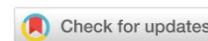


ПАТОЛОГИЯ ЖИВОТНЫХ, МОРФОЛОГИЯ, ФИЗИОЛОГИЯ, ФАРМАКОЛОГИЯ И ТОКСИКОЛОГИЯ

ANIMAL PATHOLOGY, MORPHOLOGY, PHYSIOLOGY, PHARMACOLOGY AND TOXICOLOGY



УДК 619:616:591.4:636.2:616.61

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-4826-2026-25-2-7-13>

Взаимосвязь экспрессии каспазы-3 и -6 с морфологическими изменениями в почках коров

И.М. Петрова , М.В. Бытов , С.Л. Хацко , В.Д. Зубарева , Л.И. Дроздова ,

И.А. Шкуратова



EDN: YNAJ TZ

¹ Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения
Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

✉ bytovmaks@mail.ru

Аннотация

Введение. Почки коров подвержены воздействию факторов промышленного содержания, что проявляется развитием различных нефропатий, оказывающих системное действие на организм. Почка — основной орган, обеспечивающий гомеостаз путем регуляции осмолярности, минерального и кислотно-основного состояния организма посредством экскреции воды и неорганических электролитов. Патология почек зачастую носит латентный характер и диагностируется постмортально. У лактирующих коров в связи с высокой метаболической нагрузкой часто выявляются значительные деструктивные изменения, проявляющиеся в том числе гибелью клеток. Одним из путей в сложном каскаде сигналинга апоптоза является каспазный. К сожалению, на сегодняшний день для крупного рогатого скота экспрессия ферментов-каспаз в почках не описана. Цель работы — описание взаимосвязи экспрессии каспазы-3 и каспазы-6 с патологическими изменениями в почках высокопродуктивных коров.

Материалы и методы. Морфологическое исследование образцов почек высокопродуктивных коров (4–6 лактаций, возраст 7–8 лет, n=4) проведено в ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН в период с 2023 по 2025 г. Использованы стандартные методы гистотехники с окрашиванием препаратов гематоксилином и эозином, а также по Маллори. Проведено иммуногистохимическое исследование образцов с антителами к каспазе-3 и -6.

Результаты исследования. Выявлено, что у коров в возрасте 7–8 лет в почках развиваются деструктивные процессы в виде почечной недостаточности, воспалительных реакций, склеротических и микроциркуляторных изменений. Обнаруженные явления ассоциированы с высокой экспрессией каспазы-6 на уровне почечных канальцев, что подтверждает повреждение почечной паренхимы. Каспаза-3 экспрессируется преимущественно в канальцах почки, а также в элементах ее стромы, что указывает на интенсификацию апоптических процессов по всему органу.

Обсуждение и заключение. Обнаруженные деструктивные процессы в почках высокопродуктивных коров ассоциированы, вероятно, не только с возрастом, но также с высокой метаболической нагрузкой на организм во время лактации. Полученные данные обосновывают дальнейшее изучение проапоптических факторов в свете их влияния на развитие различных патологий у крупного рогатого скота.

Ключевые слова: каспаза-3, каспаза-6, апоптоз, коровы, нефросклероз, поликистоз, почки, морфологическое исследование

Декларация о соблюдении принципов Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов и других научных целей: авторы заявляют, что все проведенные исследования соответствовали принципам конвенции и правилам надлежащей лабораторной практики.

Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда 2023 г. «Пространственная характеристика транскриптомных и метаболомных особенностей преждевременной структурно-функциональной дегенерации тканей органов сельскохозяйственных животных и птицы» (№ 23-16-00117).

Для цитирования: Петрова И.М., Бытов М.В., Хацко С.Л., Зубарева В.Д., Дроздова Л.И., Шкуратова И.А. Взаимосвязь экспрессии каспазы-3 и -6 с морфологическими изменениями в почках коров. *Ветеринарная патология*. 2026;25(2):7–13. <https://doi.org/10.23947/2949-4826-2026-25-2-7-13>

Original Empirical Research

The Relationship between Caspase-3, -6 Expression and Morphological Changes in Kidneys of Cows

Irina M. Petrova^{ID}, Maksim V. Bytov^{ID}, Sergey L. Khatsko^{ID}, Vladlena D. Zubareva^{ID}, Lyudmila I. Drozdova^{ID}, Irina A. Shkuratova^{ID}

