

УДК 636.03
AGRIS L20; U10

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/113/37>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСТУПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ^{137}Cs И ^{90}Sr С РАЦИОНОМ В ОРГАНИЗМ ЖВАЧНЫХ ЖИВОТНЫХ И ОЦЕНКА ПЕРЕХОДА В ПРОДУКЦИЮ ЖИВОТНОВОДСТВА

©*Епимахов В. Г.*, ORCID: 0000-0001-5251-2970, SPIN-код: 9305-7148, канд. биол. наук,
НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ, г. Обнинск, Россия, epimakhov.vg@gmail.com

MODELING THE INFLOW OF ^{137}Cs AND ^{90}Sr RADIONUCLIDES WITH DIET INTO THE BODY OF RUMINANT ANIMALS AND ASSESSMENT OF THE TRANSITION INTO LIVESTOCK PRODUCTS

©*Epimakhov V.*, ORCID: 0000-0001-5251-2970, SPIN-code: 9305-7148, Ph.D.,
NRC “Kurchatov Institute” – RIRAE, Obninsk, Russia, epimakhov.vg@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена вопросам нормирования поступления радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr с рационом в организм крупного рогатого скота и овец. Установленные и действующие в настоящее время временные усреднённые нормы предельно допустимого содержания радионуклидов в кормах обладают рядом существенных недостатков и нуждаются в уточнении. Для описания и изучения поступления радионуклидов с рационом в организм крупного рогатого скота и овец предлагается имитационная модель, в основу создания которой положена методология оценки перехода тяжёлых металлов из кормов в продукцию животноводства. Представлена концептуальная схема, отражающая структуру и порядок функционирования модели. Установлен перечень входных параметров. Выполнена верификация модели путём сравнительного анализа данных экспериментальных исследований и результатов численного моделирования зависимости концентрации ^{137}Cs и ^{90}Sr в молоке и мышечной массе крупного рогатого скота и овец от содержания радионуклидов в рационе. Степень соответствия эмпирических данных и результатов моделирования свидетельствует о правомерности применения модели к оценке перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr из рациона в животноводческую продукцию и их нормирования при поступлении в организм. Возможность определения и знания максимально допустимых уровней содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в рационах в зависимости от вида животных, возрастной группы, физиологического состояния, продуктивности, хозяйственного назначения и других параметров, позволит принять необходимые защитные мероприятия в условиях сложившейся радиационной обстановки. Это также будет способствовать улучшению технологий содержания и кормления крупного рогатого скота и овец, гарантировать производство животноводческой продукции, соответствующей санитарно-гигиеническим нормативам.

Abstract. The article is devoted to the issues of standardization of intake of ^{137}Cs and ^{90}Sr radionuclides with diet in cattle and sheep. The established and currently valid temporary averaged standards for maximum permissible content of radionuclides in feed have a number of significant shortcomings and need to be clarified. To describe and study the intake of radionuclides with diet in cattle and sheep, a simulation model is proposed, the creation of which is based on the methodology for assessing the transfer of heavy metals from feed to livestock products. A conceptual diagram reflecting the structure and functioning of the model is presented. A list of input parameters is established. The model is verified by comparative analysis of experimental data and the results of numerical modeling of the dependence of the concentration of ^{137}Cs and ^{90}Sr in milk and muscle

mass of cattle and sheep on the content of radionuclides in the diet. The degree of correspondence between empirical data and modeling results indicates the validity of the model application to assess the transfer of ^{137}Cs and ^{90}Sr from the diet to livestock products and their standardization upon entry into the body. The ability to determine and know the maximum permissible levels of ^{137}Cs and ^{90}Sr in diets depending on the animal species, age group, physiological state, productivity, economic purpose and other parameters will allow taking the necessary protective measures in the current radiation environment. This will also contribute to improving the technologies for keeping and feeding cattle and sheep, and guarantee the production of livestock products that meet sanitary and hygienic standards.

Ключевые слова: радионуклиды, модель, рацион, жвачные животные, нормирование.

Keywords: radionuclides, model, diet, animals, rationing.

