

УДК 539.163:636.03:591.132

АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВСАСЫВАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНОМ ТРАКТЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ

© 2021 г. Н. Н. Исамов^{1,*}, С. В. Фесенко¹¹ Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

*E-mail: nizomis@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.06.2020 г.

После доработки 22.10.2020 г.

Принята к публикации 11.11.2020 г.

Представлен анализ литературных данных по параметрам всасывания радионуклидов в желудочно-кишечном тракте сельскохозяйственных животных, полученных в полевых и лабораторных экспериментах с 1960-х годов по настоящее время. Коэффициенты всасывания для разных радионуклидов образуют следующий ряд: $^{239}\text{Pu} < ^{144}\text{Ce} \approx ^{91}\text{Y} < ^{54}\text{Mn} \approx ^{95}\text{Zr} \approx ^{106}\text{Ru} \approx ^{238}\text{U} < ^{210}\text{Pb} \approx ^{60}\text{Co} \approx ^{59}\text{Fe} \approx ^{140}\text{Ba} \approx ^{110\text{m}}\text{Ag} \approx ^{210}\text{Po} \approx ^{185}\text{W} < ^{45}\text{Ca} \approx ^{65}\text{Zn} \approx ^{90}\text{Sr} \approx \text{Te} \approx ^{226}\text{Ra} < ^{137}\text{Cs} \approx ^{32}\text{P} \approx ^{99}\text{Tc} < ^3\text{H} < ^{131}\text{I}$. Полученная информация может быть использована для оценки и прогнозирования последствий радиоактивного загрязнения окружающей среды, построения моделей поступления и выведения радионуклидов из организма животных, нормирования содержания радионуклидов в тканях животных, разработки средств снижения перехода радионуклидов из кормов в продукцию животноводства.

Ключевые слова: радионуклиды, крупный рогатый скот, овцы, козы, свиньи, куры, всасывание радионуклидов в желудочно-кишечном тракте животных

DOI: 10.31857/S0869803121010069

Радиоэкология как наука, изучающая поведение радионуклидов в окружающей среде, получила развитие в 1950-х годах. Первоначально целью этих исследований была оценка прямого действия ионизирующей радиации на растения и животных. Впоследствии было уточнено, что негативное воздействие на эти объекты происходит в результате как внешнего, так и внутреннего облучения [1, 2]. Исследования воздействия глобальных выпадений на человека показали, что некоторые радионуклиды, такие как ^{90}Sr , ^{131}I и ^{137}Cs , являются довольно подвижными в окружающей среде. Накапливаясь в продуктах питания, главным образом животного происхождения, они служат причиной значительного вклада в эффективную дозу облучения населения [2]. Вследствие этого первые исследования, выполненные в СССР по изучению поступления радионуклидов в продукты питания животного происхождения, были сосредоточены на изучении поведения продуктов деления, включая три наиболее подвижных радионуклида: ^{90}Sr , ^{131}I и ^{137}Cs , а также $^{103/106}\text{Ru}$ и $^{141/144}\text{Ce}$ [3–37].

Использование ядерной энергии в мирных целях, а также возникновение аварий на объектах ядерно-топливного цикла стимулировали даль-

нейшее проведение широкого спектра экспериментов на животных по изучению поступления и накопления радионуклидов, таких как ^3H [28–30], продуктов нейтронной активации (^{54}Mn , ^{60}Co , ^{65}Zn) [3, 30], естественных радионуклидов (^{238}U , ^{226}Ra и ^{210}Pb) [22, 25, 30] и трансурановых радионуклидов (^{237}Np , ^{239}Pu , ^{241}Am) в биологических объектах [8, 28–30].

Поскольку изначально целью исследований, связанных с вопросами миграции радионуклидов в трофической цепи животных, была оценка последствий ядерной войны или аварийных ситуаций на объектах ядерно-топливного цикла, большинство экспериментов проводили для изучения закономерностей накопления и выведения в условиях однократного поступления радионуклидов [27]. Однако в ряде исследований применялось и хроническое введение изотопов в организм животных для изучения количественных параметров накопления радионуклидов в условиях установления равновесия в распределении такового между содержимым желудочно-кишечного тракта и органами при постоянном поступлении радионуклидов. При этом используется эмпирически определяемый параметр как кратность накопления, который характеризует состояние рав-

новесия между рационом и организмом в том смысле, что скорости поступления радионуклидов в органы и выведения из них практически сравнялись и дальнейшее поступление в организм не сопровождается существенным изменением содержания радионуклида. В экспериментах использовали различные виды сельскохозяйственных жвачных животных (крупный рогатый скот, овцы и козы), моногастричных (свиньи) и птиц (преимущественно куры) [13, 19, 21, 24].

Всасывание радионуклидов в желудочном кишечном тракте (ЖКТ) является первым этапом при поступлении радионуклидов в организм животных, а величина коэффициента всасывания (A_i) определяет содержание радионуклидов в других органах и тканях. Вследствие этого оценка коэффициентов всасывания радионуклидов в ЖКТ различных видов продуктивных сельскохозяйственных животных и птиц рассматривалась как одна из первоочередных задач радиоэкологических экспериментов. В этих исследованиях изучалось влияние на коэффициент всасывания таких модифицирующих факторов, как состав рациона животных (в том числе присутствие в нем аналоговых макро- и микроэлементов), физико-химические свойства радионуклидов и возраст животных [8].

Целью данной работы являлись обобщение данных по коэффициентам абсорбции радионуклидов в ЖКТ и оценка роли факторов, определяющих всасывание радионуклидов в желудочном кишечном тракте сельскохозяйственных животных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Данные исследований, представленных в настоящей статье, получены при использовании однотипной методики. Подопытные животные были разделены на две группы с одинаковыми половозрастными характеристиками и получали один и тот же основной рацион. Данные по количеству голов каждого вида представлены в табл. 1–7. Первой группе животных задавали радионуклиды перорально, а второй группе вводили одинаковое количество радионуклида внутривенно. Через 24 ч после введения проводили убой животных обеих групп и измеряли удельную активность радионуклидов во всех тканях и органах. Радионуклиды, как правило, вводились в дозе 5.0×10^4 – 1.0×10^5 Бк на 1 кг живой массы. Коэффициент всасывания (A_i) рассчитывали методом сравнения задерживания радионуклида в организме животных после однократного орального и парентерального его введения по формуле:

$$A_i = \frac{A_1}{A_2} \times 100\%, \quad (1)$$

где A_i – величина всасывания радионуклида из ЖКТ в кровь; A_1 – содержание радионуклида в организме при оральном его поступлении; A_2 – содержание радионуклида в организме при парентеральном его введении (в %).

В работах зарубежных авторов коэффициент всасывания (f_1 , безразмерный) определялся как отношение содержания радионуклида в организме при оральном *per os* (A_o) и внутривенном поступлении (A_i) радионуклида [39]. Основой служил подход, используемый при изучении метаболизма питательных элементов с помощью метода меченых атомов. Этот метод оказался более чувствительным и позволял определять величину всасывания из источников с более низкой доступностью, чем измерения концентрации радионуклидов в фекальных выделениях. В то же время следует отметить отсутствие принципиальных различий между подходами, используемыми в России и в западных странах, что позволило сравнить результаты исследований по оценке параметров всасывания радионуклидов в ЖКТ, представленных в настоящей работе, с результатами аналогичных исследований, проведенных в других странах. В настоящей работе использовали обозначение коэффициента всасывания в виде отношения содержания радионуклида в организме при оральном *per os* (A_o) и внутривенном поступлении (A_i) радионуклида, т.е. как долю сорбированного радионуклида.

В большинстве экспериментов радионуклиды в виде хлористых солей (для катионов) добавляли в воду, используемую при поении животных, или вносили в корма рациона, затем определяли концентрацию радионуклидов в рационе и количество потребленных кормов и воды. рН применяемых растворов, внесенных как в корма, так и в воду, составляла 3.0 для хлоридов. При использовании радиоактивных солей нитратов рН растворов варьировала в пределах от 1.5 до 1.7. Для введения радионуклидов подсосным животным специально был сконструирован шприц-катетер, позволяющий без потерь проводить затравку молодняка. Однако в некоторых экспериментах телятам-молочникам выпаивали предварительно загрязненное радионуклидами молоко.

Данные были введены в базу данных, созданную с помощью программы EXCEL Microsoft, обработку данных и графическое представление результатов осуществляли с помощью программ EXCEL, STATISTICA v. 10 и GRAPHER v. 9.

Таблица 1. Коэффициенты всасывания (f_1) в ЖКТ взрослого крупного рогатого скота
Table 1. Absorption coefficient (f_1) values in the GIT of the adult cattle

Радионуклид	Физико-химическая форма	f_1^*	N	Возраст (лет)	Ссылка
^3H	НТО	0.92 ± 0.014	НД**	НД	[29]
^{22}Na	NaCl	$(9.6 \pm 0.14) \times 10^{-2}$	10	6	[10]
^{45}Ca	CaCl ₂	0.11 ± 0.021	10	5	[33]
^{54}Mn	MnCl ₂	$(5.0 \pm 0.8) \times 10^{-3}$	4	НД	[29]
^{59}Fe	FeCl ₃	$(4.2 \pm 0.3) \times 10^{-2}$	12	3.3	[21]
^{60}Co	CoCl ₂	0.024	4	10	[32]
^{65}Zn	ZnCl ₂	0.2	4	1.5	[32]
^{65}Zn	ZnCl ₂	0.11	4	8	[32]
$^{89/90}\text{Sr}$	SrCl ₂	0.11 ± 0.009	5	8	[9]
^{90}Sr	SrCl ₂	0.16 ± 0.04	4	НД	[29]
^{90}Sr	SrCl ₂	$(6.4 \pm 0.5) \times 10^{-2}$	7	1.48	[11]
^{95}Zr	ZrCl ₂	$(6.8 \pm 1.5) \times 10^{-3}$	5	НД	[31]
^{106}Ru	Ru(NO ₃) ₂	$(2.3 \pm 0.3) \times 10^{-2}$	5	НД	[31]
^{131}I	KI	1.00	4	НД	[30]
^{137}Cs	CsCl	0.50 ± 0.056	НД	НД	[17]
^{137}Cs	CsCl	0.54	5	5	[31]
^{140}Ba	BaCl ₂	0.05	4	НД	[30]
^{144}Ce	CeCl ₃	$(5.5 \pm 1.0) \times 10^{-4}$	5	5	[31]
^{210}Pb	НД	$(2.7 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	6	НД	[35]
^{238}U	UO ₂ (NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	$(1.2 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	6	5–9	[25]
^{238}U	UO ₂ (NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	$(1.0 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	НД	НД	[22]

* Среднее \pm станд. откл.

** НД – нет данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Динамика концентрации радионуклидов в крови сельскохозяйственных животных после однократного введения

Изучение всасывания радионуклидов проведено в основном в краткосрочных экспериментах с однократным введением радионуклидов в организм животных. Концентрация радионуклидов в крови достаточно быстро нарастала, достигая максимума, и затем плавно уменьшалась вследствие выведения радионуклидов из организма [36].

Время достижения максимального значения концентрации радионуклидов в крови являлось важным параметром, характеризующим динамику перехода радионуклидов из кормов в кровь (табл. 8). Данные табл. 8 суммированы из обзоров [29, 38] и результатов экспериментов со свежими продуктами деления, проведенных на площадке НПО «Маяк» [36], а также данных, приведенных в публикациях [29, 38].

