

Влияние природного йода на формирование уровней облучения щитовидной железы дойных коров в острый период радиационных аварий

А.С. Снегирев¹, М.А. Басова¹, Г.В. Козьмин¹, О.А. Мирзеабасов²

¹ Курчатовский комплекс радиологии и агроэкологии НИЦ «Курчатовский институт» (КК РАЭ)
249035 Россия, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское ш., д. 1., корп. 1

² ИАТЭ НИЯУ МИФИ,
249039 Россия, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, д. 1

Реферат. Радиационное поражение сельскохозяйственных животных в острый период радиационных аварий определяется воздействием радиоioda и зависит от величины и длительности формирования поглощенной дозы в щитовидной железе (ЩЖ). Особенностью патогенеза лучевой болезни является наличие длительного скрытого периода, в связи с чем основой оперативной оценки последствий для здоровья животных являются аппаратные методы спектрометрии радионуклидов в кормах и прогностические расчетные методики оценки уровней облучения ЩЖ. Предложена модель расчета дозиметрических параметров облучения щитовидной железы дойных коров на основе воксельной дозиметрической модели ЩЖ и камерной модели кинетики метаболизма йода, предполагающей возможность формирования разных гомеостатических состояний нейроэндокринной гипоталамо-гипофизарно-тиреоидной системы в зависимости от содержания стабильного йода в рационе животных. Согласно принятой модели, кинетика метаболизма радиоактивных изотопов йода будет определяться кинетическими параметрами, характерными для конкретных уровней стабильного йода в рационе животных. Получена аналитическая зависимость поглощенной дозы от содержания стабильного йода в рационе. Представленные результаты востребованы в задачах оперативного прогноза состояния здоровья сельскохозяйственных животных и быстрого реагирования на ядерные инциденты, а также при проведении превентивных мероприятий, обеспечивающих устойчивое ведение животноводства в районах размещения ядерно-энергетических объектов.

Ключевые слова: радиационная авария, радиоизотопы йода, радиоактивность кормов, щитовидная железа, лучевая болезнь, поглощенная доза, математическое моделирование.

Для цитирования: Снегирев А.С., Басова М.А., Козьмин Г.В., Мирзеабасов О.А. Влияние природного йода на формирование уровней облучения щитовидной железы дойных коров в острый период радиационных аварий. *Известия вузов. Ядерная энергетика.* 2025;4:110–126. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.4.08>

Постановка задачи

Загрязнение внешней среды в результате радиационных аварий радиоактивными изотопами йода может оказать негативное влияние на здоровье сельскохозяйственных животных и привести к превышению допустимого содержания радионуклидов в молоке и молочных продуктах [1]. Анализ последствий радиационной аварии на Чернобыльской АЭС показал, что степень радиационного воздействия радиоактивных изотопов йода на сельскохозяйственных животных и население существенно зависит от содержания стабильного йода в окружающей среде. Было установлено, что в условиях йододефицита на территории Полесской низменности накопление радиойода и, соответственно, поглощенные дозы в щитовидной железе (ЩЖ) крупного рогатого скота и овец могли быть существенно выше по сравнению с животными, получавшими корма, содержавшие оптимальное количество стабильного йода [1, 2].

Целью настоящей работы явилась разработка модели расчета поглощенных доз, сформированных в острый период радиационной аварии в щитовидной железе дойных коров (критическая группа животных согласно ГОСТ 27488.15-90 [3]), с учетом содержания в рационе животных природного стабильного изотопа йода.

Взаимосвязь поглощенной дозы в ЩЖ с активностью радионуклидов в рационе определяли с помощью разработанных НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ (ныне – Курчатовский комплекс радиологии и агроэкологии НИЦ «Курчатовский институт») дозиметрической модели ЩЖ крупного рогатого скота и камерной модели метаболизма йода [4].

Воксельная дозиметрическая модель ЩЖ

Оценка мощности поглощенной дозы проводилась с использованием воксельной дозиметрической модели ЩЖ крупного рогатого скота (КРС), детально представленной в [4]. Модель основана на прецизионном моделировании методом Монте-Карло процессов передачи энергии биологическим тканям ионизирующими излучениями с использованием современного вычислительного кода *MCNP5* и рекомендованной МАГАТЭ библиотеки ядерных данных *TENDL-2019 (TALYS, EUROPE 2019)*. В расчетах мощности поглощенной дозы учитывали все процессы переноса β -излучения ^{131}I , включая генерацию тормозного излучения, а также γ -излучения с учетом генерации и переноса рентгеновского и флуоресцентного излучения. Диссипация энергии учитывалась до 1 кэВ, интегральная дисперсия дозы $<0,1\%$. Показано [4], что вклад γ - и фотонного излучения ^{131}I в общую поглощенную дозу составляет $\sim 20\%$.

Основным результатом расчетов явились коэффициенты конверсии $K_{\text{ЩЖ}}$, связывающие активность радионуклидов в ЩЖ со средней мощностью поглощенной дозы в этом органе. Для ^{131}I они составили: $K_{\text{ЩЖ}} = 0,350$ Гр/сут на 1 МБк активности ЩЖ для телят и $0,202$ Гр/сут на 1 МБк для дойных коров. Полная поглощенная доза определялась с учетом динамики изменения активности в ЩЖ, полученной с использованием камерной модели метаболизма йода в организме дойных коров.

Камерная модель метаболизма йода

Динамика изменения активности в ЩЖ была получена согласно камерной модели (рис. 1), основанной на представлении определенных органов и тканей организма животных в виде отдельных камер, функционально связанных между собой и с внешней средой транспортными коммуникациями, предполагающими перенос радионуклидов с кинетикой первого порядка [5].

