

<https://doi.org/10.25207/1608-6228-2023-30-5-77-86>

УДК: 61: 340.6

Посмертные изменения тканей и динамика их импедансометрических показателей: доклиническое экспериментальное исследование

О.С. Лаврукова¹, Е.Л. Казакова¹, А.Ю. Поляков²

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, 185910, Россия

² Государственное бюджетное учреждение здравоохранения Республики Карелия «Бюро судебно-медицинской экспертизы», ул. Л. Толстого, д.38, г. Петрозаводск, 185003, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Установление происходящих в посмертном периоде закономерностей является одной из главных задач судебно-медицинского учения о смерти и трупных явлениях. Понимание этих закономерностей непосредственно связано с реконструкцией условий посмертного периода и, следовательно, определением давности наступления смерти. **Цель исследования** — анализ посмертных изменений тканей трупов и динамики их импедансометрических показателей в условиях естественного биоценоза. **Методы.** Исследованы трупы модельных биообъектов — восьми свиней, в возрасте одного-двух месяцев, весом до 10 кг. Экспериментальные исследования процесса разложения трупа проведены в условиях естественного биоценоза, ежедневно на протяжении 28 суток в двух повторностях. Фиксировались и анализировались изменения тканей трупов в процессе разложения. Предметом биофизических исследований являлись показатели импеданса тканей трех диагностических зон биообъекта: кожно-мышечного лоскута, хрящевой части третьего ребра и пяточного сухожилия. Измерения импеданса для каждого срока давности наступления смерти проводились на пяти частотах тока исследования: 100 и 120 Гц, 1, 10 и 100 кГц. Всего снято 2400 показаний. Статистическую обработку результатов исследования проводили с помощью программы Statistica 8.0 (StatSoft, США). **Результаты.** Существует взаимосвязь биологических изменений тканей трупа в посмертном периоде с характером динамики их импеданса. При исследовании импеданса в условиях естественного биоценоза установлена идентичная его зависимость от срока давности наступления смерти для всех частот тока исследования всех диагностических зон модельных биообъектов: можно выделить начальный интервал 0–4 суток, где импеданс дает «всплеск» с дальнейшим более плавным его уменьшением. Для тканей мертвого организма зафиксировано наличие дисперсии импеданса в целом в исследуемом интервале частот и отсутствие дисперсии непосредственно для высоких частот. **Заключение.** Понимание причин и сущности процессов, протекающих в теле посмертно, позволяет оценить и обосновать изменения каких-либо характеристик тканей, измеряемых количественно, в том числе и показателей импеданса, а также прогнозировать перспективность их использования в конкретных практических целях, а именно для диагностики давности наступления смерти.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ткани, посмертные изменения, импеданс, динамика, давность наступления смерти

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лаврукова О. С., Казакова Е. Л., Поляков А. Ю. Посмертные изменения тканей и динамика их импедансометрических показателей: доклиническое экспериментальное исследование. *Кубанский научный медицинский вестник*. 2023; 30(5): 77–86. <https://doi.org/10.25207/1608-6228-2023-30-5-77-86>

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

ДЕКЛАРАЦИЯ О НАЛИЧИИ ДАННЫХ: данные, подтверждающие выводы этого исследования, можно получить по запросу у корреспондирующего автора.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ: исследования, описанные в данной работе, были проведены в рамках реализации Программы поддержки научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) студентов, аспирантов и лиц, имеющих ученую степень, финансируемой Правительством Республики Карелия (проект № КГРК 23–16).

СООТВЕТСТВИЕ ПРИНЦИПАМ ЭТИКИ: проведение исследования одобрено комитетом по медицинской этике при Министерстве здравоохранения Республики Карелия и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петрозаводский государственный университет» (ул. Пирогова, д. 3, г. Петрозаводск, Россия), протокол № 43 от 19.05.2019 г. Условия содержания животных и работы с ними соответствовали руководству ARRIVE (Animal Research: Reporting of In Vivo Experiments) и правилам работы с животными на основе положений Хельсинкской декларации и рекомендаций, содержащихся в Директиве ЕС 86/609/ЕЭС и Конвенции Совета Европы по защите позвоночных животных, используемых для экспериментальных и других научных целей.

ВКЛАД АВТОРОВ: О. С. Лаврукова, Е. Л. Казакова, А. Ю. Поляков — разработка концепции и дизайна исследования; О. С. Лаврукова — ресурсное обеспечение исследования; О. С. Лаврукова, А. Ю. Поляков — сбор данных; О. С. Лаврукова, Е. Л. Казакова, А. Ю. Поляков — анализ и интерпретация результатов; О. С. Лаврукова, Е. Л. Казакова — обзор литературы, проведение статистического анализа; О. С. Лаврукова, Е. Л. Казакова — составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта; А. Ю. Поляков — критический пересмотр черновика рукописи с внесением ценного замечания интеллектуального содержания. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией, выразили согласие нести ответственность за все аспекты работы, подразумевающую надлежащее изучение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой части работы.

© Лаврукова О. С., Казакова Е. Л., Поляков А. Ю., 2023

✉КОРРЕСПОНДИРУЮЩИЙ АВТОР: Лаврукова Ольга Сергеевна, e-mail: olgalavrukova@yandex.ru; ул. Пархоменко, д. 69, г. Петрозаводск, 185002, Россия.

Получена: 27.02.2023 / Получена после доработки: 03.08.2023 / Принята к публикации: 12.09.2023

Postmortem tissue changes and dynamics of their impedance parameters: a preclinical experimental study

Olga S. Lavrukova¹, Elena L. Kazakova¹, Aleksey Yu. Polyakov²

¹ Petrozavodsk State University, Lenina str., 33, Petrozavodsk, 185910, Russia

² Bureau of Forensic Medical Examination, Tolstogo str., 38, Petrozavodsk, 185003, Russia

ABSTRACT

Background. Establishing regularities in postmortem intervals comprises one of the main tasks of the forensic science of death and cadaveric phenomena. The knowledge of these regularities is directly related to reconstructing the postmortem conditions and, consequently, to determining the postmortem interval. **Objective.** To analyze postmortem changes in cadaver tissues and dynamics of their impedance parameters under the conditions of natural biocenosis. **Methods.** The study involved the cadavers of model biological objects – eight pigs, aged one to two months, weighing up to 10 kg. Experimental studies of cadaver decomposition were carried out under natural biocenosis conditions, daily for 28 days with two replications. Changes in cadaver tissues during decomposition were recorded and analyzed. The subject of biophysical studies was the tissue impedance parameters of three diagnostic zones of the biological object: the musculocutaneous flap, the cartilaginous part of the third rib and the calcaneal tendon. Impedance measurements for each postmortem interval were performed at five studied current frequencies: 100 and 120 Hz, 1, 10 and 100 kHz. A total of 2,400 readings were taken. Statistical analysis of the study results was carried out by means of Statistica 8.0 (StatSoft Inc., USA). **Results.** Postmortem biological changes in cadaver tissues correlate with the nature of their impedance dynamics. The study of impedance under conditions of natural biocenosis established its identical dependence on the postmortem interval for all current frequencies of the study of all diagnostic zones of model biological objects: in the initial interval of 0–4 days, the impedance gives a “surge” followed by a smoother decrease. Cadaver tissues were recorded to indicate the presence of impedance dispersion in general in the studied frequency range and the absence of dispersion directly for high frequencies. **Conclusion.** Understanding the causes and essence of postmortem processes contributes to assessing and substantiating changes in any characteristics of tissues measured quantitatively, including impedance indicators, as well as to predicting the prospects of their use for specific practical purposes, in particular, for determining the postmortem interval.