В некоторых ситуациях данные табл. 8 представляли дополнительный результат радиобиологических исследований, направленных на оценку последствий облучения животных инкорпорированными радионуклидами. Так, Фёдоров и др. [36], изучая биологические эффекты внутреннего облучения 40 коров в возрасте 4–7 лет со средним живым весом 472 ± 23 кг, получил данные по динамике содержания ^{89}Sr , ^{131}I , ^{132}Te , ^{140}Ba и ^{99}Mo в различных тканях животных. Отметим, что полученные в этих исследованиях значения достаточно хорошо согласуются с данными обзора [29].

Следует также отметить, что у овец и коз максимальные концентрации радионуклидов наблюдали раньше, чем у крупного рогатого скота, а для моногастричных животных (свиньи) были зарегистрированы наименьшие сроки регистрации пика содержания радионуклидов в крови.

Наименьшее время (3–7 ч), необходимое для достижения максимальной концентрации в кро-

Таблица 2. Коэффициенты всасывания (f_1) радионуклидов в ЖКТ взрослых овец
Table 2. Absorption coefficient (f_1) values in the GIT of the adult sheep

Радионуклид	Физико-химическая форма	F_1^*	N	Возраст (лет)	Ссылка
^{45}Ca	CaCl_2	0.35	14	НД**	[28]
^{60}Co	CoCl_2	3.5×10^{-2}	10	1.48	[28]
^{65}Zn	ZnCl_2	$(8.4 \pm 1.9) \times 10^{-2}$	6	1.48–1.97	[3]
^{65}Zn	В составе кормов	$(5.3 \pm 1.6) \times 10^{-2}$	6	1.48–1.97	[3]
^{65}Zn	ZnCl_2	0.10 ± 0.026	6	1.48	[28]
^{90}Sr	SrCl_2	$(8.5 \pm 1.7) \times 10^{-2}$	4	3	[6]
^{90}Sr	SrCl_2	$(8.3 \pm 2.1) \times 10^{-2}$	НД	2.3	[6]
^{90}Sr	SrCl_2	$(9.0 \pm 0.5) \times 10^{-2}$	НД	3	[13]
^{91}Y	$\text{Y}(\text{NO}_3)_2$	$(5.0 \pm 1.5) \times 10^{-4}$	НД	НД	[23]
^{131}I	NaI	1.0	НД	НД	[28]
^{106}Ru	$\text{Ru}(\text{NO}_3)_2$	$(1.5 \pm 0.4) \times 10^{-3}$	НД	НД	[28]
^{137}Cs	CsCl	0.57 ± 0.14	НД	НД	[28]
^{137}Cs	CsCl	0.56	4	3	[12]
^{144}Ce	CeCl_3	$(3.0 \pm 0.4) \times 10^{-4}$	4	3	[6]
$^{141/144}\text{Ce}$	CeCl_3	9.0×10^{-4}	6	0.5	[8]
^{144}Ce	CeCl_3	3.0×10^{-4}	6	1.5 г	[8]

* Среднее \pm станд. откл.

** НД – нет данных.

Таблица 3. Коэффициенты всасывания (f_1) в ЖКТ взрослых коз
Table 3. Absorption coefficient (f_1) values in the GIT of the adult goat

Радионуклид	Физико-химическая форма	f_1^*	N	Возраст (лет)	Ссылка
^{45}Ca	CaCl_2	0.20 ± 0.034	12	1.48	[23]
^{60}Co	CoCl_2	$(4.7 \pm 0.5) \times 10^{-2}$	6	1.07	[28]
	CoCl_2	$(6.3 \pm 1.1) \times 10^{-2}$	4	1.48	[32]
	CoCl_2	$(6.7 \pm 0.9) \times 10^{-2}$	4	2.14	[32]
^{90}Sr	SrCl_2	$(5.9 \pm 0.6) \times 10^{-2}$	20	3.0	[28]
	SrCl_2	$(8.6 \pm 3.4) \times 10^{-2}$	12	НД	[40]
	SrCl_2	$(9.8 \pm 0.4) \times 10^{-2}$	6	2.46	[13]
^{106}Ru	$\text{Ru}(\text{NO}_3)_2$	$(1.4 \pm 0.3) \times 10^{-3}$	10	2.0	[28]
^{131}I	Iodide	0.70	НД	НД	[16]
^{137}Cs	CsCl	0.68 ± 0.073	20	3.0	[28]

* Среднее \pm станд. откл.

** НД – нет данных.

ви крупного рогатого скота, отмечено для ^{32}P и ^{131}I , промежуточное время (12–24 ч) характерно для ^3H , ^{60}Co , ^{45}Ca , $^{89,90}\text{Sr}$, ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{59}Fe , ^{140}Ba , и наибольшее время достижения максимум (30–60 ч) наблюдалось для ^{132}Te и ^{185}W .

Существует два вида возможных неопределенностей, представленных в табл. 8, связанных с оценкой коэффициента всасывания радионуклидов в ЖКТ животных, проведенных в Советском Союзе [40]. Так, исследования были относительно

Таблица 4. Коэффициенты всасывания (f_1) радионуклидов в ЖКТ свиней
Table 4. Absorption coefficient (f_1) values in the GIT of the adult pigs

Радионуклид	Физико-химическая форма	f_1^*	N	Возраст (лет)	Ссылка
^{32}P	Na_2HPO_4	0.50	14	0.29	[18]
^{59}Fe	FeCl_3	0.21 ± 0.7	7	0.56	[32]
^{60}Co	CoCl_2	0.028	7	2.0	[32]
^{65}Zn	ZnCl_2	0.59	10	0.33	[32]
^{65}Zn	ZnCl_2	0.51 ± 0.018	12	0.33	[28]
^{90}Sr	SrCl_2	0.14 ± 0.032	6	3.0	[26]
^{90}Sr	SrCl_2	0.13 ± 0.011	10	3.0	[23]
^{90}Sr	SrCl_2	0.19 ± 0.014	7	3.0	[14]
^{106}Ru	$\text{Ru}(\text{NO}_3)_2$	0.011 ± 0.001	24	0.6	[15]
^{137}Cs	CsCl	0.73	6	0.57	[37]
^{185}W	$\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.13	6	30 дней	[32]
^{239}Pu	Nitrate	$(1.7 \pm 0.5) \times 10^{-5}$	6	540 дней	[28]
^{239}Pu	Citrate	1.9×10^{-3}	6	75 дней	[7]
^{238}U	$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.012 ± 0.004	7	15 дней	[22]

* Среднее \pm станд. откл.

Таблица 5. Коэффициенты всасывания (f_1) в ЖКТ взрослых кур
Table 5. Absorption coefficient (f_1) values in the GIT of the adult hens

Радионуклид	Физико-химическая форма	f_1^*	N	Возраст (лет)	Ссылка
^3H	НТО	0.9 ± 0.005	НД**	НД	[28]
^{45}Ca	CaCl_2	0.60 ± 0.07	10	0.66	[38]
^{59}Fe	FeCl_3	0.72 ± 0.056	НД	НД	[28]
^{60}Co	CoCl_2	0.35 ± 0.02	НД	НД	[28]
^{65}Zn	ZnCl_2	0.68 ± 0.07	НД	НД	[28]
^{65}Zn	ZnCl_2	0.64 ± 0.08	НД	НД	[28]
^{90}Sr	SrCl_2	0.60 ± 0.1	10	0.66	[19]
^{90}Sr	SrCl_2	0.60 ± 0.055	12	3.01	[23]
^{106}Ru	$\text{Ru}(\text{NO}_3)_2$	0.031 ± 0.04	НД	НД	[28]
^{137}Cs	CsCl	0.68 ± 0.05	10	0.74	[19]
^{238}U	$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.015 ± 0.002	6	0.74	[25]

* Среднее \pm станд. откл.

** НД – нет данных.

но кратковременными, в результате чего животных забивали на следующий день после введения радионуклидов. Определение коэффициента всасывания с помощью подхода, описанного выше, требует, чтобы вводимые и поглощаемые радионуклиды находились в равновесии во всех измеренных пулах (органах и тканях). В течение пер-

вых 24 ч после поступления радионуклидов в организм могут все еще происходить быстрые изменения в концентрации радионуклидов в тканях животных как при внутривенном, так и пероральном введении изотопов, препятствуя достижению равновесия между содержанием радионуклидов в некоторых органах и тканях. Так,

Таблица 6. Параметры статистической модели, описывающей всасывание радионуклидов в ЖКТ животных в зависимости от возраста**Table 6.** Parameters of a statistical model describing the absorption of radionuclides in animal gastrointestinal tract as a function of age

Радионуклид	Вид животных	<i>N</i>	<i>A</i>	<i>B</i> , сут ⁻¹	<i>T</i> _{1/2} , сут	Период наблюдения, сут	<i>C</i>	<i>R</i> ²	Ссылка
⁹⁰ Sr	КРС	6	0.85	0.011	63	3–1100	0.08	0.98	[13]
⁹⁰ Sr	КРС	2	2.8	0.53			0.08	0.80	[13]
⁹⁰ Sr	Овцы	3–5	0.99	0.012	57.75	3–240	0.05	0.96	[28]
⁹⁰ Sr	Овцы	6	2.83	0.53				0.80	[28]
⁹⁰ Sr	Козы	5	1.4	0.025	27.72	20–1080	0.05	0.97	[28]
⁹⁰ Sr	Козы	6	2.3	0.49				0.83	[28]
⁹⁰ Sr	Свиньи	6	0.9	0.01	69.3	30–900	0.1	0.98	[13]
⁹⁰ Sr	Свиньи	10	3.1	0.45				0.97	[13]
⁶⁰ Co	Овцы	7–9	0.96	0.007	99	1–1080	0.04	0.92	[32]
⁶⁰ Co	Овцы	5–6	0.99	0.35				0.68	[32]
¹³⁷ Cs	Овцы	13	0.4	0.09	7.7	1–300	0.58	0.94	[12]
¹³⁷ Cs	Овцы	10	0.88	0.085				0.65	[12]
¹³⁷ Cs	Козы	12	0.35	0.05	13.86	1–300	0.55	0.96	[12]
¹³⁷ Cs	Козы	10	0.87	0.07				0.63	[12]
⁵⁹ Fe	КРС	6	0.95	0.025	27.72	1–1190	0.04	0.97	[32]
⁵⁹ Fe	КРС	12	0.54	0.33				0.94	[32]
⁵⁹ Fe	Свиньи	7	0.85	0.022	31.5	1–210	0.15	0.97	[32]
⁵⁹ Fe	Свиньи	10	0.72	0.16				0.74	[32]
⁶⁵ Zn	КРС	4–5	0.66	0.2		1–2920		0.99	[32]

значения концентрации в плазме крови не достигали пика для некоторых радионуклидов на протяжении более чем 20 ч после введения, а максимум концентрации во всех других тканях наступал значительно позднее (табл. 8). В зависимости от массы тела и интенсивности межклеточного обмена будут наблюдаться различия этого показателя между видами животных.

В зависимости от путей поступления в некоторых случаях с увеличением возраста при оральном введении величина всасывания уменьшается, а после внутривенного введения остается постоянной. Бутовым [12] показано, что содержание ¹³⁷Cs в организме коз при оральном введении уменьшается с возрастом (10–84 дней) в 1.65 раза, а при внутривенном введении практически не изменяется. Содержание ¹³⁷Cs в организме овец при оральном введении с возрастом (1–96 мес.) уменьшается в 2 раза, в то время как при внутривенном введении – лишь в 1.3 раза [12]. Аналогичные закономерности на лактирующих коровах

и телятах были выявлены Сироткиным и соавт. [28, 31].