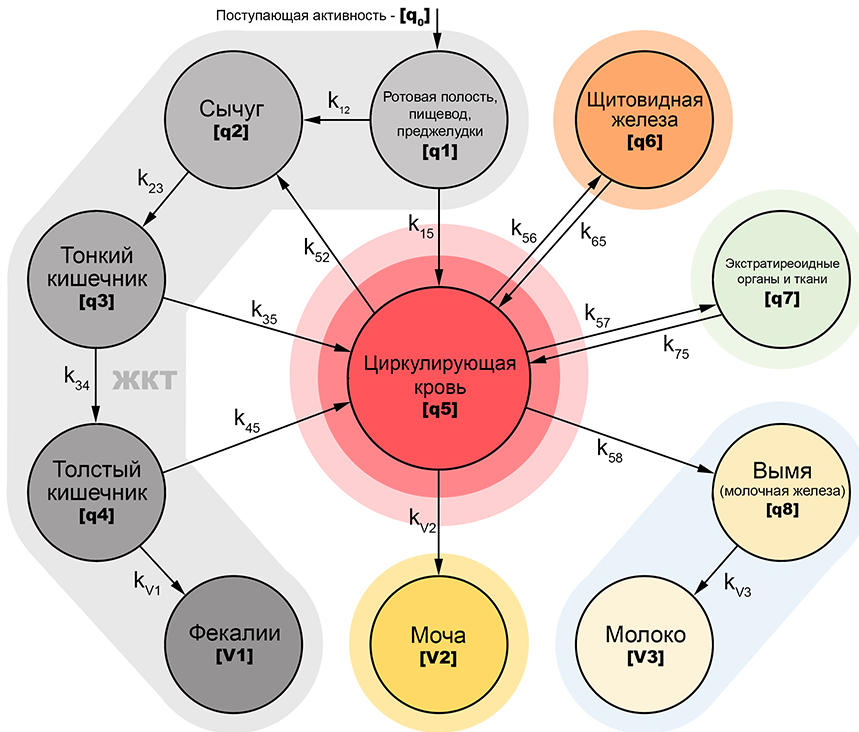


Рис. 1. Камерная модель метаболизма йода в организме дойных коров

Транспортную составляющую метаболизма йода в организме дойной коровы описывали системой дифференциальных уравнений первого порядка с кинетическими параметрами скорости транспорта (k_{ij} , сут⁻¹) из i -ой камеры в j -ую и наоборот (k_{ji} , сут⁻¹) в виде

$$\frac{dq_i}{dt} = -\lambda \cdot q_i + \sum_j k_{ji} \cdot q_j - \sum_j k_{ij} \cdot q_i, \tag{1}$$

где λ – постоянная радиоактивного распада, сут⁻¹.

Для однократного поступления радионуклидов йода принимали начальные условия: $q_1(t = 0) = q_0$ [МБк] и $q_i(t = 0) = 0$ при $i > 1$. Выведение радионуклидов из организма учитывали в виде резервуаров выведения с фекалиями (V_1), с мочой (V_2) и с молоком (V_3) с параметрами скорости выведения k_{v1} , k_{v2} и k_{v3} соответственно.

Оценку кинетических параметров модели, представленных в табл. 1, выполняли с учетом характеристик скорости прохождения содержимого в преджелудках (k_{12}), сычуге (k_{23}), тонком (k_{34}) и толстом (k_{V1}) отделах кишечника, а также параметров скорости накопления и выведения радионуклидов ^{131}I в циркулирующей крови, щитовидной железе, вымени и других органах, представленных в [6].

Таблица 1

Кинетические параметры (КП) камерной модели метаболизма радионуклидов в организме дойных коров

КП, сут ⁻¹	Значение	КП, сут ⁻¹	Значение	КП, сут ⁻¹	Значение
k_{12}	1,0	k_{45}	3,0	k_{75}	2,0
k_{15}	2,0	k_{52}	15,0	k_{58}	1,5
k_{23}	24,0	k_{56}	1,95	k_{V1}	2,0
k_{34}	12,0	k_{65}	0,25	k_{V2}	5,5
k_{35}	10,0	k_{57}	9,0	k_{V3}	1,0

В отличие от ранее разработанных моделей метаболизма йода у крупного рогатого скота [7] принятая нами модель (см. рис. 1) учитывает рециклинг йода в системе «циркулирующая кровь – сычуг – кишечник – циркулирующая кровь» [8]. Неорганическая и органическая формы йода в отдельные камеры не выделяются, так как поглощенные дозы в щитовидной железе и соответствующие им радиационные патологии у животных определяются суммарной активностью радионуклидов в ЩЖ, а радиационный контроль молока также проводится по общей концентрации радиойода вне зависимости от формы его нахождения.

В качестве бенчмарка были использованы результаты уникального экспериментального исследования закономерностей кинетики накопления и выведения радионуклидов из организма дойных коров в балансовых опытах с учетом количества поступившего с кормом радиойода и последующего его выведения с фекалиями, мочой и молоком [9].

Оценку кинетических параметров модели (табл. 1) проводили с применением многофункциональной интерактивной вычислительной системы *PTC Mathcad Prime*.

Расчетная динамика изменения активности ^{131}I в ЩЖ и в коровьем молоке, полученная согласно представленной модели, в сравнении с экспериментальными результатами при однократном поступлении аэралью загрязненной травы ^{131}I с активностью 185 МБк [9] показана на рис. 2.

Следует отметить, что положенные в основу математической модели экспериментальные данные были получены в условиях почвенно-климатической зоны Южного Урала, характеризующейся йодным дефицитом [10].

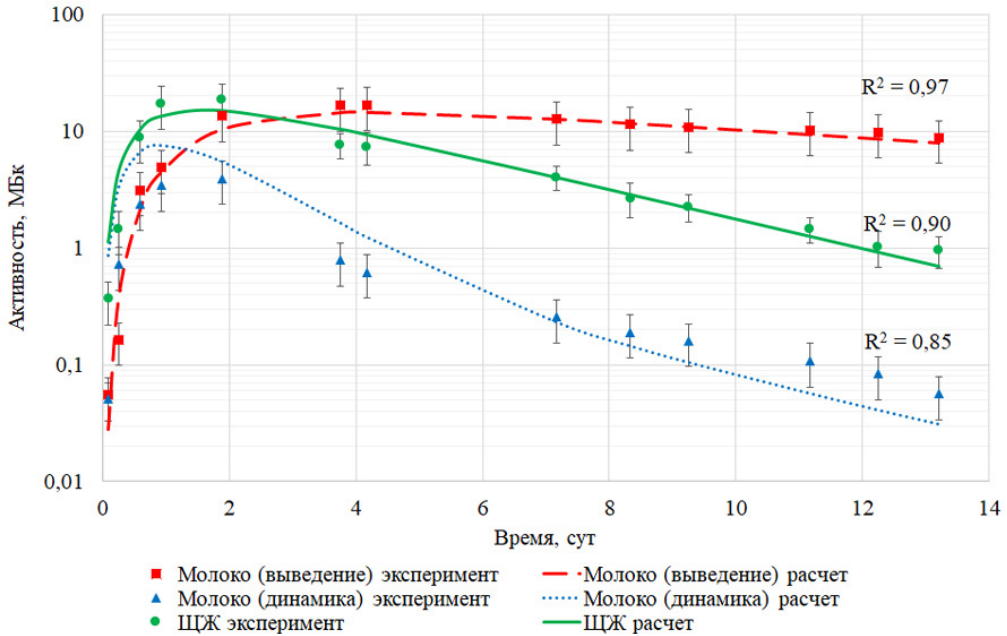


Рис. 2. Расчетная динамика изменения активности ^{131}I в ЩЖ и в коровьем молоке, полученная согласно представленной модели, в сравнении с экспериментальными результатами при однократном поступлении аэралью загрязненной травы ^{131}I с активностью 185 МБк