KEYWORDS: tissues, postmortem changes, impedance, dynamics, postmortem interval

FOR CITATION: Lavrukova O.S., Kazakova E.L., Polyakov A.Yu. Postmortem tissue changes and dynamics of their impedance parameters: A preclinical experimental study. *Kuban Scientific Medical Bulletin*. 2023; 30(5): 77–86. <https://doi.org/10.25207/1608-6228-2023-30-5-77-86>

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest.

DATA AVAILABILITY STATEMENT: Data supporting the findings of this study are available from the corresponding author upon request.

FUNDING: The research was carried out within the framework of the Research and Development (R&D) Support Program for Students, Postgraduates and Degree Holders funded by the Government of the Republic of Karelia (project No. KGRK 23-16).

COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS: The study was approved by the Ethics Committee (Ministry of Health, Republic of Karelia) and Petrozavodsk State University (Pirogova Street, 3, Petrozavodsk, Russia), Minutes No. 43 of May 19, 2019. The laboratory animal care has been organized in accordance with the ARRIVE guidelines (Animal Research: Reporting of In Vivo Experiments), the principles of the Declaration of Helsinki on the Animal Welfare, EU Directive 86/609/ECC, and the European Convention for the Protection of Vertebrate Animals used for Experimental and other Scientific Purposes.

AUTHOR CONTRIBUTIONS: Lavrukova O.S., Kazakova E.L., Polyakov A.Yu. — concept statement and contribution to the scientific layout; Lavrukova O.S. — research resourcing; Lavrukova O.S., Polyakov A.Yu. — data collection; Lavrukova O.S., Kazakova E.L., Polyakov A.Yu. — analysis and interpretation of the results; Lavrukova O.S., Kazakova E.L. — literature review, statistical analysis; Lavrukova O.S., Kazakova E.L. — drafting the manuscript and preparing its final version; Polyakov A.Yu. — critical review of the manuscript with introduction of valuable intellectual content. All authors approved the final version of the paper before publication and assumed responsibility for all aspects of the work, which implies proper study and resolution of issues related to the accuracy and integrity of any part of the work.

✉CORRESPONDING AUTHOR: Olga S. Lavrukova, e-mail: olgalavrukova@yandex.ru; Parkhomenko, 69, Petrozavodsk, 185002, Russia

Received: 27.02.2023 / Revised: 03.08.2023 / Accepted: 12.09.2023

ВВЕДЕНИЕ

Установление происходящих в посмертном периоде закономерностей является одной из главных проблем судебно-медицинского учения о смерти и трупных явлениях [1]. Познание этих закономерностей непосредственно связано с реконструкцией условий посмертного периода и, следовательно, определением давности наступления смерти (ДНС).

Наиболее полно изучены ранние посмертные изменения, развивающиеся в сроки до 72 часов с момента наступления смерти. Количество исследований, направленных на изучение гнилостно измененных трупов, значительно меньше, чем количество аналогичных исследований гнилостно неизмененных трупов [2]. Недостаточная изученность и противоречивость критериев определения ДНС в поздние сроки посмертного периода и сложившаяся практика ограниченного использования нетрадиционных (инструментальных) методов, в частности биофизических, показывают острейшую актуальность данного направления исследования и в то же время трудность научно-практической реализации [3]. Так, импедансометрический подход к определению ДНС базируется на фундаментальных биофизических процессах, которые протекают в биологических тканях и характер которых определяется биохимическим состоянием объекта. Метод импедансометрии высокочувствителен и позволяет регистрировать объективные данные. Преимуществами метода являются доступность необходимого оборудования и простота методики, позволяющие использовать его как средство экспресс-диагностики, подкрепляя инструментально традиционные методы анализа трупных явлений.

Основой диагностики ДНС были и останутся ранние и поздние трупные изменения, а лабораторные методы, по крайней мере, на современном этапе их разработки, следует рассматривать в качестве дополнительных. Изучение последовательных трансформаций тканей трупа в процессе его разложения и их взаимосвязи с изменениями его микробиологических, энтомологических, биофизических характеристик являются основой для разработки дополнительных инструментов определения ДНС [4–8]. Ранние и поздние трупные изменения, то есть посмертные изменения, их динамика должны рассматриваться и с точки зрения общего биологического процесса, а пока «порядка» в стадиях разложения трупа (ни с общепатологической, ни с судебно-медицинской точки зрения) нет. В аспекте практических целей судебно-медицинской экспертизы представляется целесообразной периодизация на основе патоморфологии разложения тканей трупа с пониманием причин смены тех или иных стадий и, соответственно, методов диагностики давности наступления смерти. Также следует учитывать, что процесс разложения мертвых тел зависит от ряда факторов, особенно связанных с воздействием на мертвое тело климатических и геофизических условий, физических свойств почвы и воды, а также возможностью доступа к трупу некрофильных насекомых [9] и повоночных-падальщиков.

Наиболее рациональным представляется комплексный подход к изучению вопроса установления ДНС: нако-

пление сведений о качественных и количественных характеристиках и закономерностях разложения мертвого органического вещества, установление закономерностей изменения количественных параметров от срока ДНС. Такой подход в перспективе позволит начать разработку компьютерной системы, способной не только выполнять однажды запрограммированную последовательность действий над известными судебно-медицинскими экспертами данными, но и самой анализировать вновь поступающую информацию и находить в ней закономерности.

Цель исследования — анализ посмертных изменений тканей трупов и динамики их импедансометрических показателей в условиях естественного биоценоза.

МЕТОДЫ

Экспериментальные животные

Исследованы модельные биообъекты — трупы свиней мужского пола, в возрасте одного-двух месяцев, весом до 10 кг. Трупы были получены со скотобойни фермерского хозяйства, где животных забили традиционным способом, без повреждений кожных покровов.

Размещение и содержание

В связи с особенностями исследования размещение и содержание животных не проводилось.

Дизайн исследования

Доклиническое экспериментальное исследование выполнено на трупах свиней, находящихся в условиях естественного биоценоза. Продолжительность исследования — 28 суток, кратность — ежедневно. В процессе биологических исследований фиксировались и анализировались изменения тканей трупов при их разложении. Предметом биофизических исследований являлись показатели импеданса тканей трех диагностических зон каждого трупа: кожно-мышечного лоскута, хрящевой части третьего ребра и пяточного сухожилия. Проводился анализ динамики абсолютных значений и коэффициента дисперсии импеданса в зависимости от срока давности наступления смерти. Блок-схема дизайна исследования представлена на рисунке 1.

Объем выборки

Исследованы трупы восьми свиней.

Критерии соответствия

Критерии включения

Животные мужского пола, массой 9–10 кг, без видимых повреждений и проявлений заболеваний, известная дата наступления смерти (не более суток), наличие только ранних трупных явлений.

