

УДК 636.03  
AGRIS L20; U10

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/88/18>

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСТУПЛЕНИЯ КАДМИЯ, СВИНЦА, РТУТИ И МЫШЬЯКА В ОРГАНИЗМ ЖВАЧНЫХ ЖИВОТНЫХ С РАЦИОНОМ И ПЕРЕХОДА В ПРОДУКЦИЮ ЖИВОТНОВОДСТВА

©*Епимахов В. Г.*, ORCID: 0000-0001-5251-2970, SPIN-код: 9305-7148,  
канд. биол. наук, Всероссийский научно-исследовательский институт  
радиологии и агроэкологии, г. Обнинск, Россия, [epimakhov.vg@gmail.com](mailto:epimakhov.vg@gmail.com)

## MODELING OF THE INTAKE OF CADMIUM, LEAD, MERCURY AND ARSENIC INTO THE BODY OF RUMINANTS WITH A RATION AND THE TRANSITION TO ANIMAL PRODUCTS

©*Epimakhov V.*, ORCID: 0000-0001-5251-2970, SPIN-code: 9305-7148, Ph.D.,  
Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia, [epimakhov.vg@gmail.com](mailto:epimakhov.vg@gmail.com)

*Аннотация.* Является актуальной задача установления закономерностей накопления и перехода в животноводческую продукцию тяжелых металлов (ТМ) для разработки научно-обоснованных нормативов содержания ТМ в рационах кормления. На основе моделирования воздействия кадмия на организм жвачных животных с целью возможности нормирования поступления тяжелых металлов: Cd, Pb, Hg и As с рационом, накопления в организме, и перехода в животноводческую продукцию разработана имитационная модель для крупного рогатого скота и овец. Представлена концептуальная схема, которая отражает структуру и порядок функционирования модели. Дано ее описание. Для расчета максимально-допустимых уровней содержания кадмия, свинца, ртути и мышьяка в рационе крупного рогатого скота и овец установлен перечень входных параметров. Исследуемым показателем является максимально допустимый уровень содержания Cd, Pb, Hg и As в рационах кормления, превышение которого, ожидается, будет приводить к нарушению нормативов ТМ в продуктах животноводства (молоке и мясе). Выполнена верификация модели. Степень сходства эмпирических данных и результатов моделирования говорит о правомерности использования модели и выводы, сделанные с ее помощью, применимы к изучаемой реальной системе и могут считаться правильными и достоверными на приемлемом уровне. Реализация модели, установление величин максимально допустимых уровней содержания кадмия, свинца, ртути и мышьяка в рационах животных в зависимости от вида, возрастной группы, физиологического состояния, уровня продуктивности и других факторов позволит внести изменения и улучшить в условиях сложившейся техногенной обстановки технологии содержания и кормления и гарантировать получение экологически безопасной продукции животноводства.

*Abstract.* The task of establishing the regularities of accumulation and transition to animal products of heavy metals for the development of scientifically based standards for the content of heavy metals in feeding diets is urgent. Based on modeling the effects of cadmium on the body of ruminants, in order to normalize the intake of heavy metals: Cd, Pb, Hg and As with the diet, accumulation in the body, and transition to livestock products, a simulation model for cattle and sheep has been developed. A conceptual scheme is presented that reflects the structure and functioning of the model. Its description is given. To calculate the maximum permissible levels of cadmium, lead, mercury and arsenic in the diet of cattle and sheep, a list of input parameters has been established. The studied indicator is the maximum permissible level of Cd, Pb, Hg and As content in feeding diets,

the excess of which, it is expected, will lead to a violation of heavy metals standards in animal products (milk and meat). The model has been verified. The degree of similarity of empirical data and modeling results indicates the legitimacy of using the model and the conclusions drawn with its help are applicable to the real system under study and can be considered correct and reliable at an acceptable level. The implementation of the model, the establishment of the values of the maximum permissible levels of cadmium, lead, mercury and arsenic in the diets of animals, depending on the species, age group, physiological state, productivity level and other factors will allow to make changes and improve the technology of keeping and feeding in the conditions of the current technogenic situation and guarantee the receipt of environmentally safe livestock products.