По данным Бересфорда и соавт. [41] поведение Cs, Sr, I в плазме крови жвачных животных (овцы) после перорального и внутривенного введения можно считать одинаковым (при условии, что радионуклид был введен в растворимой форме). Вместе с тем есть свидетельства того, что применение этого подхода для оценки всасывания ^{110m}Ag в ЖКТ имеет свои особенности, поскольку распределение этого радионуклида между тканями животных и скорость его выведения из их организма зависят от места поступления. Оказалось, что эти показатели отличались при введении ^{110m}Ag в яремную или печеночную портовую вену [39].

По мере увеличения скорости переноса радионуклидов с кровотоком в организме может произойти занижение оценки их абсорбции с увеличением массы тела (например, крупный рогатый скот может иметь более низкий коэффициент всасывания, чем овцы). Кроме того, перенос ра-

Таблица 7. Сравнение коэффициентов всасывания радионуклидов в ЖКТ животных разного возраста
Table 7. Comparison of absorption coefficients of radionuclides in GIT of animals of different age

Радионуклид	Вид	N	Возраст, дни		F ₁		Кратность снижения	Ссылка
			молодняк	взрослые	молодняк	взрослые		
⁶⁰ Co	КРС		1	3600	0.47	0.024	20	[32]
^{nat} U	КРС		30	1080	0.09 ± 0.03	0.01 ± 0.001	9.0	[22]
⁹⁰ Sr	Куры	12	20	90	0.5	0.18	2.8	[23]
⁹⁰ Sr	Куры	14	20	1100	0.5	0.6	0.83	[23]
^{nat} U	Куры		1	300	0.10 ± 0.02	0.015 ± 0.00	6.6	[22, 25]
⁶⁵ Zn	Овцы	6	1	720	0.47 ± 0.05	0.084 ± 0.02	5.5	[3]
¹¹⁰⁶ Ru	Свиньи	48	20	220	0.02 ± 0.003	0.011 ± 0.001	1.8	[15]
¹³⁷ Cs	Свиньи		0.57	180	0.73	0.51	1.4	[37]
⁶⁰ Co	Свиньи		60	3600	0.68	0.028	24	[32]
⁶⁵ Zn	Свиньи		60	129	0.71	0.59	1.2	[32]

дионуклидов из желудочно-кишечного тракта в кровь у моногастричных (свиньи) протекает более быстрыми темпами по сравнению со жвачными видами животных (табл. 8).

Всасывание радионуклидов в ЖКТ взрослых животных

Крупный рогатый скот. Первые эксперименты по изучению всасывания ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в ЖКТ крупного рогатого скота были выполнены в середине 1950-х годов Ильиным и Москалёвым [17]. В последующем, в рамках программы исследований на Южном Урале, была поставлена серия экспериментов с целью определения количественных параметров миграции радионуклидов в трофической цепи сельскохозяйственных животных [9–11, 21, 29–31]. Большинство опытов проводилось на взрослых дойных коровах в возрасте 5–6 лет с живой массой 450–470 кг и низкой молочной продуктивностью 8–10 л в сутки (табл. 1).

При выборе значений, приведенных в табл. 1, в общей сложности были проанализированы результаты 20 экспериментов из 13 публикаций. К числу наиболее важных литературных источников можно отнести работы Сироткина и др. [28–31], Булова [9] и Мартюшова и соавт. (1984) [22].

Анализ этих данных, приведенных в табл. 1, показывает широкий диапазон варьирования коэффициентов всасывания радионуклидов в ЖКТ в зависимости от изотопа, вида и возраста животных. Данные по коэффициенту всасывания некоторых радионуклидов в желудочно-кишечном тракте крупного рогатого скота показывают, что его величина изменяется от 0.01 до 1.0. Наиболее плохо всасываются трудно растворимые радионуклиды, а коэффициенты всасывания для

изученных радионуклидов по величине могут быть расположены в ряд: ¹⁴⁴Ce, ⁵⁴Mn, ⁹⁵Zr (0.5–7.0) × 10⁻³ < ²³⁸U, ²¹⁰Pb, ¹⁰⁶Ru, ⁶⁰Co, ⁹Fe, ¹⁴⁰Ba (1.0–5.0) × 10⁻² < ²²Na, ⁴⁵Ca, ⁶⁵Zn, ⁹⁰Sr, ⁶⁵Zn (1.0–2.0) × 10⁻¹ < ¹³⁷Cs (5.0) × 10⁻¹ < ³H, ¹³¹I (0.9–1.0).

Полученные в отечественных исследованиях значения коэффициентов всасывания хорошо согласуются с данными зарубежных исследований, несмотря на различия в породном составе животных, возрасте, рационах кормления и продуктивности. Значения коэффициентов всасывания ⁹⁰Sr, ¹⁴⁰Ba, ²³⁸U и ²¹⁰Pb в желудочно-кишечном тракте крупного рогатого скота (табл. 1) также находятся в согласии с данными зарубежных источников [52, 56]. В статье Бересфорда и соавт. [39] приводится более высокое значение коэффициента всасывания для молочного скота (0.73), в результате введения *per os* раствора CsCl. В ряде работ отечественных авторов приводятся более низкие значения поглощения Cs, заданного таким же способом (CsCl) у крупного рогатого скота и овец. Значение *f*₁ для ¹⁰⁶Ru (2.3 ± 0.3) × 10⁻², введенного в форме Ru(NO₃)₂, достаточно хорошо совпадает со средним значением коэффициентов всасывания, приведенных в обзоре Котри [51] для взрослых животных при поступлении в составе для хлоридов и окисей (0.05), хотя и существенно меньше значения, полученного при внесении рутения в качестве комплексного соединения – аммонийной соли нитрозопентахлорида рутения (0.15). Значение коэффициентов всасывания Pb из ЖКТ в организм крупного рогатого скота составило 0.027 (табл. 1). Это значение достаточно близко к диапазону значений *f*₁ для жвачных животных, приведенных в рекомендациях по питанию молочного скота NRC (0.03–0.10) и в обзоре

Таблица 8. Периоды времени для достижения максимальных концентраций радионуклидов в крови взрослых животных после однократного перорального введения

Table 8. Time for achieving radionuclide peak concentrations in animal blood after single oral administration to adult animals

Радионуклид	Время достижения максимальной концентрации в крови, ч	Ссылка
Крупный рогатый скот		
^3H	12*	[29]
^{32}P	3–5**	[29]
^{45}Ca	14–20	[29]
^{59}Fe	22–26	[28]
^{60}Co	12	[29]
$^{89/90}\text{Sr}$	12–24	[29]
^{89}Sr	36	[36]
^{99}Mo	6	[36]
^{99}Mo	6–8	[29]
^{131}I	4–6	[29]
^{131}I	3	[36]
^{132}Te	48	[36]
^{137}Cs	16–22	[29]
^{140}Ba	20–28	[29]
^{140}Ba	24	[36]
^{185}W	60	[29]
Овцы		
^{59}Fe	12	[38]
^{65}Zn	16–20	[29]
^{137}Cs	12–24	[29]
Козы		
^{90}Sr	10–12	[29]
^{99}Mo	4–8	[29]
^{137}Cs	12–24	[29]
Свиньи		
^{32}P	1	[38]
^{59}Fe	2–3	[38]
^{90}Sr	6–12	[29]
^{137}Cs	6–12	[29]

* Среднее арифметическое из одного эксперимента.

** Диапазон по набору экспериментов с животными разного возраста.

по метаболизму токсических элементов у домашних животных (0.01–0.18) [47, 59].

Овцы и козы. Для оценки параметров всасывания радионуклидов в организме овец и коз были проанализированы результаты 25 экспериментов (табл. 2). Основными источниками информации при подготовке таблицы служили оригинальные работы Булдакова [5, 6, 8], Бурова [11–13], а также обзор Сироткина [28].

В экспериментах с овцами было задействовано от 10 до 30 голов взрослых овец 2–3 лет возраста (живая масса 38–42 кг) (табл. 2). Помимо радионуклидов в составе растворов солей хлорида или нитрата, ^{65}Zn задавали вместе с инкорпорированным в корм радионуклидом (выращенным на почвах, загрязненных ZnCl_2).

Ранжирование радионуклидов на основе коэффициентов всасывания в целом повторяет аналогичный ряд, полученный для крупного рогатого скота: ^{144}Ce , ^{91}Y (3.0×10^{-4} – 9.0×10^{-4}) < ^{106}Ru (1.5×10^{-3}) < ^{60}Co (3.5×10^{-2}) < ^{90}Sr , ^{65}Zn , ^{45}Ca (0.1–0.3) < ^{137}Cs (0.6) < ^{131}I (1.0).

На основе экспериментов с ^{137}Cs , вводимым как в виде CsCl , так и в составе загрязненных кормов, Бересфорд [50], получил коэффициент всасывания в диапазоне 0.63–0.99 (среднее значение 0.8). Отметим, что это значение выше среднего значения f_1 (0.57 ± 0.14), опубликованного Сироткиным [28] и существенно выше значения 0.17, представленного в ранней работе Булдакова [6].

Среднее значение f_1 для ^{106}Ru в табл. 2 (1.5 ± 0.4) $\times 10^{-3}$ в целом согласуется со средним значением f_1 для ^{106}Ru , введенного в виде хлористой соли в организм 5-месячных ягнят 3.4×10^{-3} , полученное Бересфордом [50]. В исследованиях на 5-месячных ягнятах, которым вводили радиоцезий в виде хлорида, Бересфорд [50] получил коэффициент всасывания, равный 3.4×10^{-3} . Это значение согласуется с большинством результатов, полученных отечественными авторами для жвачных животных.

При проведении экспериментов на козах обычно использовали взрослых животных в возрасте 2–3 лет с живой массой 33–37 кг. Выполнен анализ данных девяти публикаций, содержащих результаты двенадцати экспериментов с шестью радионуклидами (табл. 3). В целом коэффициенты всасывания для коз и овец довольно близки, а ранжирование радионуклидов на основе коэффициентов всасывания можно представить в виде следующего ряда: ^{106}Ru (1.4×10^{-3}) < ^{60}Co (4.7 – 6.7) $\times 10^{-2}$ < ^{90}Sr , ^{45}Ca (0.59 – 2.0) $\times 10^{-1}$ < $^{137}\text{Cs} \approx ^{131}\text{I}$ (0.7).

При анализе данных табл. 3 стоит отметить довольно низкие значения коэффициента всасывания ^{131}I у коз, приведенные в работе Дмитро-

ченко [16]. Достаточно низкие значения коэффициента всасывания также отмечены для ^{45}Ca . В то же время данные по ^{90}Sr и ^{137}Cs для коз находятся в полном согласии с аналогичными значениями для овец.

Свины. Информация, представленная в табл. 4, включает в себя сведения как по взрослым, так и по молодым животным, для некоторых радионуклидов имеются данные только по молодым животным [7, 22]. Были рассмотрены результаты 29 экспериментов на свиньях (табл. 4). Живая масса свиней (крупной белой породы) изменялась с возрастом следующим образом: 1.6–3.0 кг для поросят в возрасте 5–10 дней; 4.5–12.0 кг для поросят в возрасте 20–60 дней; 30–70 кг для поросят в возрасте от 120–260 дней и 140–160 кг для свиней в возрасте от 360–450 дней.

Несмотря на то что большинство исследований было посвящено вопросам, связанным с поступлением ^{90}Sr в организм животных, количественные параметры миграции некоторых менее изученных радионуклидов (^{32}P , ^{185}W и ^{239}Pu), введенных в составе цитрата или нитрата, также представлены в работах [7, 18, 28].