Критерии исключения

Животные женского пола, масса менее 9 и более 10 кг, наличие поздних трупных явлений.

Рандомизация

Эксперимент проведен в двух повторностях: с 20 июня по 18 июля 2022 г. (период I, 4 трупа), и с 8 июля по 5 августа 2022 г. (период II, 4 трупа). Отбор животных осуществлялся на ферме случайным образом согласно критериям включения в исследование.

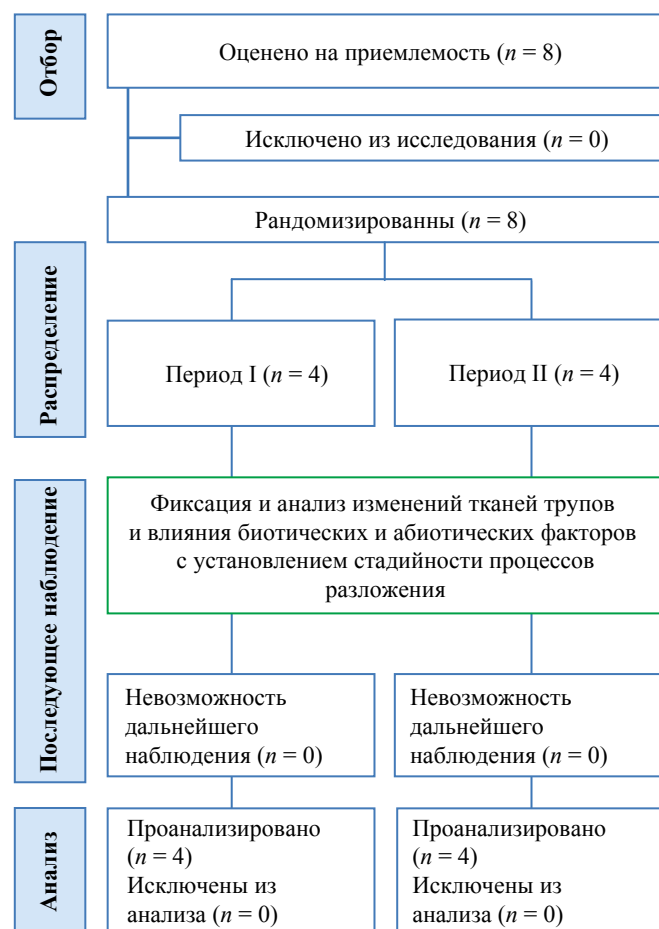


Рис. 1. Блок-схема дизайна исследования

Примечание: блок-схема выполнена авторами (согласно рекомендациям ARRIVE).

Fig. 1. Schematic diagram of the research design

Note: performed by the authors (according to ARRIVE recommendations)

Обеспечение анонимности данных

Проведение эксперимента, оценка результатов и анализ полученных данных осуществлялись без введения дополнительных лиц.

Итоговые показатели (исходы исследования)

Проводилась фиксация и анализ изменений тканей трупов и влияния биотических и абиотических факторов с установлением стадийности процессов разложения.

Выполнены измерения величины импеданса Z для каждого срока ДНС на пяти частотах тока исследования: 100 и 120 Гц, 1, 10 и 100 кГц для трех диагностических зон каждого биообъекта. Всего снято 2400 показаний. Для оценки характера дисперсии Z мы использовали коэффициент дисперсии $k_d = Z_{нч}/Z_{вч}$, где $Z_{нч}$ — импеданс на низкой частоте (100 Гц), $Z_{вч}$ — импеданс на высокой частоте (100 кГц) и коэффициент поляризации $k_n = Z(10 \text{ кГц})/Z(100 \text{ кГц})$.

Экспериментальные процедуры

Условия проведения исследования

Исследования проведены на территории садовых посадок частного сектора летом 2022 года. Характеристика района исследования представлена в таблице 1.

Приманки выкладывали на верхний почвенный слой на расстоянии более 25 м друг от друга с целью ограничения взаимного влияния. Для сохранности трупов на месте и ограничения воздействия некробионтов их защищали с помощью клеток из мелкоячеистой металлической сетки.

Показатели основных абиотических факторов среды на момент отбора проб приведены в таблице 2.

Экспериментальные процедуры

Наблюдение изменений тканей трупов модельных биообъектов, пребывавших в условиях естественного биоценоза, проводилось на протяжении 28 дней исследования. Зафиксированы характерные изменения мягких тканей трупов в процессе протекания двух стадий разложения.

Импеданс измеряли прибором Keysight U1731 (бренд/производитель: Keysight Technologies (США), страна происхождения: Малайзия). Выбор прибора обусловлен его портативностью, мобильностью и простотой в использовании. Прибор имеет 2 датчика в виде игл из нержавеющей стали диаметром 0,5 мм и длиной погружной части 5 мм. Датчики жестко фиксировали на расстоянии 5 см друг от друга. При снятии показаний датчики вводили в ткань диагностической зоны на всю длину погружной части (5 мм) путем прокола. Измерения импеданса проводили на 5 частотах (100 и 120 Гц; 1, 10 и 100 кГц). Выбор частот определялся анализом данных литературы [10] и возможностями измерительного прибора.

Измерение импеданса проводили на трех диагностических зонах трупа: хрящевая часть III ребра, кожно-мышечный лоскут плеча и пяточное сухожилие. При выборе диагностических зон руководствовались требованиями

Таблица 1. Характеристика района исследования

Table 1. Characteristics of the study area

Показатель	Характеристика
Район	Восточно-Европейская равнина (северо-запад России, берег Онежского озера)
Территориальное размещение биоценоза	Зона населенного пункта
Характер растительности	Смешанная растительность, присутствие хвойных и лиственных пород
Почвы	Подзолистые песчано-супесчано-суглинистые, а также торфяные и торфяно-глеевые

Примечание: таблица составлена авторами.

Note: compiled by the authors.

Таблица 2. Показатели температуры, влажности среды и атмосферного давления при проведении биологических наблюдений и измерении импеданса

Table 2. Indicators of temperature, humidity and atmospheric pressure during biological observations and impedance measurement

№ периода	Среднесуточная температура (t)	Влажность воздуха (φ)	Атмосферное давление (p)
период I с 20 июня по 18 июля	$t_{\min} = 13,7^{\circ}\text{C}$ $t_{\max} = 22,6^{\circ}\text{C}$	$\varphi_{\min} = 61,6\%$ $\varphi_{\max} = 86,1\%$	$p_{\min} = 746 \text{ мм рт. ст.}$ $p_{\max} = 753 \text{ мм рт. ст.}$
период II с 8 июля по 5 августа	$t_{\min} = 12,6^{\circ}\text{C}$ $t_{\max} = 25,1^{\circ}\text{C}$	$\varphi_{\min} = 51,6\%$ $\varphi_{\max} = 84,2\%$	$p_{\min} = 749 \text{ мм рт. ст.}$ $p_{\max} = 758 \text{ мм рт. ст.}$

Примечание: таблица составлена авторами.

Note: compiled by the authors.