В настоящее время наблюдается усиление антропогенного воздействия на окружающую среду. В результате, особенно в индустриальных регионах, выявлены территории с повышенным содержанием экотоксикантов, что приводит к серьёзному загрязнению сельскохозяйственных угодий, кормов и, как следствие, к ухудшению ветеринарно-санитарного качества продукции животноводства. Это, в свою очередь, является причиной хронической интоксикации животных, снижения их репродуктивных способностей и иммунологического статуса [1, 2].

Наибольшую опасность представляют радионуклиды ^{137}Cs и ^{90}Sr , которые, обладая высокой степенью токсичности для окружающей среды и способностью накапливаться в живых организмах, при попадании внутрь нарушают естественные обменные процессы и снижают устойчивость к различным заболеваниям [3].

На сегодняшний день вопросы накопления радионуклидов в организме жвачных животных при поступлении с рационом остаются недостаточно изученными. Все имеющиеся оценки отражают условия проведения экспериментов, и степень их достоверности различается в зависимости от исследования. Прогнозирование перехода радионуклидов в продукцию животноводства затруднительно. Отдельные работы по изучению миграции и аккумуляции ^{137}Cs и ^{90}Sr в органах и тканях крупного рогатого скота и овец проведены, но результаты исследований противоречивы и фрагментарны, не позволяют сформировать комплексное представление о поведении радионуклидов в системе «рацион — организм животных — продукция животноводства» [4-6].

В этой связи задача кормопроизводства должна быть расширена от оптимизации использования кормов с целью обеспечения максимальной продуктивности, обусловленной генетически, при сохранении здоровья и репродуктивной функции животного, до решения вопросов, связанных с получением экологически безопасной животноводческой продукции.

Цель данного исследования состоит в разработке модели, позволяющей оценить поступление радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в организм жвачных животных, их накопление и переход в молоко и мясо. Это необходимо для определения максимально допустимых уровней содержания радионуклидов в рационах кормления животных на загрязнённых радионуклидами территориях и обеспечения производства экологически безопасной животноводческой продукции.

В контексте вышеизложенного, представляется актуальным изучение не только определения особенностей распределения упомянутых радионуклидов в организме, но и выявления закономерностей их накопления и перехода в продукцию животноводства с целью

разработки научно обоснованных нормативов содержания радионуклидов в кормовых рационах.

Общедоступные научные данные свидетельствуют о том, что внимание исследователей сосредоточено главным образом на процессах аккумуляции ^{137}Cs и ^{90}Sr в органах и тканях животных, а также уровнях загрязнения мяса, молока и других продуктов. Анализ этих данных показывает, что они существенно различаются, что делает их сопоставление и обобщение практически невозможным. Предлагаемые подходы к описанию процессов поступления радионуклидов в организм животных характеризуются значительным разнообразием, что обусловлено тем, что реакция организма на поступление радионуклидов с кормами зависит от множества факторов внешней и внутренней среды [3].

В случае длительного поступления радионуклидов с рационом задача не может быть решена без учёта этих факторов. Устранение противоречий в методологических подходах представляется важным и может быть успешно решено только посредством проведения дополнительных исследований. При этом следует учитывать, что установленные и действующие в настоящее время временные усреднённые нормы предельно допустимого содержания радионуклидов в кормах обладают рядом существенных недостатков и нуждаются в уточнении.

Таким образом, несмотря на то, что загрязнение кормов радионуклидами носит региональный характер и связано в основном с промышленными выбросами и повышенным естественным их содержанием в почвах, проблема перехода радионуклидов по трофической цепи «рацион - организм животных – продукция животноводства» находится в центре внимания специалистов.

Моделирование. Ранее были разработаны модели, описывающие поступление Cd, Pb, Hg и As в организм жвачных животных с рационом, а также их накопление и переход в животноводческую продукцию, такую как молоко и мясо [7].

В ходе численных экспериментов, анализа и обобщения полученных данных были выявлены закономерности формирования зависимостей «доза-эффект» при поступлении тяжёлых металлов (ТМ) в организм животных с рационом. Эти закономерности аналогичны базовым закономерностям, характерным для изолированных органов и тканей [8].