*Ключевые слова:* тяжелые металлы, имитационные модели, рационы, животные, крупный рогатый скот, овцы, кормление жвачных животных.

*Keywords:* heavy metals, simulation models, rations, animals, cattle, sheep, ruminant feeding.

### *Введение*

В настоящее время наблюдается рост антропогенной нагрузки на окружающую среду. В результате, особенно в промышленных регионах, обнаружены территории с повышенным содержанием экотоксикантов, что приводит к значительному загрязнению сельхозугодий, кормов и, как следствие, ухудшению ветеринарно-санитарного качества животноводческой продукции, служит причиной хронической интоксикации животных, снижая их воспроизводительные качества, иммунологический статус [1, 2].

Наибольшую опасность представляют тяжелые металлы (ТМ): ртуть, кадмий, свинец, мышьяк, которые включены в число подлежащих контролю при международной торговле пищевыми продуктами. Обладая высокой экотоксичностью, кумулятивностью и синергизмом они, при попадании в организм, нарушают внутренние обменные процессы и снижают его устойчивость к различным заболеваниям [3].

К сожалению, вопросы накопления ТМ в организме с/х животных при потреблении с рационом малых количеств тяжелых металлов в настоящее время изучены недостаточно, а все известные оценки по своему содержанию являются отражением условий проведения экспериментов и степень их достоверности в разных исследованиях, естественно, различна. Прогнозировать их переход в производимую продукцию, затруднительно. Отдельные работы по миграции и накоплению ТМ в органах и тканях крупного рогатого скота и овец выполнены, но результаты исследований противоречивы, носят фрагментарный характер, не отражают комплексного подхода к изучению поведения ТМ в системе «рацион – организм животных – продукция животноводства» [4, 5].

В связи с этим задача кормопроизводства от рационального использования кормов в направлении обеспечения максимальной, генетически обусловленной продуктивности при сохранении здоровья и воспроизводительной функции животного должна быть расширена до решения вопросов получения экологически безопасной животноводческой продукции.

Цель данной работы заключается в моделировании поступления Cd, Pb, Hg и As в организм жвачных животных, накоплении и перехода в животноводческую продукцию на предмет оценки допустимых уровней содержания ТМ в рационах кормления для получения на техногенно загрязненных территориях экологически безопасной продукции (молока и мяса).

В связи с вышесказанным, актуальной является задача не только выявления специфики распределения в организме каждого из указанных тяжелых металлов, но также установления

закономерностей накопления и перехода в животноводческую продукцию для разработки научно-обоснованных нормативов содержания ТМ в рационах кормления.

Общедоступная научная информация показывает, что основное внимание исследователей сконцентрировано на процессах аккумуляции ТМ в органах и тканях организма животных и уровнях загрязнения мяса, молока и др. продукции. Сопоставление данных показывает, что они довольно сильно отличаются, провести анализ и обобщить их практически невозможно. Причина в том, что ответная реакция организма на поступление ТМ с рационом находится в зависимости от многочисленных факторов внешней и внутренней среды и, в случаях длительного поступления ТМ с рационом, задача не может быть решена без их учета. Проблема усложняется еще и тем, что предлагаются различные подходы к оценке поступления ТМ в организм животных [6].

Устранение расхождений в подходах является необходимым и возможно только путем проведения дальнейших исследований с учетом, что принятые в настоящее время временные усредненные нормы предельного содержания токсических элементов в кормах имеют существенные недостатки и требуют уточнения.

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

### *Моделирование*

Математическое описание исследуемых объектов или биологических процессов зависит от особенностей поставленной задачи. Когда не принимается во внимание структура изучаемой системы и механизмы ее функционирования ограничиваются методами математической статистики, которые дают требуемое решение. В случае, когда представления о поведении системы, ее отклика на изменение факторов внешней и внутренней среды могут существенно повлиять на принимаемые решения, прибегают к методам моделирования систем.