Ural Federal Agrarian Scientific Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

✉ bytovmaks@mail.ru

Abstract

Introduction. Cow kidneys are exposed to the impact of industrial factors, which is manifested in development of the various nephropathies with systemic effects on organism. The kidneys are the main organs responsible for homeostasis by regulating osmolarity, mineral balance, and acid-base balance in organism through the excretion of water and inorganic electrolytes. Renal pathology often has latent character and is diagnosed postmortem. Significant destructive changes, including cell death, are often detected in lactating cows due to high metabolic load they undergo. Caspase pathway is one of the pathways in the complex apoptotic signaling cascade. Unfortunately, the expression of caspases in bovine kidneys has not been yet described in the literature. The aim of the study is to describe the relationship between the expression of caspase-3 and caspase-6 and the pathological changes in the kidneys of high-yielding cows.

Materials and Methods. A morphological study of renal samples from high-yielding cows (4–6 lactations, 7–8 years old, n=4) was conducted at the Ural Federal Agrarian Scientific Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences in the period from 2023 to 2025. Standard histological techniques including hematoxylin and eosin staining and Mallory's trichrome staining were used. Immunohistochemical analysis of the samples using antibodies to caspase-3, and -6 was performed.

Results. It was found that in the kidneys of 7–8-year-old cows there develop the destructive processes including renal failure, inflammatory reactions, and sclerotic and microcirculatory disorders. The observed conditions are associated with high expression of caspase-6 at the level of the renal tubules, which confirms damage to the renal parenchyma. Caspase-3 is expressed primarily in the renal tubules and in renal stroma elements, which indicates intensification of apoptotic processes across the entire organ.

Discussion and Conclusion. The destructive processes revealed in the kidneys of high-yielding cows are likely to be associated not only with the age but also with the high metabolic load imposed on the organism during lactation. The research findings substantiate the need for further study of pro-apoptotic factors due to their influence on the development of various pathologies in cattle.

Keywords: caspase-3, caspase-6, apoptosis, cows, nephrosclerosis, polycystic kidney disease, morphological study

Declaration on Compliance with the Principles of the European Convention for the Protection of Vertebrate Animals Used for Experimental and Other Scientific Purposes: the authors declare that all the studies were conducted in compliance with the principles of Good Laboratory Practice.

Funding. The work was carried out in the frame of the Russian Science Foundation project No. 23-16-00117 of 2023 “Spatial characterization of transcriptomic and metabolomic features of premature structural and functional degeneration of tissues in farm animal and poultry organs”.

For Citation: Petrova IM, Bytov MV, Khatsko SL, Zubareva VD, Drozdova LI, Shkuratova IA. The Relationship between Caspase-3, -6 Expression and Morphological Changes in Kidneys of Cows. *Russian Journal of Veterinary Pathology*. 2026;25(2):7–13. <https://doi.org/10.23947/2949-4826-2026-25-2-7-13>

Введение. Организм высокопродуктивных коров молочного направления подвержен метаболическому дисбалансу. Одним из последствий продуктивной нагрузки является развитие ацидозного синдрома, негативно влияющего на почки [1]. Кетоз, которому

особо подвержены коровы при лактации, также может приводить к различным нефропатиям [2]. Развитие патологических процессов в почках угнетает функции органа, что имеет системный эффект и сказывается на общем состоянии животного. Научное сообщество

давно активно обсуждает роль апоптоза в патогенезе различных заболеваний почек [3]. Например, установлено, что запрограммированная гибель эпителиальных клеток канальцев является, наряду с некрозом, классическим признаком острой почечной недостаточности [4]. Кроме повреждения нефроцитов, важным фактором развития почечной дисфункции является повреждение сосудов почки и апоптоз эндотелиоцитов. Предполагается, что потеря эндотелиальных клеток посредством апоптоза играет важную роль в изменении микроциркуляторного русла, наблюдающегося при повреждении почек [5]. Апоптоз был описан также и в клетках интерстиция почки после ее ишемического повреждения [6].