Анализ формирования зависимостей показал, что распределение животных по показателям «концентрация ТМ в мясе» и «концентрация ТМ в молоке» подчиняется нормальному и логнормальному распределению. Это позволяет использовать модели для прогнозирования содержания ТМ в продукции. Вариация значений установленных модифицирующих факторов позволила нормировать и оценить максимально допустимый уровень (МДУ) содержания Cd, Pb, Hg и As в рационах животных [9].

Для создания имитационной модели поступления радионуклидов с рационом в организмы крупного рогатого скота и овец была применена методология оценки перехода тяжёлых металлов из кормов в продукцию. Цель моделирования заключается в установлении количественной оценки максимально допустимого уровня поступления ^{137}Cs и ^{90}Sr в организм жвачных животных разного вида, возрастной группы, физиологического состояния, технологии содержания, хозяйственного использования и продуктивности. Также необходимо рассмотреть вклад принимаемых защитных мероприятий на территориях, загрязнённых радионуклидами, для предотвращения превышения санитарно-гигиенических нормативов в животноводческой продукции.

Концептуальная схема, представленная на Рисунке 1, отражает структуру и порядок функционирования модели поступления ^{137}Cs и ^{90}Sr в организм крупного рогатого скота и овец. Модель является стохастической, в ней учтены вариации содержания радионуклидов в

рационах кормления, абсорбции радионуклидов в желудочно-кишечном тракте, изменения основного обмена веществ от животного к животному при различных физиологических состояниях, энергетических ресурсов, расходуемых организмом на поддержание своего энергетического статуса, а также других показателей, влияющих на переход радионуклидов в продукцию. Для количественного учёта потребляемых питательных веществ в рационах кормления применяется система оценки кормов по обменной энергии [10]. Учтены модифицирующие факторы, оказывающие воздействие на аккумуляцию радионуклидов в организме и их последующий переход в продукцию животноводства [11].