Значения коэффициентов всасывания в ЖКТ свиней существенно выше параметров всасывания, полученных в аналогичных экспериментах с крупным рогатым скотом, овцами и козами. Повидимому, это связано с анатомо-физиологическими особенностями строения однокамерного желудка.

Величина абсорбции радиоцезия из желудочно-кишечного тракта свиней, оцененная на основе зарубежных источников и обзоров, считается близкой к 1.0 [40, 51]. Значение, полученное отечественными исследователями для свиней, оказалось несколько ниже, чем приведено в международных обзорах [46, 51]. Это может быть связано как с различиями физико-химических свойств введенного в организм изотопа, так и с использованием в экспериментальных работах животных различных возрастных категорий.

На основе данных табл. 4, коэффициенты всасывания радионуклидов в ЖКТ свиней можно представить в виде следующего ряда: ^{239}Pu ($0.017\text{--}1.9$) $\times 10^{-3} \ll ^{106}\text{Ru} \approx ^{238}\text{U}$, ^{60}Co ($1.0\text{--}2.8$) $\times 10^{-2} < ^{90}\text{Sr} \approx ^{185}\text{W} \approx ^{59}\text{Fe}$ ($1.3\text{--}2.1$) $\times 10^{-1} < ^{32}\text{P} \approx ^{65}\text{Zn}$ ($5.0\text{--}5.9$) $\times 10^{-1} < ^{137}\text{Cs}$ (0.73).

Полученные значения коэффициентов всасывания для свиней в большинстве случаев (за исключением ^{137}Cs) выше соответствующих значений для коз и овец. Относительно высокие значения f_1 для ^{185}W , что можно объяснить как физико-химическими свойствами элемента, так и специфичностью основного места депонирования радионуклида в костной ткани, почках, печени и селезенке.

Куры. Данные по коэффициентам всасывания радионуклидов в ЖКТ кур, приведенные в табл. 5, получены на основе анализа результатов 17 экспериментов.

В экспериментах, как правило, использовали кур Русской белой породы в возрасте 240–270 дней с живой массой приблизительно 1.5 кг. Большинство данных относятся к ^{90}Sr и были получены Колдаевой и соавт. [19, 20]. Однако в литературе также имеются данные и для менее изученных радионуклидов, таких как ^3H , ^{45}Ca и ^{238}U . Значения f_1 для кур образуют ряд, согласующийся с аналогичными рядами для других животных, представленными в настоящей работе: ^{238}U , $^{106}\text{Ru} < (1.5\text{--}3.1) \times 10^{-2} < ^{60}\text{Co}$, ^{45}Ca , ^{90}Sr , ^{65}Zn , ^{137}Cs , ^{59}Fe ($3.5\text{--}7.2$) $\times 10^{-1} < ^3\text{H}$ (0.9).

Коэффициенты всасывания для радионуклидов, относящихся к элементам с низкими значениями f_1 , в желудке кур оказались существенно выше, чем в ЖКТ млекопитающих. Значения f_1 радионуклидов с высокими показателями всасывания в ЖКТ млекопитающих находились на том же уровне.

При анализе данных табл. 5 обращает на себя внимание, что значения f_1 варьируют в гораздо более узком диапазоне, чем аналогичные данные для млекопитающих, а параметры всасывания в ЖКТ для многих радионуклидов важных для развития довольно близки. В целом коэффициенты всасывания ^{238}U в желудке кур находятся в соответствии с данными зарубежных публикаций [50, 55]. Следует отметить, что некоторые отечественные работы, такие как публикация Пристера [25], были переведены на английский язык и впоследствии использовались при составлении зарубежных обзоров.

Зависимость коэффициента всасывания от возраста животных

Всасывание радионуклидов в ЖКТ животных является сложным физиологическим процессом, который зависит от многих факторов. Отличия в строении желудка у жвачных животных от однокамерного желудка свиньи оказывают существенное воздействие на время пребывания кормовых масс в ЖКТ и доступность радионуклидов для всасывания радионуклидов. Желудок свиньи отличается от жвачных животных и физиологией пищеварения. Особенностью пищеварения у поросят является отсутствие в желудочном соке свободной соляной кислоты после рождения. Начиная с 3-й декады жизни поросят выделение соляной кислоты, а также интенсивность переваривания кормовых масс желудочным соком повышается. Свойства стенок ЖКТ и, в частности, способность к всасыванию за счет увеличения проницаемости клеточных мембран, а также скорость ме-

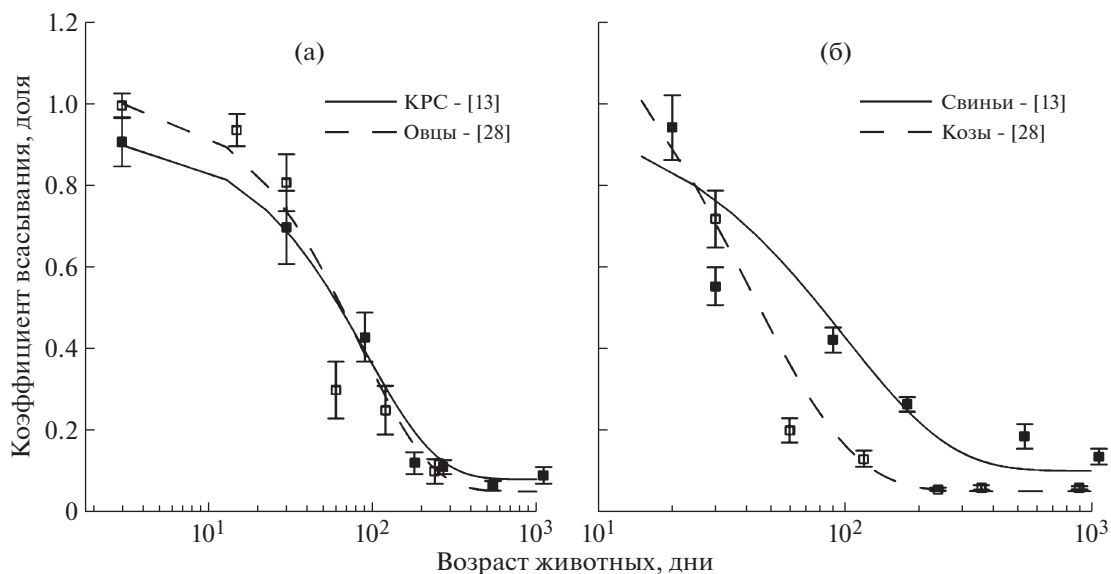


Рис. 1. Влияние возраста животных на коэффициенты всасывания ^{90}Sr для КРС и овец (а), свиней и коз (б).
Fig. 1. Variation with animal age in ^{90}Sr absorption factors for cattle and sheep (а), pigs and goats (б).

таболизма элементов в организме животных также изменяются с возрастом животных.

Оценка значений f_1 в зависимости от возраста в динамике является очень трудоемким экспериментом и требует существенно большего числа животных, чем это необходимо для оценки этого параметра для взрослых особей, поскольку основывается на забое животных различного возраста.

В то же время эти данные имеют как практическое значение, поскольку для потребления могут использоваться молодые животные, так и теоретическое — для изменения особенностей метаболизма в организме животных с возрастом. Так как большая часть этих исследований проводилась на Опытной станции химкомбината «Маяк» на Южном Урале, основное количество данных, описывающих изменение с возрастом коэффициента всасывания в ЖКТ, было получено для ^{90}Sr .

Результаты долгосрочных крупномасштабных экспериментов по влиянию возраста на коэффициент всасывания ^{90}Sr в ЖКТ крупного рогатого скота (189), овец (175) и коз (98) приведены в работах Бурова [11, 13, 14]. Аналогичные исследования на 70 свиньях представлены в работе Панченко и соавт. [24]. Показано, что существует значительное уменьшение этого показателя с возрастом для всех видов животных, которое обусловлено как высокой потребностью в кальции для развития костей скелета в постнатальный период, так и снижением эффективности усвоения кальция с возрастом (рис. 1) [42].

Аналогичные данные по ^{137}Cs были получены Буровым и др. [27] в эксперименте с 25 овцами и 16 козами (рис. 2). Анализ этих результатов

показывает, что зависимость коэффициента всасывания от возраста, как у овец, так и коз, может быть описана функцией вида:

$$f_1 = A \times e^{-B \times t} + C, \quad (1)$$

где t — возраст животного, A , B и C — константы.

$$f_1 = A \times t^{-B}. \quad (2)$$

Анализ этих данных позволяет сделать вывод, что в большинстве случаев зависимость изменения коэффициента всасывания от возраста может быть достаточно хорошо описана экспоненциальным уравнением. Параметры снижения коэффициентов всасывания варьируют в диапазоне от 0.007 до 0.025 (сут^{-1}), что соответствует периодам полуснижения от 7.7 до 99 дней. При этом следует отметить различия в динамике снижения коэффициентов всасывания в ЖКТ животных ^{137}Cs и других радионуклидов. Так, после быстрого снижения в течение примерно 100 дней с периодом 8–14 дней, коэффициенты всасывания выходят на плато, равное примерно половине максимально потенциально возможной величины, и остаются примерно на этом уровне ($f_1 = 0.55$ – 0.58). Эти величины примерно равны значениям коэффициентов всасывания для взрослых КРС и свиней.

Как уже отмечалось, наиболее детальные работы, связанные с оценкой влияния возраста животных на всасывание радионуклидов в ЖКТ, были выполнены со ^{90}Sr . В то же время существуют данные, позволяющие оценить снижение коэффициентов всасывания в процессе онтогенеза и для других радионуклидов.

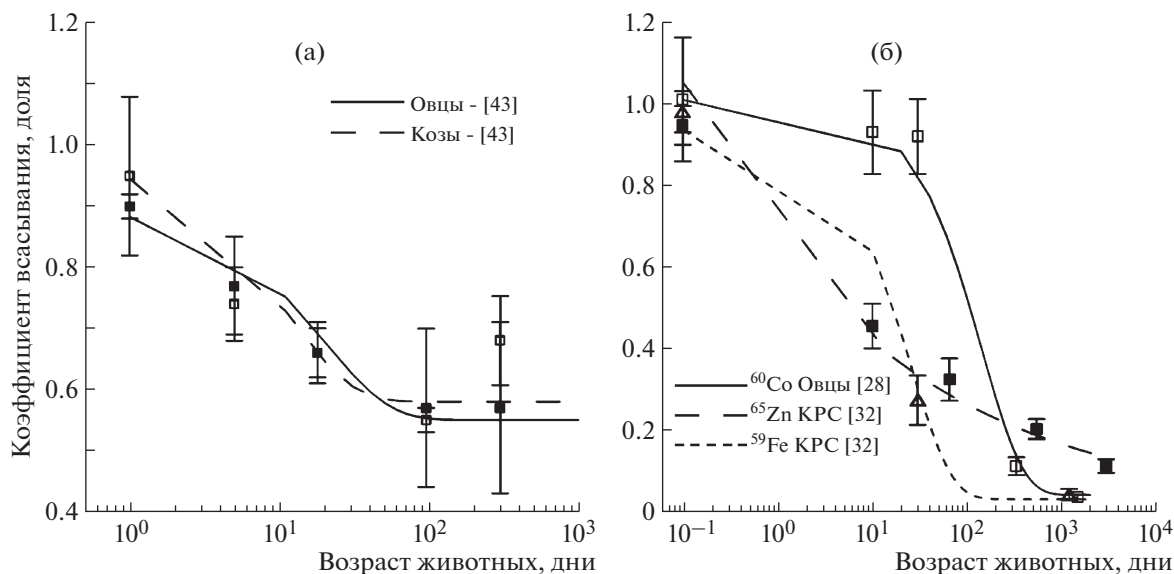


Рис. 2. Влияние возраста животных на коэффициенты всасывания ¹³⁷Cs в ЖКТ овец и коз (а), овец (⁶⁰Co) и КРС (⁶⁵Zn) (б).