Каспазы — это ферменты группы протеаз, которые участвуют в апоптозе клеток. Для людей и грызунов описано 12 каспаз, однако для крупного рогатого скота точное количество ферментов этой группы еще предстоит установить. Каспазы делятся на 3 группы: исполнители (executioners), инициаторы (initiators) и воспалительные каспазы (inflammatory caspases). Представителем исполнительных каспаз является каспаза-3, а инициаторных — каспаза-6. Исследования роли каспаз в развитии различных патологических состояний в органах крупного рогатого скота крайне ограничены. Например, сообщается о роли каспазы-3 в апоптозе клеток молочной железы коров в условиях питания концентрированными кормами [7]. Данные о роли каспаз в развитии патологий почек у крупного рогатого скота в литературе не представлены. В то же время известно, что у человека и грызунов каспазы участвуют в воспалительных реакциях, апоптозе, вазоконстрикции и тубулярном некрозе при различных заболеваниях почек [8]. Кроме того, важная роль каспаз в поражении почек делает их привлекательной мишенью для терапии. Так, на примере поликистозной болезни крыс показано, что ингибирование каспаз может снизить апоптоз в почечных канальцах и замедлить прогрессирование заболевания [9].

Таким образом, целью данного исследования является описание взаимосвязи экспрессии каспазы-3 и каспазы-6 с морфологическими изменениями в почках высокопродуктивных коров при патологиях.

Материалы и методы. Работа выполнена в ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН (г. Екатеринбург) в период с 2023 по 2025 г. Для изучения морфологических изменений в почках коров постмортально был отобран материал от животных в возрасте 7–8 лет, 4–6 лактаций (n=4). Для гистологических исследований кусочки тканей толщиной не более 0,5 см фиксировали в 10 % забуференном нейтральном формалине в соотношении 1:20. После фиксации образцы промывали в проточной воде, обезживали, затем пропитывали парафином и готовили парафиновые блоки. Изготавливали парафиновые срезы толщиной 3–4 мкм. Срезы

депарафинизировали и окрашивали гематоксилином и эозином, а также по Маллори.

Проводили иммуногистохимическое окрашивание образцов с антителами к каспазе-3 и каспазе-6 для оценки интенсивности апоптоза в органе. Для иммуногистохимического исследования срезы помещали на стекла с адгезивным покрытием (superfrost), далее — на сушильный столик (+60 °C) до визуального расплавления парафина. Иммуногистохимическое исследование проводили по следующему протоколу:

1. Срезы помещали в буферный раствор трис-ЭДТА, нагретый на водяной бане до 96 °C на 12 мин для проведения температурной демаскировки антигенов (HIER, pH=6; «ПраймБиоМед», Россия).
2. После 12-минутной инкубации на водяной бане срезы оставляли в буфере остывать до комнатной температуры, после чего промывали дистиллированной водой.
3. Срезы инкубировали в растворе H₂O₂ в течение 10 мин, после чего помещали в дистиллированную воду на 2 мин.
4. Срезы обсушивали, обводили гидрофобным маркером.
5. Срезы заливали буфером TBST на 1 мин.
6. На срезы наносили первичные антитела и инкубировали во влажной камере в течение 1 часа при 30 °C.
7. Срезы трижды промывали буфером TBST.
8. На срезы наносили вторичные антитела и инкубировали во влажной камере в течение 30 мин при 30 °C.
9. Срезы трижды промывали TBST.
10. На срезы наносили хромоген DAB и инкубировали до потемнения срезов примерно 30–60 сек.
11. Срезы промывали в дистиллированной воде, после чего докрашивали гематоксилином в течение 10 сек.
12. Срезы промывали в дистиллированной воде, осветляли и заключали в бальзам.

В качестве первичных антител использовали антитела к каспазе-3 (PAA626Bo01, Cloud-Clone, Китай) и каспазе-6 (PAC340Bo02, Cloud-Clone, Китай) в разведении 1:100. В качестве вторичных использовали антитела к иммуноглобулину IgG кролика (SAA544Rb19, Cloud-Clone, Китай) с использованием DAB (Bio-Rad, США) в качестве субстрата пероксидазы хрена в соответствии с рекомендациями производителя.

Проводили гистологическое описание препаратов и визуальную оценку интенсивности иммуногистохимического окрашивания.