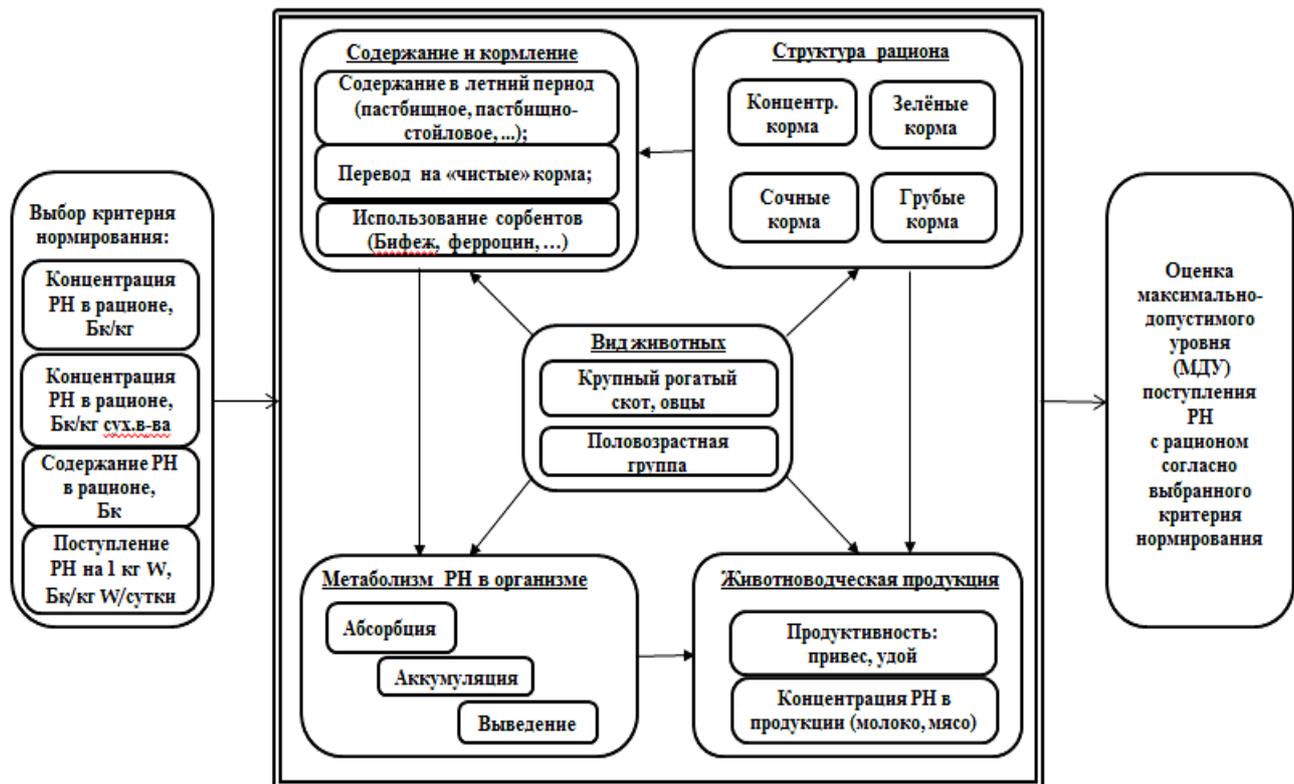


Рисунок 1. Концептуальная схема модели перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr из рациона в животноводческую продукцию, нормирования и оценки максимально - допустимого уровня (МДУ) поступления РН

Входными параметрами для определения максимально-допустимых уровней поступления ^{137}Cs и ^{90}Sr с рационом в организм крупного рогатого скота и овец являются следующие:

- вид животных: КРС или овцы;
- поголовье животных (10 голов для каждого численного опыта на модели);
- половозрастная группа животных. Для крупного рогатого скота: быки-производители, коровы, ремонтные телки, племенные бычки и молодняк, выращиваемый на мясо. Для овец: бараны-производители, овцематки и растущие ягнята;
- рацион кормления. Рассматриваются типовые рационы, разработанные для роста и нормального физиологического развития животных определённого вида и возрастной группы при заданных условиях содержания и хозяйственного использования [10, 12-15];
- продуктивность: планируемая живая масса к завершению периода откорма, для коров и лактирующих овец - молочная продуктивность, выраженная в удое за период лактации;
- технологии содержания и кормления животных;

- критерии нормирования - параметры, согласно которым выполняется нормирование и оценка максимально допустимого уровня суточного поступления радионуклидов в организм животных;

- величина накопленного уровня содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в мышечной ткани животных.

Принято во внимание изменения живой массы с возрастом, удоев в процессе лактации, типа и уровня кормления при переходе от пастбищного к стойловому содержанию.

Длительность моделирования составляет один год. Шаг моделирования по времени равен одним суткам, что соответствует основному циркадианному ритму, который обуславливает баланс веществ и энергии в организме.

В качестве исследуемого показателя рассматривается максимально допустимый уровень поступления ^{137}Cs и ^{90}Sr с рационом кормления в соответствии с выбранным критерием нормирования. Превышение данного уровня, как ожидается, приведёт к нарушению санитарно – гигиенических нормативов в продуктах животноводства (молоке и мясе).

С целью повышения достоверности и качества аналитических выводов, снижения неоднородности результатов исследований и обеспечения математико-статистической обработки данных для каждого численного опыта предусмотрена многократная повторность.

