

ПАТОЛОГИЯ ЖИВОТНЫХ, МОРФОЛОГИЯ, ФИЗИОЛОГИЯ, ФАРМАКОЛОГИЯ И ТОКСИКОЛОГИЯ

ANIMAL PATHOLOGY, MORPHOLOGY, PHYSIOLOGY, PHARMACOLOGY AND TOXICOLOGY



УДК: 636.089.5:616.61-092-073.7

<https://doi.org/10.23947/2949-4826-2025-24-4-55-63>

Оригинальное эмпирическое исследование

Оценка изменений плотности тканей почек у крыс с гиперлипидемией методом микро-КТ

Ю.А. Тихменева , Е.В. Садырин

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

tihmeneva.yulia@yandex.ru



EDN: RVFJKC

Аннотация

Введение. Компьютерная рентгеновская микротомография (микро-КТ) позволяет получать трёхмерные изображения микроскопических структур без их разрушения, благодаря чему метод нашел широкое применение в биомедицине. Что касается применения микро-КТ в ветеринарии, то на сегодняшний день потенциал метода для оценки морфологических изменений внутренних органов животных при патологиях использован не полностью. В частности, недостаточно данных о возможностях микротомографии при изучении патологических процессов в почках животных. Цель исследования — оценить патологические изменения плотности и морфологии тканей почек лабораторных крыс с гиперлипидемией с помощью микро-КТ.

Материалы и методы. В эксперименте, проведенном в ДГТУ в период с 2021 по 2024 гг., использовались самцы крыс линии Wistar ($n=40$), разделенные на 5 групп — 4 опытные и 1 контрольную. Опытные группы в ходе эксперимента были переведены на гиперлипидемическую диету; контрольная группа получала только обычный корм. После декапитации животных на 30-е, 120-е, 150-е и 180-е сутки проводился забор почек и подготовка образцов для сканирования на микротомографе Zeiss Xradia Versa 520 при 80 кВ и размере вокселя 20 мкм. Эффективность микро-КТ оценивали по качеству 3D-реконструкции и выявлению изменений в плотности и морфологии тканей почек на разных стадиях гиперлипидемии.

Результаты исследования. Микротомограммы почек крыс, участвовавших в эксперименте, позволили детально визуализировать морфологию органа, включая корковое и мозговое вещество, а также сосудистую сеть. Получены количественные данные по изменению плотности тканей, выявлены различия в структуре почек при норме (контрольная группа) и патологии (опытные группы с гиперлипидемией разной степени).

Заключение и обсуждение. Метод микро-КТ продемонстрировал высокую точность и информативность при анализе состояния тканей почек крыс, доказав его эффективность для ранней диагностики патологических изменений и динамического мониторинга заболеваний этих внутренних органов у животных. Среди ограничений метода — высокая стоимость оборудования, низкая чувствительность к мягким тканям без контрастирования и необходимость специальных навыков для интерпретации снимков.

Ключевые слова: микротомография, микро-КТ, крысы, почка, плотность тканей, гиперлипидемия, визуализация, диагностика, патологические процессы

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 при поддержке Российского научного фонда, проект № 25-29-00829, <https://rsrf.ru/project/25-29-00829/>

Для цитирования. Тихменева Ю.А., Садырин Е.В. Оценка изменений плотности тканей почек у крыс с гиперлипидемией методом микро-КТ. Ветеринарная патология. 2025;24(4):55–63. <https://doi.org/10.23947/2949-4826-2025-24-4-55-63>

Assessing Kidney Tissue Density Changes in Rats with Hyperlipidemia Using Micro-CT

Yulia A. Tikhmeneva  , Evgeniy V. Sadyrin 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 tihmeneva.yulia@yandex.ru

Abstract

Introduction. Computed X-ray microtomography (micro-CT) enables getting the three-dimensional images of microscopic structures without damaging them, which makes this method widely implemented in biomedicine. Regarding the application of micro-CT in veterinary medicine, its potential in assessing morphological changes in internal organs of animals with pathologies has not yet been used at full scale. For example, there are no enough data on the capacity of microtomography in studying pathological processes in kidneys of animals. The aim of the present study is to assess the pathological changes in the density and morphology of kidney tissue in laboratory rats with hyperlipidemia using micro-CT.

