

DOI: <https://doi.org/10.17816/fm16193>

Удельная электропроводность синовиальной жидкости как критерий давности наступления смерти человека при исследовании трупа в позднем посмертном периоде

А.А. Халиков¹, А.Ю. Вавилов², В.В. Агзамов¹, А.Р. Поздеев²¹ Башкирский государственный медицинский университет, Уфа, Россия;² Ижевская государственная медицинская академия, Ижевск, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Точность определения давности наступления смерти человека имеет существенное юридическое значение, поскольку от успешности решения этого вопроса во многом зависит исход расследования преступления против жизни и здоровья граждан. Особую актуальность вопрос определения давности наступления смерти приобретает в тех случаях, когда она наступила в условиях неочевидности, а мёртвое тело исследуют в позднем посмертном периоде. При отсутствии убедительных доказательств ненасильственной смерти сотрудники следственных органов исходят из версии убийства неизвестными лицами, а точное время смерти помогает сузить круг расследования и подтвердить или опровергнуть эту версию. Однако гнилостная биотрансформация мёртвого тела затрудняет работу судебно-медицинского эксперта, снижая точность ответов на вопросы следователя, что требует поиска новых объективных критериев.

Цель исследования — изучить изменения удельной электропроводности синовиальной жидкости коленных суставов трупа при развитии его гнилостной трансформации с математическим описанием выявленных изменений на основе модели многослойного перцептрона для обоснования перспективности определения давности наступления смерти кондуктометрическим способом.

Материалы и методы. Исследованы кондуктометрические свойства синовиальной жидкости коленных суставов 103 трупов лиц, умерших в возрасте 20–87 лет по различным причинам. Анализ проводили в позднем посмертном периоде (до 10 сут). Давность наступления смерти устанавливали комплексно с учётом медицинских, судебно-медицинских и следственных данных. Измерение электропроводности проводили с помощью портативного измерителя параметров «АКИП RLC 6109» с погрешностью 0,1% при частотах 100 Гц, 1 и 10 кГц.

Результаты. Установлено, что удельная электропроводность синовиальной жидкости при частотах 100 Гц и 1 кГц достоверно зависит от давности смерти. Оптимальная математическая модель, описывающая данную взаимосвязь, — полином второй степени. Также предложена модель с архитектурой многослойного перцептрона 2-5-1, обеспечивающая расчёт с погрешностью, не превышающей установленного в работе предела (достоверность >95%).

Заключение. Кондуктометрический анализ синовиальной жидкости коленных суставов трупа в позднем постмортальном периоде позволяет достоверно выявлять изменения её удельной электропроводности, обусловленные временем, прошедшим с момента смерти. Эти изменения могут служить основой для математической модели расчёта давности наступления смерти в позднем посмертном периоде. Наиболее точные предсказания обеспечивает модель № 2 с архитектурой многослойного перцептрона 2-5-1, что делает её наиболее пригодной для решения данной задачи.

Ключевые слова: электропроводность; синовиальная жидкость; коленный сустав; давность наступления смерти; поздний посмертный период; математическая модель; многослойный перцептрон.

Как цитировать:

Халиков А.А., Вавилов А.Ю., Агзамов В.В., Поздеев А.Р. Удельная электропроводность синовиальной жидкости как критерий давности наступления смерти человека при исследовании трупа в позднем посмертном периоде // Судебная медицина. 2025. Т. 11, № 1. С. 5–15. DOI: <https://doi.org/10.17816/fm16193>

DOI: <https://doi.org/10.17816/fm16193>

Electrical conductivity of synovial fluid as a measure of death time in late postmortem examination

Airat A. Khalikov¹, Alexey Yu. Vavilov², Vadim V. Agzamov¹, Alexey R. Pozdeev²

¹ Bashkir State Medical University, Ufa, Russia;

² Izhevsk State Medical Academy, Izhevsk, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The determination of time since death is of significant legal importance, because the findings of investigation of a crime against the life and health largely depends on the successful resolution of this issue. The determination of time since death becomes particularly significant in cases where the death circumstances are not evident and the cadaver is examined in the late postmortem period. Without conclusive evidence of a non-violent death, investigators assume homicide; the exact death time since death serves to narrow the options and confirm or refute this assumption. The putrefaction complicates the forensic examination, limiting the accuracy of answers to the investigator's questions and requiring the new objective expert criteria search.

AIM: To assess changes in electrical conductivity of synovial fluid of knee joints at the stage putrefaction with mathematical description of the revealed changes on the basis of a multilayer perceptron to substantiate the prospects of determining the time since death by conductometric method.