Fig. 2. Variation with animal age in ⁹⁰Sr absorption factors in sheep and goats (a), sheep (⁶⁰Co) and cattle (⁵⁹Fe and ⁶⁵Zn) (b).

Данные о влиянии возраста на изменения значений коэффициента всасывания у кур были получены в экспериментах со ⁹⁰Sr и ²³⁸U. Для ⁹⁰Sr отмечены снижение коэффициента всасывания с возрастом до периода зрелости и резкое возрастание значений *f*₁ у взрослых кур.

В период яйценоскости куры-несушки имеют повышенную потребность во многих минеральных элементах, таких как Ca и Fe [44]. Таким образом, регистрируется увеличение абсорбции макро- и микроэлементов в кишечнике (и их радиоактивных аналогов, таких как ⁹⁰Sr) по сравнению с всасыванием этих радионуклидов в ЖКТ непродуктивных животных. Как отмечалось выше для других сельскохозяйственных животных, более высокие значения ⁹⁰Sr, зарегистрированные для молодняка птицы, вероятно, являются следствием повышенной потребности в Ca в период роста и развития организма. Более высокие показатели абсорбции радиоизотопов основных жизненно важных для развития элементов (например, Zn, Fe) или их аналогов (например, Sr) могут быть связаны и с повышенной потребностью молодняка в этих элементах по сравнению с взрослыми животными [46, 47].

В частности, Майес [43] представил результаты исследований, посвященных изучению влияния возраста на абсорбцию радиоцезия (вводимого в виде раствора хлорида) у ягнят в возрасте от 11 до 59 нед. Ягнятам 11- и 16-недельного возраста выпаивали из бутылки затравленное ¹³⁷Cs молоко однократно. Во второй группе использовали ягнят 16-недельного и четырех последующих воз-

растных групп до 59 нед. включительно. Этим животным перорально через желудочный зонд вводили ¹³⁷CsCl в желатиновых капсулах. Оказалось, что значения коэффициентов абсорбции варьировали в диапазоне 0.80–0.85. Авторы предположили, что различия между параметрами всасывания ¹³⁷Cs, введенного в организм с молоком и посредством желатиновых капсул, было обусловлено особенностями анатомо-физиологического строения отделов желудочно-кишечного тракта. У подсосных ягнят ¹³⁷Cs с молоком поступает непосредственно в сычуг, минуя рубец, в то время как желатиновые капсулы, заданные через зонд, локализуются в рубце (подобно кормам растительного происхождения). Причиной высоких значений всасывания, наблюдаемых в подопытных группах молодняка коз и ягнят и описанных в отечественной литературе, является прямое поступление ¹³⁷Cs в сычуг при выпойке животным загрязненного молока. Для других радионуклидов подобный эффект не был обнаружен.

Влияние характеристик радионуклидов на всасывание в ЖКТ животных

Физико-химические свойства радионуклидов, формы их нахождения в ЖКТ также оказывают непосредственное влияние на всасывание. Во многих случаях радиоактивные изотопы являются аналогами элементов минерального питания животных. Так, ряд радионуклидов, коэффициенты всасывания которых приведены в табл. 1–5, являются радиоактивными изотопами таких основных питательных элементов, как P,

Ca, Na, Zn. Величину поступления большей части этих элементов можно корректировать добавлением к основному рациону минеральных добавок в зависимости от потребности организма. При этом в рационе следует соблюдать оптимальное соотношение таких элементов минерального питания как Ca и P, Na и K, Fe и Zn и др.

Существует значительное количество публикаций, посвященных вопросам минерального питания животных, в которых приводятся коэффициенты всасывания этих элементов в ЖКТ животных [38, 42, 46, 47]. Показано, что максимальные коэффициенты всасывания Ca у жвачных животных находятся в диапазоне от 0.55 (взрослые) до 0.7 (молодые животные). Коэффициенты всасывания ^{45}Ca (0.11–0.35), приведенные для жвачных животных, в табл. 1–3, в целом согласуются с данными, представленными в обзоре для животных с избыточным содержанием стабильного кальция в рационе [57].

Коэффициенты всасывания Zn, приведенные там же, составили 0.3 и 0.2 для молодых и взрослых жвачных соответственно. Эти значения достаточно хорошо согласуются с данными табл. 1 и 2, для крупного рогатого скота и овец. В то же время в документах по минеральному питанию животных сообщается о почти полном поглощении Zn свиньями в составе хлористых солей ($f_1 \sim 1.0$). Значения для $^{65}\text{ZnCl}_2$, приведенные в работе Сироткина и соавт. (0.5–0.6), являются относительно более низкими [3, 28] (табл. 3).

Значения коэффициента всасывания ^{22}Na (0.1) у взрослого крупного рогатого скота по данным отечественных публикаций [10] существенно ниже значений f_1 , представленных в публикации NRC [47]. В то же время в работе Бурова и Антаковой [12] отмечено влияние стабильного Na на абсорбцию ^{22}Na в желудочно-кишечном тракте крупного рогатого скота. Показано, что доля f_1 ^{22}Na в кишечнике была равна 0.096 при поступлении NaCl в количестве 30 г в день, в то время как при более высоком потреблении поваренной соли (80 г в день) этот показатель снизился до 0.045. Очевидно, что при более низких значениях содержания NaCl в рационе возможно существенное увеличение всасывания ^{22}Na в ЖКТ и значения f_1 могут быть существенно выше представленных в табл. 1.

Значение f_1 для ^{60}Co 0.2, приведенное в обзоре Котри и Торна [44] для жвачных животных, является максимальной оценкой этого параметра, предназначенной для радиологических расчетов. Это значение существенно выше значения коэффициента всасывания (0.024), приведенного Сироткиным и соавт. [32] для взрослых коров. В то же время, рекомендуя значение f_1 0.2 для ^{60}Co , Котри и Торн отмечают, что в реальных условиях

это значение может быть до 10 раз ниже, что хорошо согласуется с данными работы [32].

В большинстве случаев всасывание радионуклидов в ЖКТ животных зависело от содержания в рационе элементов аналогов [28, 29]. В то же время абсорбция радиоактивного йода в желудочно-кишечном тракте жвачных животных не зависела от состава рациона и наличия в нем стабильного йода в [6]. Доля всасывания нуклида варьировала в пределах 0.8–0.9, что соответствует данным, приведенным как в зарубежных источниках по кормлению животных (NRC 2001) [42, 46, 47], так и в отечественной литературе. В работе В.А. Бударкова и др. показано влияние стабильного йода в рационе на уровень накопления ^{131}I щитовидной железой овец, получавших радионуклид в тиреотоксических дозах. У животных с пониженным уровнем йодного питания выявлено большее накопление радиоактивного йода щитовидной железой, что привело к формированию более высоких (в 2–5 раз) поглощенных доз в этом органе [58]. В то же время это обстоятельство свидетельствует только о влиянии содержания стабильного йода в рационе кормления животных на накопление радиойода щитовидной железой в этих условиях, а не на всасывание этого элемента в ЖКТ. Ограниченность данных по параметрам миграции, в том числе и по интактным животным из различных зон, эндемичных по этому элементу, затрудняет оценку данных по всасыванию йода в ЖКТ овец в этом эксперименте.

Значение f_1 в ЖКТ коров для ^{54}Mn ($(5.0 \pm 0.8) \times 10^{-3}$) практически совпадает с диапазоном величин коэффициента всасывания марганца дойными коровами, приведенным в западных источниках <0.004 до 0.01 (табл. 1). Величина поглощения ^{59}Fe (табл. 1) для взрослого крупного рогатого скота (0.042) существенно ниже значений, приводимых NRC для взрослых животных (0.1–0.2) [42]. Значение f_1 ^{59}Fe у телят, равное 0.27 [32], практически совпадает с данными работы [42] (0.15–0.4) для телят, получавших в качестве рациона жидкие кормовые смеси.

Степень всасывания изотопов в желудочно-кишечном тракте каждого из изученных видов животных варьировала в широких пределах. Наиболее высокие значения абсорбции были характерны для ^3H , ^{131}I и ^{137}Cs (0.7–1.0) и самые низкие для ^{144}Ce и ^{239}Pu (10^{-5} – 10^{-3}) (табл. 9). Для большинства радионуклидов максимальные значения коэффициента всасывания отмечаются для кур, что связано с большей интенсивностью метаболизма и более высокой потребностью кур в микроэлементах, особенно в период яйценоскости. Некоторым исключением из этого правила является всасывание в ЖКТ животных и птицы ^{137}Cs ,

Таблица 9. Распределение радионуклидов по категориям коэффициентов всасывания (f_1)
Table 9. Distribution of radionuclides by category of absorption factor

Категория f_1	КРС, овцы, козы и свиньи	Куры	МКРЗ [48]
10^{-5} – 10^{-4}	^{239}Pu (нитрат)		^{239}Pu (оксид, нитрат)
10^{-4} – 10^{-3}	^{144}Ce , ^{91}Y		^{144}Ce , ^{239}Pu (другие формы)
10^{-3} – 10^{-2}	^{54}Mn , ^{95}Zr , ^{106}Ru , ^{239}Pu (цитрат)		^{238}U , ^{239}Pu (цитрат)
10^{-2} – 10^{-1}	^{238}U , ^{210}Pb , ^{60}Co , ^{59}Fe , ^{140}Ba	^{238}U , ^{106}Ru	^{60}Co , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{140}Ba , ^{210}Po , ^{185}W (вольфрамовая кислота), ^{238}U
10^{-1} – 0.5	^{45}Ca , ^{65}Zn , ^{90}Sr , ^{185}W	^{60}Co	^{90}Sr , ^{185}W , ^{65}Zn , Te , ^{210}Pb , ^{226}Ra
0.5 – 0.9	^{137}Cs , ^{32}P	^{45}Ca , ^{65}Zn , ^{90}Sr , ^{65}Zn	^{99}Tc , ^{65}Zn
0.9 – 1.0	^3H , ^{131}I	^{131}I , ^{137}Cs , ^3H	^{137}Cs , ^{131}I , ^3H

для которого значения f_1 для свиней, коз и птицы довольно близки (табл. 2–5).

Сравнение этих показателей f_1 у жвачных с данными, полученными для свиней и кур, показывают, что интенсивность поглощения радионуклида в кишечнике животных с однокамерным желудком (свиней и кур) выше, чем у жвачных (рис. 3).

Максимальные различия в коэффициентах всасывания отмечены для ^{60}Co ; значение f_1 для кур превышало f_1 для КРС примерно в 15 раз. Минимальные отличия между коэффициентами всасывания отмечены для ^{137}Cs и ^{238}U , различия между минимальным и максимальным значениями f_1 были менее 2 раз. Для ^{45}Ca , ^{65}Zn и ^{90}Sr коэффициенты всасывания в желудке кур были в 5–6 выше соответствующих величин для КРС, отражая различную потребность в минеральных веществах у взрослых животных и кур.