Materials and Methods. The experiment was conducted at DSTU from 2021 to 2024 and involved 40 male Wistar rats divided into 5 groups: 4 experimental and 1 control. During the experiment, the experimental groups were fed a hyperlipidemic diet; the control group received only standard feed-stuff. Kidneys were taken from decapitated animals on 30th, 120th, 150th, and 180th day, and samples were prepared for scanning with a Zeiss Xradia Versa 520 micro-CT scanner at 80 kV and voxel size of 20 μm . The efficiency of micro-CT was assessed by the quality of 3D reconstruction and detected changes in kidney tissue density and morphology at different stages of hyperlipidemia.

Results. Microtomograms of kidneys of rats in the experiment allowed for detailed visualization of the organ's morphology, including renal cortex and medulla, as well as vasculature. Quantitative data on changes in tissue density were obtained, and differences in kidney structure were distinguished between the normal (in control group) and pathological conditions (in experimental groups with various degrees of hyperlipidemia).

Discussion and Conclusion. Micro-CT method has demonstrated high accuracy and informative value in analysing kidney tissue condition in rats and proved its efficiency in early diagnostics of pathological changes in these internal organs, as well as in dynamic monitoring of disease. Among the constraints of this method, the following aspects can be noted: the high cost of equipment, low sensitivity to soft tissues in the absence of contrast-enhancement, and the need for specialized skills to interpret the images.

Keywords: microtomography, micro-CT, rats, kidney, tissue density, hyperlipidemia, visualization, diagnostics, pathological processes

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 research was conducted in compliance with the principles of the Convention and the Rules of good laboratory practice.

For Citation. Tikhmeneva YuA, Sadyrin EV. Assessing Kidney Tissue Density Changes in Rats with Hyperlipidemia Using Micro-CT. *Russian Journal of Veterinary Pathology*. 2025;24(4):55–63. <https://doi.org/10.23947/2949-4826-2025-24-4-55-63>

Введение. Компьютерная рентгеновская микротомография (микро-КТ) — это метод, позволяющий получать трёхмерные изображения микроскопических внутренних и внешних структур образцов без их разрушения, что делает возможным исследование объектов, не доступных другим способам анализа [1]. Основой метода является получение набора рентгеновских проекционных изображений при вращении образца, размещенного между рентгеновским источником и детектором (хотя возможны и другие схемы размещения образца [2]). Далее с помощью специализированных алгоритмов реконструкции эти изображения преобразуются в серии поперечных сечений [3].

Микро-КТ отличается от традиционной КТ и пристальной рентгенографии по ряду параметров, включая разрешение, область применения и дозу облучения [3].

Микро-КТ обеспечивает сверхвысокое разрешение (до 1 мкм) и позволяет получать детализированные трёхмерные изображения, что делает её незаменимой в научных исследованиях, изучении тканей *ex vivo* и экспериментальной онкологии [3]. Однако использование метода ограничено длительным временем сканирования и высокой лучевой нагрузкой, что снижает его применимость *in vivo*. Традиционная КТ широко используется в клинической практике для диагностики патологий внутренних органов и костной системы. Она позволяет быстро получать 3D-изображения с разрешением порядка 0,5–1 мм, а также использовать контрастные вещества для улучшенной визуализации мягких тканей [4–5]. Прицельная рентгенография применяется преимущественно в стоматологии (bitewing X-ray — рентгеновский снимок укуса) для выявления кариеса, оценки состояния костной ткани и

пародонта. Это быстрый и малодозовый метод, но он даёт только двухмерное изображение и не подходит для детального изучения сложных структур [4].

Выбор метода визуализации зависит от конкретной задачи. Если необходимо максимально детализированное

изображение тканей, предпочтение отдаётся микро-КТ, но для клинической диагностики и работы с живыми пациентами более подходят традиционная КТ и прицельная рентгенография. Более подробно характеристики методов описаны в Таблице 1.