Ранее была разработаны модели воздействия Cd на организм жвачных животных при хроническом поступлении с рационом [7]. При проведении численных опытов на моделях, анализе и обобщении полученных данных установлены закономерности формирования зависимостей «доза-эффект» при поступлении ТМ в организм животных с рационом, которые оказались аналогичны базовым закономерностям для изолированных органов и тканей [8]. Анализ формирования зависимостей показал, что имеет место нормальное и логнормальное распределение животных по показателям «концентрация ТМ в мясе» и «концентрация ТМ в молоке», что позволяет использовать модели для прогнозирования содержания ТМ в продукции. Варьирование значений модифицирующих факторов позволили нормировать и выполнить оценку максимально допустимого уровня (МДУ) содержания Cd и Pb в рационах животных [9].

Принятая методология оценки перехода ТМ из кормов в продукцию была использована при построении имитационных моделей поступления Hg или As с рационом в организм КРС и овец. В дальнейшем, разработанные модели были трансформированы в одну модель. Предназначение — решение задачи количественной оценки допустимого уровня содержания Cd, Pb, Hg и As в рационах жвачных животных в зависимости от вида животных, возраста, физиологического состояния, способа содержания, направления и уровня продуктивности при

содержании на загрязненных тяжелыми металлами территориях с целью недопущения превышения санитарно-гигиенического норматива в животноводческой продукции.

Концептуальная схема (Рисунок 1) отражает структуру и порядок функционирования модели. Модель является стохастической. В них учтены вариации содержания ТМ в рационах кормления, абсорбции ТМ в ЖКТ, изменения основного обмена от животного к животному при данном физиологическом состоянии, энергетических ресурсов расходуемых организмом на поддержание своего энергетического статуса, других показателей, влияющих на переход ТМ в продукцию, а также стохастический характер потребления корма. Для количественного учета потребляемых питательных веществ рационов кормления используется система оценки кормов по обменной энергии [10].

Учтены факторы, влияющие на накопление ТМ в организме и переход в производимую продукцию животноводства такие как вид животных, возрастная группа, физиологическое состояние, способ содержания и кормления, уровень продуктивности [11].