На всасывание радионуклидов в ЖКТ существенное значение оказывает и химическая форма радионуклида, поступающего в организм животного. Особенное значение это имеет для радионуклидов, образующих сложные комплексные образования в окружающей среде. Так, данные, представленные Булдаковым [7], свидетельствуют о том, что значение коэффициента всасывания при введении ^{239}Pu свиньям в составе цитрата было на два порядка больше, чем случае поступления радионуклида в составе нитратных солей (табл. 4). Эти данные согласуются с результатами, используемыми в Публикации 67 МКРЗ, где предполагается, что значение f_1 равно 1.0×10^{-5} для оксида плутония, 1.0×10^{-4} для нитрата плутония, 1.0×10^{-4} – 1.0×10^{-3} для цитрата и 1.0×10^{-4} для других солей [48, 49].

Значение f_1 ^{106}Ru в виде хлористых солей или двуокисных соединений в желудочно-кишечном тракте кроликов оказалось значительно ниже (0.003) по сравнению с f_1 для ^{106}Ru , вводимого в

виде нитратного комплекса 0.13 [28]. Абрамова и соавт. [3] представили данные о более низком всасывании ^{65}Zn в желудочно-кишечном тракте овец в условиях потребления загрязненного ^{65}Zn корма, нежели заданного *per os* в составе раствора $^{65}\text{ZnCl}_2$ (табл. 2).

Величина абсорбции Sr во многом определяет содержанием кальция в кормах рациона, потребностями животного в этом макроэлементе. В работе [41] представлено соотношение между коэффициентом адсорбции стронция в ЖКТ и коэффициентом потребления Ca, обусловленным его необходимостью в питании жвачных животных. Отмеченные выше значения коэффициента

Значения f_1 для овец, коз, свиней и птицы, нормированные на значения f_1 для КРС

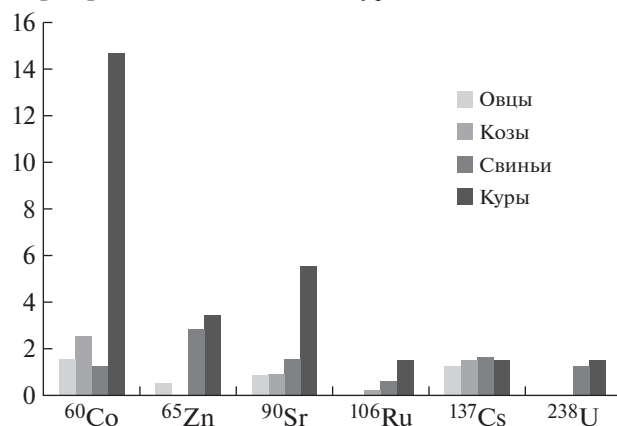


Рис. 3. Сравнение значений коэффициентов всасывания (f_1) некоторых радионуклидов у различных видов взрослых животных и кур. Значения f_1 для овец, коз, свиней и птицы нормированы на соответствующее значение для КРС.

Fig. 3. Comparison of absorption factor values (f_1) of some radionuclides in different species of adult animals and chickens. The f_1 values for sheep, goats and poultry are normalized to the corresponding value for cattle.

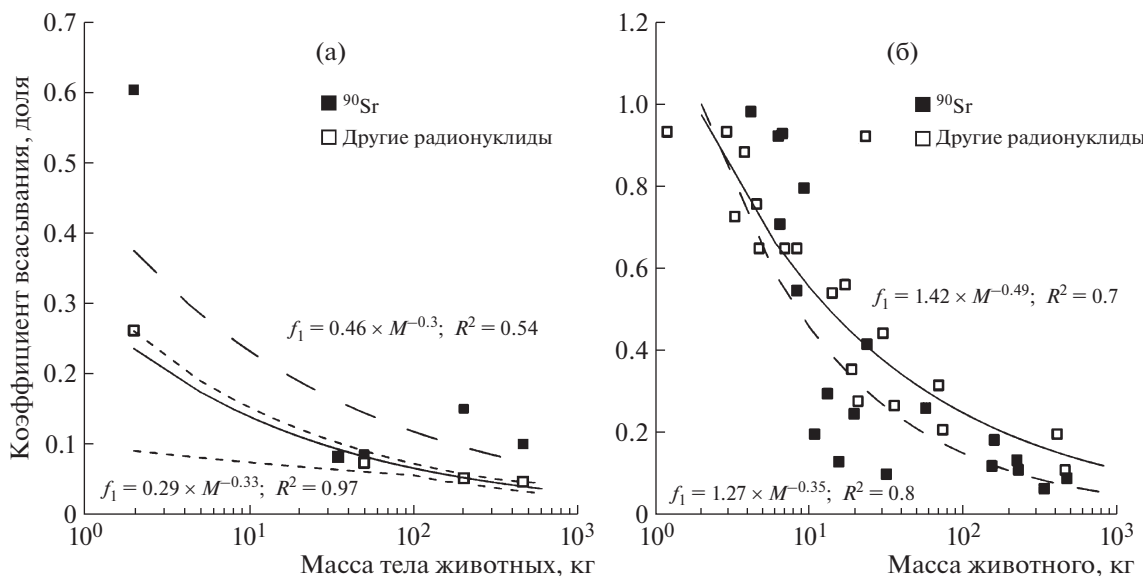


Рис. 4. Зависимость коэффициентов всасывания радионуклидов массы тела животного. а – соотношения, основанные на межвидовом аллометрическом подходе и б – соотношения, основанные на онтогенетическом аллометрическом подходе.

Fig. 4. Dependence of absorption coefficients on animal body weight. а – is the ratio based on the interspecies approach and б – is the ratio based on the ontogenetic approach.

ентов всасывания Sr для жвачных животных (дойные коровы, молочные козы, взрослые овцы и ягнята) по данным работы [42] варьировали в диапазоне от 0.1 до 0.7. Считается, что более высокая величина 0,7 отражает максимальное значение коэффициента поглощения для Sr [44, 46, 47]. За исключением значений для молодых (≤ 1 -месячного возраста) животных результаты, полученные для разных видов жвачных животных и свиней, находятся в пределах этих величин. При этом оказалось, что значения коэффициентов всасывания для свиней были не намного выше, чем для жвачных (рис. 2), но в несколько раз ниже, чем для кур, что отражает выведение Ca из организма продуктивных птиц [19–21].

Аллометрические соотношения

Для прогнозирования и интерполяции данных, касающихся процессов, связанных с метаболизмом питательных веществ в организме животных, часто используют аллометрические соотношения. Так, Клайбер [60], анализируя факторы, определяющие скорость основного обмена у животных, отметил, что для подавляющего большинства теплокровных животных минимальное количество энергии (R), необходимое для поддержания жизнедеятельности, пропорционально массе организма. В этом соотношении, известном как закон Клайбера, скорость основного обмена рассматривается как функция массы животных, относящихся к одной таксономической

группе, M – масса тела животного (кг), A – нормировочная константа и B равно 0.75.

$$R = A \times M^B. \quad (3)$$

Рассматривают несколько видов аллометрических соотношений. Выделяют онтогенетическую аллометрию, прослеживаемую в ходе онтогенеза особи или устанавливаемую при сравнении разновозрастных особей одного вида, внутривидовую и межвидовую аллометрию, обнаруживаемую при сравнении особей на одной стадии развития (обычно взрослых), которые отличаются друг от друга по размеру и/или виду. Учитывая, что всасывание радионуклидов во многом определяется процессами метаболизма химических элементов в организме животного, представляет интерес анализ зависимостей функции f_1 от массы животных, используемых при проведении экспериментов.

Результаты применения аллометрического подхода к оценке зависимостей коэффициентов всасывания радионуклидов от массы тела животного на онтогенетическом и межвидовом уровнях приведены на рис. 4. Данные по коэффициентам всасывания были разделены на две группы: ^{90}Sr , который накапливается в основном в костной ткани, и остальные радионуклиды, распределение которых в организме животных более равномерно.

Видно, что при диффузном типе распределения радионуклидов аппроксимация данных урав-

нением (1) достаточно достоверна, а значения R^2 , характеризующие достоверность аппроксимации, находятся в диапазоне от 0.8 до 0.97. Аппроксимация зависимостей всасывания ^{90}Sr в ЖКТ в обоих случаях существенно хуже, чем для других радионуклидов. Во многом это определяется особенностями потребности животных в Са в различные периоды онтогенеза. В частности, высокое значение f_1 для кур (вес 2 кг) объясняется повышенной потребностью в Са и его аналоге Sr в период яйценоскости (рис. 4).

В целом можно сделать вывод, что применение аллометрического подхода позволяет осуществить адекватное описание процессов в реальной системе, что определяет возможность использования аллометрических соотношений для прогнозирования параметров всасывания для различных животных, разной массы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен критический обзор данных о характере поглощения радионуклидов из желудочно-кишечного тракта жвачных животных, свиней и кур. Подтверждено влияние модифицирующих факторов, таких как состав рациона животных (в том числе присутствие в нем аналоговых макро- и микроэлементов), физико-химические свойства радионуклидов, возраста животного. Полученные нами данные позволили провести комплексное сравнение количественных показателей абсорбции радионуклидов из желудочно-кишечного тракта жвачных животных и животных с однокамерным желудком. Показана высокая сходимость численных параметров в работах отечественных и зарубежных исследователей, что позволяет объединить эти данные для получения более достоверных оценок параметров всасывания радионуклидов в ЖКТ. Полученные данные могут быть использованы для оценки и прогнозирования последствий радиоактивного загрязнения окружающей среды, построения моделей поступления и выведения радионуклидов из организма животных и разработки методов снижения переноса радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. UNSCEAR, 1958. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: Sources, effects and risks of ionizing radiation, Report to the General Assembly with Scientific Annexes: Radioactive contamination of the environment by nuclear tests. New York, 1964.
2. Scott R. Radioactivity and human diet. Oxford, New York: Pergamon Press, 1966. 552 p.
3. Абрамова Т.Н., Сироткин А.Н., Расин И.М. Миграция Zn-65 в трофической цепи овец и вопросы

нормирования поступления его в воду, почву и корма // II Всесоюз. Конф. по сельскохозяйственной радиологии: Тез. докл. Т. II. Обнинск, 1984. С. 116–117. [Abramova T.N., Sirotkin A.N., Rasin I.M. ^{65}Zn migration in the trophic chain of sheep and problems of regulation of its uptake to water // II Vserosousnaya konf. po selskochozyestvenoi radiologii (Conf. proc.). Obninsk, 1984. P. 116–117. (In Russian)]