Кинетика метаболизма в зависимости от содержания природного стабильного йода в рационе животных

Кинетику метаболизма йода рассматривали с позиции возможности формирования гомеостатических состояний нейроэндокринной гипоталамо-гипофизарно-тиреоидной системы в зависимости от содержания стабильного йода в рационе животных. При этом учитывали, что в процессах, регулирующих метаболизм йода и продуцирование гормонов ЩЖ, важную роль играет белок натрий-йодид симпортер (*NIS*) – трансмембранный гликопротеид, обеспечивающий активный транспорт йода из пищеварительного тракта в циркулирующую кровь и затем из кровотока в фолликулярные клетки щитовидной железы [11].

По аналогии с методическим подходом, принятым Международной Комиссией по Радиационной защите для учета влияния стабильного йода на метаболизм радиоактивных изотопов йода у человека [12], был использован кинетический параметр k_{56} , определяющий поглощение йода щитовидной железой. В [8] было установлено, что высокое содержание стабильного йода в рационе (100 и 1000 мг/сут) не снижало в процессе рециклинга параметр скорости поступления радиоактивного йода в сычуг ($k_{52} = 15,2 \text{ сут}^{-1}$), но эффективно блокировало его поглощение щитовидной железой (резкое уменьшение k_{56}). Отмеченная закономерность подтверждает существенную зависимость величины коэффициента k_{56} от содержания стабильного йода в рационе.

В работе для определения k_{56} предложено аналитическое выражение (2) зависимости этого параметра от величины содержания стабильного йода в рационе дойных

коров в диапазоне величин от 1 до 1000 мг/сут. При оценке параметров (2) учитывали результаты, полученные в условиях йододефицита [2], и при использовании антидота – йодида калия – KI [13]. На основании анализа результатов расчетов для k_{56} было принято следующее выражение:

$$k_{56} = \begin{cases} k_H \cdot \frac{B_{\min}}{B}, & B \leq 10 \text{ мг/сут}; \\ k_H, & 10 < B < 50 \text{ мг/сут}; \\ k_H \cdot \frac{B_{\max}}{B}, & B \geq 50 \text{ мг/сут}. \end{cases} \quad (2)$$

где B – содержание стабильного йода в рационе животных, мг/сут; $B_{\min} = 10$ мг/сут – значение суточного потребления йода, ниже которого происходит повышение экспрессии гена, кодирующего продуцирование *NIS* на базальной мембране фолликулярных клеток щитовидной железы, и усиление ее функциональной активности. При B менее 2 мг/сут со временем возникают симптомы зобной болезни [14]; $B_{\max} = 50$ мг/сут – значение суточного потребления йода, выше которого происходит понижение экспрессии гена, кодирующего продуцирование *NIS* на базальной мембране фолликулярных клеток щитовидной железы, и, как следствие, угнетение ее функциональной активности (эффект Вольфа – Чайкоффа [15]); при высоких значениях B (более 160 мг/сут) со временем возникают симптомы токсического действия стабильного йода [16]); k_H – константа скорости перехода радиоiodа из крови в ЩЖ в оптимальном диапазоне содержания йода в рационе, сут⁻¹.

Оптимальный диапазон содержания стабильного йода в рационе

Для оценки оптимального диапазона содержания йода в рационе дойных коров принимали во внимание результаты многолетнего опыта ведения животноводства. В мировой практике молочного животноводства для коров голштинской и черно-пестрой пород (родственные породы) используется суточный рацион, содержащий, как правило, от 10 до 50 мг/сут стабильного йода, который обеспечивает удовлетворительное состояние здоровья животных, их высокую продуктивность и который был принят в работе в качестве оптимального [16].

С учетом рекомендаций [17] нижняя и верхняя границы оптимального диапазона рассматривались в качестве минимального и максимального приемлемых уровней содержания стабильного йода в рационе животных в условиях йододефицита и при избытке йода соответственно. В пределах оптимального диапазона в обеспечении стабильного гормонального гомеостаза основная роль принадлежит способности ЩЖ к саморегуляции процессов органификации йодида и секреции гормонов в ответ на изменение доступности йодида [15].

Расчеты, выполненные с применением настоящей камерной модели, позволили оценить значение кинетического параметра перехода йода из циркулирующей крови в ЩЖ (k_{56}) для условий йододефицита Южного Урала, составившего 1,95 сут⁻¹ (см.

табл. 1), а также и для условий оптимального содержания стабильного йода – $0,80 \text{ сут}^{-1}$. Отметим, что в модели [7] величина параметра, аналогичного k_{56} в оптимальном диапазоне содержания стабильного йода в рационе, составляет $0,72 \text{ сут}^{-1}$.

Нижней и верхней границам оптимального содержания стабильного йода в рационе будут соответствовать минимальный и максимальный приемлемые уровни содержания йода в ЩЖ, значения которых можно получить, предположив стационарное состояние содержания йода во всех камерах модели (хроническое поступление йода в количестве $B \text{ мг/сут}$).

Для моделирования метаболизма стабильного йода в организме дойных коров и формирования стационарных состояний использовали настоящую камерную модель (см. рис. 1), кинетические параметры табл. 1, а также зависимость (2) для оценки параметра k_{56} . Хроническое поступление стабильного йода ($\lambda = 0$) представляли в виде

$$\frac{dq_1}{dt} = -(k_{12} + k_{15}) \cdot q_1 + B. \quad (3)$$

При этом решения уравнений (1) для всех q_i могут быть представлены в виде

$$q_i(t, B) = B \varepsilon_i(t, B), \quad (4)$$

где $\varepsilon_i(t, B)$ – кинетическая функция, зависящая от содержания стабильного йода в рационе, отн. ед.