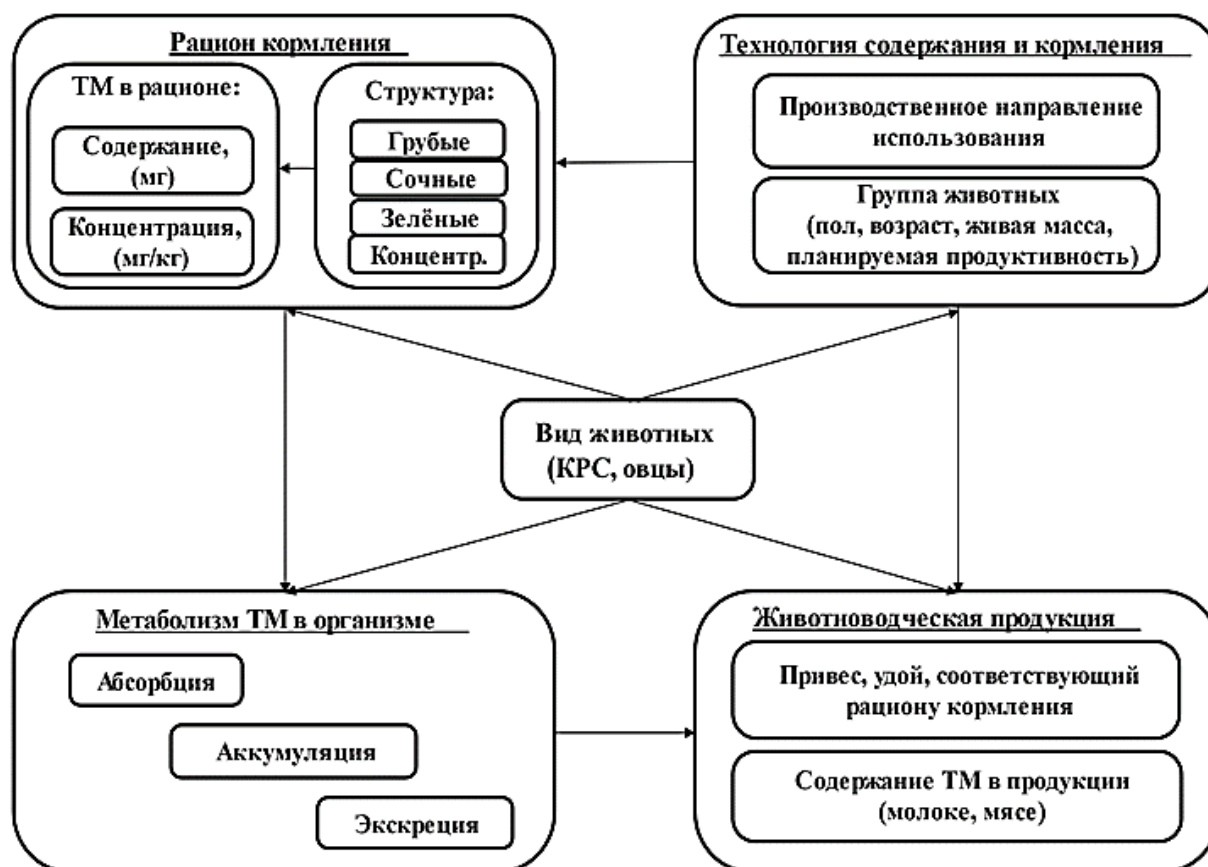


Рисунок 1. Концептуальная схема модели оценки поступления Cd, Pb, Hg и As в организм жвачных животных с рационом.

Для расчета максимально-допустимых уровней содержания кадмия, свинца, ртути и мышьяка в рационе крупного рогатого скота и овец установлен перечень входных параметров:

- вид животных: КРС или овцы;
- поголовье животных. Численность животных установлена 10 голов для каждого опыта;
- половозрастная группа животных. Для КРС выбраны следующие группы: быки-производители, коровы, ремонтные телки и племенные бычки, молодняк, выращиваемый на мясо. Овцы представлены 3 группами: бараны-производители, овцематки и растущие ягнята;

- рацион кормления. Структура рациона включает объемистые (грубые, сочные и зеленые) корма и концентрированные корма. Рассматриваются типовые рационы [10, 12–14], которые рассчитаны на обеспечение роста и нормального физиологического развития животных данного вида, возрастной группы при заданных условиях содержания и направления использования.

- продуктивность: планируемая живая масса на конец периода выращивания, для лактирующих — молочная продуктивность (удой за лактацию);

- величина содержания ТМ (Cd, Pb, Hg или As) в рационе (мг/рацион). Принято во внимание, что в пастбищный период размеры поступления ТМ в организм животных и, соответственно, в продукцию животноводства возрастают за счет потребления почвенных частиц: в среднем у крупного рогатого скота в 1,8 раза, у мелкого рогатого скота — в 2,2 раза [15];

Учитывается изменение живой массы с возрастом, удоев, типа и уровня кормления при переходе от пастбищного периода к стойловому периоду, а также, в течение лактации,

начальное содержание Cd, Pb, Hg и As в мышечной ткани животных, что важно и необходимо для проведения корректных расчетов.

Длительность моделирования составляет 1 год, включает пастбищный и стойловый периоды содержания животных. Шаг моделирования по времени принят равным 1 сутки, что совпадает с основным циркадианным ритмом, обуславливающим баланс веществ и энергии в организме.

Исследуемым показателем является максимально допустимый уровень содержания Cd, Pb, Hg и As в рационах кормления, превышение которого, ожидаемо, будет приводить к нарушению нормативов ТМ в продуктах животноводства (молоке и мясе), установленных органами санитарно-эпидемиологической службы Минздрав РФ.

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

### *Верификация*

В зоотехнической практике критерием оценки поступления ТМ в молоко и мясо продуктивных животных считается коэффициент перехода (КП) токсикантов из рациона в производимую продукцию [16]. Для верификации модели был выполнен сравнительный анализ взаимосвязи используемых для расчета КП параметров: а) концентрации Cd, Pb, Hg и As в молоке и мышечной массе КРС и овец и б) содержания Cd, Pb, Hg и As в рационе животных.

Моделирование проводилось для коров возраста 3–4-х лет, продуктивностью от 4000 до 6000 л молока и овец возраста от 2 месяцев до 3 лет. Кормление животных соответствовало типовым нормам и рационам в пастбищный и стойловый периоды. Рассматривались варианты концентрации ТМ в мышечной ткани животных на начало проведения численных экспериментов. Результаты исследования — концентрация Cd, Pb, Hg и As в мышечной ткани и молоке жвачных животных.