MATERIALS AND METHODS: Conductometric properties of synovial fluid of knee joints of 103 cadavers who died of various causes at the age of 20–87 years were studied. The study was performed in the late postmortem period (up to 10 days). The time since death was established comprehensively considering medical, forensic and investigative data. The electrical conductivity was measured using AKIP RLC 6109 measuring system, with an error of 0.1%, at frequencies of 0.1 kHz, 1 kHz, and 10 kHz.

RESULTS: Electrical conductivity of synovial fluid at 100 Hz and 1 kHz was found to depend significantly on the time since death. The optimal mathematical model describing this correlation is a second degree polynomial. A model with a 2-5-1 multilayer perceptron architecture is also presented with an error that does not exceed the set limit (reliability >95%).

CONCLUSIONS: Conductometric analysis of synovial fluid of cadavers' knee joints in the late postmortem period allows to reliably detect changes in its electrical conductivity determined by the time since death. These changes can serve as a mathematical model basis for calculating the time since death in the late postmortem period. The most accurate predictions are provided by model No. 2 with a 2-5-1 multilayer perceptron architecture, making it the most suitable for this task.

Keywords: electrical conductivity; synovial fluid; knee joint; time since death; late postmortem period; mathematical model; multilayer perceptron.

To cite this article:

Khalikov AA, Vavilov AY, Agzamov VV, Pozdeev AR. Electrical conductivity of synovial fluid as a measure of death time in late postmortem examination. *Russian Journal of Forensic Medicine*. 2025;11(1):5–15. DOI: <https://doi.org/10.17816/fm16193>

Received: 05.10.2024

Accepted: 07.11.2024

Published online: 21.03.2025

DOI: <https://doi.org/10.17816/fm16193>

在晚期死后尸体研究中，滑液单位电导率作为人类死亡时间的标准

Airat A. Khalikov¹, Alexey Yu. Vavilov², Vadim V. Agzamov¹, Alexey R. Pozdeev²¹ Bashkir State Medical University, Ufa, Russia;² Izhevsk State Medical Academy, Izhevsk, Russia

简介

理由。确定一个人死亡发生时间的准确性具有重要的法律意义，因为对危害公民生命和健康罪的调查结果在很大程度上取决于这一问题是否能够成功解决。当死亡发生在不明显的条件下，在晚期死后进行尸体检查时，确定死亡发生时间的问题就具有特别的重要性。在没有确凿的非暴力死亡证据的情况下，调查人员从不明身份者谋杀的判断出发，而准确的死亡时间有助于缩小调查范围，并将证实或推翻这一判断。尸体腐烂的生物转化加大了法医专家的工作难度，降低了对调查员问题回答的准确性，需要寻找新的客观鉴定标准。

研究目的。研究尸体膝关节滑液在腐烂转化过程中比电导率的变化，并基于多层感知器模型对检测到的变化进行数学描述，以通过电导法论证确定死亡时间的明晰度。

材料和方法。对103具20~87岁因各种原因死亡的尸体膝关节滑液的电导特性进行研究。在晚期死后（10天内）进行了分析。根据医学、法医和调查数据综合确定死亡发生的时间。使用便携式参数计“AKIP RLC 6109”在100 赫兹、1和10 千赫兹频率下，测量了电导率，误差为0.1%。

结果。证实，100赫兹和1千赫兹频率下滑液的单位电导率准确地取决于死亡时间。描述这种关系的最佳数学模型为二次多项式。此外，提出了一种具有2-5-1多层感知器架构的模型，提供的计算误差不超过作业中设定的极限（准确性>95%）。

结论。晚期死后尸体膝关节滑液的电导测定分析可以可靠地检测其单位电导率随死亡发生时间推移的变化。这些变化可以作为计算晚期死后死亡时间的数学模型的理由。具有2-5-1多层感知器架构的模型2提供了最准确的预测，使其更适合解决这类问题。

关键词：电导率；滑液；膝关节；死亡发生时间；晚期死后；数学模型；多层感知器。

引用本文：

Khalikov AA, Vavilov AYu, Agzamov VV, Pozdeev AR. 在晚期死后尸体研究中，滑液单位电导率作为人类死亡时间的标准. *Russian Journal of Forensic Medicine*. 2025;11(1):5–15. DOI: <https://doi.org/10.17816/fm16193>