Отметим, что в данном случае камерная модель и выражения (3), (4) оперируют с параметрами содержания стабильного йода в камерах, выраженными в миллиграммах.

Кинетика метаболизма йода в условиях йододефицита и избытка йода в рационе

За пределами оптимального диапазона щитовидная железа адаптируется к дефициту ($D < 10 \text{ мг/сут}$) или избытку ($D > 50 \text{ мг/сут}$) йода в рационе с участием гипоталамо-гипофизарно-тиреоидной системы регулирования. Полагали, что при этом сохраняются уровни гомеостаза щитовидной железы, соответствующие минимальному и максимальному приемлемым величинам содержания стабильного йода в суточном рационе. Данные условия достигаются с использованием зависимости (2), из которой следует, что при хроническом потреблении йододефицитного рациона или избытке стабильного йода формируются соответствующие им два стационарных состояния содержания йода в щитовидной железе. Для стационарных состояний принимается условие

$$\frac{dq_6}{dt} = 0 = k_{56} \cdot q_5 - k_{65} \cdot q_6. \quad (5)$$

Принимая во внимание зависимости (2) и (4), несложно получить

$$q_6(t, B) = B_k \cdot \frac{k_H}{k_{65}} \cdot \varepsilon_5(t, B), \quad (6)$$

где B_k – минимально приемлемый ($B_{\min}, k = 1$) или максимально приемлемый ($B_{\max}, k = 2$) уровни содержания стабильного йода в рационе, мг/сут.

В качестве примера на рис. 3 показана зависимость динамики формирования стационарного содержания стабильного йода в щитовидной железе в условиях йододефицита.

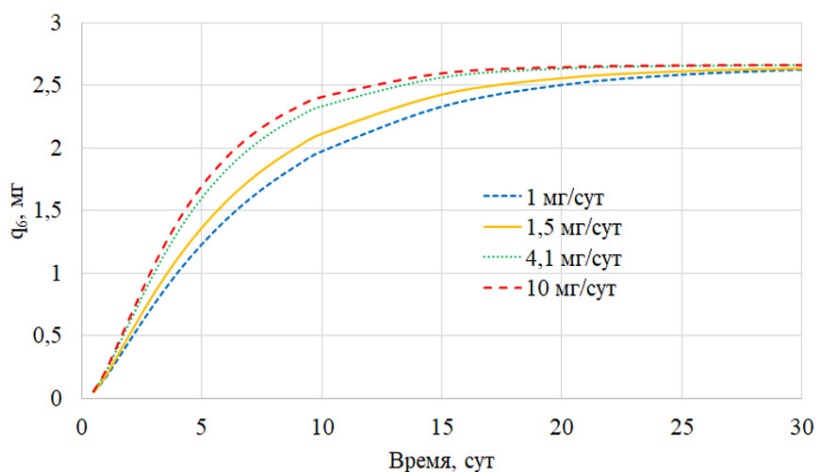


Рис. 3. Формирование стационарного состояния метаболизма стабильного йода в щитовидной железе при хроническом потреблении рациона в условиях йододефицита

Как видно из рисунка 3, в условиях йододефицита за счет увеличения скорости поглощения щитовидной железой йода из циркулирующей крови с уменьшением содержания стабильного йода в рационе происходит выход всех зависимостей на общее плато, соответствующее минимально приемлемому значению содержания йода в ЩЖ. Возможность такой закономерности обусловлена тем, что физиологически значимый пул содержания йода, источника йода для щитовидной железы – циркулирующей крови (q_5) – формируется большим количеством кинетических потоков и связей с органами и тканями организма и отличается устойчивым гомеостазом, что подтверждается результатами численного эксперимента. Теоретическая оценка величины минимально приемлемого содержания йода в ЩЖ (2,6 мг) вполне реальна. У физиологически здоровых коров (*optimum*) в щитовидной железе содержится ~250 мкг йода на 1 г [18], а в условиях йододефицита более чем вдвое меньше [19]. Согласно экспериментальным данным [18, 19], в ЩЖ с массой 20,6 г [4] в оптимальных условиях может содержаться 5,1 мг йода, а в условиях йододефицита – не более 2,5 мг.

Используя первое выражение зависимости (2), несложно получить возможное значение суточного поступления стабильного йода с пастбищной растительностью в условиях йододефицита Южного Урала, которое составило 4,1 мг/сут.

В настоящей работе по отношению к метаболизму йода принимается гипотеза о том, что самоорганизация возможна лишь в тех системах, которые обладают возможностью стационарно существовать в нескольких состояниях [20]. В условиях длительного содержания животных при дефиците стабильного йода и адаптации животных к йододефицитным условиям внешней среды в целом, например, в условиях Южного Урала или Полесской низменности, формируется свой региональный, неоптимальный диапазон содержания стабильного йода, определенный возможностями самоуправления щитовидной железой биохимическими процессами при значении параметра переноса йодида из циркулирующей крови в щитовидную железу (k_{56}), отличным от значения этого параметра в оптимальном диапазоне. В конечном итоге постоянное напряжение экспрессии генов, отвечающих за регуляторную функцию гипоталамо-гипофизарно-тиреоидной системы, со временем приводит к нарушениям кинетики метаболизма йода и возникновению эндемического зоба.

При поступлении с кормом радиоактивных изотопов йода кинетика их метаболизма будет определяться кинетическими параметрами, характерными для конкретных уровней стабильного йода в суточном рационе животных. На рисунке 4 представлена динамика содержания ^{131}I в щитовидной железе дойных коров после однократного поступления с кормом радионуклидов с активностью, составляющей 185 МБк, в условиях йододефицита (4,1 мг/сут), при содержании стабильного йода в рационе в норме (~20 мг/сут) и при избытке йода (770 мг/сут).