На Рисунках 2 и 3 представлены экспериментальные данные и результаты численных экспериментов, полученные с использованием описанной выше модели.

Заштрихованные области представляют собой множество расчетных значений концентрации ТМ в молоке и мышечной ткани, соответствующей совокупности возможных значений содержания ТМ в рационе. Они практически полностью покрывают данные, полученные в исследованиях и натуральных экспериментах. Это показывает, что модель обладает характеристиками, близкими к изучаемой реальной системе, а выводы, сделанные с помощью модели, применимы к системе и могут считаться правильными и достоверными на приемлемом уровне.

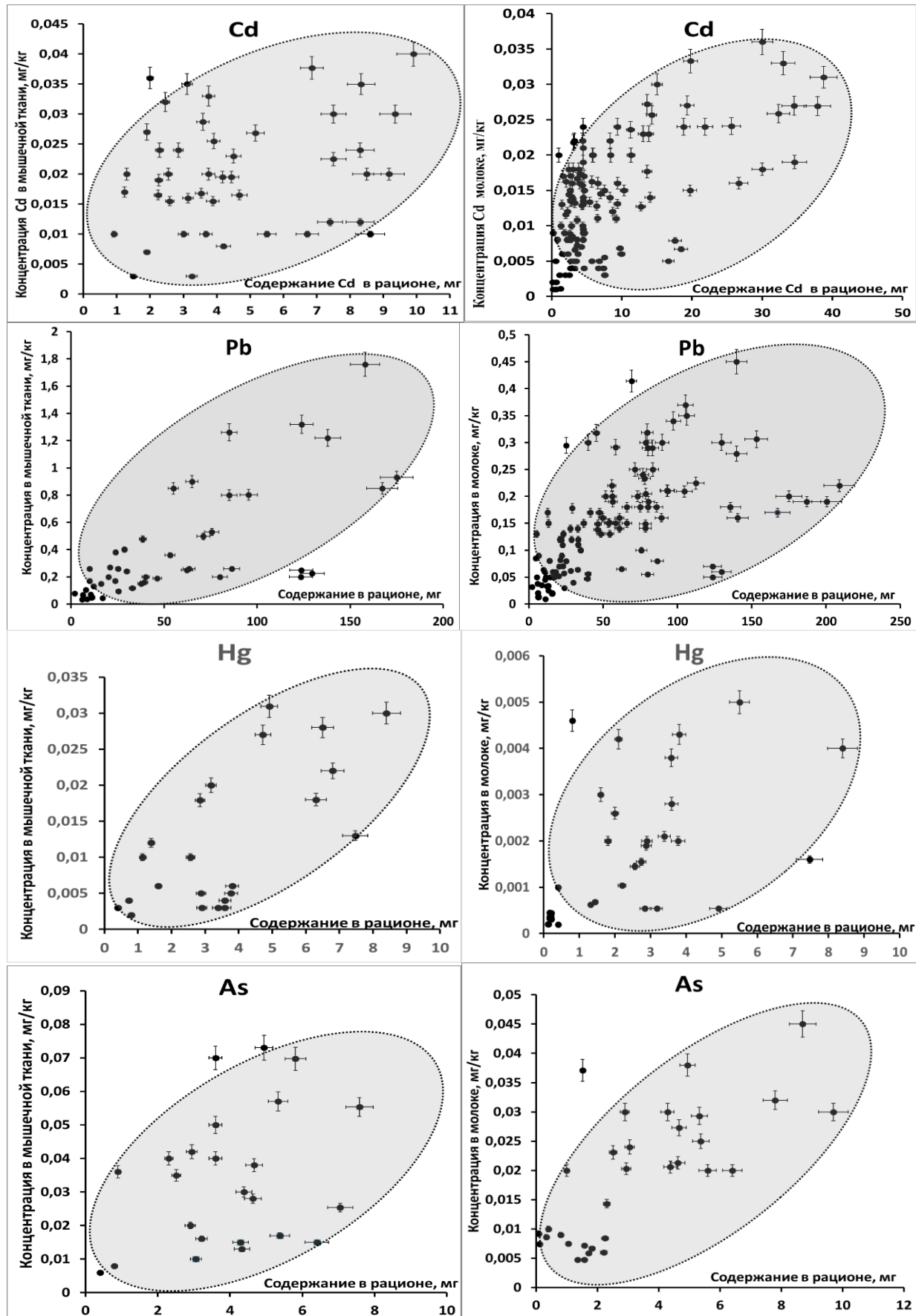


Рисунок 2. Оценка влияния содержания Cd, Pb, Hg и As в рационе на концентрацию ТМ в молоке и мышечной ткани КРС при варьировании модифицирующих факторов

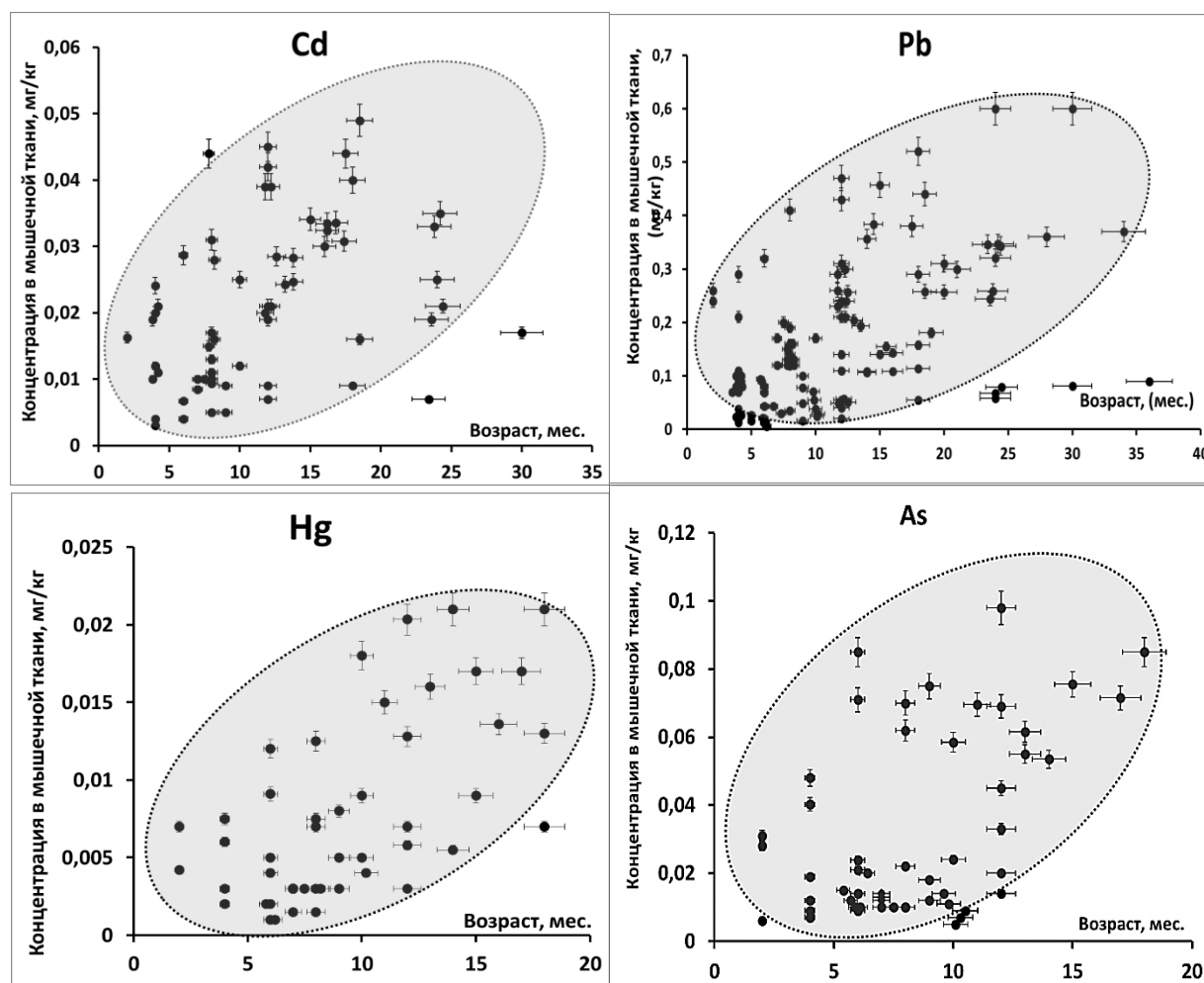


Рисунок 3. Оценка влияния содержания Cd, Pb, Hg и As в рационе на концентрацию ТМ в мышечной ткани овец при варьировании модифицирующих факторов