доступности ткани для исследования и максимального снижения влияния индивидуальных особенностей биообъекта на измерение. Зона «кожно-мышечный лоскут» имеет удобное расположение и легко исследуется. Для каждого нового измерения в кожно-мышечном лоскуте производили новые проколы в связи постоянным контактом диагностической зоны с внешней средой и подсыханием краев проколов. При измерениях импеданса хряща требовался кожный разрез. Для доступа к сухожилию делали вертикальный разрез длиной 5 см в проекции пяточного сухожилия (*tendo calcaneus*). Диагностические зоны «хрящ» и «сухожилие» также имеют удобное расположение, их легко исследовать, а вводимые в их ткань иглы датчика не задевают другие ткани и органы. После снятия показаний эти области легко закрываются кожей во избежание постоянного контакта внешней средой, подсыхания и изменения протекания процесса гниения. Для каждого нового измерения иглы датчика вводили в проколы, оставшиеся от предыдущего измерения.

Статистические процедуры

Принципы расчета размера выборки

Предварительный расчет выборки не производился.

Методы статистического анализа данных

Статистическую обработку результатов исследования проводили с помощью программы Statistica 8.0 (StatSoft, США). Числовыми характеристиками выборки из 8 биообъектов являются медианные значения величины импеданса Z и коэффициентов k_d и k_n , значения нижнего и верхнего квартилей. Различия между количественными параметрами, соответствующими разным срокам ДНС, оценивали с помощью непараметрического критерия Вилкоксона для зависимых выборок.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперимент проводился на трупах модельных биообъектов [11, 12], пребывавших в условиях естественного биоценоза. Прослежены две стадии разложения мягких тканей трупов модельных биообъектов, которые условно можно обозначить как «преимущественно микробиологическая», а затем «микробно-зоологическая» утилизация.

Преимущественно микробная деструкция является первой стадией [13], начинающейся с наступления биологической смерти и заканчивающаяся с появлением гни-

лостной эмфиземы. В эту стадию в трупах преобладает бактериальная жизнедеятельность, приводящая к постепенному разрушению трупных тканей. При наружном осмотре эта стадия делится на два этапа: неизмененного или «свежего» трупа — без гнилостных изменений и этап, когда гнилостные изменения заметны наблюдателю — конец первых суток, начало вторых — появляется трупный запах и зеленоватый цвет кожи живота.

Трупный запах появляется в результате жизнедеятельности микроорганизмов, прижизненно населяющих кишечник организма. Микробы выделяют множество газов, увеличивая объем как кишечника, так и брюшной полости в целом — живот раздувается и брюшная стенка становится напряженной. Одним из этих газов является сероводород, вступающий в реакцию с миоглобином и гемоглобином, в результате которой образуются сульфгемоглобин и сульфмиоглобин, изменяющие цвет кожных покровов в грязно-зеленый. Эти явления хорошо заметны уже ко вторым суткам наблюдения.

С появлением некрофильных — питающихся омертвевшими трупными тканями — насекомых начинается вторая стадия [14–17]. В наших наблюдениях эта стадия начинается с 4–5 суток срока ДНС. Увеличивающийся объем гнилостных газов в эту стадию продолжает «раздувать» труп, сглаживая визуально переход головы к туловищу, язык начинает выступать из полости рта, а глазные яблоки — из глазниц. Из полости рта и носа подтекает гнилостного вида грязно-бурая жидкость, а из начинающего зиять заднепроходного отверстия выделяются каловые массы. На ощупь можно ощутить гнилостную эмфизему в виде «похрустывания» мягких тканей. Половые органы мужских особей заметно увеличивались в объеме. Кожа приобретает грязно-зеленоватый цвет уже повсеместно, в виде грязно-бурых полос становится отчетливо видна гнилостная венозная сеть. Поверхностные слои кожи отслаиваются в виде заполненных буро-красной жидкостью пузырей, впоследствии рвущихся и обнажающих более глубокие слои кожи. Дальнейшее увеличение объема гнилостных газов приводит к разрывам кожи живота и выпадению через них петель кишечника. К концу второй — началу третьей недели мягкие ткани трупа становятся осклизлыми и легко рвутся при ощупывании. Мягкие ткани постепенно изменяются, принимая вид однородной зловонной

вязкой массы, «сползающей» с подлежащих костей. Аналогичным же образом происходит изменение внутренних органов. На четвертой неделе труп становится доступен воздействию окружающей среды полностью — гнилостных газов в мягких тканях не остается, сами мягкие ткани окончательно приняли бесструктурный вид, начал оголяться скелет.

В течение всего этого времени, несмотря на попытки защиты приманки от проникновения взрослых особей мух и откладывания ими яиц, фиксировалось появление насекомых-некробионтов. Наличие на трупе двукрылых приводит к ускорению темпа деструкции мягких тканей трупа. Появившиеся личинки двукрылых благодаря выделению пищеварительных ферментов проделывают в мягких тканях трупа отверстия, через которые активно перемещаются, что дополнительно способствует разрушению трупа. Через два-три дня после двукрылых на трупе фиксировалось появление жесткокрылых, сменяющих видовой состав в процессе дальнейшего разложения трупа. Появление жуков связано как непосредственно с состоянием мягких тканей, так и с появлением других насекомых, являющихся их пищей.

В целом на этой стадии трупная экосистема наиболее богата: здесь активны микробы и насекомые, кроме того, труп интересен и для позвоночных-падальщиков. Микробы в эту стадию пассивно «перемешиваются» — посещающие труп мухи приносят «новые» бактерии и уносят «старые». Вследствие разжижения мягких тканей они вытекают наружу на почву, вследствие чего все большее количество танатомикробиома можно обнаружить в подлежащей почве. Яйца и личинки мух привлекают на труп пожирающих их муравьев, клещей, ос и пауков, хищни-

ков-жуков. Для этой стадии, продолжающейся до 1,5–2 месяцев (в зависимости от размеров и массы трупов), характерно быстрое уничтожение некробионтами основной массы мягких тканей объекта. Следует отметить, что временная последовательность биологических изменений для периодов I и II совпадает по срокам ДНС, несмотря на некоторые отличия показателей основных абиотических факторов среды на момент наблюдения (табл. 2).

В рамках биофизических исследований были проведены измерения импеданса Z , и для тканей всех исследуемых диагностических зон наблюдаются следующие характерные закономерности:

1. На всех частотах тока исследования зависимость Z от срока ДНС идентичная: можно выделить начальный интервал 0–4 суток, где Z дает «всплеск» с дальнейшим более плавным уменьшением. На рисунке 1 представлены временные зависимости Z на частоте 1 кГц для всех исследуемых тканей в условиях естественного биоценоза. Измерения Z в течение всего периода наблюдений (28 суток) были проведены только для кожно-мышечного лоскута. Измерения на хряще и сухожилии удалось провести в срок до 17 и 15 суток посмертного периода соответственно, т. к. далее ткани оказались непригодны для проведения измерений ввиду развития резко выраженных деструктивных изменений (рис. 2).