Таблица 1

Сравнительные характеристики микро-КТ, традиционной КТ и bitewing X-ray

Параметр	Микро-КТ	Традиционная КТ	Bitewing X-ray
Тип изображения	2D, 3D	2D, 3D	2D
Разрешение	до <1 мкм	0,5–1 мм	Не применимо
Область применения	Научные исследования, патоморфология, онкология	Клиническая диагностика внутренних органов и костей	Стоматология, диагностика карисса и пародонтита
Доза облучения	Высокая	Средняя	Низкая
Скорость сканирования	Минуты–часы	Секунды–минуты	Секунды
Использование контраста	Возможно	Часто используется	Нет
Применимость <i>in vivo</i>	Ограничена	Да	Да

Основные преимущества микротомографии:

– высокое разрешение: технология позволяет получать изображения с минимально различимой деталью менее одного мкм до десятков мкм, обеспечивая четкость, детализацию [5, 6] и, при необходимости, исследование достаточно крупных образцов [6];

– широкий спектр применения благодаря возможности получения 2D- и 3D-изображений: 2D-изображения применяются для измерения длины, толщины и углов искривления, а 3D-формат помогает выявлять патологические изменения, такие как остеолиз или гиперплазия костей [4], онкологические образования [3], деминерализация тканей зуба [4] и др.;

– цифровая обработка данных: изображения легко поддаются цифровой обработке и рендерингу [7], что позволяет вращать и анализировать их в трех измерениях для более глубокого понимания состояния объекта [8].

Высококачественные изображения, полученные с использованием микро-КТ, позволяют исследователям детально визуализировать патологические процессы на экспериментальных моделях животных, что способствует более точной диагностике заболеваний, оценке эффективности терапевтических стратегий и лучшему пониманию механизмов их развития. Также возможность детального изучения патологических изменений, таких как жировая инфильтрация тканей при гиперлипидемии, способствует расширению научных знаний и совершенствованию методов лечения [5, 6].

За последние десятилетия микро-КТ стала мощным инструментом в биомедицинских исследованиях,ши-

роко применяемым при изучении морфологии костей [3], фенотипировании животных [1], а также в исследовании патологий внутренних органов [5]. Оптимизация разработки и введения контрастных веществ позволила значительно расширить возможности метода. Визуализация *in vivo* обеспечивает оценку морфологии сосудов и мягких тканей, однако *ex vivo* исследование даёт более высокое разрешение за счёт увеличенного времени сканирования и отсутствия ограничений, связанных с анестезией и облучением [9].

В неврологии микро-КТ используется для анализа сосудистой анатомии головного мозга, выявления атеросклеротических поражений и оценки нарушений гематоэнцефалического барьера [9]. Кроме того, методика позволяет проводить продольные исследования роста опухолей мозга и эффективности противоопухолевой терапии.

В кардиологии микро-КТ с контрастным усилением применяется для визуализации системы проведения сердечного импульса, диагностики врождённых пороков сердца и количественной оценки лёгочной вентиляции при фиброзе лёгких [10].

Микро-КТ также активно используется в онкологических исследованиях. Например, в моделях колоректального рака метод демонстрирует высокую корреляцию между объёмом опухоли и гистологическими данными [9]. Применение контрастных веществ позволяет дифференцировать здоровые ткани печени от неоплазий, что даёт возможность количественно оценивать метастазы и эффективность экспериментальной терапии [9].

Исследования костной ткани с помощью микро-КТ охватывают широкий спектр патологий, включая осте-

опороз, заживление переломов, остеогенез и резорбцию костей при опухолевых процессах [2]. Методика также используется для оценки взаимодействия мягких тканей с имплантатами, изучения ангиогенеза и мышечной дистрофии [9].

В ветеринарной медицине микро-КТ становится все более востребованной благодаря возможности получать высококачественные трёхмерные изображения тканей и структур, а также способности неразрушающим методом исследовать анатомические особенности и патологические изменения с пространственным разрешением до 1 мкм [10]: возможность визуализации без необходимости разрезания биопсийного материала особенно ценно для последующего гистологического анализа [11].

Микро-КТ может применяться как *in vivo*, так и *ex vivo*: в режиме *in vivo* метод позволяет визуализировать изменения тканей у мелких животных с разрешением до 30 мкм, при минимальной дозе облучения [11–13]. Однако его применение ограничено низкой чувствительностью к мягким тканям, что компенсируется использованием контрастных веществ. В режиме *ex vivo* микро-КТ достигает ещё более высокого разрешения благодаря длительным экспозициям, позволяя получать детализированные изображения, превосходящие результаты гистологического анализа.

Благодаря возможностям 3D-реконструкции и цифровой обработки данных, микро-КТ обеспечивает исследователям уникальную возможность анализировать морфологию тканей, разрабатывать виртуальные модели и даже создавать точные физические 3D-прототипы [14, 15]. В дополнение к этому, интеграция микро-КТ с традиционными методами диагностики, такими как гистопатология, расширяет её диагностический потенциал, позволяя комбинировать точные количественные данные с визуальной оценкой структуры тканей [13]. Благодаря методам *in silico* для микро-КТ стало возможным проводить 3D-реконструкцию, сегментацию, морфометрический анализ и вычисление плотности тканей без разрушения образцов [16].