Степень сходства эмпирических данных и результатов моделирования говорит о правомерности использования модели для оценки максимально допустимого уровня содержания ТМ в рационах животных, что представляется важным для решения задач в области кормопроизводства и животноводства по вопросам содержания и кормления животных на техногенно загрязненных территориях, получения продукции, отвечающей санитарно-гигиеническим требованиям.

#### Заключение

До настоящего времени комплексная оценка миграции тяжелых металлов Cd, Pb, Hg и As в системе «рацион – животные – производимая продукция» в полном объеме не проводилась, а имеющиеся данные носят разрозненный и фрагментарный характер.

Реализация модели, установление величин максимально допустимых уровней содержания кадмия, свинца, ртути и мышьяка в рационах животных в зависимости от вида, возрастной группы, физиологического состояния, уровня продуктивности и других факторов позволит внести изменения и улучшить в условиях сложившейся техногенной обстановки технологии содержания и кормления и гарантировать получение экологически безопасной продукции животноводства.

#### Список литературы:

1. Баранников В. Д., Кириллов Н. К. Экологическая безопасность сельскохозяйственной

продукции. М.: Колос, 2005. С. 3-7, 148-155, 171-249.

2. Шахов А. Г., Аргунов М. Н., Середина 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., Алексахин Р. М., Фисинин В. И. Методология исследований и экспериментов в агроэкологии при различных типах техногенеза // Сельскохозяйственная биология. 2010. №2. С. 3-17.

4. Сироткин А. Н., Расин И. М., Исамов Н. Н., Соколова Е. А. Оценка концентрации тяжелых металлов // Агробиологический вестник. 2000. №2. С. 18-19.

5. Колесников В. А. Эколого-токсикологические аспекты воздействия соединений свинца на биологические объекты: автореф. дисс. ... д-ра биол. наук. Красноярск, 2003. 36с.

6. Ильязов Р. Г. Адаптация агроэкологии к условиям техногенеза = Agroecosphere adaptation to technogenesis conditions. Казань: Фэн: Акад. наук РТ, 2006. 669 с.

7. Епимахов В. Г. Моделирование - инструмент прогнозирования и нормирования потребления Cd с рационом жвачными животными // Евразийское Научное Объединение. 2019. №4-3 (50). С. 137-141. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2671599>

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. М., 2021. С. 5-24.

10. Макарец Н. Г. Кормление сельскохозяйственных животных. Калуга: Ноосфера, 2012.

11. Епимахов В. Г. От анализа и обобщения экспериментальных данных к подходу оценки воздействия тяжелых металлов на организм жвачных животных // Актуальные вопросы научных исследований: Материалы XVIII Международной научно-практической конференции. Иваново: Диалог, 2018. С. 10-12.

12. Рядчиков В. Г. Основы питания и кормления сельскохозяйственных животных. Краснодар: КубГАУ, 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: Изд-во АГАУ, 2008. 211 с.

15. Санжарова Н. И. Научные основы оценки устойчивости агроэкосистем к воздействию техногенных факторов. Обнинск, 2013. 187 с.

16. Аверин В. С., Пятнов Ю. Н., Ненашев Р. А. Поступление свинца и кадмия в молоко коров в зависимости от способа и типа рациона в разных регионах Белоруссии // Актуальные проблемы экологии на рубеже третьего тысячелетия и пути их решения. Брянск, 1999. С. 345-349.

#### 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 tekhnogenezha: materialy mezhdunarodnogo simpoziuma, Kazan'*, 139- 142. (in Russian).