2. На каждом конкретном сроке ДНС наблюдается дисперсия импеданса: уменьшение Z с увеличением частоты тока. Для оценки характера дисперсии импеданса Z в целом мы использовали коэффициент $k_o = Z_{нч}/Z_{вч}$, где $Z_{нч}$ — импеданс на низкой частоте (100 Гц), $Z_{вч}$ — импеданс на высокой частоте (100 кГц). Так, например, для кожно-мышечного лоскута в период от 0 до 15 суток ДНС значение k_o

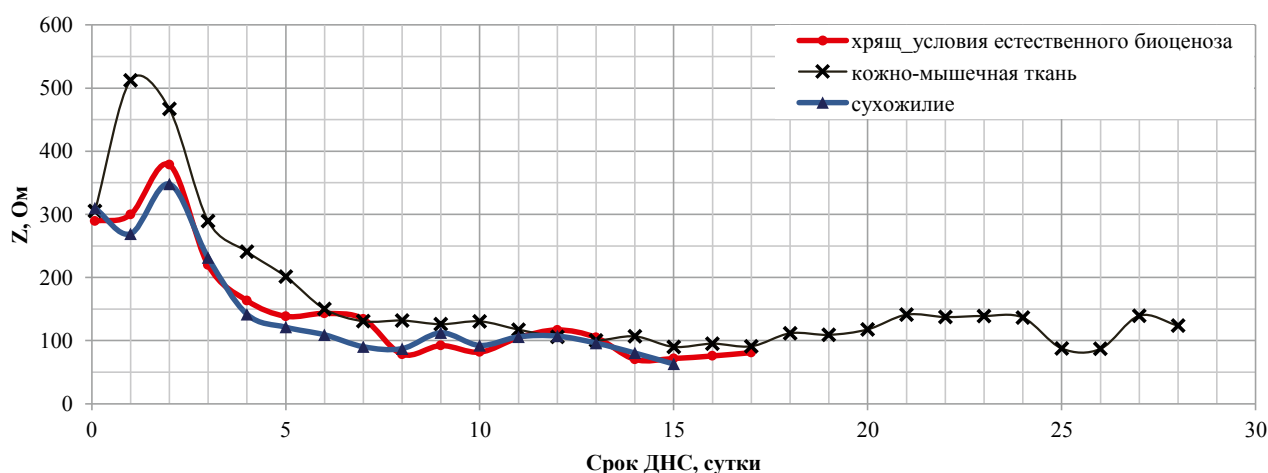


Рис. 2. Графики зависимости импеданса (Z) на частоте 1 кГц от срока давности наступления смерти для кожно-мышечной ткани, сухожилия и хряща биообъекта в условиях естественного биоценоза. Точки на графике являются медианными значениями импеданса

Примечание: рисунок выполнен авторами. Сокращения: Z — значение показателя импеданса; ДНС — давность наступления смерти.

Fig. 2. Dependence of impedance (Z) at the frequency of 1 kHz on postmortem interval for musclocutaneous tissue, tendon and cartilage of a biological object under the conditions of natural biocenosis. Points on the graph are median impedance values

Note: performed by the authors. Abbreviations: Z — impedance value; ДНС — postmortem interval.

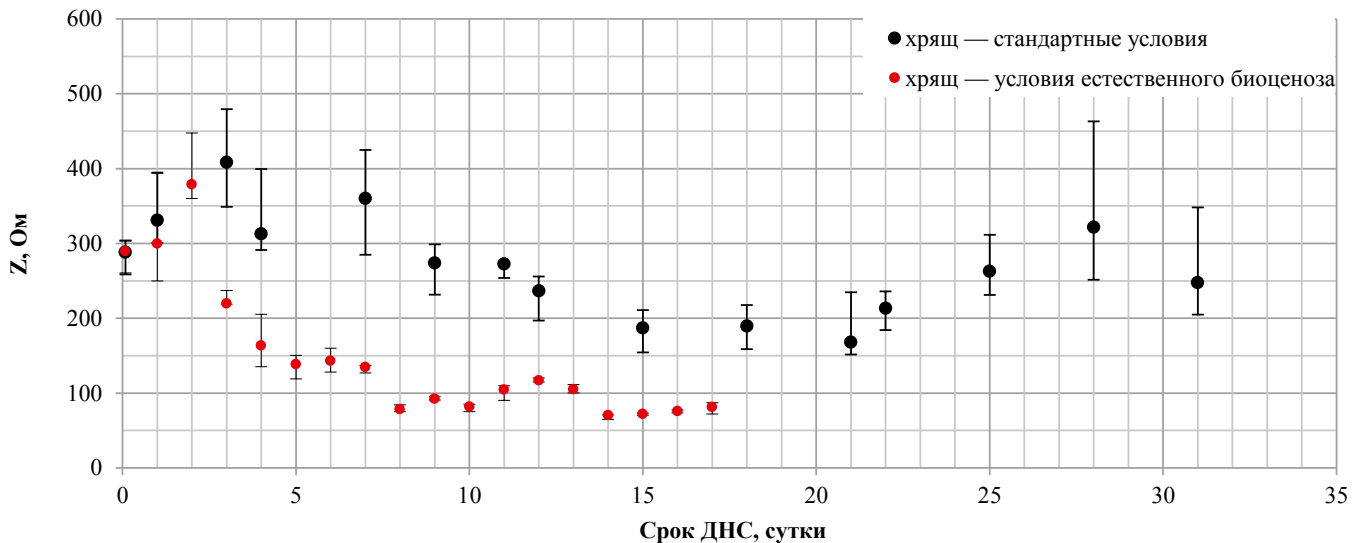


Рис. 3. Зависимость импеданса (Z) от срока давности наступления смерти для хрящевой ткани в стандартизированных условиях и условиях естественного биоценоза. Точки на графиках являются медианными значениями импеданса. Края вертикальных отрезков — границы нижнего и верхнего квартилей, характеризующие «разброс» значений импеданса.

Примечание: рисунок выполнен авторами. Сокращения: Z — значение показателя импеданса; ДНС — давность наступления смерти.

Fig. 3. Dependence of impedance (Z) on postmortem interval for cartilage tissue under standardized conditions and conditions of natural biocenosis. Points on the graphs are median impedance values. Edges of vertical segments are the boundaries of the lower and upper quartiles, characterizing the “spread” of impedance values.

Note: performed by the authors. Abbreviations: Z — impedance value; ДНС — postmortem interval.

выше единицы и не превышают значение $k_0 = 1,8$, а далее наблюдается увеличение и на сроке ДНС 27 суток $k_0 = 2,8$.

С другой стороны, следует отметить, что при наличии дисперсии Z в целом в исследуемом интервале частот от 100 Гц до 100 кГц непосредственно для высоких частот (10 кГц и 100 кГц) дисперсия практически отсутствует, т.е. коэффициент поляризации $k_{\text{п}}$ близок к единице (до 1,1) для всех сроков ДНС для всех диагностических зон в условиях естественного биоценоза.

ОБСУЖДЕНИЕ

Интерпретация/научная значимость

Следует отметить, что данные о биологических изменениях тканей в посмертном периоде, полученные в этом эксперименте, согласуются с данными, полученными ранее при изучении разложения трупов свиней в условиях естественных биоценозов севера европейской части России [18].