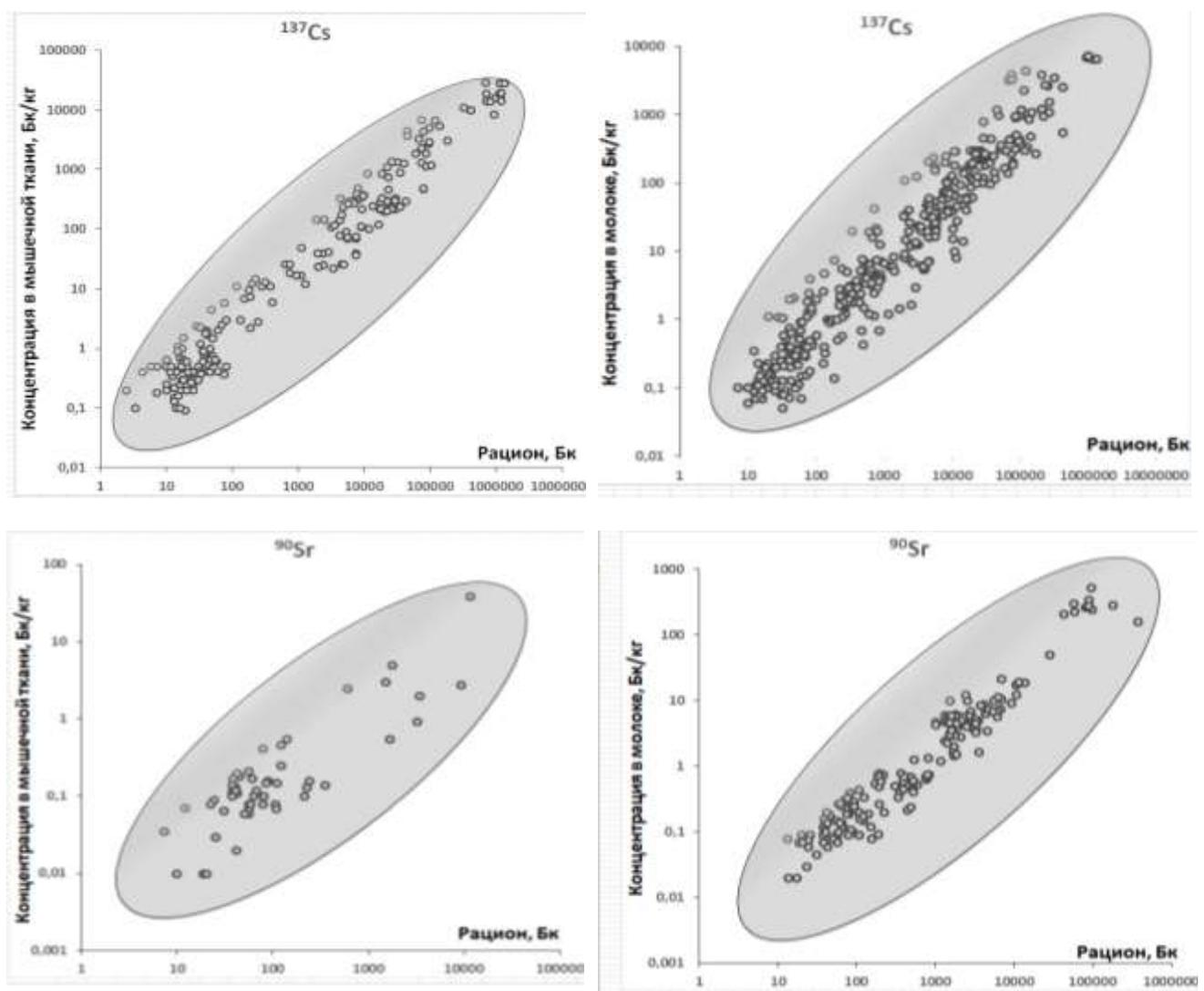


Рисунок 2. Оценка влияния содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в рационе крупного рогатого скота на концентрацию радионуклидов в молоке и мышечной ткани животных

Верификация. В зоотехнической практике для оценки поступления радионуклидов в продукцию продуктивных животных применяется коэффициент перехода, который отражает уровень миграции радионуклидов из рациона в производимую продукцию. Для верификации модели проведён сравнительный анализ взаимосвязи параметров, используемых для расчёта коэффициента перехода: а) концентрации ^{137}Cs и ^{90}Sr в молоке и мышечной массе крупного рогатого скота и овец, (Бк/кг); б) содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в рационе животных, (Бк).

Моделирование проводилось для коров в возрасте от трёх до четырёх лет, с продуктивностью от 4000 до 6000 литров молока, и для овец в возрасте от двух месяцев до трёх лет. Кормление животных соответствовало стандартным нормам и рационам в периоды пастбищного и стойлового содержания. Предметом исследования являлась концентрация ^{137}Cs и ^{90}Sr в мышечной ткани и молоке жвачных животных в зависимости от уровня содержания радионуклидов в их рационе.

На Рисунках 2 и 3 представлены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования, проведённых с применением модели.