3. Ilyazov, R. G., Aleksakhin, R. M., & Fisinin, V. I. (2010). *Metodologiya issledovaniy i*



eksperimentov v agroekosfere pri razlichnykh tipakh tekhnogeneza. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya*, (2), 3-17. (in Russian).

4. Sirotkin, A. N., Rasin, I. M., Isamov, N. N., & Sokolova, E. A. (2000). Otsenka kontsentratsii tyazhelykh metallov. *Agrokhimicheskii vestnik*, (2), 18-19. (in Russian).

5. Kolesnikov, V. A. (2003). Ekologo-toksikologicheskie aspekty vozdeistviya soedinenii svintsa na biologicheskie ob"ekty: avtoref. dis. d-ra biol. nauk. Krasnoyarsk. (in Russian).

6. Ilyazov, R. G. (2006). Adaptatsiya agroekosfery k usloviyam tekhnogeneza = Agroecosphere adaptation to technogenesis conditions. Kazan'. (in Russian).

7. Epimakhov, V. G. (2019). Modelirovanie - instrument prognozirovaniya i normirovaniya potrebleniya cd s ratsionom zhvachnymi zhivotnymi. *Evraziiskoe Nauchnoe Ob"edinenie*, (4-3(50)), 137-141. (in Russian). <https://doi.org/10.5281/zenodo.2671599>

8. Kutsenko, S. A. (2004). Osnovy toksikologii. Moscow. (in Russian).

9. Epimakhov, V. G. (2021). Otsenka maksimal'no dopustimyykh urovnei sodержaniya kadmiya i svintsa v ratsionakh zhvachnykh zhivotnykh. Imitatsionnoe modelirovanie kak al'ternativnyi podkhod. In *Innovatsionnoe razvitie nauki: vozmozhnosti, problemy, perspektivy*, Moscow, 5-24. (in Russian).

10. Makartsev, N. G. (2012). Kormlenie sel'skokhozyaistvennykh zhivotnykh. Kaluga. (in Russian).

11. Epimakhov, V. G. (2018). Ot analiza i obobshcheniya eksperimental'nykh dannykh k podkhodu otsenki vozdeistviya otsenki vozdeistviya tyazhelykh metallov na organizm zhvachnykh zhivotnykh. In *Aktual'nye voprosy nauchnykh issledovaniy: Materialy XVIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, Ivanovo, 10-12. (in Russian).

12. Ryadchikov, V. G. (2012). Osnovy pitaniya i kormleniya sel'skokhozyaistvennykh zhivotnykh. Krasnodar. (in Russian).

13. Kalashnikov, A. P., Fisinin, V. I., Shcheglov, V. V., & Kleimenov, N. I. (2003). Normy i ratsiony kormleniya sel'skokhozyaistvennykh zhivotnykh. Moscow. (in Russian).

14. Vladimirov, N. I. (2008). Kormlenie sel'skokhozyaistvennykh zhivotnykh. Barnaul. (in Russian).

15. Sanzharova, N. I. (2013). Nauchnye osnovy otsenki ustoichivosti agroekosistem k vozdeistviyu tekhnogennykh faktorov. Obninsk. (in Russian).

16. Averin, V. S. Pyatnov, Yu. N., & Nenashev, R. A. (1999). Postuplenie svintsa i kadmiya v moloko korov v zavisimosti ot sposoba i tipa ratsiona v raznykh regionakh Belorussii. In *Aktual'nye problemy ekologiy na rubezhe tret'ego tysyacheletie i puti ikh resheniya*, Bryansk, 345-349. (in Russian).

Работа поступила  
в редакцию 12.02.2023 г.

Принята к публикации  
18.02.2023 г.

Ссылка для цитирования:

Епимахов В. Г. Моделирование поступления кадмия, свинца, ртути и мышьяка в организм жвачных животных с рационом и перехода в продукцию животноводства // Бюллетень науки и практики. 2023. Т. 9. №3. С. 138-146. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/88/18>

Cite as (APA):

Epimakhov, V. (2023). Modeling of the Intake of Cadmium, Lead, Mercury and Arsenic Into the Body of Ruminants With a Ration and the Transition to Animal Products. *Bulletin of Science and Practice*, 9(3), 138-146. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/88/18>