收到: 05.10.2024

接受: 07.11.2024

发布日期: 21.03.2025

ОБОСНОВАНИЕ

Объективное определение давности наступления смерти — важная задача судебно-медицинской экспертизы, находящаяся в компетенции медицинских специалистов. Оно основано на анализе биологических процессов, закономерно развивающихся в организме после смерти в раннем и позднем постмортальных периодах. Точность установления давности наступления смерти имеет существенное юридическое значение, поскольку во многом влияет на исход расследования преступлений против жизни и здоровья граждан. Особую актуальность этот вопрос приобретает в случаях, когда смерть наступила в неочевидных обстоятельствах, а исследование тела проводят в позднем посмертном периоде [1–3], поскольку его обнаружили спустя значительное время после смерти. При отсутствии достоверных сведений о ненасильственном характере смерти сотрудники следственных органов чаще всего рассматривают версию убийства, предполагая криминальный умысел неизвестных лиц. Точное установление времени смерти значительно облегчает доказательную работу, позволяя либо подтвердить, либо опровергнуть эту гипотезу [4–6]. Однако гнилостная биотрансформация мёртвого тела существенно снижает диагностические возможности судебно-медицинского эксперта, затрудняя точное определение давности смерти [7]. Это обуславливает необходимость поиска новых достоверных экспертных критериев, способных повысить объективность исследований.

В современной научной литературе отмечают, что синовиальная жидкость крупных суставов трупа является перспективным объектом для изучения изменений в позднем постмортальном периоде. Разработан метод её исследования в условиях гнилостной трансформации тела, основанный на определении давности наступления смерти в соответствии с величиной оптической плотности синовиальной жидкости [6, 7]. Однако он имеет некоторые ограничения, обусловленные особенностями применяемой аппаратуры (фотоколориметра), что исключает возможность его применения в полевых условиях при выезде эксперта на место обнаружения трупа, поскольку прибор является стационарным. Также существует зависимость от качества объекта сравнения (дистиллированной воды), что может повлиять на результат инструментального исследования и, соответственно, на точность определения давности наступления смерти с использованием предложенного расчётного метода.

По нашему мнению, метод исследования электропроводности жидкости не имеет указанных ограничений, поскольку его можно применять в любых условиях, включая осмотр трупа на месте, по причине наличия портативных кондуктометров. Кроме того, данная аппаратура не относится к категории дорогостоящих приборов, а её освоение требует минимальных временных затрат, что способствует ускорению практического внедрения. Кондуктометрия является объективным количественным методом, который

с высокой точностью выявляет изменения в жидких биологических средах и уже зарекомендовала себя в различных областях медицинской диагностики [8].

С учётом вышеизложенного выдвинута версия о возможном повышении точности и объективности судебно-медицинской диагностики давности смерти человека на поздних сроках постмортального периода кондуктометрическим способом, что и определило содержание работы.

ЦЕЛЬ

Изучить изменения удельной электропроводности синовиальной жидкости коленных суставов трупа при развитии его гнилостной трансформации с математическим описанием динамики выявленных изменений на основе модели многослойного перцептрона для обоснования перспективности определения давности наступления смерти кондуктометрическим способом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Проведено экспериментальное неослеплённое одноцентровое проспективное выборочное неконтролируемое исследование. На различных сроках позднего посмертного периода исследованы кондуктометрические свойства синовиальной жидкости коленных суставов 103 трупов лиц, умерших в возрасте 20–87 лет по различным причинам.

Давность наступления смерти устанавливали комплексно с учётом медицинских, судебно-медицинских и следственных данных.

Критерии соответствия

Критерии включения: случаи судебно-медицинской экспертизы трупов на поздних сроках посмертного периода (до 10 сут), где давность наступления смерти подтверждена морфологически на основе анализа степени выраженности поздних трупных изменений, а также с учётом дополнительной информации.

Критерии невключения: случаи судебно-медицинской экспертизы трупов без признаков поздних трупных изменений или с таковыми, но при отсутствии достоверной информации о времени смерти человека.

Условия проведения

Работа выполнена на базе Государственного бюджетного учреждения здравоохранения Республики Башкортостан «Бюро судебно-медицинской экспертизы» Министерства здравоохранения Республики Башкортостан (ГБУЗ РБ «БСМЭ» МЗ РБ).

Продолжительность исследования

Исследование проведено в период с 2020 по 2024 год.