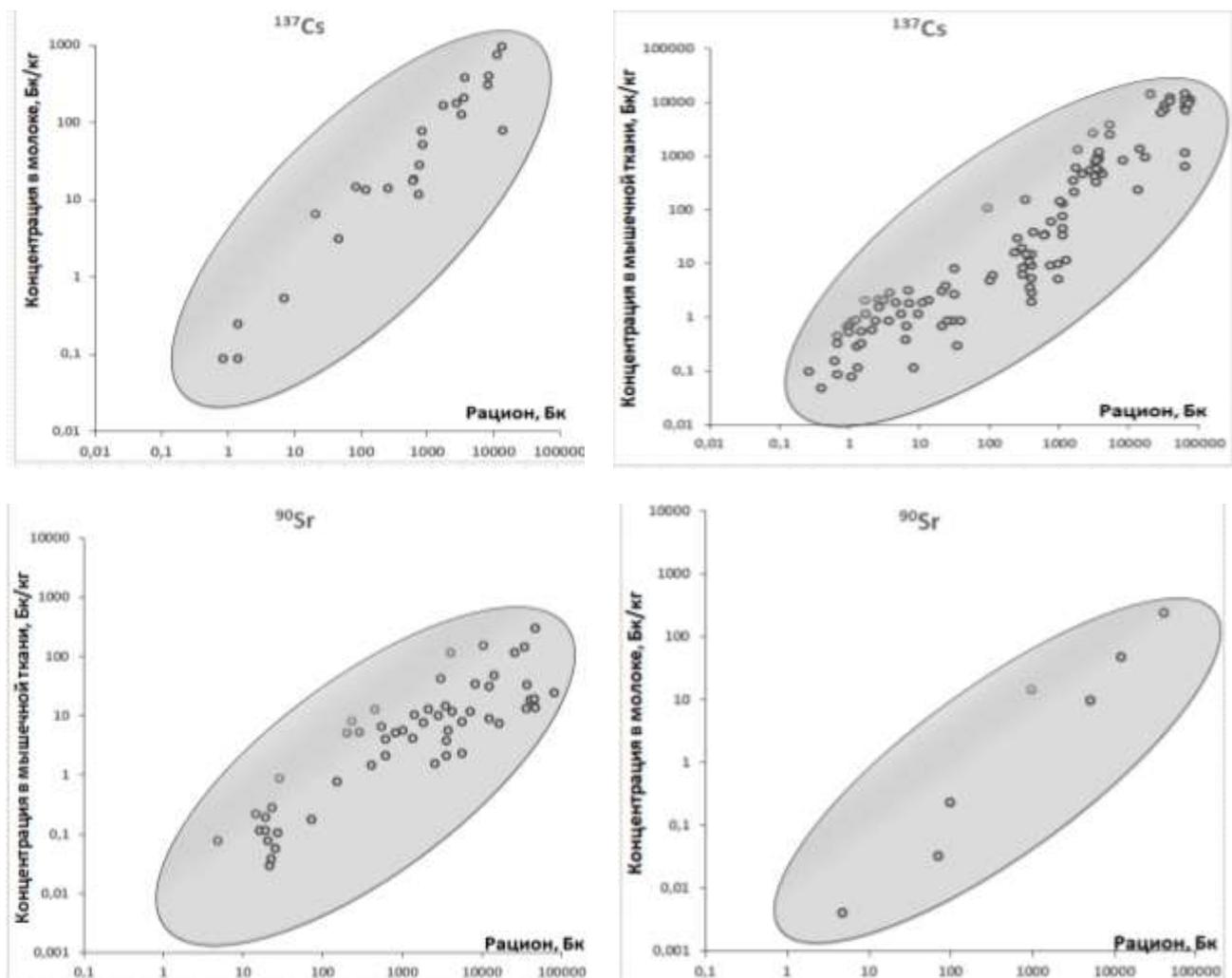


Рисунок 3. Оценка влияния содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в рационе овец на концентрацию радионуклидов в мышечной ткани животных

Заштрихованные области представляют собой совокупности расчётных значений концентрации ^{137}Cs и ^{90}Sr в молоке и мышечной ткани, которые соответствуют множеству

возможных значений содержания радионуклидов в рационе жвачных животных. Расчётные данные полностью охватывают результаты исследований и натурных экспериментов. Это свидетельствует о том, что модель обладает свойствами, близкими к изучаемой реальной системе, и выводы, полученные с помощью модели, могут считаться корректными и достоверными на приемлемом уровне.

