

ЩИТОВИДНАЯ ЖЕЛЕЗА

**Оценка поглощенной дозы в щитовидной железе  
плода и новорожденных после аварии на  
Чернобыльской АЭС**

**Звонова И.А.**

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт  
радиационной гигиены Минздрава РФ

Представлена методика оценки дозы облучения щитовидной железы (ЩЖ) плода инкорпорированным  $^{131}\text{I}$  вследствие плацентарного перехода радионуклида из организма матери, проживавшей на территории, загрязненной радиоактивными выпадениями после аварии на Чернобыльской АЭС. Исходной величиной для расчета являлась доза в ЩЖ матери, сформировавшаяся за счет длительного поступления  $^{131}\text{I}$  в организм матери с загрязненными продуктами питания и воздухом. Поглощенная доза излучения  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ плода зависит от срока беременности на день радиоактивного загрязнения местности, не отличаясь от среднетканевой дозы до 75 суток беременности и достигая максимума, примерно вдвое превышающего величину дозы в ЩЖ матери, если авария произошла, когда возраст плода составлял 100-140 дней. При большем сроке беременности на день аварии доза облучения ЩЖ плода меньше. Если авария произошла в последний месяц беременности, то к дозе внутриутробного облучения ЩЖ могло добавиться облучение из-за поступления активности с материнским молоком после рождения. Доза облучения ЩЖ новорожденного, питавшегося только материнским молоком после чернобыльской аварии, в  $3.5 \pm 0.2$  раза больше дозы в ЩЖ матери.

**Thyroid dose estimations in fetus and new-borns  
after the Chernobyl accident**

**Zvonova I.A.**

St.Petersburg Institute of Radiation Hygiene of the Ministry of Health of Russia

A method of a dose estimation in fetal thyroid due to  $^{131}\text{I}$  intake into mother's body living on a territory contaminated with radionuclides after the Chernobyl accident is described. The initial value for calculations was the thyroid dose in mother formed due to a prolonged  $^{131}\text{I}$  intake with contaminated food and air. The absorbed fetal thyroid dose is dependent on pregnancy time on the day of radioactive fallout. It did not differ from the average tissue dose during pregnancy less than 75 days and was the highest, approximately twice as high as the mother's thyroid dose in case when the age of fetus was from 100 to 140 days at the time of accident. The fetal thyroid dose became smaller with increasing of fetal age. The thyroid dose in a new-born child could be formed due to a pre-natal  $^{131}\text{I}$  uptake in fetal thyroid and due to  $^{131}\text{I}$  intake with maternal milk after its birth if the accident happened at the last month of a pregnancy. The thyroid dose in a breast-feed new-born was higher by a factor of  $3.5 \pm 0.2$  than a thyroid dose in its mother following the Chernobyl accident.

Среди проблем дозиметрии облученного населения в зоне радиоактивного загрязнения после аварии на Чернобыльской АЭС задача корректной оценки дозы в щитовидной железе (ЩЖ) детей является наиболее важной для дальнейшего медицинского наблюдения. Именно у детей сформировались наибольшие дозы в ЩЖ, которая в детском возрасте обладает повышенной, по сравнению со взрослыми, способностью к образованию опухолей в ответ на облучение [1]. Именно у детей проявились последствия облучения радионуклидами йода - увеличение заболеваемости раком

щитовидной железы. Вопросы формирования и оценки дозы при облучении во внутриутробном периоде и в период грудного вскармливания являются наименее изученными.

В ситуации, сложившейся после аварии на ЧАЭС, встали, в частности, практические задачи:

1) оценить дозу внутриутробного облучения ЩЖ плода  $^{131}\text{I}$ , поступившим в организм матери;

2) оценить дозу в ЩЖ младенцев, находившихся на грудном и смешанном вскармливании.

В первом случае исходной информацией являлся результат измерения  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ матери.

Данными измерений в ЩЖ новорожденных до начала питания материнским молоком мы не располагали. Методический подход к решению этой задачи - модель внутриутробного обмена йода, предложенная в работе [2], для однократного поступления, и примененная нами для случая пролонгированного поступления  $^{131}\text{I}$  в организм матери в соответствии с моделью поступления радиойода в организм человека в послеварийный период, принятой для дозиметрических расчетов [3, 4, 5].

