 капель 2 раза в день после еды в 1/2 стакана молока или воды;
  - детям от 5 лет и старше в 2 раза меньших количествах;
  - детям до 5 лет раствор Люголя не назначают.

Препараты йода применяют до исчезновения угрозы поступления в организм радиойода. Поступление и накопление радиойода в щитовидной железе контролируют по данным радиометрических и спектрометрических измерений  $\gamma$ -излучения. Исследуют также биосубстраты (кровь, мочу, кал). Своевременное применение препаратов стабильного йода снижает накопление радиойода в щитовидной железе и уровни её облучения.

## 6 Применение радиоизотопов йода

Радиоизотопы йода нашли применение в ядерной медицине для целей диагностики и лечения разного рода заболеваний. С их помощью получают уникальную информацию о функциональном состоянии органов и систем на клеточном уровне. К настоящему времени радиофармпрепараты йода используют во всех клинических областях медицины, в том числе в онкологии. Большие перспективы открываются для использования препаратов радиоизотопов йода в области лучевой терапии.

Наиболее широко применяют  $^{131}\text{I}$  и  $^{123}\text{I}$ . Годовой объём потребления препаратов  $^{131}\text{I}$  для радионуклидной терапии составляет в России — 2128 ГБк, в Германии — 41426 Гбк.