Ранее нами были получены данные по динамике Z [19] для трех диагностических зон аналогичных модельных биообъектов, находящихся в стандартизированных условиях (температура воздуха +4 °C, влажность 45 %) в сроки посмертного периода от 0 до 31 суток и от 61 до 80 суток. Для периода от 0 до 31 суток можно отметить, что при общей тенденции уменьшения Z его изменения представляли собой волнообразную динамику абсолютных показателей в виде начального снижения, определенного промежутка плато и дальнейшего пологого подъема, что повторялось для всех частот тока в различных диагностических зонах

исследования. В период от 61 до 80 суток для кожно-мышечного лоскута наблюдалось более «спокойное поведение» Z с меньшим значением по сравнению с начальным периодом (в среднем в 4 раза). Хрящ и сухожилие в период от 61 до 80 суток оказались непригодными для проведения измерений. На рисунке 3 приведены зависимости Z от срока ДНС для хрящевой ткани в стандартизированных условиях и условиях естественного биоценоза.

Разную динамику показателей Z при нахождении трупов в стандартизированных условиях и в условиях естественного биоценоза (рис. 3) можно объяснить отличиями в протекании процессов деструкции тканей [10, 20], происходящими в основном под воздействием каких-либо ферментных систем: собственных ферментов организма (аутолиз), ферментов контаминирующих труп микроорганизмов (гниение), ферментов, выделяемых личинками при заселении трупа некрофильными насекомыми, или их сочетаниями [21]. Скорость протекания всех этих процессов зависит от температуры окружающей среды: чем она выше, тем быстрее разлагается труп.

В стандартизированных условиях температура среды относительно низкая, когда микроорганизмы, контаминирующие труп, практически не активны, а энтомологический фактор отсутствует, и характер деструктивного изменения тканей медленный и определяется только протекающими в них аутолитическими изменениями. Тогда можно проследить волнообразную динамику показателей Z , по всей вероятности, определяющуюся периодами некоторой активизации и затухания процесса аутолиза тканей.

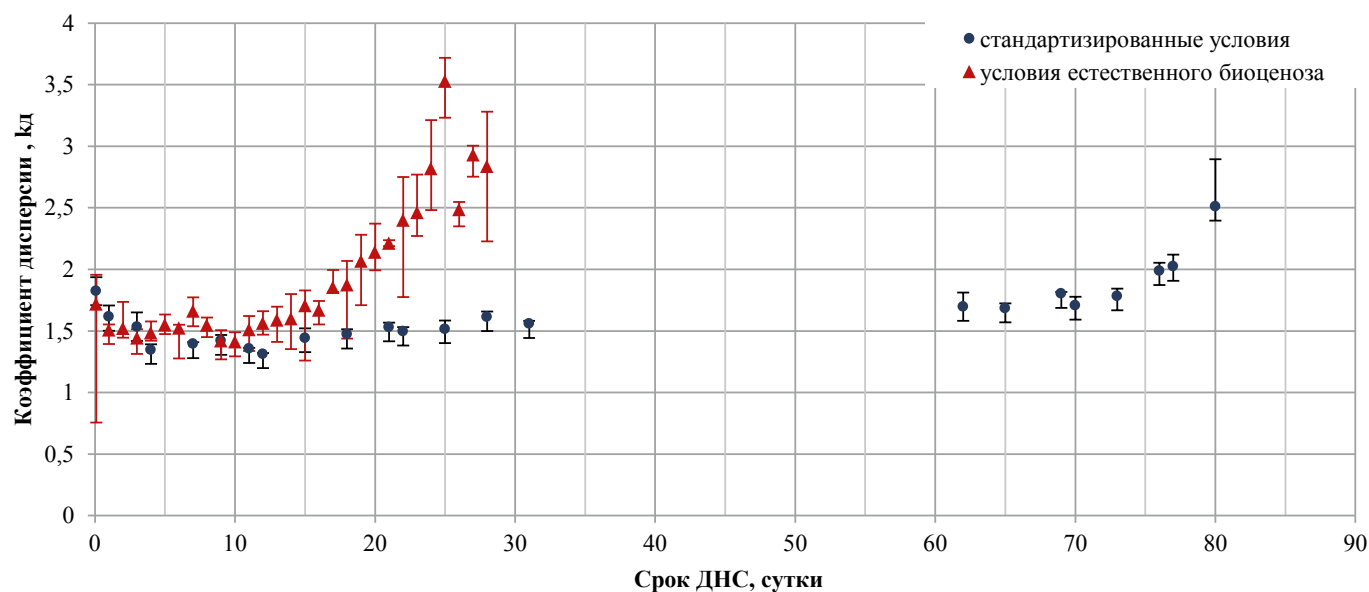


Рис. 4. Зависимость коэффициента дисперсии $k_d = Z_{\text{ни}}/Z_{\text{вы}}$ от срока давности наступления смерти для кожно-мышечной ткани в стандартизированных условиях и условиях естественного биоценоза. Точки на графиках являются медианными значениями k_d . Края вертикальных отрезков — границы нижнего и верхнего квартилей, характеризующие «разброс» значений k_d .

Примечание: рисунок выполнен авторами. Сокращение: ДНС — давность наступления смерти.

Fig. 4. Dependence of dispersion coefficient $k_d = Z_{\text{low}}/Z_{\text{high}}$ on postmortem interval for musculoskeletal tissue under standardized conditions and conditions of natural biocenosis. Points on the graph are median values of k_d . Edges of vertical segments are the boundaries of the lower and upper quartiles, characterizing the “spread” of the values k_d .

Note: performed by the authors. Abbreviation: ДНС — postmortem interval.

При разложении в условиях естественного биоценоза в нашем эксперименте средняя температура окружающей среды составляла +18–19 °С. При такой температуре активно происходили процессы и аутолиза, и гниения, как за счет «собственных» микроорганизмов тела, так и привнесенных из почвы, а также инкорпорирования энтомологического фактора. Это привело к быстрому развитию деструкции мягких тканей и другой динамике показателей Z : некоторого роста его абсолютных значений на протяжении четырех суток с момента наступления смерти с дальнейшим более плавным его уменьшением.

Зависимость коэффициента дисперсии k_d от срока ДНС для кожно-мышечной ткани в стандартизированных условиях и в условиях естественного биоценоза приведена на рисунке 4.

Изменение характера дисперсии с увеличением срока ДНС (рис. 4) может свидетельствовать о нарастании количества клеток с разрушенной мембраной, что связано с расщеплением ферментными системами (собственными, микроорганизмов или личинок некрофильных насекомых) фосфолипидов и белков мембран. При этом наличие схожих участков подъема k_d в более поздние сроки ДНС для стандартизированных условий (с 70-х суток ДНС) по сравнению с условиями естественного биоценоза (с 15–17-х суток ДНС) позволяет предположить наличие схожей последовательности деструктивных изменений кожно-мышечной ткани, но различной скорости

их протекания, что, вероятно, связано с более высокой температурой среды и наличием энтомологической составляющей при проведении эксперимента на улице. Можно еще отметить тот факт, что именно на 15–17 суток эксперимента в условиях естественного биоценоза, когда отмечен подъем k_d , в целом для трупов наблюдались схожие изменения мягких тканей, которые стали осклизлыми и легко рвались при ощупывании, грудная и брюшная полости за счет возникших перфораций сообщались с внешней средой, а сухожилие и хрящ стали непригодны для исследования.