Во втором случае удалось провести одновременные измерения  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ матери и младенца (в том числе несколько повторных), получивших внутреннее загрязнение радиоактивным йодом вследствие радиоактивного загрязнения местности, в которой они проживали. Измерения проводили на установке со сцинтилляционным коллиматором детектором фирмы "Robotron", в спектрометрическом режиме измерений с регистрируемым интервалом энергий излучения 300-400 кэВ. Измерения проводили на расстоянии 5 см от поверхности детектора до шеи пациента, длительность измерения 100 с. Расчет активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ производили по формуле:

$$G = (N_{\text{шея}} - F) \cdot K, \quad (1)$$

где  $G$  - содержание  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ, кБк;  
 $N_{\text{шея}}$  - скорость счета над ЩЖ, имп./с;  
 $F$  - скорость счета прибора без пациента, имп./с;

$K$  - коэффициент калибровки прибора для измерения содержания  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ человека.

Расчет дозы излучения  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ проводился на основе обобщенной модели поступления  $^{131}\text{I}$  в организм человека, когда в течение 15 дней суточное поступление радиойода было примерно одинаковым, а затем уменьшалось по экспоненте с полупериодом 5 суток [3, 4, 5]. В расчете учитывалась индивидуальная длительность пребывания матери и ребенка на загрязненной территории и интервал времени между выездом и датой измерения.

В таблице 1 показаны соотношения активностей и доз в ЩЖ матерей и младенцев, питавшихся только материнским молоком или получавших гарантированно "чистый" дополнительный прикорм в виде консервированного детского питания или прошлогодних овощей. Оказалось, что активности и дозы в ЩЖ ребенка линейно связаны с соответствующими показателями матери.

Уравнения регрессии этих зависимостей имеют вид:

$$g = 0,22 \cdot G, \quad (2)$$

$$h = 3,5 \cdot H, \quad (3)$$

где  $g$  и  $G$  - активность  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ младенца и матери, кБк;

$h$  и  $H$  - поглощенная доза в ЩЖ младенца и матери, Гр.

Полученное соотношение (3) использовали для оценки дозы в ЩЖ грудных младенцев при наличии результатов измерения  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ или реконструированной оценки дозы в ЩЖ матери в случае, когда ребенок питался только материнским молоком.

Линейная связь между показателями у матери и младенца высоко достоверна: коэффициент корреляции активностей  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ матери и младенца равен 0.93, а дозы в их ЩЖ - 0.97 (рисунк 1).

Если ребенок находился на смешанном питании и кроме грудного молока получал в качестве прикорма коровье молоко из личного хозяйства в количестве  $V_n$  (л/сут.) или из торговой сети  $V_m$  (л/сут.), то полученная младенцем индивидуальная доза в ЩЖ оценивается следующим образом:

- для сельских жителей:

$$h = 3,6 \cdot H + \bar{h} \cdot \frac{a \cdot V_T + V_o}{\bar{V}} \cdot \frac{\vartheta}{\bar{\vartheta}}, \quad (4)$$

- для городских жителей:

$$h = 3,6 \cdot H + \bar{h} \cdot \frac{V_T + b \cdot V_o}{\bar{V}} \cdot \frac{\vartheta}{\bar{\vartheta}}, \quad (5)$$

где  $\bar{h}$  - средняя доза в ЩЖ детей в возрасте до 1 года в данном населенном пункте;

$\bar{V}$  - среднее суточное потребление молока в этом возрасте;

$\vartheta, \bar{\vartheta}$  - индивидуальная и средняя для населенного пункта даты прекращения потребления молока;

коэффициенты  $a, b$  - соотношение концентраций радиойода в молоке из торговой сети и из личного хозяйства в рассматриваемом населенном пункте соответственно.