Результаты исследования. При исследовании препаратов почек коров в органе прослеживаются

значительные изменения. В корковом веществе, в почечных тельцах имеет место расширение пространства капсулы Боумена-Шумлянского. В гломерулярном аппарате видны процессы пролиферации эндотелия, что указывает на развитие интракапиллярного гломерулита (рис. 1.1). Повсеместно в корковой зоне обнаруживаются кистозные полости различных размеров, свидетельствующие о почечной недостаточности (рис. 1.2). В просвете проксимальных канальцев видно отложение белковых цилиндров, что говорит о нарушении белкового обмена. Нефроциты в состоянии дистрофии, ряд клеток с нарушением структуры. Канальцы тубулярного аппарата характеризуются уменьшением просвета, набуханием нефроцитов и изменением их структуры (рис. 1.1 и 1.2).

При окрашивании по Маллори отмечается усиление соединительнотканного рисунка в капсуле Боумена-Шумлянского, а также между извитыми канальцами первого порядка, что свидетельствует о продуктивном воспалении (рис. 1.3). В тубулярной зоне между канальцами обнаруживаются очаги нефросклероза (рис. 1.4). В области расположения кровеносных сосудов, особенно вблизи дуговых артерий, в периваскулярной зоне, наблюдаются выраженные склеротические процессы — целые поля разрастания

соединительной ткани, окрашенные в разные оттенки синего цвета (рис. 1.5). В самих сосудах активно происходят процессы дезорганизации и пролиферации элементов сосудистой стенки, просвет артерий резко сужен (рис. 1.6).

Наряду с морфологическими изменениями, в почках исследуемых коров отмечается экспрессия проапоптотических белков — каспазы-3 и каспазы-6. Умеренная экспрессия каспазы-3 обнаруживается в нефроцитах канальцев коркового вещества (рис. 2.1), а также в клетках наружного листка капсулы Боумена-Шумлянского деформированных клубочков (рис. 2.2). В интерстиции, вокруг кистозных полостей, также определяется большое количество клеток, имеющих положительную реакцию на каспазу-3 (рис. 2.3). Нефроциты канальцев как коркового, так и мозгового вещества почки интенсивно окрашены в коричневый цвет, что говорит о высокой степени экспрессии в них каспазы-6 (рис. 2.4 и 2.5). При этом почечные тельца, сохранившие свою структуру, не экспрессируют каспазу-6, в отличие от деформированных клубочков (рис. 2.6). Стоит заметить, что не все канальцы имеют положительную реакцию на каспазы, что может быть связано с гибелью клеток не только путем апоптоза, но и некроза, и обсуждается в литературе [4].

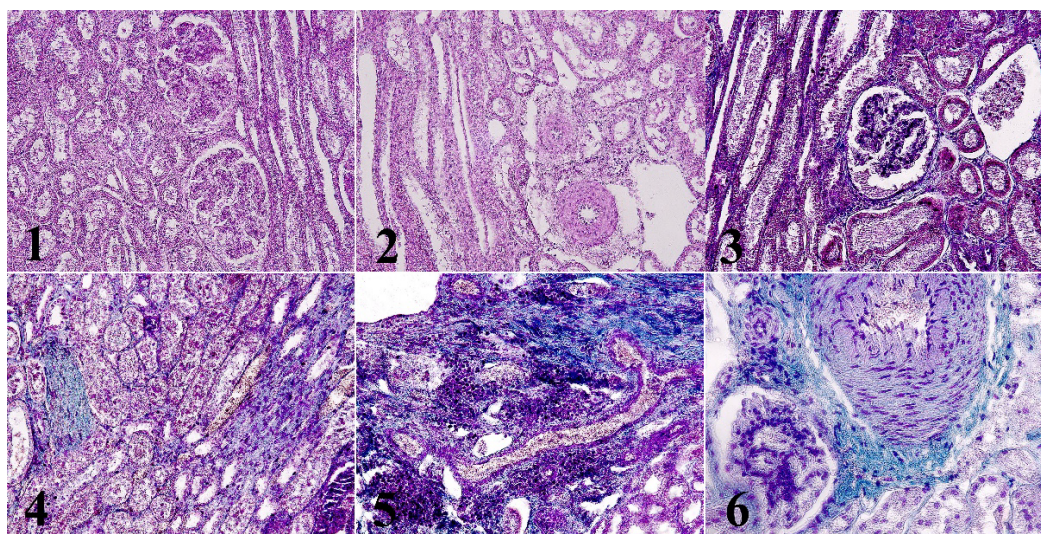


Рис. 1. Морфологическая структура почек высокопродуктивных коров в возрасте 7-8 лет: 1, 2 — окраска гематоксилином и эозином, ув. 200×; 3-5 — окраска по Маллори, ув. 200×; 6 — окраска по Маллори, ув. 400× (фото авторов)