Несмотря на активное развитие современных методов визуализации, возможности применения микро-КТ для комплексного анализа состояния мягких тканей и внутренних органов животных пока недостаточно изучены. Потенциал метода для детальной количественной оценки морфологических изменений внутренних органов, связанных с патологическими процессами, остается относительно новым направлением. В частности, практически отсутствуют работы, посвященные комплексному анализу плотности и трехмерной морфологии почечной ткани у животных экспериментальных моделей с алиментарно индуцированными патологиями, такими как гиперлипидемия. Выбор почек в качестве объекта исследования обусловлен их ключевой ролью в метаболизме и высокой уязвимостью при системных нарушениях, к которым относится и гиперлипидемия. Развивающиеся при этом структурные изменения (жировая инфильтрация,

фиброз) напрямую влияют на плотность тканей почек, что делает микро-КТ идеальным методом для их детекции и количественной оценки.

Цель работы — оценить эффективность применения микро-КТ для изучения патологических изменений плотности и морфологии тканей почек у лабораторных крыс с разной степенью гиперлипидемии.

Материалы и методы. Эксперимент проведен на базе Донского государственного технического университета (г. Ростов-на-Дону) в период с 2021 по 2024 гг. 40 самцов крыс линии Wistar были разделены на 5 групп (4 опытные и 1 контрольная), по 8 животных в каждой. Животные содержались в виварии ДГТУ на древесной подстилке, которая менялась каждую неделю.

Все животные в течение первых 30 суток получали стандартный рацион. После этого 1-я группа была выведена из эксперимента путем декапитации; 2-я, 3-я и 4-я группы были переведены на гиперлипидемическую диету с повышенным содержанием холестерина; 5-я (контрольная) группа в течение всего периода получала только стандартный корм. На 120-е, 150-е и 180-е сутки животные 2-й, 3-й и 4-й групп соответственно были эвтаназированы методом декапитации; 5-я группа выведена из эксперимента одновременно с 4-й на 180-е сутки. После этого было проведено вскрытие для забора почек и пробоподготовка материала для микро-КТ с последующим анализом данных.

После первоначальной фиксации в 10-процентном формалине в течение 48 ч все образцы почек крыс были последовательно обезвожены в 50-, 70-, 80-, 90-, 96- и 100-процентном этаноле (выдержаны по 1 ч в каждом растворе). Затем образцы окрашивали 1-процентным раствором йода I_2 в абсолютном этаноле в течение 14 ч. Наконец, образцы промывали в абсолютном этаноле и помещали в пластиковые контейнеры, заполненные абсолютным этанолом, для хранения при температуре +5 °C.

Сканирование проводилось на микротомографе **Xradia Versa 520** (Carl Zeiss X-ray Microscopy, США). Образцы фиксировались вертикально в пластиковых пробирках, заполненных абсолютным спиртом, и устанавливались в цанговый держатель, расположенный вне поля зрения детектора. Исследования выполнялись в обычном воздушном пространстве камеры прибора, без применения дополнительных сред.

Для получения качественных данных сканировались три сегмента каждого образца, начиная с нижнего и заканчивая верхним. Общие параметры сканирования:

- увеличение объектива: 0,4×;
- напряжение источника: 80 кВ;
- мощность: 6,5 Вт;
- размер вокселя: 20 мкм;
- вращение: 360°;
- время экспозиции: 1 с;
- количество проекций: 1601 для каждого сегмента.

Сбор проекционных данных завершался реконструкцией микротомограмм с использованием программного обеспечения (Carl Zeiss AG, Германия). Для повышения чёткости контуров вручную настраивались параметры смещения центра. Итоговая обработка реконструированных данных проводилась в программе VGStudio MAX 3.5 (Volume Graphics GmbH, Германия):

- удаление среды вокруг образца выполнялось вручную с использованием гистограммы плотности;
- для визуализации использовался объёмный рендерер по Фонгу [17];
- сегментация структур проводилась с применением ручных, автоматических и полуавтоматических инструментов. Каждая область интереса помечалась псевдоцветом.