С другой стороны, следует отметить, что при наличии дисперсии Z в целом в исследуемом интервале частот (от 100 Гц до 100 кГц), непосредственно для высоких частот (10 и 100 кГц) дисперсия практически отсутствует, т. е. коэффициент поляризации k_n близок к единице для всех сроков ДНС в любых условиях. Известно, что дисперсия Z для высоких частот присуща только живым тканям и отсутствует у мертвых [22]. Именно в интервале высоких частот от 10 до 1000 кГц для живых тканей дисперсия импеданса определяется поляризацией фосфолипидов мембран клеток в поле внешнего электрического тока и дипольной поляризацией структурных образований в цитоплазме. При повреждении живой ткани и снижении ее жизнеспособности k_n уменьшается и при полной гибели приближается к единице. Такой коэффициент поляризации рассматривают собственно как характеристику жизнеспособности ткани¹.

¹ Самойлов В. О. Медицинская биофизика: учебник для вузов. 3-е изд., испр. и доп. СПб.: СпецЛит. 2013. 591 с.: ил. ISBN 978-5-299-00518-9.

Следует отметить, что только для кожно-мышечного лоскута в стандартизованных условиях в первые сутки ДНС коэффициент поляризации имеет медианное значение $k_n = 1,41$. Различия значений k_n для этой ткани в первые и четвертые сутки ($k_n = 1,11$) срока ДНС значимы в соответствии с критерием Вилкоксона для зависимых выборок ($p = 0,01$). Данный факт именно для кожно-мышечного лоскута, вероятно, можно объяснить процессами переживаемости тканей.

Таким образом, в соответствии с результатами наших исследований, наличие дисперсии Z тканей мертвого организма, так же как и отличие ее степени и характера в стандартизованных условиях и условиях естественного биоценоза, отражает особенности протекания процессов разложения тканей (аутолиза и гниения в первом случае, в сочетании с энтомологическим компонентом — во втором). А значение коэффициента поляризации близкого к единице на всем протяжении эксперимента свидетельствует о нежизнеспособности тканей.

Ограничения исследования

Ограничения исследования не установлены.

Обобщаемость/экстраполяция

Исследования направлены на установление количественного инструментария определения ДНС для использования в практике судебного эксперта. Экстраполяция данных, полученных в ходе изучения посмертных изменений тканей и динамики их импедансометрических показателей, возможна как путем классического анализа человеком-экспертом, так и с применением компьютерных

методов анализа [23–25], что позволяет рекомендовать труп свиньи в качестве адекватной модели трупа человека, как для научных исследований, так и для решения конкретных научно-практических вопросов, возникающих в практике судебно-медицинской экспертизы при определении ДНС и условий постмортального периода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прослежены две стадии разложения мягких тканей трупов модельных биообъектов, которые условно можно обозначить как «преимущественно микробиологическая», а затем «микробно-зоологическая» утилизация. Существует взаимосвязь биологических изменений тканей в посмертном периоде с характером динамики их импеданса. При исследовании импеданса в условиях естественного биоценоза установлена идентичная его зависимость от срока ДНС для всех частот тока исследования всех диагностических зон модельных биообъектов: можно выделить начальный интервал 0–4 суток, где импеданс дает «всплеск» с дальнейшим более плавным его уменьшением. Для тканей мертвого организма зафиксировано наличие дисперсии импеданса в целом в исследуемом интервале частот и отсутствие дисперсии непосредственно для высоких частот. Понимание причин и сущности процессов, протекающих в теле посмертно, позволяет оценить и обосновать изменения каких-либо характеристик тканей, измеряемых количественно, в том числе и показателей импеданса, а также прогнозировать перспективность их использования в конкретных практических целях, а именно для диагностики давности наступления смерти.

СПИСОК ЛИТЕАТУРЫ / REFERENCES

1. Кильдюшов Е.М., Ермакова Ю.В., Туманов Э.В., Кузнецова Г.С. Диагностика давности наступления смерти в позднем посмертном периоде в судебно-медицинской практике (обзор литературы). *Судебная медицина*. 2018;4(1):34–38. <https://doi.org/10.19048/2411-8729-2018-4-1-34-38>
2. Kil'dyushov EM, Ermakova YV, Tumanov EV, Kuznetsova GS. Estimation of time since death in the late postmortem period in forensic medicine (literature review). *Russian Journal of Forensic Medicine*. 2018;4(1):34–38 (In Russ.). <https://doi.org/10.19048/2411-8729-2018-4-1-34-38>
3. Díez López C, Vidaki A, Kayser M. Integrating the human microbiome in the forensic toolkit: Current bottlenecks and future solutions. *Forensic Sci Int Genet*. 2022;56:102627. <https://doi.org/10.1016/j.fsi-gen.2021.102627>
4. Попов В.Л. Повреждения от биологического воздействия. *Судебно-медицинская экспертиза*. 2023;66(2):15–19. <https://doi.org/10.17116/sudmed20236602115>
5. Popov VL. Injuries after the biological exposure. *Sudebno-Meditsinskaya Ekspertisa*. 2023;66(2):15–19 (In Russ.). <https://doi.org/10.17116/sudmed20236602115>
6. Халиков А.А., Кильдюшов Е.М., Кузнецов К.О., Комлев Д.С., Халикова Л.В. Диагностика давности наступления смерти и особенности проведения судебно-медицинской экспертизы при посмертном оледенении трупа. *Судебно-медицинская экспертиза*. 2022;65(2):16–19. <https://doi.org/10.17116/sudmed20226502116>
7. Khalikov AA, Kildyushov EM, Kuznetsov KO, Komlev DS, Khalikova LV. Diagnostics of the presence of once of death and peculiarities of performance of the forensic medical examination in post-mortal facial condition. *Sudebno-Meditsinskaya Ekspertisa*. 2022;65(2):16–19 (In Russ.). <https://doi.org/10.17116/sudmed20226502116>
8. Abe H, Yajima D, Hoshioka Y, Nara A, Nagasawa S, Iwase H. Myoglobinemia markers with potential applications in forensic sample analysis: lipid markers in myoglobinemia for postmortem blood. *Int J Legal Med*. 2017;131(6):1739–1746. <https://doi.org/10.1007/s00414-017-1657-8>
9. Ali MM, Ibrahim SF, Fayed AA. Using Skin Gene Markers for Estimating Early Postmortem Interval at Different Temperatures. *Am J Forensic Med Pathol*. 2017 Dec;38(4):323–325. <https://doi.org/10.1097/PAF.0000000000000337>
10. Zhang J, Li B, Wang Q, Li C, Zhang Y, Lin H, Wang Z. Characterization of postmortem biochemical changes in rabbit plasma using ATR-FTIR combined with chemometrics: A preliminary study. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*. 2017;173:733–739. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2016.10.041>
11. Preiswerk D, Walser JC, Ebert D. Temporal dynamics of microbiota before and after host death. *ISME J*. 2018;12(8):2076–2085. <https://doi.org/10.1038/s41396-018-0157-2>
12. Amendt J. Forensic entomology. *Forensic Sci Res*. 2017;3(1):1. <https://doi.org/10.1080/20961790.2017.1403081>
13. Емельянов А.С., Прошутин В.Л. Применение методики для определения давности наступления смерти, основанной на изменении электрического сопротивления периферических нервов. *Вятский медицинский вестник*. 2020;66(2):38–41. <https://doi.org/10.24411/2220-7880-2020-10079>
14. Yemelyanov AS, Proshutin VL. Use of the technique based on change of electric resistance of peripheral nerves to determine perscription of death coming. *Vyatskii Meditsinskii Vestnik*. 2020;66(2):38–41 (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2220-7880-2020-10079>
15. Иванов И.В., Ушаков И.Б. Основные подходы к экстраполяции данных с животных на человека в радиобиологическом эксперименте. *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2020;65(3):5–12. <https://doi.org/10.12737/1024-6177-2020-65-3-5-12>
16. Ivanov IV, Ushakov IB. Basic Approaches to the Extrapolation of Data of Animals to Human in Radiobiological Experiment. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2020;65(3):5–12 (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/1024-6177-2020-65-3-5-12>