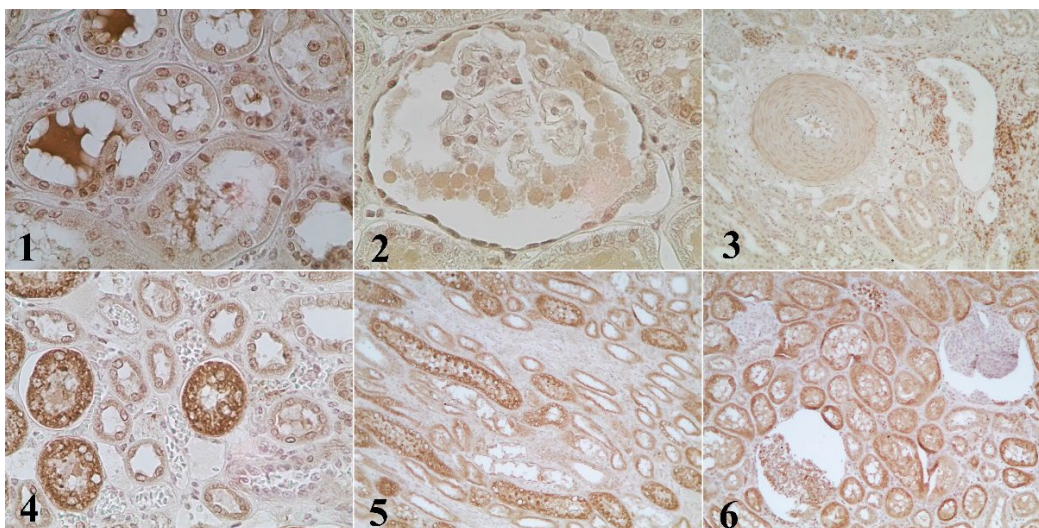


Рис. 2. Иммуногистохимическое выявление каспазы-3 (1-3) и каспазы-6 (4-6) в тканях почек высокопродуктивных коров в возрасте 7-8 лет, докраска гематоксилином: 1, 2, 4, 5 — ув. 400×; 3 и 6 — ув. 200× (фото авторов)

Обсуждение и заключение. Морфологическое исследование тканей почек коров в возрасте 7-8 лет свидетельствует о развитии деструктивных процессов в органе, которые ассоциированы, вероятно, не только с возрастом, но также с высокой метаболической нагрузкой на организм во время лактаций. Изменения касаются не только функциональной паренхимы органа, но и стромы с микроциркуляторным руслом. Формирование кистозных полостей, наличие деформированных клубочков и нарушения в структуре гломерулярного аппарата свидетельствуют о развитии почечной недостаточности. Отложение белковых цилиндров в тубулярном аппарате и гибель нефроцитов указывают на развитие дистрофических процессов. Очаги нефросклероза и значительные микроциркуляторные нарушения свидетельствуют в пользу наличия воспалительных реакций и фиброзных изменений органа.

Описанные изменения сопровождаются экспрессией апоптотических факторов — каспазы-3 и

каспазы-6. При этом каспаза-6 преимущественно экспрессируется нефроцитами почечных канальцев, которые, согласно морфологическому описанию, претерпевают дистрофические процессы, связанные с нарушением белкового обмена. Таким образом, повышенный уровень экспрессии каспазы-6 является маркером повреждения клеток почек и их преапоптотического состояния с задействованием каспазного каскадного пути. Экспрессия каспазы-3 отмечена не только в функциональной паренхиме почки, но также и в компонентах стромы органа — в клетках интерстиция и сосудистых стенок. Таким образом, в связи с исполнительной ролью каспазы-3, можно сделать вывод о наличии обширных процессов апоптоза в различных тканях органа. Полученные данные являются веским основанием для дальнейшего углубленного изучения проапоптотических факторов в свете их влияния на развитие различных патологий у крупного рогатого скота.