Эффективность микро-КТ оценивалась по качеству визуализации и реконструкции, т. е. по способности метода чётко выделять корковое и мозговое вещество, сосуды и другие структуры почек в трёхмерной модели с высокой детализацией и минимальными артефактами. Также учитывался количественный анализ

изменений тканей — измерение плотности через значения серого (MGV, mean gray value).

Результаты исследования. На высококачественных микротомограммах почек удалось чётко выделить структурные компоненты органа: корковое вещество и почечную артерию (рис. 1); мозговое вещество (рис. 2); сосудистую сеть, включая крупные артериальные и венозные сосуды, а также мелкие капилляры (рис. 3). На реконструированных 3D-моделях почек корковое вещество, мозговое вещество и сосуды выделены как ROI на основе средних значений серого (MGV). Для наглядной визуализации изменений плотности использовалась однородная по восприятию цветовая схема «плазма».

Наличие нескольких опытных групп позволило проследить временную динамику нарастания патологических изменений (в частности, увеличение плотности тканей) в ответ на длительность гиперлипидемического воздействия. Показатели плотности через средние значения серого (MGV) для каждой группы представлены в Таблице 2.

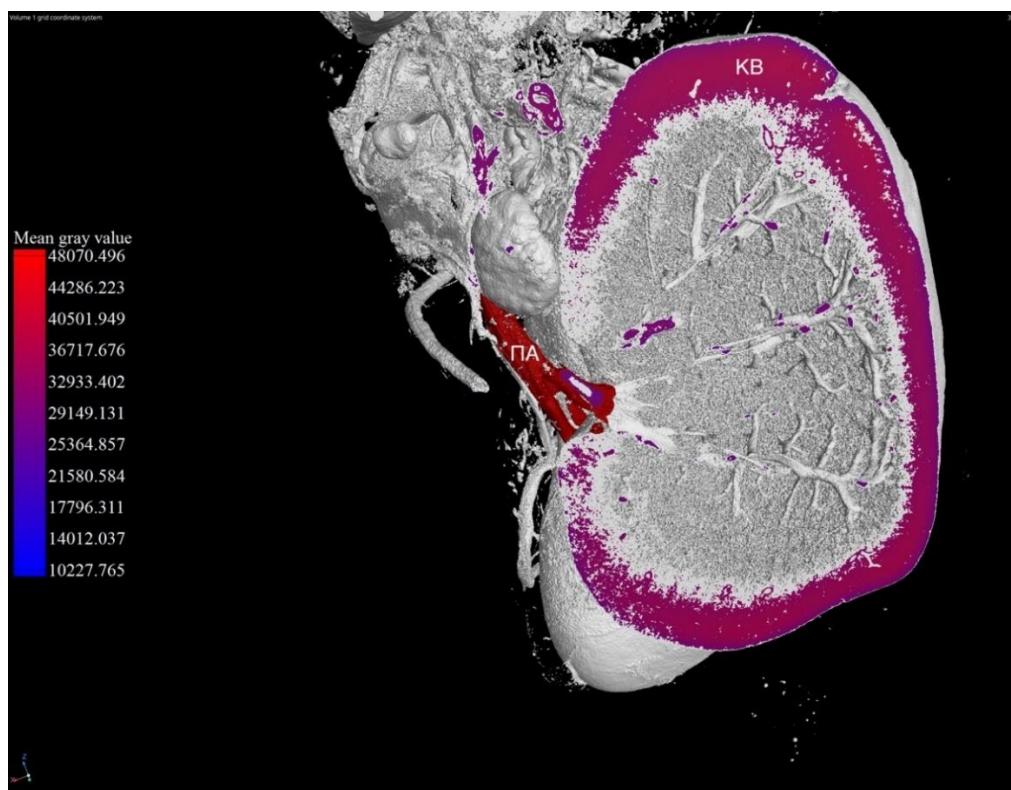


Рис. 1. Визуализация почки в разрезе с шкалой плотности: КВ — корковое вещество почки, ПА — почечная артерия