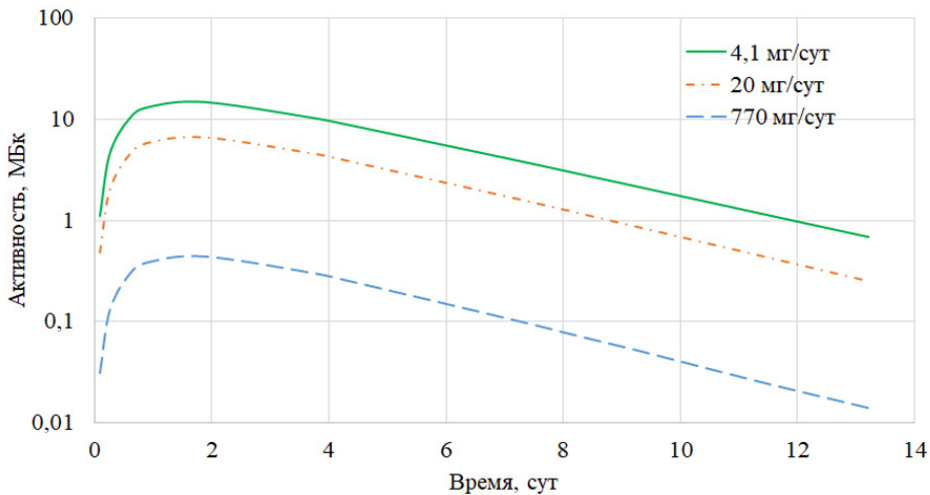


Рис. 4. Динамика содержания ^{131}I в щитовидной железе дойных коров в норме, в условиях йододефицита и избытка после однократного поступления с кормом радиоактивного изотопа с активностью 185 МБк

Избыток йода в рационе как противорадиационный фактор

Для оценки влияния противорадиационных количеств стабильного йода в рационе дойных коров на величину накопления ^{131}I в щитовидной железе были использованы данные, по всей видимости, единственного отечественного экспериментального исследования [13], выполненного после чернобыльской аварии на экспериментальной базе ПО «Маяк» (Опытная научно-исследовательская станция – ОНИС).

В качестве показателя противорадиационной эффективности антидота (иодида калия KI) использовали [13] отношение (выраженное в процентах) показаний одноканального гамма-спектрометра, измеренных в области расположения щитовидной железы коров при назначении антидота, к показаниям спектрометра у животных, получивших однократно только радиоактивный изотоп йода. Результаты эксперимента и расчета согласно принятой модели приведены в табл. 2.

Таблица 2

Накопление ^{131}I в ЩЖ дойных коров при назначении йодида калия (% от показаний гамма-спектрометра у животных без назначения антидота)

Время после введения, сут.	Расчет	Эксперимент [13]
1	6,5	$5,0 \pm 0,2$
3	6,5	$3,9 \pm 0,2$
4	6,4	$5,4 \pm 0,1$
8	6,0	$9,8 \pm 0,3$
10	5,9	$8,5 \pm 0,2$
14	5,6	–

Как видно из табл. 2, согласно данным расчета и эксперимента, наблюдается высокая эффективность йодной профилактики при однократном оральном введении KI в количестве 2 мг/кг массы животных, что соответствует суточному потреблению йода ~770 мг/сут животными массой 500 кг. Указанное значение суточного потребления животными йода лежит в диапазоне токсичных терапевтических доз (от 200 до 2000 мг), используемых для системного лечения эндемического зоба и микотических инфекций у крупного рогатого скота [21].

Можно предположить, что поступление антидота в токсичных дозах воспринимается организмом как стресс, в ответ на который происходит быстрая (менее чем за 1 сут) реакция гипоталамо-гипофизарно-тиреоидной системы регулирования содержания тиреотропного гормона (ТТГ) гипофиза в плазме циркулирующей крови, определяющего и в данном случае резко снижающего интенсивность экспрессии гена, отвечающего за продуцирование интермембранного симпортера *NIS* на базальной мембране фолликулярных клеток щитовидной железы.

Из таблицы 2 видно, что уже через сутки после перорального одновременного поступления стабильного йода и ^{131}I активность радиойода в щитовидной железе составляет незначительную величину – всего лишь от 3,9 до 9,8% от активности ^{131}I в ЩЖ без применения антидота.

Оценка сформированных поглощенных доз облучения ЩЖ в зависимости от содержания стабильного йода в рационе

Полная поглощенная доза оценивалась с учетом динамики изменения активности ^{131}I в щитовидной железе согласно принятой камерной модели. При этом функция формирования поглощенной дозы в щитовидной железе может быть представлена

в виде

$$D(T, B) = \int_0^T K_{щж} \cdot A_0 \cdot \varepsilon(t, B) \cdot e^{-\lambda \cdot t} dt, \quad (7)$$

где T – длительность формирования поглощенной дозы, принятая равной 14 сут; A_0 – однократно поступившая с кормом активность ^{131}I , принятая равной 1 МБк; $\varepsilon(t, B)$ – функция для однократного поступления йода с рационом.

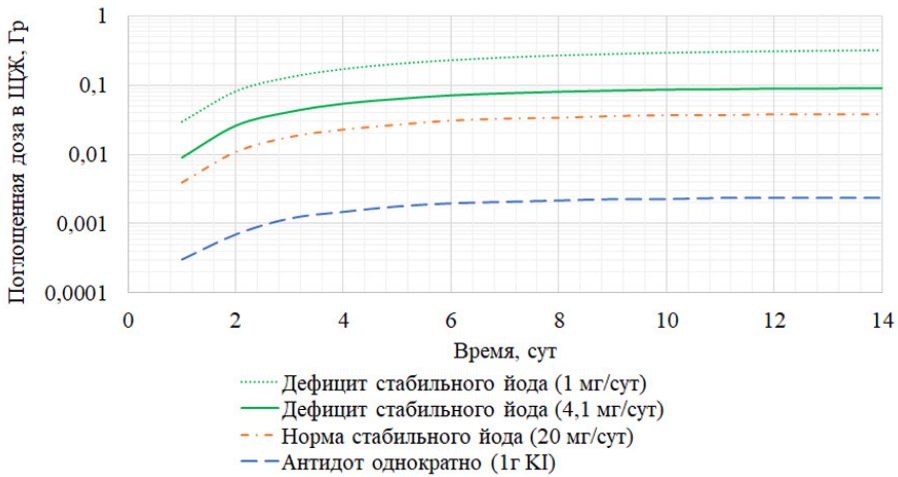


Рис. 5. Динамика формирования поглощенных доз облучения ЩЖ в зависимости от содержания стабильного йода в рационе

В качестве примера на рис. 5 представлена динамика формирования поглощенной дозы для дефицита, нормы и избытка содержания радиойода в рационе животных.

Как видно из рисунка 5, при содержании животных в условиях йододефицита дозы облучения ЩЖ могут быть до 10 раз больше, чем в регионах с нормальным потреблением стабильного йода.