Степень корреляции между эмпирическими данными и результатами моделирования свидетельствует о возможности и правомерности применения модели для определения максимально допустимого уровня содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в рационах животных. Это имеет большое значение для решения задач в области кормопроизводства при ведении животноводства на территориях, загрязнённых радионуклидами.

Заключение

До настоящего времени не была проведена в полном объёме комплексная оценка поступления радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в организм жвачных животных, их накопление и переход в молоко и мясо. Имеющиеся данные носят отрывочный и фрагментарный характер.

Реализация модели, созданной с целью прогнозирования перехода радионуклидов в продукцию животноводства позволит внести коррективы в существующие технологии содержания и кормления, адаптируя их к сложившейся радиационной обстановке в хозяйствах. В свою очередь, определение максимально допустимых уровней поступления ^{137}Cs и ^{90}Sr с рационом в зависимости от вида, возраста, хозяйственного назначения, уровня продуктивности животных и других факторов позволит обеспечить получение экологически безопасной продукции животноводства.

Список литературы:

1. Баранников В. Д., Кириллов Н. К. Экологическая безопасность сельскохозяйственной продукции. М.: Колос, 2005. 350 с.
2. Шахов А. Г., Аргунов М. Н., Середа С. В., Василенко В. В. Загрязнение окружающей среды – важнейший фактор ухудшения продуктивного здоровья животных // Агроэкологическая безопасность в условиях техногенеза: Материалы международного симпозиума. Казань, 2006. С. 139-142.
3. Ильязов Р. Г. Адаптация агросферы к условиям техногенеза. Казань: Фэн, 2006. 664 с.
4. Окунев А. М. Особенности перехода техногенных радионуклидов из рациона в молоко и мясо коров при пастбищном содержании на юге Тюменской области // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2018. №6(141). С. 250-254.
5. Лысенко Н. П., Пастернак А. Д., Рогожина Л. В., Павлов А. Г. Ведение животноводства в условиях радиоактивного загрязнения среды. СПб.: Лань, 2005. 240 с.
6. Мурзалиев И. Д. Технологические приемы переработки продукции овцеводства на ионопастбищах // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. №5(115). С. 158-160.
7. Епимахов В. Г. Максимально допустимые уровни поступления Cd, Pb, Hg и As в организм жвачных животных с рационом // Эпоха науки. 2023. №34. С. 7-13. <https://doi.org/10.24412/2409-3203-2023-34-7-13>
8. Куценко С. А. Основы токсикологии. М.: Фолиант, 2004. 570 с.
9. Епимахов В. Г. Оценка максимально допустимых уровней содержания кадмия и свинца в рационах жвачных животных. Имитационное моделирование как альтернативный подход // Инновационное развитие науки: возможности, проблемы, перспективы. Т. VIII. М.: Перо, 2021. С. 5-24.

10. Макарец Н. Г. Кормление сельскохозяйственных животных. Калуга: Ноосфера, 2012. 642 с.
11. Епимахов В. Г., Саруханов В. Я., Епифанова И. Э. Факторы, модифицирующие переход радионуклидов из кормов в животноводческую продукцию // Ветеринария, зоотехния и биотехнология. 2024. №11. Т. 1. С. 105–117. <https://doi.org/10.36871/vet.zoo.bio.202411110>
12. Рядчиков В. Г. Основы питания и кормления сельскохозяйственных животных. Краснодар, 2012. 328 с.
13. Калашников А. П., Фисинин В. И., Щеглов В. В., Клейменов Н. И. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных. М., 2003. 456 с.
14. Владимиров Н. И. Кормление сельскохозяйственных животных. Барнаул, 2008. 211 с.
15. Санжаров Н. И. Научные основы оценки устойчивости агроэкосистем к воздействию техногенных факторов. Обнинск, 2013. 187 с.