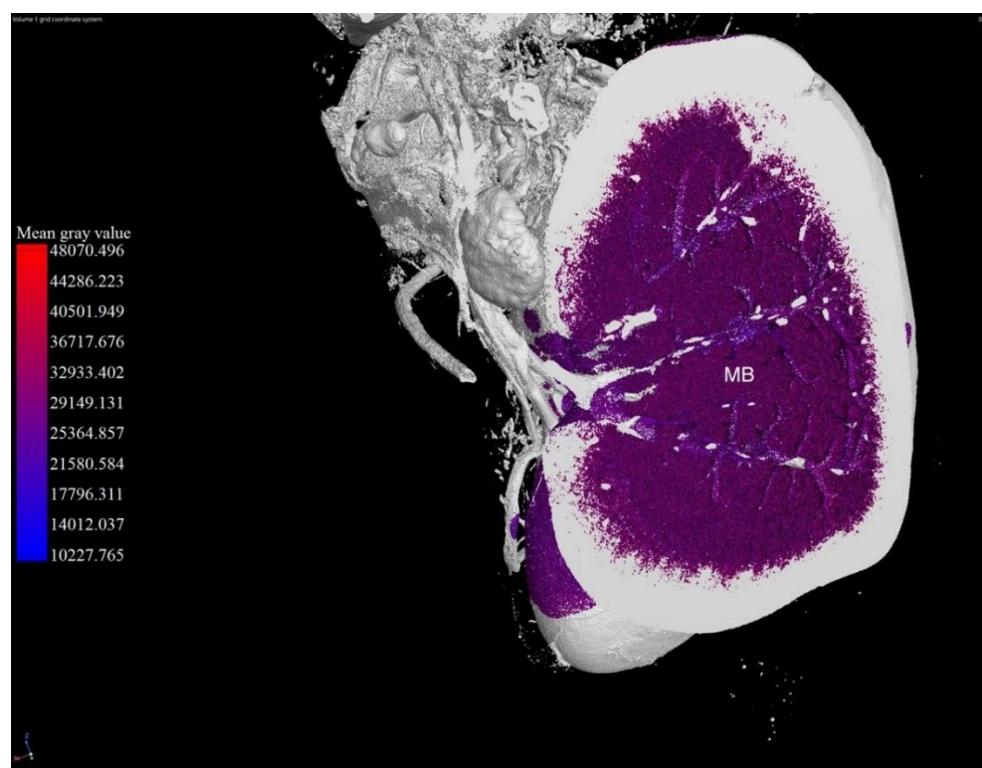


Рис. 2. Визуализация почки в разрезе с шкалой плотности: МВ — мозговое вещество почки



Рис. 3. Артерии почек, выделенные красным цветом

Таблица 2

Плотность различных структур почек у крыс через значения серого (MGV), ($M \pm SD$)

Группа	Срок участия в эксперименте	n	Корковое вещество, MGV	Мозговое вещество, MGV	Сосуды, MGV
1-я	30 суток (стандартный рацион)	8	30943 ± 1905	24515 ± 1435	24967 ± 2162
2-я	120 суток (3 месяца* гиперлипидемической диеты)	8	36642 ± 2269	30267 ± 1021	30792 ± 1848
3-я	150 суток (4 месяца* гиперлипидемической диеты)	8	33865 ± 2380	26290 ± 1750	27409 ± 3680
4-я	180 суток (5 месяцев* гиперлипидемической диеты)	8	29006 ± 2448	23294 ± 1048	25070 ± 2316
5-я (контроль)	180 суток (стандартный рацион)	8	30746 ± 2017	26579 ± 1088	25548 ± 3420

Примечание: * — в течение первых 30 суток эксперимента животные всех групп получали стандартный рацион

Данные таблицы демонстрируют четкую динамику изменения плотности тканей почек в зависимости от длительности гиперлипидемической диеты. Наиболее значительное увеличение плотности во всех структурах наблюдается во 2-й группе (3 месяца диеты), что, вероятно, отражает пик жировой инфильтрации и развития воспалительной реакции. К 5-му месяцу диеты (4-я группа) значения плотности приближаются к контрольным, что может свидетельствовать о развитии фиброза и склерозирования тканей, при которых плотность также повышается, но уже по иному механизму, требующему дальнейшего гистологического подтверждения.

Анализ сосудистой сети показал уплотнение стенок сосудов и потерю их эластичности, что свидетельствует о снижении кровоснабжения и повышенном риске ишемических повреждений ткани. Полученные данные согласуются с предыдущими исследованиями фиброза кавернозных тел на модели кастрированных кроликов, где микро-КТ позволила количественно оценить изменения радиоплотности на различных стадиях заболевания [18].