4. Анненков Б.Н. Миграция ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{131}I по цепи корм-сельскохозяйственные животные-продукты животноводства // Проблемы и задачи радиэкологии животных. М.: Наука, 1980. С. 131–144. [Annenkov B.N. Migration of ^{90}Sr , ^{137}Cs and ^{131}I via the fodder-farm animals-animal products chain // Problems and Tasks of Animal Radioecology. M.: Nauka, 1980. P. 131–144. (In Russian)]
5. Булдаков Л.А. К обмену и биологическому действию цезия-137 у овец: распределение, биологическое действие, ускорение выведения радиоактивных изотопов. М.: Медицина, 1964. С. 167–182. [Buldakov L.A. On the exchange and biological effect of ^{137}Cs in sheep. Distribution, Biological Effect, Acceleration of Radioactive Isotope Removal. M.: Medicine, 1964. P. 167–173. (In Russian)]
6. Булдаков Л.А. О биологическом влиянии некоторых долгоживущих радиоизотопов при длительном энтеральном поступлении в организм овец // Биологическое действие радиации и вопросы распределения радиоактивных изотопов / Под ред. А.В. Лебединского, Ю.И. Москалева. М.: Госатомиздат, 1961. С. 80–87. [Buldakov L.A. O biologicheskom vliyaniy nekotorych dolgozhivuchich izotopov pri dlitelnom entoretalnom postuplenii v orgazim ovets // Biological Radiation Effects and Issues of Radioactive Isotope Distribution. M.: Gosatomizdat; 1961 P. 70–79. (In Russian)]
7. Булдаков Л.А. Поведение плутония (^{239}Pu) в организме поросят // Радиобиология. 1968. Т. 8. № 1. С. 62–64. [Buldakov L.A. Povedenie ^{239}Pu v organisme porisyat // Radiobiologiy. 1968. V. 8. № 1. P. 62–64 (In Russian)]
8. Булдаков Л.А., Буров Н.И. Поведение радиоцезия (^{144}Ce) в организме овец разного возраста // Радиобиология. 1967. Т. 7. № 6. С. 881–885. [Buldakov L.A., Burov N.I. Povedenie radioceria (^{144}Ce) v ovtsach raznogo vozrasta. 1967. V. 7. № 6. P. 881–885. (In Russian)]
9. Буров Н.И. Вопросы миграции радиоактивного стронция в организме стельных коров // Биологическое действие радиации и вопросы распределения радиоактивных изотопов. М.: Госатомиздат, 1961. С. 88–94. [Burov N.I. Voprosy migracii radioaktivnogo stroncija v organizme stel'nyh korov // Biologicheskoe dejstvie radiacii i voprosy raspredelenija radioaktivnyh izotopov. M.: Medicine, 1961. P. 88–94. (In Russian.)]
10. Буров Н.И., Антакова Н.Н. Влияние увеличения хлорида натрия в рационе на обмен ^{22}Na в организме крупного рогатого скота // II Всесоюзная конференция по сельскохозяйственной радиологии: Тез. докл. Т. II. Обнинск, 1984. С. 152. [Burov N.I., Antakova N.N. Vlijanie uvelichenija hlorida natrija v racione na obmen ^{22}Na v organizme krupnogo rogatogo

- skota // II Vsesojuznaja konferencija po sel'skohozjajstvennoj radiologii (Conf. Proc.) Obninsk, 1984. P. 152–153. (In Russian)]
11. Буров Н.И. Метаболизм стронция-90 в некоторых видах домашних животных: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1974. 18 с. [Burov N.I. Metabolizm stroncija-90 v nekotoryh vidah domashnih zhivotnyh (dissertation) M., 1974. 18 p. (In Russian)]
 12. Буров Н.И., Антакова Н.Н., Панченко И.Я. Метаболизм Cs-137 в организме овец и коз // Радиоэкология позвоночных животных. М.: Наука, 1978. С. 80–90. [Burov N.I., Antakova N.N., Panchenko I.Ya. Cs-137 metabolism in sheep and goats // Radioecology of Vertebrates. M.: Nauka, 1978. P. 71–79. (In Russian)]
 13. Буров Н.И., Антакова Н.Н., Панченко И.Я., Сарapultцев И.А. Накопление и распределение стронция-90 в организме овец и коз при однократном и хроническом поступлении // Радиоактивные изотопы и организм / Под ред. Ю.И. Москалева. М.: Медицина, 1969. С. 19–23. [Burov N.I., Antakova N.N., Panchenko I.A., Sarapultsev I.A. Accumulation and distribution of ⁹⁰Sr in sheep and goats in a single and chronic uptake // Radioactive Isotopes and Organisms. M.: Medicina, 1969. P. 19–23. (In Russian)]
 14. Буров Н.И., Корнеев Н.А., Никитина З.А. Обмен стронция-90 в организме свиней // Докл. ВАСХНИЛ. 1971. № 1. С. 33–35. [Burov N.I., Korneev N.A., Nikitina Z.A. Obmen stroncija-90 v organizme svinej // Doklady VASHNIL 1971. № 1. P. 3–35. (In Russian)]
 15. Буров Н.И., Сарapultцев И.А. Некоторые закономерности обмена рутения-106 в организме свиней // Сельскохозяйственная биология. 1974. Т. IX № 1. С. 114–118. [Burov N.I., Sarapultsev I.A. Nekotorye zakonmernosti obmena rutenija-106 v organizme svinej // Sel'skohozyajstvennaya biologiya. 1974. V. 9. № 1. P. 114–118. (In Russian)]
 16. Дмитроченко А.П. Результаты исследований по минеральному кормлению сельскохозяйственных животных. М.: Колос, 1973. С. 5–12. [Dmitrichenko A.P. Rezul'taty issledovanij po mineral'nomu kormleniju sel'skohozjajstvennyh zhivotnyh. M.: Kolos, 1973. P. 5–12. (In Russian)]
 17. Ильин Д.И., Москалев Ю.И. О проблеме метаболизма цезия, стронция и смеси бета-излучателей у коров // Атомная энергия. 1957. № 2. С. 163–168. [Ilyin D.I., Moskalev Yu.I. O probleme metabolizma cezija, stroncija i smesi beta-izluchatelej u korov // Atomnaja Jenergija. 1957. № 2. P. 163–168. (In Russian)]
 18. Ильин Д.А., Москалев Ю.И. О распределении и коэффициентах накопления ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs и ³²P в органах свиней и собак // Распределение, биологическое воздействие и миграция радиоактивных изотопов. М.: Медгиз, 1961. С. 53–78. [Ilyin D.A., Moskalev Yu.I. O raspredelenii i koeficientah nakoplenija ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs i ³²P v organah svinej i sobak // Raspredelenie, biologicheskoe vozdejstvie i migracija radioaktivnyh izotopov. Moscow: Medgiz, 1961. С. 19–26. (In Russian)]
 19. Колдаева К.А., Анненков Б. Н., Панченко И.Я., Сарapultцев И.Я. Накопление и распределение стронция-90 у кур при однократном и хроническом поступлении // Радиоактивные изотопы и организм / Под ред. Ю.И. Москалева. М.: Медицина, 1969. С. 23–29. [Koldaeva K.A., Annenkov B., Panchenko I.Ya., Sarapultsev I.Ya. Nakoplenie i raspredelenie stroncija-90 u kur pri odnokratnom i hronicheskom postuplenii // Radioaktivnye izotopy i organism. M.: Medicina, 1969. P. 23–29. (In Russian)]
 20. Колдаева К.А., Сарapultцев И.А. Содержание стронция-90 в скелете и мышцах цыплят после однократного и хронического введения // Докл. ВАСХНИЛ. 1968. № 8. С. 32–35. [Koldaeva K.A., Sarapultsev I.A. Soderzhanie stroncija-90 v skelete i myshchah cypljat posle odnokratnogo i hronicheskogo vvedenija // Doklady VASHNIL. 1968. № 1. P. 32–35. (In Russian)]
 21. Корнеев Н.А., Сироткин А.Н., Корнеева Н.В. Всасывание радионуклидов в желудочно-кишечном тракте взрослых сельскохозяйственных животных и кур // Снижение радиоактивности в растениях и продуктах животноводства. М.: Колос, 1977. С. 107. [Korneev N.A., Sirotkin A.N., Korneeva N.V. Vsastryvanie radionuklidov v zheludочно-kishechnom trakte vzroslyh sel'skohozyajstvennyh zhivotnyh i kur // Snizhenie radioaktivnosti v rastenijah i produktah zhivotnovodstva. M.: Kolos; 1977. P. 107. (In Russian)]
 22. Мартышов В.З., Буров Н.И., Антакова Н.Н. Метаболизм урана в организме сельскохозяйственных животных // II Всесоюз. Конф. по сельскохозяйственной радиологии: Тез. докл. Т. II. Обнинск, 1984. С. 150–151. [Martyushov V.Z., Burov N.I., Antakova N.N. Metabolizm urana v organizme sel'skohozyajstvennyh zhivotnyh // II Vsesoyuznaya konf. po sel'skohozyajstvennoj radiologii (Conf. Proc.). Obninsk, 1984. P. 150–151. (In Russian)]
 23. Панченко И.Я., Ивин И.С., Буров Н.И., Сироткин А.Н. Накопление ⁹⁰Sr в организме различных животных // Сельскохозяйственная биология. 1974. Т. 9. № 1. С. 124–127. [Panchenko I.Ya., Ivin I.S., Burov N.I., Sirotkin A.N. Nakoplenie ⁹⁰Sr v organizme razlichnyh zhivotnyh // Sel'skohozyajstvennaya biologiya. 1974. V. 9. № 1. P. 124–127. (In Russian)]
 24. Панченко И.Я., Сарapultцев И.А., Педченко В.И., Поваляев А.П. Динамика ⁹⁰Sr в организме кур при продолжительном поступлении с кормом // Ветеринария. 1966. № 4. С. 63–64. [Panchenko I.Ya., Sarapultsev I.A., Pedchenko V.I., Povolliaev A.P. Dinamika ⁹⁰Sr v organizme kur pri prodolzhitel'nom postuplenii s kormom // Veterinaria. 1966. № 4. P. 63–64. (In Russian)]
 25. Пристер Б.С. О поведении U в некоторых звеньях биологической цепи // Докл. ВАСХНИЛ. 1967. № 1. С. 31–33. [Prister B.S. O povedenii U v nekotoryh zven'jah biologicheskoy cepi // Doklady VASHNIL. 1967. № 1. P. 31–33. (In Russian)]
 26. Анненков Б.Н. Метаболизм продуктов деления у сельскохозяйственных животных // Радиобиология и радиоэкология сельскохозяйственных животных / Под ред. Б.Н. Анненкова, И.К. Дибобеса, Р.М. Алексахина. М.: Атомиздат, 1973. С. 28–44. [Annenkov B.N. Metabolizm produktov delenija u sel'skohozyajstvennyh zhivotnyh // Radiobiology and Radioecology of Farm Animals. M.: AtomIzdat, 1973. P. 28–44. (In Russian)]