Описание медицинского вмешательства

Синовиальную жидкость трупа получали путём пункции коленного сустава через традиционные точки доступа [9] с использованием стерильного одноразового медицинского шприца 5,0 мл. Для обеспечения стандартных условий измерения удельной электропроводности шприц с образцом помещали в термостат при 25 °С для стабилизации температуры. Спустя 30–45 мин жидкость из шприца переливали в специальную кювету, предназначенную для изучения электропроводности. Измерение электропроводности синовиальной жидкости проводили с помощью портативного измерителя параметров RLC АК ИП-6109® («Аналитические контрольно-измерительные приборы», Россия), подключённого к компьютеру через USB интерфейс. Применяемый аппарат внесён в государственный реестр измерительных средств, имеет сертификат соответствия и позволяет измерять сопротивление, комплексное сопротивление, активное сопротивление, ёмкость и индуктивность с погрешностью 0,1% при частотах от 0,1 до 10 кГц.

Основной исход исследования

Получены значения электропроводности синовиальной жидкости коленных суставов трупов, исследованных на поздних сроках посмертного периода. Их определение осуществляли при трёх частотах синусоидального тока: 100 Гц, 1 и 10 кГц. Выявлены закономерности изменения удельной электропроводности синовиальной жидкости в зависимости от времени, прошедшего с момента смерти. Созданы математические модели, описывающие эту зависимость, что позволяет более точно оценивать длительность постмортального периода.

Анализ в подгруппах

В рамках достижения указанной выше цели исследования деление на подгруппы и анализ в них мы не проводили.

Методы регистрации исходов

Основной метод регистрации наблюдаемых исходов — фиксация значений удельной электропроводности в базе данных, сформированной в приложении Microsoft Excel офисного пакета программ Microsoft Office® (Microsoft, Соединённые Штаты Америки). Также мы осуществляли предварительную обработку полученных результатов в соответствии с правилами статистических исследований, рекомендованных к применению в биологических и медицинских научных работах [10]. Разработку математической модели выполняли в приложении Statistica 10.0® (Statsoft, Dell Inc., Соединённые Штаты Америки).

Этическая экспертиза

Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом ФГБОУ ВО «Башкирский государственный

медицинский университет» Минздрава России (протокол заседания № 3 от 26.02.2020).

Статистический анализ

Принципы расчёта размера выборки: размер выборки предварительно не рассчитывали.

Методы статистического анализа данных: в работе использованы классические методы статистического анализа — вычисление среднего арифметического в выборках, стандартного отклонения, ошибки среднего арифметического [10]. Математическое моделирование осуществляли с применением функций нейронных сетей на основе многомерного перцептрона в приложении Statistica 10.0® (Statsoft, Dell Inc., Соединённые Штаты Америки).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Объекты исследования

Объект исследования — синовиальная жидкость коленных суставов, изъятая от 103 трупов лиц различного пола в возрасте от 20 до 87 лет, умерших по различным причинам.

Для достижения цели исследования критически важной характеристикой изученных мёртвых тел была продолжительность посмертного периода (давность смерти): до 24 ч — 43; 25–48 ч — 17; 49–72 ч — 12; 73–96 ч — 6; 97–120 ч — 13; 121–144 ч — 1; 145–168 ч — 7; 169–192 ч — 2; 217–240 ч — 2.

Основные результаты исследования

Результаты исследований показали, что изменения удельной электропроводности синовиальной жидкости при частотах 100 Гц и 1 кГц детерминированы давностью смерти человека и не зависят от других сопряжённых факторов. Следует отметить, что взаимосвязь между величиной удельной электропроводности синовиальной жидкости и продолжительностью постмортального периода наиболее точно описывают математические модели, основанные на полиномиальной зависимости второй степени.

- На частоте тока 100 Гц:

$$\lambda_{100} = 0,3108 - 0,0486 \times TSD + 0,0335 \times TSD^2, (1)$$

где λ_{100} — величина удельной электропроводности на частоте 100 Гц, $\text{См}^{-1} \times 10^{-1}$; TSD — давность наступления смерти, сут; $r=0,93$, $p=0,01$.

- На частоте тока 1 кГц:

$$\lambda_{1k} = 0,2058 + 0,1766 \times TSD + 0,0121 \times TSD^2, (2)$$

где λ_{1k} — величина удельной электропроводности на частоте 1 кГц, $\text{См}^{-1} \times 10^{-1}$; TSD — давность наступления смерти, сут; $r=0,95$, $p=0,01$.