Список литературы/References

1. Евглевский А.А., Евглевская Е.П., Михайлова И.И., Ванина Н.В., Ерыженская Н.Ф., Сулейманова Т.А. Нарушение кислотно-основного состояния в организме коров: причины, последствия, пути решения. *Ветеринарная патология*. 2017;(1(59)):53–58.
2. Evglevsky AA, Evglevskaya EP, Mikhaylova II, Vanina NV, Erigenskaya NF, Suleimanova TA. Disturbance of Acid-Base Balance in the Cow: Causes, Consequences and Treatment. *Veterinary Pathology*. 2017;(1(59)):53–58. (In Russ.).
3. İssi M, Gül Y, Başbuğ O. Evaluation of Renal and Hepatic Functions in Cattle with Subclinical and Clinical Ketosis. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences*. 2016;40:47–52. <https://doi.org/10.3906/vet-1505-16>
3. Пак Л.Б., Дубиков А.И., Кабанцева Т.А., Василюк А.А., Григорян О.М. Апоптоз и патология почек. *Нефрология*. 2013;17(4):36–43.
4. Pak LB, Dubikov AI, Kabanceva TA, Vasilyuk AA, Grigoryan OM. Apoptosis and Nephropathies. *Nephrology*. 2013;17(4):36–43. (In Russ.).
4. Yang B, Lan S, Dieudé M, Sabo-Vatasescu JP, Karakeussian-Rimbaud A, Turgeon J, et al. Caspase-3 is a Pivotal Regulator of Microvascular Rarefaction and Renal Fibrosis after Ischemia-Reperfusion Injury. *Journal of the American Society of Nephrology*. 2018;29(7):1900–1916. <http://doi.org/10.1681/ASN.2017050581>

5. Hörbelt M., Lee S.Y., Mang H.E., Knipe N.L., Sado Y., Kribben A., Sutton T.A. Acute and chronic microvascular alterations in a mouse model of ischemic acute kidney injury. *American Journal of Physiology*. 2007;293(3):688–695. <https://doi.org/10.1152/ajprenal.00452.2006>
6. Forbes JM, Hewitson TD, Becker GJ, Jones CL. Ischemic Acute Renal Failure: Long-Term Histology of Cell and Matrix Changes in the Rat. *Kidney International*. 2000;57(6):2375–2385. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1755.2000.00097.x>
7. Ul Aabdin Z, Cheng X, Dai H, Wang Y, Sahito B, Roy AC, et al. High-Concentrate Feeding to Dairy Cows Induces Apoptosis via the NOD1/Caspase-8 Pathway in Mammary Epithelial Cells. *Genes*. 2020;11(1):107. <https://doi.org/10.3390/genes11010107>
8. Homsí E, Janino P, de Faria JBL. Role of Caspases on Cell Death, Inflammation, and Cell Cycle in Glycerol-Induced Acute Renal Failure. *Kidney International*. 2006;69(8):1385–1392. <https://doi.org/10.1038/sj.ki.5000315>
9. Tao Y, Zafar I, Kim J, Schrier RW, Edelstein CL. Caspase-3 Gene Deletion Prolongs Survival in Polycystic Kidney Disease. *Journal of the American Society of Nephrology*. 2008;19(4):749–755. <https://doi.org/10.1681/ASN.2006121378>

Об авторах:

Петрова Ирина Михайловна, лаборант Отдела геномных исследований и селекции животных, Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (620142, Российская Федерация, г. Екатеринбург, а/я 269, ул. Белинского, 112а), [ORCID](#), [Scopus ID](#), [SPIN-код](#), marygane6@mail.ru

Бытов Максим Владимирович, аспирант, младший научный сотрудник Отдела геномных исследований и селекции животных, Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (620142, Российская Федерация, г. Екатеринбург, а/я 269, ул. Белинского, 112а), [ORCID](#), [Researcher ID](#), [Scopus ID](#), [SPIN-код](#), bytovmaks@mail.ru

Хацко Сергей Леонидович, лаборант Отдела геномных исследований и селекции животных, Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (620142, Российская Федерация, г. Екатеринбург, а/я 269, ул. Белинского, 112а), [ORCID](#), [Scopus ID](#), [SPIN-код](#), hardscore@mail.ru