Таблица 1  
Активность  $^{131}\text{I}$  и доза в ЩЖ матери и ребенка, питавшегося материнским молоком, после аварии на Чернобыльской АЭС

Инициалы матери	Возраст		Дата измерения	Активность, кБк		Доза, Гр	
	Мать, лет	Ребенок, мес.		$G$ , мать	$g$ , ребенок	$H$ , мать	$h$ , ребенок
1. В.Е.Н.	25	1. 5	14.05.86	37	9	0.17	0.48
2. Л.Е.И.	18	7	20.05.86	-	4	-	0.40
			13.05.86	355	63	1.8	3.9
			20.05.86	174	41	1.6	5.0
			26.05.86	130	24	1.6	5.8
3. Е.А.А.	24	7	04.05.86	-	9	-	6.4
			06.05.86	-	6	-	5.4
			30.05.86	85	22	1.1	4.2
4. Б.С.Б.	37	6	03.06.86	-	21	-	6.0
			14.05.86	24	5	0.09	0.21
			16.05.86	14	4	0.09	0.18
5. Ш.Н.А.	25	3	20.05.86	-	3	-	0.20
			28.05.86	122	29	1.2	4.0
			6. Г.Г.Ф.	32	3	15.05.86	6
7. К.И.А.	37	4	15.05.86	31	9	0.14	0.44
8. М.Ж.И.	30	6	16.05.86	6	2	0.02	0.06
9. Б.Т.Н.	26	5	14.05.86	24	6	0.08	0.26
10. М.И.П.	28	7	17.05.86	189	52	0.8	3.2
11. Б.З.И.	23	8	17.05.86	189	52	0.8	3.2
12. К.Т.М.	23	9	15.05.86	133	52	0.8	3.0

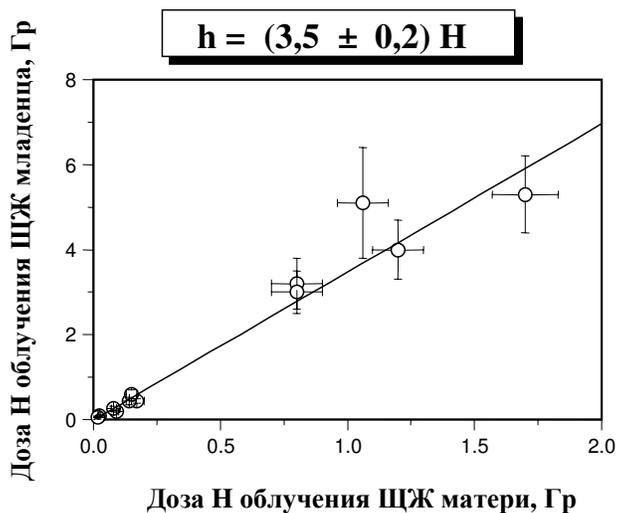


Рис. 1. Зависимость дозы  $h$  внутреннего облучения инкорпорированным  $^{131}\text{I}$  ЩЖ младенца, питавшегося материнским молоком после аварии на Чернобыльской АЭС, от дозы облучения ЩЖ матери.

В наиболее загрязненных районах активность в молоке из личных хозяйств была примерно в 2-3 раза выше, чем в молоке из торговой сети. Это объясняется, с одной стороны, разной структурой кормов личных и общественных коров - большей долей комбикормов в общественном стаде, с другой стороны, - проведением радиационного контроля на молокозаводах и изъятием из употребления молока, превышающего установленные пределы ВДУ. Также оценивалось, какое молоко преобладает в рационе питания жителей. В городах, где люди питаются, как правило, молоком из торговой сети, средняя доза формируется за счет этого молока. Поэтому потребление молока из личного хозяйства учитывается в формуле (5) с коэффициентом 2-3. В селах основной источник питания - молоко из личных хозяйств, поэтому потребление торгового молока оценивается коэффициентом 0.3-0.5 в формуле (4). Коэффициенты *a* и *b* необходимо оценивать с использованием всей имеющейся информации по измерениям молока и загрязнению почвы в населенном пункте и в районе, из которого поступало молоко на молокозавод.

Информацию, необходимую для расчета дозы в ЩЖ младенцев, получали из опроса матерей о характере питания ребенка (грудное, смешанное или искусственное), виде и количестве прикорма, прекращении употребления молочной продукции местного производства ребенком и матерью.

Модель метаболизма радиойода в организме матери и плода [2], использованная для оценки дозы в ЩЖ плода, состоит из общей камеры неорганического йода, куда быстро переходит йод из органов поступления (легкие, желудочно-кишечный тракт), камер органически связанного йода в ЩЖ матери и плода и камер органического экстрацеллюлярного йода матери и плода, общей камеры выделения.