Установлено, что математические модели, созданные на основе многослойного перцептрона (MLP — Multilayer Perceptron) 2-5-1 (MLP 2-5-1) можно использовать для расчёта давности наступления смерти в соответствии со значением удельной электропроводности синовиальной жидкости коленного сустава с получаемым результатом, границы погрешности которого с вероятностью >95% [10] устанавливаются с помощью следующего неравенством:

$$0,837 \times TSD_a - 0,100 \leq TSD \leq 1,114 \times TSD_a + 0,039, (3)$$

где TSD — истинное значение давности наступления смерти, сут; TSD_a — расчётное значение давности наступления смерти, определённое с помощью математической модели на основе многослойного перцептрона, сут.

В настоящей статье мы не можем привести итоговое математическое выражение (модель с архитектурой MLP 2-5-1), рекомендуемое для применения в судебно-медицинской практике, поскольку оно составляет сущность заявки на изобретение, которая в настоящий момент проходит экспертизу в Федеральном институте промышленной собственности.

Дополнительные результаты исследования

Дополнительных результатов в рамках достижения цели настоящего исследования не получено.

Нежелательные явления

Нежелательные явления в рамках достижения цели настоящего исследования не наблюдали.

ОБСУЖДЕНИЕ

Резюме основного результата исследования

Возможность судебно-медицинской диагностики давности смерти человека путём изучения электропроводности синовиальной жидкости коленных суставов трупа человека обоснована. Динамику изменения этого биофизического параметра в течение позднего постмортального периода с высокой степенью достоверности можно описать полиномиальными выражениями в соответствии с частотой электрического тока 100 Гц (1) и 1 кГц (2) при максимальной давности наступления смерти до 10 сут.

Использование искусственной нейронной сети позволило разработать модель № 2 с архитектурой MLP 2-5-1 для предсказания давности наступления смерти в соответствии с величиной удельной электропроводности синовиальной жидкости трупа. Её адекватность проверена путём сопоставления расчётных результатов с подтверждённым временем наступления смерти.

Обсуждение основных результатов исследования

Динамика изменения удельной электропроводности синовиальной жидкости в постмортальном периоде в течение 10 сут показывает статистически значимые изменения ($p < 0,001$) при частотах электрического тока 100 Гц и 1 кГц, а также их отсутствие на частоте 10 кГц (рис. 1). Изменения удельной электропроводности синовиальной жидкости при данных частотах синусоидального тока зависят от давности смерти человека, что позволяет их учитывать для её определения.

Для визуализации тенденций изменения удельной электропроводности синовиальной жидкости в зависимости от продолжительности постмортального периода наиболее целесообразным является построение линий тренда, что предоставляет дополнительную возможность выразить наблюдаемые изменения в виде математического уравнения. Проведённый анализ показал, что наиболее точно этот процесс описан выражениями, основанными на полиномиальной зависимости исследуемых параметров (рис. 2).

Полиномы второй степени, устанавливающие взаимосвязь между продолжительностью постмортального периода и величиной удельной электропроводности синовиальной жидкости приведены в выражениях (1) и (2).

Для выявления значимых предикторов и построения моделей мы использовали нейронные сети. Искусственная нейронная сеть — это математическая модель вместе с её аппаратной и программной реализацией, построенная по принципу действия биологической нейронной сети и предназначенная для установления взаимосвязанности данных.

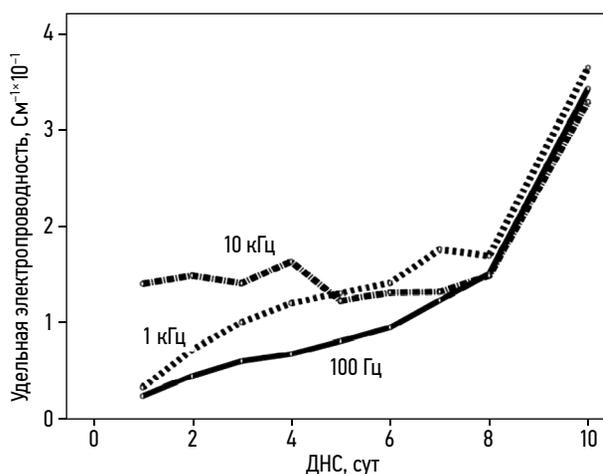


Рис. 1. Изменение удельной электропроводности синовиальной жидкости коленных суставов трупа человека в течение 10 сут при трёх частотах тока: 100 Гц, 1 и 10 кГц. ДНС — давность наступления смерти.

Fig. 1. Changes in the specific electrical conductivity of synovial fluid of the knee joints of a human corpse over 10 days at three current frequencies; 100 Hz, 1 and 10 kHz. ДНС — time since death.