12. Mina MV. Requirements imposed on model objects in microevolutionary studies. *Biology Bulletin Reviews*. 2016;6:203–207. <https://doi.org/10.1134/S2079086416030063>
13. Javan GT, Finley SJ, Can I, Wilkinson JE, Hanson JD, Tarone AM. Human thanatomicrobiome succession and time since death. *Sci Rep*. 2016;6:29598. <https://doi.org/10.1038/srep29598>
14. Anderson GS, Bell LS. Impact of Marine Submergence and Season on Faunal Colonization and Decomposition of Pig Carcasses in the Salish Sea. *PLoS One*. 2016;11(3):e0149107. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149107>
15. Matuszewski S, Frątczak K, Konwerski S, Bajerlein D, Szpila K, Jarmusz M, Szałałowicz M, Grzywacz A, Mądra A. Effect of body mass and clothing on carrion entomofauna. *Int J Legal Med*. 2016;130(1):221–232. <https://doi.org/10.1007/s00414-015-1145-y>
16. Armstrong P, Nizio KD, Perrault KA, Forbes SL. Establishing the volatile profile of pig carcasses as analogues for human decomposition during the early postmortem period. *Heliyon*. 2016;2(2):e00070. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2016.e00070>
17. Moffatt C, Heaton V, De Haan D. The distribution of blow fly (Diptera: Calliphoridae) larval lengths and its implications for estimating post mortem intervals. *Int J Legal Med*. 2016;130(1):287–297. <https://doi.org/10.1007/s00414-015-1289-9>
18. Приходько А.Н., Лаврукова О.С., Лябзина С.Н., Сидорова Н.А., Попов В.Л. Использование микробно-энтомологических данных для установления давности наступления смерти. *Судебно-медицинская экспертиза*. 2018;61(6):52–56. <https://doi.org/10.17116/sudmed20186106152>
19. Prikhod'ko AN, Lavrukova OS, Lyabzina SN, Sidorova NA, Popov VL. The use of the microbial and entomological data for the diagnostics of prescription of death coming. *Sudebno-Meditsinskaya Ekspertiza*. 2018;61(6):52–56 (In Russ.). <https://doi.org/10.17116/sudmed20186106152>
20. DeBruyn JM, Hauther KA. Postmortem succession of gut microbial communities in deceased human subjects. *PeerJ*. 2017;5:e3437. <https://doi.org/10.7717/peerj.3437>
21. Носов М.М., Кильдюшов Е.М., Туманов Э.В., Дворников А.С. Изучение некоторых электрофизических свойств жировой ткани в посмертном периоде при работе с источником постоянного тока. *Судебно-медицинская экспертиза*. 2021;64(3):29–33. <https://doi.org/10.17116/sudmed20216403129>
22. Nosov MM, Kildyushov EM, Tumanov EV, Dvornikov AS. Study of certain electrophysical properties of adipose tissue in the postmortem period when working with a direct current source. *Sudebno-Meditsinskaya Ekspertiza*. 2021;64(3):29–33 (In Russ.). <https://doi.org/10.17116/sudmed20216403129>
23. Hansen ES, Baigent C, Reck SI, Connor M. Bioelectrical Impedance as a Technique for Estimating Postmortem Interval. *J Forensic Sci*. 2018;63(4):1186–1190. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13695>
24. Miladinović Đ, Muheim C, Bauer S, Spinnler A, Noain D, Bandarabadi M, Gallusser B, Krummenacher G, Baumann C, Adamantidis A, Brown SA, Buhmann JM. SPINDLE: End-to-end learning from EEG/EMG to extrapolate animal sleep scoring across experimental settings, labs and species. *PLoS Comput Biol*. 2019;15(4):e1006968. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1006968>
25. Калигин К.Ю., Придворов Г.В., Спасов А.А., Муха О.Ю. Влияние клозапина и 5-HT_{2A}-антагониста РУ-31 на электроэнцефалограмму и двигательную активность крыс в модели шизофрении с неонатальным разрушением вентрального гиппокампа. *Кубанский научный медицинский вестник*. 2022;29(5):108–122. <https://doi.org/10.25207/1608-6228-2022-29-5-108-122>
26. Kalitin KYu, Pridvorov GV, Spasov AA, Mukha OYu. Effect of Clozapine and 5-HT_{2A}-Antagonist RU-31 on electroencephalography and Motor Activity of Rats in a Model of Schizophrenia with Neonatal Destruction of the Ventral Hippocampus. *Kuban Scientific Medical Bulletin*. 2022;29(5):108–122 (In Russ.). <https://doi.org/10.25207/1608-6228-2022-29-5-108-122>
27. Becker RA, Dellarco V, Seed J, Kronenberg JM, Meek B, Foreman J, Palermo C, Kirman C, Linkov I, Schoeny R, Dourson M, Pottenger LH, Manibusan MK. Quantitative weight of evidence to assess confidence in potential modes of action. *Regul Toxicol Pharmacol*. 2017;86:205–220. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2017.02.017>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Лаврукова Ольга Сергеевна — доктор медицинских наук, профессор кафедры анатомии, гистологии, топографической анатомии и оперативной хирургии, патологической анатомии, судебной медицины Медицинского института федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петрозаводский государственный университет».

<https://orcid.org/0000-0003-0620-9406>

Казакова Елена Лионовна — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики Физико-технического

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Olga S. Lavrukova — Dr. Sci. (Med.), Prof., Department of Anatomy, Histology, Topographic Anatomy and Operative Surgery, Pathological Anatomy, Forensic Medicine, Medical Institute, Petrozavodsk State University.

<https://orcid.org/0000-0003-0620-9406>

Elena L. Kazakova — Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assoc. Prof., General Physics Department, Institute of Physics and Technology, Petrozavodsk State University.

<https://orcid.org/0000-0002-8670-5380>

института федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петрозаводский государственный университет».

<https://orcid.org/0000-0002-8670-5380>

Поляков Алексей Юрьевич — заведующий отделом судебно-медицинской экспертизы трупов государственного бюджетного учреждения здравоохранения Республики Карелия «Бюро судебно-медицинской экспертизы».

<https://orcid.org/0000-0003-0067-8850>

Aleksey Yu. Polyakov — Head of the Department of Forensic Medical Examination of Corpses, Forensic Medical Expertise Bureau, Republic of Karelia.

<https://orcid.org/0000-0003-0067-8850>