Из общей йодидной камеры постоянная доля ее содержимого  $f_2$  переходит в ЩЖ матери и доля  $f_{2f}(A)$ , зависящая от возраста плода *A* (сут.) - в ЩЖ плода. При сроках развития плода менее 90 суток не отмечено накопления йода в его ЩЖ. При более поздних сроках имеющиеся экспериментальные данные о накоплении  $^{131}I$  в ЩЖ плода можно аппроксимировать линейной зависимостью коэффициента отложения от возраста:

$$f_{2f}(A) = 1.7 \cdot 10^{-4} \cdot (A - 90), \text{отн. ед.} \quad (6)$$

Прямых определений скорости выведения йода из ЩЖ плода ( $T_f$ ) нет. В работе [2] предложена аппроксимация константы скорости выведения йода из ЩЖ плода ( $\lambda_f$ ) в виде:

$$\lambda_f = 5.3 \cdot 10^{-5} \cdot (A - 90), \text{сут.}^{-1} \quad (7)$$

Представляется более оправданным ориентироваться на значение биологического периода выведения йода из ЩЖ новорожденных (*T*), равное 16 сут., и рассматривать два возможных варианта:

а) скорость выведения у плода изменяется с возрастом так, что к рождению  $T_f = 16$  сут., то есть  $\lambda_f = \ln 2 / T_f = 0.043$  сут. Тогда:

$$\lambda_f = 2.3 \cdot 10^{-4} \cdot (A - 90), \text{отн. ед.} \quad (8)$$

б) считать скорость выведения из ЩЖ плода постоянной с начала функционирования ЩЖ (90 сут.) и равной скорости выведения у новорожденных.

В обоих случаях численное значение скорости биологического выведения не отразится существенно на дозиметрических оценках, так как в расчет дозы входит значение эффективной константы скорости выведения, равной сумме констант скоростей радиоактивного распада (0.086 сут.<sup>-1</sup> для  $^{131}I$ ) и биологического выведения. Для численных расчетов выбрано среднее значение эффективной постоянной выведения  $\lambda_p$  равное 0.11 сут.<sup>-1</sup>

Изменение содержания  $^{131}I$  в ЩЖ плода упрощенно опишем следующим уравнением, пренебрегая незначительной задержкой нуклида в общей йодидной камере:

$$\frac{dg}{dt} = f_{2f}(A_0 + t) \cdot I(t) - \lambda_f \cdot g, \quad (9)$$

где  $A_0$  - возраст плода в момент загрязнения местности  $^{131}I$  ( $t = 0$ );

$I(t)$  - функция поступления  $^{131}I$  в организм матери.

В работе [2] мощность дозы в ЩЖ плода через *t* дней после однократного поступления активности определяется выражением:

$$h(t, A_0) = S(t + A_0) \cdot g(t, A_0), \quad (10)$$

где  $S(A)$  - фактор, преобразующий активность в  $^{131}I$  ЩЖ плода в мощность дозы в ней, а  $g(t, A_0)$  является решением уравнения (9).  $S(A)$  определяется уравнением:

$$S(A) = 1.38 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{E(A)}{m(A)}, \text{ Sv/(Bq-сут.)} \quad (11)$$

где  $E(A)$  - энергия излучения радионуклида, поглощенная в ЩЖ плода в возрасте *A*, МэВ/расп.;

$m(A)$ , г, - масса ЩЖ плода в возрасте *A*, описываемая функцией [2]:

$$m(A) = (A / 40)^{3.89}, \text{ мг.} \quad (12)$$

В работе [2] приведена таблица численных значений  $S(A)$ , которая хорошо аппроксимируется для  $^{131}\text{I}$  показательной функцией. Проинтегрировав выражение (10) при  $g(t)$ , определенном уравнением (9), получили значения дозы в ЩЖ плода от пролонгированного поступления  $^{131}\text{I}$  в организм матери. Доза плода зависит от срока беременности матери в момент аварии.