References:

1. Barannikov, V. D., & Kirillov, N. K. (2005). *Ekologicheskaya bezopasnost' sel'skokhozyaistvennoi produktsii*. Moscow. (in Russian).
2. Shakhov, A. G., Argunov, M. N., Sereda, S. V., & Vasilenko, V. V. (2006). *Zagryaznenie okruzhayushchei sredy – vazhneishii faktor ukhudsheniya produktivnogo zdorov'ya zhivotnykh*. In *Agroekologicheskaya bezopasnost' v usloviyakh tekhnogeneza: Materialy mezhdunarodnogo simpoziuma, Kazan'*, 139-142. (in Russian).
3. Il'yazov, R. G. (2006). *Adaptatsiya agrosfery k usloviyam tekhnogeneza*. Kazan'. (in Russian).
4. Okunev, A. M. (2018). *Osobennosti perekhoda tekhnogennykh radionuklidov iz ratsiona v moloko i myaso korov pri pastbishchnom sodержanii na yuge Tyumenskoi oblasti*. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, (6(141)), 250-254. (in Russian).
5. Lysenko, N. P., Pasternak, A. D., Rogozhina, L. V., & Pavlov, A. G. (2005). *Vedenie zhivotnovodstva v usloviyakh radioaktivnogo zagryazneniya sredy*. St. Petersburg. (in Russian).
6. Murzaliev, I. D. (2014). *Tekhnologicheskie priemy pererabotki produktsii ovtsevodstva na ionopastbishchakh*. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, (5(115)), 158-160. (in Russian).
7. Epimakhov, V. G. (2023). *Maksimal'no dopustimye urovni postupleniya Cd, Pb, Hg i As v organizm zhvachnykh zhivotnykh s ratsionom*. *Epokha nauki*, (34), 7-13. (in Russian). <https://doi.org/10.24412/2409-3203-2023-34-7-13>
8. Kutsenko, S. A. (2004). *Osnovy toksikologii*. Moscow. (in Russian).
9. Epimakhov, V. G. (2021). *Otsenka maksimal'no dopustimykh urovnei sodержaniya kadmiya i svintsa v ratsionakh zhvachnykh zhivotnykh. Imitatsionnoe modelirovanie kak al'ternativnyi podkhod*. In *Innovatsionnoe razvitie nauki: vozmozhnosti, problemy, perspektivy*, 8, Moscow, 5-24. (in Russian).
10. Makartsev, N. G. (2012). *Kormlenie sel'skokhozyaistvennykh zhivotnykh*. Kaluga. (in Russian).
11. Epimakhov, V. G., Sarukhanov, V. Ya., & Epifanova, I. E. (2024). *Faktory, modifitsiruyushchie perekhod radionuklidov iz kormov v zhivotnovodcheskuyu produktsiyu*. *Veterinariya, zootekhniya i biotekhnologiya*, 1(11), 105–117. (in Russian). <https://doi.org/10.36871/vet.zoo.bio.202411110>

12. Ryadchikov, V. G. (2012). Osnovy pitaniya i kormleniya sel'skokhozyaistvennykh zivotnykh. Krasnodar. (in Russian).
13. Kalashnikov, A. P., Fisinin, V. I., Shcheglov, V. V., & Kleimenov, N. I. (2003). Normy i ratsiony kormleniya sel'skokhozyaistvennykh zivotnykh. Moscow. (in Russian).
14. Vladimirov, N. I. (2008). Kormlenie sel'skokhozyaistvennykh zivotnykh. Barnaul. (in Russian).
15. Sanzharov, N. I. (2013). Nauchnye osnovy otsenki ustoichivosti agroekosistem k vozdeistviyu tekhnogennykh faktorov. Obninsk. (in Russian).

*Работа поступила
в редакцию 11.02.2025 г.*

*Принята к публикации
18.02.2025 г.*

Ссылка для цитирования:

Епимахов В. Г. Моделирование поступления радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr с рационом в организм жвачных животных и оценка перехода в продукцию животноводства // Бюллетень науки и практики. 2025. Т. 11. №4. С. 272-280. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/113/37>

Cite as (APA):

Epimakhov, V. (2025). Modeling the Inflow of ^{137}Cs and ^{90}Sr Radionuclides with Diet Into the Body of Ruminant Animals and Assessment of the Transition Into Livestock Products. *Bulletin of Science and Practice*, 11(4), 272-280. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/113/37>