Зубарева Владлена Дмитриевна, кандидат ветеринарных наук, старший научный сотрудник Отдела геномных исследований и селекции животных, Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (620142, Российская Федерация, г. Екатеринбург, а/я 269, ул. Белинского, 112а), [ORCID](#), [Scopus ID](#), [SPIN-код](#), zzub97@mail.ru

Дроздова Людмила Ивановна, доктор ветеринарных наук, профессор, ведущий научный сотрудник Отдела экологии и незаразной патологии животных, Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (620142, Российская Федерация, г. Екатеринбург, а/я 269, ул. Белинского, 112а), [ORCID](#), [SPIN-код](#), drozdova43@mail.ru

Шкуратова Ирина Алексеевна, член-корреспондент РАН, доктор ветеринарных наук, профессор, главный научный сотрудник Отдела экологии и незаразной патологии животных, Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (620142, Российская Федерация, г. Екатеринбург, а/я 269, ул. Белинского, 112а), [ORCID](#), [Scopus ID](#), [SPIN-код](#), shkuratova@bk.ru

Заявленный вклад авторов:

И.М. Петрова: формирование основной концепции, поиск литературы, анализ результатов, формирование выводов.

М.В. Бытов: разработка методологии, формальный анализ; написание рукописи.

С.Л. Хацко: проведение экспериментов и сбор данных; подготовка первоначального варианта рукописи.

В.Д. Зубарева: редактирование и доработка рукописи.

Л.И. Дроздова: анализ полученных результатов, валидация, написание черновика рукописи.

И.А. Шкуратова: научное руководство, разработка концепции, разработка методологии, написание черновика рукописи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Irina M. Petrova, Laboratory Technician of the Genomic Research and Animal Breeding Department, Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (112a, Belinsky Str, P.O. Box 269, Ekaterinburg, 620142, Russian Federation), [ORCID](#), [Scopus ID](#), [SPIN-code](#), marygane6@mail.ru

Maksim V. Bytov, Postgraduate Student, Junior Research Associate of the Genomic Research and Animal Breeding Department, Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (112a, Belinsky Str, P.O. Box 269, Ekaterinburg, 620142, Russian Federation), [ORCID](#), [Researcher ID](#), [Scopus ID](#), [SPIN-code](#), bytovmaks@mail.ru

Sergey L. Khatsko, Laboratory Technician of the Genomic Research and Animal Breeding Department, Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (112a, Belinsky Str, P.O. Box 269, Ekaterinburg, 620142, Russian Federation), [ORCID](#), [Scopus ID](#), [SPIN-code](#), hardscore@mail.ru

Vladlena D. Zubareva, Cand.Sci. (Veterinary), Senior Research Associate of the Genomic Research and Animal Breeding Department, Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (112a, Belinsky Str., P.O. Box 269, Ekaterinburg, 620142, Russian Federation), [ORCID](#), [Scopus ID](#), [SPIN-code](#), zzub97@mail.ru

Lyudmila I. Drozdova, Dr.Sci. (Veterinary), Professor, Lead Research Associate of the Ecology and Noncontagious Animal Pathology Department, Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (112a, Belinsky Str., P.O. Box 269, Ekaterinburg, 620142, Russian Federation), [ORCID](#), [SPIN-code](#), drozdova43@mail.ru

Irina A. Shkuratova, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sci. (Veterinary), Professor, Chief Research Associate of the Ecology and Noncontagious Animal Pathology Department, Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (112a, Belinsky Str., P.O. Box 269, Ekaterinburg, 620142, Russian Federation), [ORCID](#), [Scopus ID](#), [SPIN-code](#), shkuratova@bk.ru

Claimed Contributorship:

IM Petrova: formulating the main concept, search for publications, analysis of the research results, formulating the conclusions

MV Bytov: development of research methodology, formal analysis, writing the manuscript.

SL Khatsko: conducting experiments and collecting data; preparing the initial draft of the manuscript.

VD. Zubareva: editing and refining the manuscript.

LI Drozdova: analysis and validation of the obtained results, preparing a draft of the manuscript.

IA Shkuratova: scientific supervision, developing the concept and methodology of research, preparing a draft of the manuscript.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 05.12.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 16.12.2025

Принята к публикации / Accepted 24.12.2025