Если аварийное поступление произошло раньше начала функционирования ЩЖ плода (90 суток), то доза в ней определяется лишь той частью активности, которая поступает в организм матери после 90 суток беременности. Если радиоактивное загрязнение местности произошло в последний месяц беременности, то доза, полученная новорожденным, частично определялась внутриутробным поступлением  $^{131}\text{I}$  до родов, частично - поступлением радиойода с материнским молоком после рождения. Последняя доля оценивается согласно уравнению (3), где  $H$  - та часть дозы в ЩЖ

матери, которая сформировалась за счет поступления  $^{131}\text{I}$  в период после родов.

В таблице 2 даны значения дозы в ЩЖ плода ( $h$ ), сформировавшейся в результате длительного поступления  $^{131}\text{I}$  в организм матери в соответствии с принятой моделью по 1 Бк/сут. в течение 15 дней с последующим экспоненциальным уменьшением с периодом 5 суток и отношение этой дозы к дозе в ЩЖ матери ( $H$ ) в зависимости от возраста плода на момент аварии при условии отсутствия защитных мероприятий. Если возраст беременности на момент аварии составлял 80-90 суток, то поглощенная доза в ЩЖ плода в пределах  $\pm 50\%$  оказалась сравнимой с дозой в ЩЖ матери. Наибольшая доза в ЩЖ плода, примерно вдвое большая, чем у матери, формировалась при сроке беременности 100-140 суток на день радиоактивного загрязнения местности. При большем сроке беременности на день аварии доза облучения ЩЖ плода была сравнительно меньше.

Таблица 2

**Доза облучения  $h$  ЩЖ плода инкорпорированным  $^{131}\text{I}$ , поступившим \*) в организм матери после аварии на Чернобыльской АЭС, и ее отношение к дозе облучения  $H$  ЩЖ матери в зависимости от срока беременности  $A_0$  на дату радиоактивного загрязнения**

$A_0$ , сутки	$h$ , мкГр	$h/H$
60	0.4	0.04
70	1.7	0.14
80	6.4	0.5
90	15.4	1.3
100	22.6	1.9
110	24.9	2.1
120	24.7	2.1
140	22.0	1.9
160	18.9	1.6
180	16.3	1.4
200	14.2	1.2
220	11.8	1.0
230	10.4	0.9
240	9.1	0.8
250	7.6	0.6
260	4.0	0.3
270	0.0	0.0

\* - по 1 Бк/сут. в течение 15 дней с последующим экспоненциальным уменьшением с периодом 5 суток.

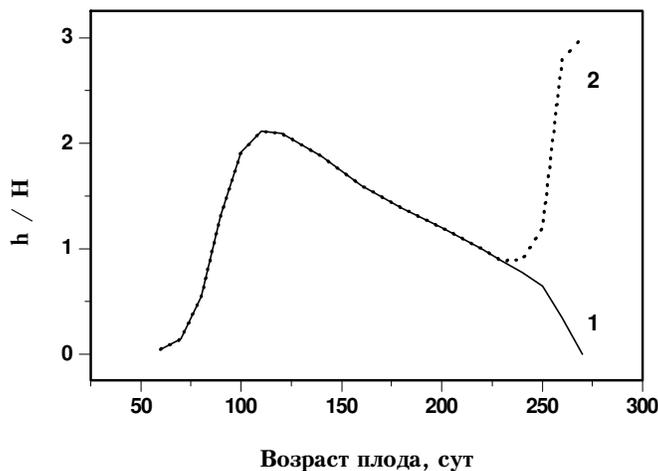
На рисунке 2 представлен график отношения поглощенной дозы в ЩЖ плода к дозе в ЩЖ матери в зависимости от срока беременности на 26.04.86 г. Если авария произошла в последний месяц беременности, то к дозе облучения ЩЖ за счет плацентарного перехода  $^{131}\text{I}$  из организма матери во внутриутробном периоде, может добавиться облучение из-за поступления активности с материнским молоком после рождения. На графике (рисунок 2) показаны возможные варианты фор-

мирования дозы в ЩЖ новорожденного: кривая 1 соответствует только внутриутробному поступлению  $^{131}\text{I}$ , кривая 2 - с добавкой, полученной с молоком матери.