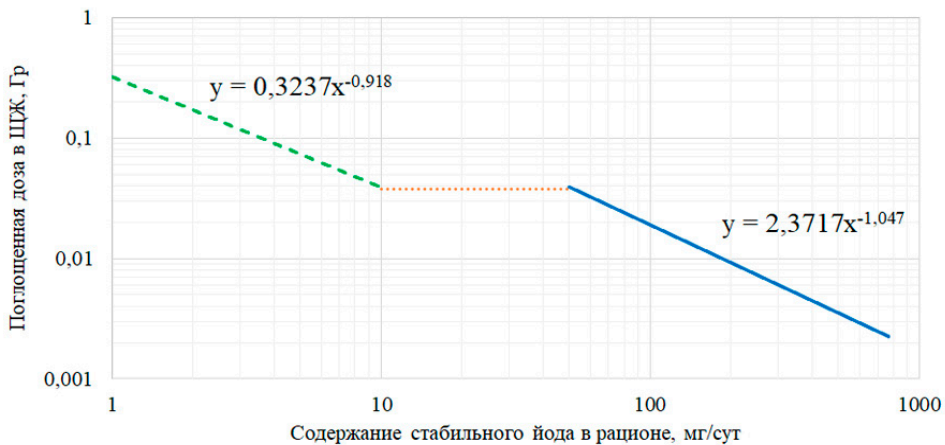


Рис. 6. Зависимость поглощенных доз облучения ЩЖ ^{131}I от содержания стабильного йода в рационе

На рисунке 6 представлены оценка сформированных поглощенных доз облучения ЩЖ для однократного поступления с пищей активности ^{131}I , равной 1 МБк, в зависимости от содержания стабильного йода в рационе животного, а также аппроксимации полученных зависимостей.

Представленные результаты позволяют принять для расчета величины сформированной поглощенной дозы в ЩЖ дойных коров после поступления с кормом радиоактивных изотопов йода в зависимости от содержания стабильного йода в суточном рационе следующее выражение:

$$D(B) = \frac{A}{A_0} \cdot \frac{B_k}{B} \cdot D_{opt}, \quad (8)$$

где D_{opt} – сформированная доза, не зависящая от содержания стабильного йода в рационе в оптимальном диапазоне от 10 до 50 мг/сут; A – однократно поступившая активность с кормом, Бк.

Заключение

Проведенные расчетно-теоретические исследования показали, что метаболизм радиоактивных изотопов йода у дойных коров в острый период радиационных аварий имеет выраженную зависимость от содержания стабильного йода в рационе животных. Разработанная в работе камерная модель метаболизма йода в сочетании с воксельной дозиметрической моделью щитовидной железы позволила количественно описать кинетику поступления, распределения и выведения радионуклидов ^{131}I при различных уровнях йодного обеспечения и тем самым установить закономерности формирования дозовых нагрузок на щитовидную железу в зависимости от состояния йодного гомеостаза.

Математическое моделирование основано на предположении о существовании трех характерных диапазонов функционирования гипоталамо-гипофизарно-тиреоидной системы – дефицитного, оптимального и избыточного, – для каждого из которых определены устойчивые стационарные состояния метаболизма йода, отличающиеся кинетическими параметрами переноса и накопления. При хроническом дефиците йода в рационе наблюдается компенсаторное повышение скорости поглощения йодида щитовидной железой (увеличение параметра k_{56}), что приводит к значительному росту накопления радиойода и, как следствие, к увеличению поглощенных доз облучения ЩЖ до 10 раз по сравнению с условиями оптимального содержания йода. Напротив, при введении противорадиационных количеств стабильного йода (в виде иодида калия) наблюдается выраженное угнетение транспорта радиойода в щитовидную железу, что сопровождается снижением накопления активности ^{131}I до 5–10% от уровня содержания радиойода в ЩЖ животных, не получавших антидот.

Принятая аналитическая зависимость параметра k_{56} от содержания стабильного йода в рационе (1–1000 мг/сут) позволила получить универсальное выражение для оценки сформированных доз облучения щитовидной железы при различных условиях йодного статуса животных. При содержании в рационе стабильного йода в пределах

10 – 50 мг/сут доза облучения не зависит от его содержания в корме и определяется только величиной поступившей активности радионуклида, тогда как за пределами указанного диапазона наблюдается рост дозовой нагрузки при дефиците и ее спад при избытке йода.

Полученные результаты подтверждаются данными экспериментальных исследований [6, 8, 9, 13, 18, 19] и имеют важное прикладное значение для задач прогнозирования радиационного воздействия на животных в условиях возможных радиационных аварий. Модель позволяет оперативно оценивать дозиметрические параметры щитовидной железы с учетом региональных особенностей йодного фона и специфики кормления животных. Кроме того, ее применение дает возможность обосновывать эффективные профилактические мероприятия, включая использование йодных добавок в рационе или антидотных средств (калия йодида), направленных на снижение дозовых нагрузок при радиационных инцидентах.

В работе предложен методический подход к оценке доз внутреннего облучения щитовидной железы, который может быть адаптирован к лабораторным, сельскохозяйственным животным и человеку. Представленные результаты могут быть использованы при разработке нормативных документов и систем моделирования в области радиационной защиты в животноводстве.

Выводы

1. Разработана комплексная модель, объединяющая воксельную дозиметрическую модель щитовидной железы крупного рогатого скота и камерную модель метаболизма йода, предполагающую возможность количественной оценки дозовых нагрузок на ЩЖ при различных уровнях содержания стабильного йода в рационе животных.

2. Показано, что кинетика метаболизма радиоактивных изотопов йода определяется функциональным состоянием гипоталамо-гипофизарно-тиреоидной системы, зависящим от содержания стабильного йода, и характеризуется изменением параметра скорости перехода йода из крови в ЩЖ (k_{56}).

3. Предложено аналитическое выражение зависимости параметра k_{56} и, соответственно, дозы облучения ЩЖ от содержания стабильного йода в рационе, что позволяет оценивать дозовые параметры при любом уровне йодного обеспечения.

4. В условиях йододефицита (менее 10 мг/сут) происходит интенсификация накопления радиойода и увеличение поглощенных доз в щитовидной железе до 10 раз по сравнению с оптимальным диапазоном.

5. При введении повышенных количеств стабильного йода (700 – 800 мг/сут в пересчете на йодид калия) достигается противорадиационный эффект, проявляющийся в снижении накопления активности ^{131}I в ЩЖ до 5 – 10% от контрольных значений.

6. Разработанная модель может быть использована при прогнозировании последствий радиационных аварий, при планировании йодной профилактики и разработке мер по обеспечению радиационной безопасности сельскохозяйственных животных.