Обсуждение и заключение. В ходе проведённого микро-КТ-исследования были получены изображения почек с высоким разрешением, что позволило детально визуализировать их структуру. Метод продемонстрировал высокую точность в определении плотностных характеристик почечных тканей при гиперлипидемии, что может быть полезно для оценки структурных изменений при различных патологиях. Анализ плотности

позволяет проводить количественную оценку таких изменений и связывать их с клиническими проявлениями заболевания.

Ограничения исследования включают небольшой размер выборки, использование только одной линии крыс (самцы Wistar), что ограничивает генерализацию результатов, а также возможное влияние сроков эксперимента и диеты на развитие патологий и вариабельность данных. Подготовка образцов (фиксация, обезвоживание, окрашивание) могла вызвать артефакты, влияющие на точность измерений плотности тканей. Также следует учитывать ограничения самого метода микро-КТ — высокую стоимость оборудования и расходных материалов, низкую чувствительность к мягким тканям без контрастных веществ, ограничения при *in vivo* исследованиях (анестезия, дозы облучения, время сканирования), необходимость специального программного обеспечения и навыков для обработки и анализа данных.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на применение контрастных агентов, позволяющих более детально изучить сосудистую сеть почек и процессы, связанные с их перфузией. Также необходимо установить эффективность микро-КТ для выявления и количественной оценки нарушений структуры и фиброза путём прямого сопоставления с гистопатологией. Такой подход позволит более точно определять изменения на клеточном и тканевом уровнях и расширит возможности применения микро-КТ в клинической практике для диагностики и мониторинга заболеваний.

Список литературы / References

- Li H, Zhang H, Tang Z, Hu G. Micro-computed Tomography for Small Animal Imaging: Technological Details. *Progress in Natural Science*. 2008;18(5):513–521. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.01.002>
- Ashton JR, West JL, Badea CT. In Vivo Small Animal Micro-CT Using Nanoparticle Contrast Agents. *Frontiers in Pharmacology*. 2015;6:256. <https://doi.org/10.3389/fphar.2015.00256>