Из литературы известно, что в грудное молоко за 36-48 часов после однократного введения  $^{131}\text{I}$  переходит от 1.4 до 26.8 % введенной активности. По-видимому, эта доля зависит от величины лактации [6, 7]. При объеме лактации 1 л/сут. наиболее вероятным значением кажется 10-20%, то есть

в организм новорожденного с грудным молоком переходит 10-20%, а в его ЩЖ - 5-14% от активности  $^{131}\text{I}$ , поступившей в организм матери (принят коэффициент отложения йода в ЩЖ новорожденного 50-70% [8]). Поскольку массы ЩЖ у новорожденного и плода на последней стадии

беременности близки по величине, а отложение в ЩЖ 5-14% вследствие кормления грудным молоком заметно выше 3% (см. формулу (6)) в конце внутриутробного периода, увеличение дозы в ЩЖ новорожденных, показанное в правой части рисунка 2, вполне объяснимо.



**Рис. 2.** Отношение дозы  $h$  внутреннего облучения ЩЖ плода  $^{131}\text{I}$ , поступившим из организма матери, к дозе  $H$  облучения ЩЖ матери в зависимости от срока беременности на день радиоактивного загрязнения местности: 1 - соответствует только внутриутробному поступлению  $^{131}\text{I}$ ; 2 - с добавкой, полученной с молоком матери.

Ясно, что отказ от кормления грудью в первый месяц после аварии мог бы существенно уменьшить радиационное воздействие на ребенка. Другой мерой защиты новорожденных и их матерей, которая, например, была проведена в наиболее загрязненных районах Брянской области, был временный вывоз беременных женщин и матерей с новорожденными на "чистую" территорию. Самым простым, достаточно эффективным и безопасным для ребенка способом снижения воздействия радионуклидов йода было бы своевременное, полное прекращение употребления матерью загрязненных продуктов местного производства, главным образом, молока, молочной продукции и листовых овощей, обеспечение матери чистыми продуктами, а ребенка консервированным детским питанием и чистым прикормом с молочной кухни. В Новозыбкове Брянской области по приказу главного санитарного врача И.С.Каплуна с 4 мая 1986 года была запрещена поставка местного загрязненного молока на детскую молочную кухню и в детские учреждения. Эта мера способ-

ствовала значительному снижению дозы облучения ЩЖ у самых маленьких жителей города. К сожалению, в селах разъяснение ситуации и рекомендации по режиму поведения были сделаны позднее.

Представленная методика оценки дозы в ЩЖ новорожденных, облученных внутриутробно или при грудном вскармливании, основанная на сравнении с дозой, полученной матерью, была использована для оценки дозы облучения ЩЖ новорожденных жителей наиболее загрязненных территорий Брянской и Тульской областей.

### Литература

1. NCRP, Report 80. Induction of thyroid cancer by ionizing radiation. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland, 1985.
2. Johnson J.R. Fetal thyroid dose from intakes of radioiodine by the mother//Health Phys. - 1982. - V. 43, No. 4. - P. 573-582.
3. Zvonova I.A. and Balonov M.I. Radioiodine Dosimetry and Forecast for Consequences of Thyroid Exposure of the RSFSR Inhabitants Following the Chernobyl Acci-

- dent//The Chernobyl Papers. V. I: Doses to the Soviet Population and Early Health Effects Studies/Eds. by S.Merwin and M.Balonov. - Research Enterprises, 1993. - P. 71-125.
4. **Балонов М.И., Брук Г.Я., Голиков В.Ю., Еркин В.Г., Звонова И.А., Пархоменко В.И., Шутов В.Н.** Облучение населения Российской Федерации вследствие аварии на Чернобыльской АЭС //Радиация и риск. - 1996. - Вып. 7. - С. 39-71.
  5. **Звонова И.А., Балонов М.И., Братилова А.А. и др.** Оценка поглощенной дозы в щитовидной железе жителей Брянской, Тульской, Орловской областей по результатам радиометрии в 1986 году//Радиация и риск. - Данный выпуск. - С. 95-116.
  6. **Rubov S. and Klopper J.** Excretion of radioiodine in human milk following a therapeutic dose of  $^{131}\text{I}$ //Eur. J. Nucl. Med. - 1988. - V. 14. - P. 632-633.
  7. **Weaver J.C., Kamm M.L. and Dobson R.L.** Excretion of radioiodine in human milk//JAMA. - 1960. - V. 173. - P. 872-875.
  8. ICRP Publication 56. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides. Annals of the ICRP V. 20, 1989.