Литература

1. Бударков В.А., Зенкин А.С., Васильев А.В. и др. Радиобиология. Радиационная безопасность сельскохозяйственных животных: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений. М.: Бибком, Транслог, 2017, 440 с. ISBN 978-5-905563-69-0.

2. Ястребков Ю.А. Метаболизм радионуклидов в организме сельскохозяйственных животных. *Ветеринарная патология*. 2002;3:35–47.
3. Защита сельскохозяйственных животных от радиоактивных веществ при авариях на радиационноопасных объектах народного хозяйства. Общие требования. ГОСТ 27488.15-90. М.: Издательство стандартов, 1990.
4. Kurachenko Yu.A., Sanzharova N.I., Kozmin G.V., Budarkov V.A., Denisova E.N., Snegirev A.S. Cattle's Thyroid Dose Estimation with Compartmental Model of Iodine Metabolism and Monte Carlo Transport Technique. *Medical radiology and radiation safety*. 2018;63(5):48–54. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5bc896ee239387.41111179
5. Климанов В.А., Крамер-Агеев Е.А., Смирнов В.В. Радиационная дозиметрия: монография (Под ред. В.А. Климанова). М.: НИЯУ МИФИ, 2014, 648 с. ISBN 978-5-7262-2038-3.
6. Снегирев А.С. Радиоактивные частицы в пищевой цепочке жвачных сельскохозяйственных животных: транспорт в пищеварительном тракте и метаболизм радионуклидов на примере ^{131}I . Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2023, 133 с.
7. Smith J.G., Simmonds J.R. The Methodology for Assessing the Radiological Consequences of Routine Releases of Radionuclides to the Environment Used in PC-CREAM 08. HPA-RPD-058. Chilton, Centre for Radiation, Chemical and Environmental Hazards, 2009, 295 p.
8. Miller J.K., Swanson E.W., Spalding G.E. Iodine Absorption, Excretion, Recycling, and Tissue Distribution in the Dairy Cow. *Journal of Dairy Science*. 1975;58(10):1578–1593. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(75\)84753-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(75)84753-9)
9. Сироткин А.Н., Панченко И.Я., Тюменев Л.Н. и др. Сравнительное поведение ^{131}I у коров при различных источниках поступления его в организм. Биологическое действие внешних и внутренних источников радиации. М.: Медицина, 1972, с. 72–77.
10. Шкуратова И.А., Ряпосова М.В., Бейкин Я.Б. Характеристика показателей гомеостаза у коров на разных сроках гестации при хроническом дефиците йода. *Аграрный вестник Урала*. 2011;8(87):28–29.
11. Dai G., Levy O., Carrasco N. Cloning and characterization of the thyroid iodide transporter. *Nature*. 1996;379:458–460. DOI: <https://doi.org/10.1038/379458a0>
12. ICRP. Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. *Ann. ICRP*. 2017;46(3/4):1–486.
13. Буров Н.И., Антипова Н.Н. Влияние йодида калия на накопление ^{131}I в щитовидной железе коров и овец. Кинетика обмена, биологическое действие радиоактивных изотопов йода. М.: ИБФ МЗ СССР, 1989, с. 149–156.
14. Андросова Л.Ф. Влияние йода на воспроизводительные и продуктивные функции коров. *Зоотехния*. 2003;10:14–16.
15. Leggett R. W. A Physiological Systems Model for Iodine for Use in Radiation Protection. *Radiation Research*. 2010;174(4):496–516. DOI: <https://doi.org/10.1667/RR2243.1>
16. Voigt G., Kiefer P. Stable and radioiodine concentrations in cow milk: dependence on iodine intake. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2007;98:218–227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2006.12.016>
17. Tolerable upper intake levels for vitamins and minerals (Ed. Albert Flynn). Scientific Committee on Food Scientific Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies. Parma, European Food Safety Authority, 2006, 480 p. ISBN 92-9199-014-0.
18. Малашко В.В. Йод – важный элемент для животных. *Ветеринарное дело*. 2020;1(103):10–19.

19. Манукало С.А., Шантыз А.Х. Йодная недостаточность в животноводстве. *Ветеринария Кубани*. 2010;5:7–8.
20. Атауллаханов Ф.И., Мельник К.С., Бутылин А.А. Самоорганизация системы с несколькими состояниями равновесия. *Биофизика*. 2013;58(1):149–158.
21. Тохметов Т.М. Профилактика дефицита йода в рационах дойных коров. *Сельское, лесное и водное хозяйство*. 2011;3. URL: <https://agro.snpauka.ru/2011/12/75> (дата обращения 03.06.2025).

Поступила в редакцию 20.10.2025

После доработки 05.11.2025

Принята к опубликованию 27.11.2025

Авторы

Снегирев Алексей Сергеевич, м.н.с., к.биол.н.,

E-mail: snegir.05@mail.ru

Басова Мария Андреевна, м.н.с.,

E-mail: maribasova@mail.ru

Козьмин Геннадий Васильевич, в.н.с., к.биол.н.,

E-mail: kozmin@obninsk.ru

Мирзеабасов Олег Ахмедбекович, доцент, к.т.н.,

E-mail: oami@yandex.ru

UDC 614.876; 53.072; 539.1.047; 51-76

Influence of Natural Iodine on the Formation of Thyroid Exposure Levels in Dairy Cows during the Early Phase of Radiation Accidents

Snegirev A.S.¹, Basova M.A.¹, Kozmin G.V.¹, Mirzeabasov O.A.²

¹ *Kurchatov Complex of Radiology and Agroecology of the NRC "Kurchatov Institute" (KK RAE)*

1 Kievskoe Sh., 249035 Obninsk, Kaluga reg., Russia

² *QINPE MPhI,*

1 Studgorodok, 249039 Obninsk, Kaluga reg., Russia

Abstract

Radiation damage to farm animals during the acute period of nuclear reactor accidents is mainly determined by exposure to ¹³¹I and depends on the magnitude and duration of accumulation of the absorbed dose in the thyroid gland (TG). A feature of the pathogenesis of radiation sickness is the presence of a long latent period, and therefore, the basis for rapid assessment of the consequences for animal health is instrumental methods of radionuclide spectrometry in animal feed and predictive calculation methods for assessing TG exposure levels. We propose a model for calculating dosimetric parameters of irradiation of the thyroid gland of dairy cows based on a voxel dosimetric model of the thyroid gland and a compartment model of the kinetics of iodine metabolism, which suggests the possibility of forming different homeostatic states of the neuroendocrine hypothalamic-pituitary-thyroid system depending on the content of stable iodine in the animal's diet. According to our model, the kinetics of metabolism of radioactive iodine isotopes is determined by kinetic parameters characteristic for specified levels of stable iodine in the animal's diet. An analytic formula linking absorbed dose and content of stable iodine in the diet was developed. The presented results are critical

for rapid forecasting of the health status of farm animals and rapid response to nuclear incidents, as well as in carrying out preventive measures to ensure sustainable livestock farming in areas where nuclear power facilities are located.