27. *Анненков Б.Н., Дибобес И.К., Алексахин Р.М.* (Ред.) Радиобиология и радиэкология сельскохозяйственных животных. М.: Атомиздат, 1973. 224 с. [*Annenkov B.N., Dibobes I.K., Alexakhin R.M.* Radiobiology and Radioecology of Farm Animals. M.: Atomizdat, 1973. 224 p. (In Russian)]
28. *Сироткин А.Н.* Всасывание радиоактивных веществ // Снижение радиоактивности в растениях и продуктах животноводства. М.: Колос, 1977. С. 100–112. [*Sirotkin A.N.* Vssasyvanie radioaktivnykh veshchestv // Snizhenie radioaktivnosti v rastenijah i produktah zhivotnovodstva. M.: Kolos, 1977. P. 100–112. (In Russian)]
29. *Сироткин А.Н.* Закономерности обмена радионуклидов в организме животных // Основы радиэкологии сельскохозяйственных животных. М.: Энергоатомиздат, 1987. С. 21–99. [*Sirotkin A.N.* Zakonomernosti obmena radionuklidov v organizme zhivotnykh // Osnovy radiojologii sel'skohozjajstvennykh zhivotnykh. M.: Energoatomizdat, 1987. P. 21–99. (In Russian)]
30. *Сироткин А.Н.* Поступление радионуклидов в продукцию животноводства // Сельскохозяйственная радиэкология. М.: Экология, 1991. С. 106–115. [*Sirotkin A.N.* ostuplenie radionuklidov v produkciju zhivotnovodstva // Sel'skohozjajstvennaja radiojologija. M.: Ecologiya, 1991. P. 106–115. (In Russian)]
31. *Сироткин А.Н., Буров Н.И., Тюменев Л.Н., Гришин А.И.* О поведении стронция-90, цезия-137, церия-144, рутения-106, сурьмы-125 и циркония-95 у крупного рогатого скота // Радиобиология. 1970. Т. 10. № 4. С. 629. [*Sirotkin A.N., Burov N.I., Tyumenev L.N., Grishin A.I.* O povedenii stroncija-90, cezija-137, cerija-144, rutenija-106, sur'my-125 i cirkonija-95 u krupnogo rogatogo skota // Radiobiologiya. 1970. V. 10. № 4. P. 629. (In Russian)]
32. *Сироткин А.Н., Гришин А.И., Тюменев Л.Н.* Миграция в трофической цепи и метаболизм в организме сельскохозяйственных животных радиоактивных продуктов нейтронной активации // Проблемы и задачи радиэкологии животных. М.: Наука, 1980. С. 144–171. [*Sirotkin A.N., Grishin A.I., Tyumenev L.N.* Migracija v troficheskoj cepi i metabolizm v organizme sel'skohozjajstvennykh zhivotnykh radioaktivnykh produktov nejtronnoj aktivacii // Problemy i zadachi radiojologii zhivotnykh. M.: Nauka, 1980. S. 144–171. (In Russian)]
33. *Сироткин А.Н., Панченко И.Я.* Поведение 90-Sr и 45-Ca в организме коров при различном содержании кальция стабильного в рационе // Докл. ВАСХНИЛ. 1967. № 7. С. 30. [*Sirotkin A.N., Panchenko I.Ya.* On the behaviour of ⁹⁰Sr and ⁴⁵Ca in calves in case of simultaneous administration of these isotopes // Doklady VASHNIL. 1967. № 7. P. 30. (In Russian)]
34. *Сироткин А.Н., Сарапульцев И.А. Панченко И.Я., Шилов В.П., Самарина А.А.* Кинетика обмена ¹³⁷Cs у крупного рогатого скота // Биологическое действие внешних и внутренних источников радиации / Под ред. Ю.И. Москалева, В.С. Калистратовой. М.: Медицина, 1972. С. 149–151. [*Sirotkin A.N., Sarapul'tsev I.A., Panchenko I.Ya., Shilov V.P., Samarina A.A.* Kinetika obmena ¹³⁷Cs u krupnogo rogatogo skota: Biologicheskoe dejstvie vneshnih i vnutrennih istochnikov radiacii // Biologicheskoe dejstvie vneshnih i vnutrennih istochnikov radiacii. M.: Medicine, 1972. S. 149–151. (In Russian)]
35. *Смирнова А.П.* Свинец-210 и полоний 210 в органах и тканях крупного рогатого скота: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Ленинград, 1974. 24 с. [*Smirnova A.P.* Svines-210 i polonij 210 v organah i tkanjah krupnogo rogatogo skota (dissertation). Leningrad, 1973. 24 p. (In Russian)]
36. *Федоров Е.А., Пристер С.Б., Буров Н.И., Романов Г.Н. Булдаков Л.А., Панченко И.Я., Осанов Д.П.* Биологическое действие молодых продуктов деления на молочный скот и их переход в продукцию животноводства // Радиобиология и радиэкология сельскохозяйственных животных / Под ред. Б.Н. Анненкова, И.К. Дибобеса, Р.М. Алексахина. М.: Атомиздат, 1973. С. 70–139. [*Fedorov E.A., Prister S.B., Burov N.I., Romanov G.N., Buldakov L.A., Panchenko I.Ya., Osanov D.P.* Biologicheskoe dejstvie molodykh produktov delenija na molochnyj skot i ih perehod v produkciju zhivotnovodstva // Radiobiologija i radiojologija sel'skohozjajstvennykh zhivotnykh. M.: Atomizdat, 1973. S. 70–139. (In Russian)]
37. *Шилов В.П.* Метаболизм ¹³⁷Cs у свиней в возрастном аспекте // Сельскохозяйственная биология. 1980. Т. XV. № 5. С. 766–769. [*Shilov V.P.* Metabolizm ¹³⁷Cs u svinej v vozrastnom aspekte // Sel'skohozjajstvennaja biologiya. 1980. V. 15. № 5. P. 766–769. (In Russian)]
38. *Георгиевский В.И., Анненков Б.Н., Самохин В.Т.* Минеральное питание животных. М.: Колос, 1979. 471 с. [*Georgievsky V.I., Annenkov B.N., Samokhin V.T.* Mineral'noe pitanie zhivotnykh. M.: Kolos, 1979. 471 p. (In Russian)]
39. *Mayes R.W., Beresford N.A., Howard B.J., Vandecasteele C.M., Stakelum G.* Use of the true absorption coefficient as a measure of the bioavailability of radio-caesium in ruminants // Radiat. Environ. Biophys. 1996. V. 35. P. 101–109.
40. *Fesenko S., Isamov N., Howard B.J., Voigt G., Beresford N.A., Sanzharova N.* Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: part 1. Gut absorption // J. Environ. Radioact. 2007. V. 98. P. 85–103.
41. *Beresford N.A., Mayes R.W., Cooke A.I., Barnett C.L., Howard B.J., Lamb C.S., Naylor G.P.L.* The importance of source dependent bioavailability in determining the transfer of ingested radionuclides to ruminant derived food products // Environ. Sci. a Technol. 2000. V. 34. P. 4455–4462.
42. National Research Council (NRC). Nutrient Requirements of Dairy Cattle, seventh ed. Washington DC: National Academic Press, 2001.
43. *Mayes R.W., Eayres H.F., Beresford N.A., Lamb C.S., Howard B.J.* Changes with age in the absorption of radio-caesium by sheep // Radiat. Prot. Dosim. 1992. V. 41. P. 83–86.
44. *Coughtrey P.J., Thorne M.C.* Radionuclide Distribution and Transport in Terrestrial and Aquatic Ecosystems. V. 1. Rotterdam: A Balkema, 1983.
45. *McDonald P., Edwards R.A., Greenhalgh J.F.D., Morgan C.A.* Animal Nutrition. Fifth ed. Harlow: Longman Scientific and Technical, 1995.

46. National Research Council (NRC). Nutrient requirements of swine. 10th Ed. Washington DC: National Academic press, 1998.
47. National Research Council (NRC). Nutrient requirements of dairy cattle. Seventh ed. Washington DC: National Academic press, 2001.
48. ICRP Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides, part 2 – ingestion dose coefficients. Annals of the ICRP. ICRP Publication 67. Annals of the ICRP 23, (3/4). Oxford: Pergamon Press, 1993.
49. *Harrison J.D.* The gastrointestinal absorption of the actinide elements // *Sci. Total Environ.* 1991. V. 100. P. 43–60.
50. *Beresford N.A., Crout N.M.J., Mayes R.W., Howard B.J., Lamb C.S.* Dynamic distribution of radioisotopes of cerium, ruthenium and silver in sheep tissues // *J. Environ. Radioact.* 1998. V. 38. P. 317–338.
51. *Coughtrey P.J., Thorne M.C.* Radionuclide Distribution and Transport in Terrestrial and Aquatic Ecosystems. V. 1. Rotterdam: A ABalkema, 1983.
52. *Никитина З.А., Панченко И.И., Буров Н.И.* Накопление и распределение ^{137}Cs в организме свиней при длительном поступлении изотопа // Биологическое действие внешних и внутренних источников радиации. М.: Медицина, 1972. С. 145–148. [*Nikitina Z.A., Panchenko I.Ya., Burov N.I.* *Nakoplenie i raspredelenie ^{137}Cs v organizme svinej pri dlitel'nom postuplenii izotopa* // *Biologicheskoe dejstvie vneshnih i vnutrennih istochnikov radiacii.* М.: Medicine, 1972. P. 145–148. (In Russian)]
53. *Garner R.J., Jones H.G., Sanson B.F.* Fission products and dairy cow. 2. Some aspects of the metabolism of the alkaline-earth elements calcium, strontium and barium // *Biochemical. J.* 1960. V. 76. P. 572–579.
54. *Morgan J.E.* The metabolism of toxic metals by domestic animals – lead, cadmium, mercury and arsenic. 1991. ANS Report No. 2437-R1. ANS Consultants Ltd, Epsom.
55. *Thorne M.C.* Estimation of animal transfer factors for radioactive isotopes of iodine, technetium, selenium and uranium // *J. Environ. Radioact.* 2003. V. 70. P. 3–20.
56. *Beresford N.A., Barnett C.L., Mayes R.W., Pollaris K., Vandecasteele C.M., Howard B.J.* The use of an in-vitro technique to predict the absorption of dietary radiocesium by sheep // *Radiat. Environ. Biophys.* 1995. V. 34. P. 191–194.
57. Agricultural research Council (ARC). The nutrient requirements of ruminant livestock. Technical review by an Agricultural Research Council working party. Wallingford: C.A.B International, 1980.
58. *Бударков В.А., Зенкин А.С., Архипов Н.И. и др.* Влияние йода-131 на овец зависимости от содержания стабильного йода в рационе // Радиобиология. 1992. Т. 32. № 3. С. 451–458. [*Budarkov V.A., Zenkin A.S., Arkhipov N.I. et al.* *The influence of iodine-131 on sheep depending on the content of stable iodine in a diet* // *Radiobiologiya.* 1992. V. 32. № 3. P. 451–458 (In Russian)]
59. *Squire H.M., Middleton L.J., Sansom B.F., Coid C.R.* Experiments on the metabolism of certain fission products in dairy cows: Radioisotopes in Scientific Research // Proc. First UNESCO Int. Conf. 1958. V. 4. Pergamon Press, London.
60. *Morgan J.E.* The metabolism of toxic metals by domestic animals e lead, cadmium, mercury and arsenic // ANS rep. № 2437-R1. 1991. ANS Consultants Ltd., Epsom.
61. *Kleiber M.* Body size and metabolic rate // *Physiol. Rev.* 1947. V. 27. № 4. P. 511–541.

Analysis of Data on the Radionuclide Adsorption in the Gastrointestinal Tract of Farm Animals

N. N. Isamov^{a,#} and S. V. Fesenko^a

^a Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

[#]E-mail: nizomis@yandex.ru

The analysis of data on the radionuclide adsorption in the gastrointestinal tract of farm animals and poultry obtained in field and laboratory experiments from 1960s up to present time is given. Radionuclides adsorption coefficients can be ranked as follows: $^{239}\text{Pu} < ^{144}\text{Ce} \approx ^{91}\text{Y} < ^{54}\text{Mn} \approx ^{95}\text{Zr} \approx ^{106}\text{Ru} \approx ^{238}\text{U} < ^{210}\text{Pb} \approx ^{60}\text{Co} \approx ^{59}\text{Fe} \approx ^{140}\text{Ba} \approx ^{110\text{m}}\text{Ag} \approx ^{210}\text{Po} \approx ^{185}\text{W} < ^{45}\text{Ca} \approx ^{65}\text{Zn} \approx ^{90}\text{Sr} \approx \text{Te} \approx ^{226}\text{Ra} < ^{137}\text{Cs} \approx ^{32}\text{P} \approx ^{99}\text{Tc} < ^3\text{H} < ^{131}\text{I}$. The information presented can be used for: 1) assessing consequences of radioactive contamination of the environment, 2) models development of radionuclide transfer to animals, (iii) estimation of acceptable levels of radionuclide concentrations in the animal tissues and to develop measures to reduce the radionuclides transfer from feed to animal products.

Keywords: radionuclides, cattle, sheep, goats, pigs, hens, radionuclides absorption in the gastrointestinal tract of animals