3. Yu Z, Zhang L, Han D. Comparison Between Micro-CT and High-Resolution CT Scan of Temporal Bone. In book: *Micro-CT of Temporal Bone*. Yu Z, Zhang L, Han D (Eds.). Singapore: Springer; 2021. P. 169–183 https://doi.org/10.1007/978-981-16-0807-0_10
4. Бурда А.Н., Рутковская А.С. Диагностика скрытого кариеса с помощью рентген-диагностики BITEWING. *Современная стоматология*. 2020;(3(80)):86–90.
- Burda AN, Rutkovskaya AS. Diagnostics of Hidden Caries by BITEWING X - Ray Diagnostics. *Sovremennaya stomatologiya (Modern Dentistry)*. 2020;(3(80)):86–90. (In Russ.)
5. Keklikoglu K, Arvanitidis C, Chatzigeorgiou G, Chatzinikolaou E, Karagiannidis E, Koletsas T, et al. Micro-CT for Biological and Biomedical Studies: A Comparison of Imaging Techniques. *Journal of Imaging*. 2021;7(9):172. <https://doi.org/10.3390/jimaging7090172>
6. Heath J, Poggel C (Eds.). *An Overview of 3D X-ray Microscopy*. Zeiss. Xradia 520 Versa 3D X-ray Microscope User Manual. UK, Chichester: John Wiley & Sons Ltd; 2020. 41 p. <https://manualzz.com/doc/57135760/zeiss-xradia-520-versa-3d-x-ray-microscope-user-manual> (accessed: 14.11.2025)
7. Sasai H, Iwai H, Fujita D, Seto E, Izumi Y. The Use of Micro-computed Tomography in the Diagnosis of Dental and Oral Disease in Rabbits. *BMC Veterinary Research*. 2014;(10):209. <https://doi.org/10.1186/s12917-014-0209-4>
8. Мужикян А.А., Макарова М.Н. Применение компьютерной томографии при оценке состояния органов и тканей лабораторных животных. *Международный вестник ветеринарии*. 2015;(4):73–80.
- Muzhikyan AA, Makarova MN. Using the CT Scan for Assessment of Organs and Tissues of Laboratory Animals. *International Bulletin of Veterinary Medicine*. 2015;(4):73–80. (In Russ.)
- Hutchinson JC, Shelmerdine SC, Simcock IC, Sebire NJ, Arthurs OJ. Early Clinical Applications for Imaging at Microscopic Detail: Microfocus Computed Tomography (Micro-CT). *British Journal of Radiology*. 2017;90(1075):20170113. <https://doi.org/10.1259/bjr.20170113>
- Fitzpatrick N, Garcia TC, Daryani A, Bertran J, Watari S, Hayashi K. Micro-CT Structural Analysis of the Canine Medial Coronoid Disease. *Veterinary Surgery*. 2016;45(3):336–346. <https://doi.org/10.1111/vsu.12449>
- Eberspächer-Schweda MC, Schmitt K, Handschuh S, Fuchs-Baumgartinger A, Reiter AM. Diagnostic Yield of Micro-Computed Tomography (micro-CT) Versus Histopathology of a Canine Oral Fibrosarcoma. *Journal of Veterinary Dentistry*. 2020;37(1):14–21. <https://doi.org/10.1177/0898756420926519>
- Ritman EL. Current Status of Developments and Applications of Micro-CT. *Annual Review of Biomedical Engineering*. 2011;13:531–552. <https://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-071910-124717>
- Jekl V, Brinek A, Zikmund T, Jeklova E, Kaiser J. Use of Micro-CT Imaging to Assess Ventral Mandibular Cortical Thickness and Volume in an Experimental Rodent Model with Chronic High-Phosphorus Intake. *Frontiers in Veterinary Science*. 2021;8:759093. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.759093>
- Honkanen MKM, Mohammadi A, Te Moller NCR, Ebrahimi M, Xu W, Plomp S, et al. Dual-Contrast Micro-CT Enables Cartilage Lesion Detection and Tissue Condition Evaluation Ex Vivo. *Equine Veterinary Journal*. 2023;55(2):315–324. <https://doi.org/10.1111/evj.13573>
- Szalusi-Jordanow O, Barszcz K, Mądry W, Buczyński M, Czopowicz M, Gierulski A, et al. Hydrops Fetalis Caused by a Complex Congenital Heart Defect with Concurrent Hypoplasia of Pulmonary Blood Vessels and Lungs Visualized by Micro-CT in a French Bulldog. *BMC Veterinary Research*. 2024;20(1):189. <https://doi.org/10.1186/s12917-024-04060-5>
- Zelentsov VB, Sadyrin EV, Mitrin BI, Swain MV. Mathematical Tools for Recovery of the Load on the Fissure According to the Micro-CT Results. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2023;138:105625. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105625>
- Jeong T, Shin HJ. An Approximation Technique for Real-Time Rendering of Phong Reflection Model with Image-Based Lighting. *Journal of Korea Computer Graphics Society*. 2014;20(1):13–19. <https://doi.org/10.15701/kcgs.2014.20.1.13>
- Kogan MI, Popov IV, Kirichenko EY, Mitrin BI, Sadyrin EV, Kulaeva ED et al. X-ray Micro-computed Tomography in the Assessment of Penile Cavernous Fibrosis in a Rabbit Castration Model. *Andrology*. 2021;9(5):1467–1480. <https://doi.org/10.1111/andr.13077>

Об авторах:

Юлия Андреевна Тихменева, аспирант факультета биоинженерии и ветеринарной медицины Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [Scopus ID](#), juliya5634@gmail.com

Евгений Валерьевич Садырин, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории механики биосовместимых материалов, доцент кафедры теоретической и прикладной механики Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [Researcher ID](#), [Scopus ID](#), evgeniy.sadyrin@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Ю.А. Тихменева: разработка концепции, разработка методологии, написание черновика рукописи.

Е.В. Садырин: написание рукописи — редактирование.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Yulia A. Tikhmeneva, PhD Student of the Faculty of Bioengineering and Veterinary Medicine, Don State Technical University (1, Gagarin Sq, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [Scopus ID](#), juliya5634@gmail.com

Evgenny V. Sadyrin, Cand.Sci. (Physics and Mathematics), Senior Research Associate at the Laboratory of Biocompatible Materials Mechanics, Associate Professor of the Theoretical and Applied Mechanics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [Researcher ID](#), [Scopus ID](#), evgeniy.sadyrin@gmail.com

Claimed Contributorship:

YuA Tikhmeneva: development of the concept and methodology, writing the draft manuscript.

EV Sadyrin: writing and editing 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 11.09.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 09.10.2025

Принята к публикации / Accepted 14.10.2025