Keywords: radiation accident, iodine radioisotopes, feed radioactivity, thyroid gland, radiation sickness, absorbed dose, mathematical modeling.

For citation: Snegirev A.S., Basova M.A., Kozmin G.V., Mirzeabasov O.A. Influence of Natural Iodine on the Formation of Thyroid Exposure Levels in Dairy Cows during the Early Phase of Radiation Accidents. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;4:110–126. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.4.08> (in Russian).

References

1. Budarkov V.A., Zenkin A.S., Vasiliev A.V., Donskaya G.A. Radiobiology. Radiation safety of farm animals: A textbook for students of higher educational institutions. Moscow, Bibcom, Translog Publ., 2017, 440 p. ISBN: 978-5-905563-69-0 (in Russian).
2. Yastrebkov Yu.A. Metabolism of radionuclides in the body of agricultural animals. *Russian Journal of Veterinary Pathology*. 2002;3:35–47 (in Russian).
3. Protection of farm animals from radioactive substances in case of accidents at radially hazardous facilities of the national economy. General requirements. GOST 27488.15-90. Moscow, Publishing House of Standards, 1990 (in Russian).
4. Kurachenko Yu.A., Sanzharova N.I., Kozmin G.V., Budarkov V.A., Denisova E.N., Snegirev A.S. Cattle's Thyroid Dose Estimation with a Comparative Model of Iodine Metabolism and Monte Carlo Transport Technique. *Medical radiology and radiation safety*. 2018;63(5):48–54. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5bc896ee239387.41111179
5. Klimanov V.A., Kramer-Ageev E.A., Smirnov V.V. Radiation dosimetry: monograph. Edited by V.A. Klimanov. Moscow, MEPhI, 2014, 648 p. ISBN 978-5-7262-2038-3 (in Russian).
6. Snegirev A.S. Radioactive particles in the food chain of ruminant farm animals: transport in the digestive tract and metabolism of radionuclides using the example of ^{131}I . Dissertation for the degree of Candidate of Biological Sciences. Obninsk, RIRAE, 2023, 133 p. (in Russian).
7. Smith J.G., Simmonds J.R. The Methodology for Assessing the Radiological Consequences of Routine Releases of Radionuclides to the Environment Used in PC-CREAM 08. HPA-RPD-058. Chilton, Centre for Radiation, Chemical and Environmental Hazards, 2009, 295 p.
8. Miller J.K., Swanson E.W., Spalding G.E. Iodine Absorption, Excretion, Recycling, and Tissue Distribution in the Dairy Cow. *Journal of Dairy Science*, 1975;58(10):1578–1593. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(75\)84753-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(75)84753-9)
9. Sirotkin A.N., Panchenko I.Ya., Tyumenev L.N., Panteleev L.I., Nikolayeva E.M., Grishin A.I., Korneev N.A. Comparative behavior of ^{131}I in cows at different sources of its intake. In Collection «Biological effect of external and internal sources of radiation». Moscow, Medicina Publ., 1972, pp. 72–77 (in Russian).
10. Shkuratova I.A., Ryaposova M.V., Beikin Ya.B. Characteristics of homeostasis indicators in cows at different gestation periods with chronic iodine deficiency. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2011;8(87):28–29 (in Russian).
11. Dai G., Levy O., Carrasco N. Cloning and characterization of the thyroid iodide transporter. *Nature*. 1996;379:458–460. DOI: <https://doi.org/10.1038/379458a0>
12. ICRP. Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. *Ann. ICRP*. 2017;46(3/4):1–486.

13. Burov N.I., Antipova N.N. The effect of potassium iodide on the accumulation of ^{131}I in the thyroid gland of cows and sheep. Kinetics of metabolism, biological effect of radioactive isotopes of iodine. Moscow, IBF of the Ministry of Health of the USSR, 1989, pp. 149–156 (in Russian).
14. Androsova L.F. The effect of iodine on reproductive and productive functions of cows. *Zootechniya*. 2003;10:14–16 (in Russian).
15. Leggett R. W. A Physiological Systems Model for Iodine for Use in Radiation Protection. *Radiation Research*. 2010;174(4):496–516. DOI: <https://doi.org/10.1667/RR2243.1>
16. Voigt G., Kiefer P. Stable and radioiodine concentrations in cow milk: dependence on iodine intake. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2007;98:218–227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2006.12.016>
17. Tolerable upper intake levels for vitamins and minerals (Ed. Albert Flynn). Scientific Committee on Food Scientific Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies. Parma, European Food Safety Authority, 2006, 480 p. ISBN 92-9199-014-0.
18. Malashko V.V. Iodine is an important element for animals. *Veterinarnoe delo*. 2020;1(103): 10–19 (in Russian).
19. Manukalo S.A., Shantyz A.Kh. Iodine deficiency in animal husbandry. *Veterinaria Kubani*. 2010;5:7–8 (in Russian).
20. Ataulakhanov F.I., Melnik K.S., Butylin A.A. Molecular self-organization and multiple equilibrium systems. *Biophysics*. 2013;58(1):120–127 <https://doi.org/10.1134/S0006350913010028>
21. Tokhmetov T.M. Preventive maintenance of deficiency of iodine in diets of milk cows. *Agriculture, forestry and water management*. 2011;3. URL: <https://agro.snauka.ru/en/2011/12/75> (accessed Jun.03, 2025) (in Russian).

Authors

Aleksei S. Snegirev, Junior Researcher, Cand. Sci. (Biology),

E-mail: snegir.05@mail.ru

Maria A. Basova, Junior Researcher,

E-mail: maribasova97@mail.ru

Gennady V. Kozmin, Leading Researcher, Cand. Sci. (Biology),

E-mail: kozmin@obninsk.ru

Oleg A. Mirzeabasov, Associate professor, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: oami@yandex.ru