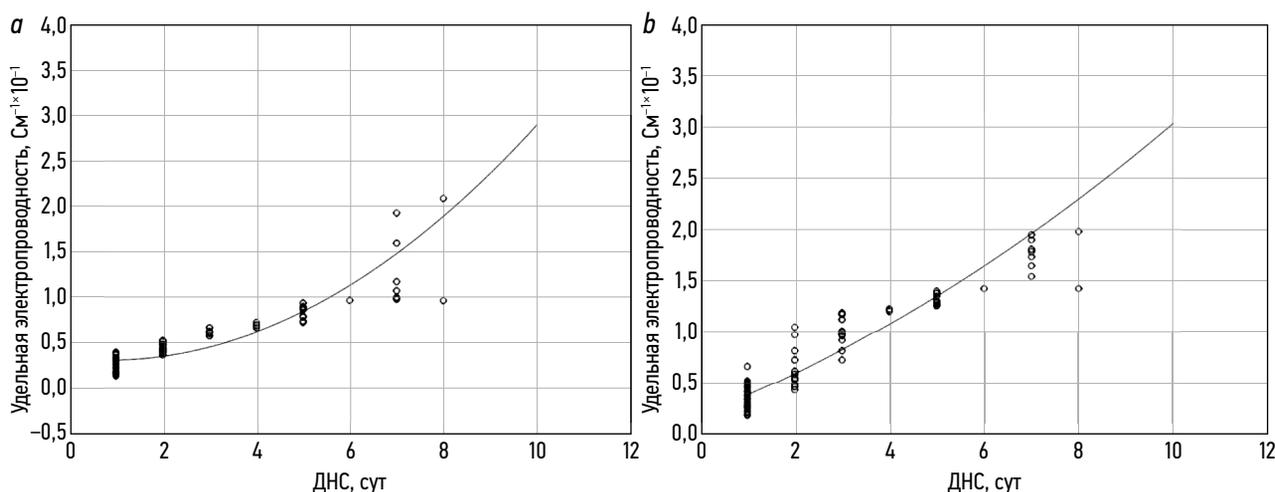


Рис. 2. Полиномиальные тренды динамики удельной электропроводности синовиальной жидкости в постмортальном периоде при частотах тока 100 Гц (a) и 1 кГц (b). ДНС — давность наступления смерти.

Fig. 2. Polynomial trends of the dynamics of specific electrical conductivity of synovial fluid in the postmortem period at current frequencies of 100 Hz (a) and 1 kHz (b). ДНС — time since death.

Для удобства выбора используемых в нейронной сети функций построена диаграмма рассеяния, демонстрирующая зависимость давности наступления смерти от величины удельной электропроводности при частотах электрического тока 100 Гц и 1 кГц (рис. 3). Анализ диаграммы позволяет сделать вывод, что для итоговой активации перцептрона подходят большинство функций:

- тождественная;
- гиперболическая;
- экспонентная.

На обучающей выборке активированы пять моделей, одна из которых основана на архитектуре MLP 2-9-1

Таблица 1. Веса в структуре модели № 2 с архитектурой многослойного перцептрона 2-5-1

Table 1. The weights in the structure of the model No. 2 with the architecture of a multilayer perceptron 2-5-1

Соединения	Значения весов
X01k → скрытый нейрон 1	-1,60556
X1k → скрытый нейрон 1	-0,8682
X01k → скрытый нейрон 2	-1,72512
X1k → скрытый нейрон 2	0,29258
X01k → скрытый нейрон 3	1,71824
X1k → скрытый нейрон 3	0,53656
X01k → скрытый нейрон 4	5,9973
X1k → скрытый нейрон 4	6,47249
X01k → скрытый нейрон 5	0,9848
X1k → скрытый нейрон 5	-1,13822
Входное смещение → скрытый нейрон 1	-0,32826
Входное смещение → скрытый нейрон 2	0,05079
Входное смещение → скрытый нейрон 3	-1,52135
Входное смещение → скрытый нейрон 4	-3,25862
Входное смещение → скрытый нейрон 5	0,55719
Скрытый нейрон 1 → давность наступления смерти, сут	-0,54822
Скрытый нейрон 2 → давность наступления смерти, сут	0,26344
Скрытый нейрон 3 → давность наступления смерти, сут	0,28115
Скрытый нейрон 4 → давность наступления смерти, сут	0,22141
Скрытый нейрон 5 → давность наступления смерти, сут	-0,07299
Скрытое смещение → давность наступления смерти, сут	0,30003

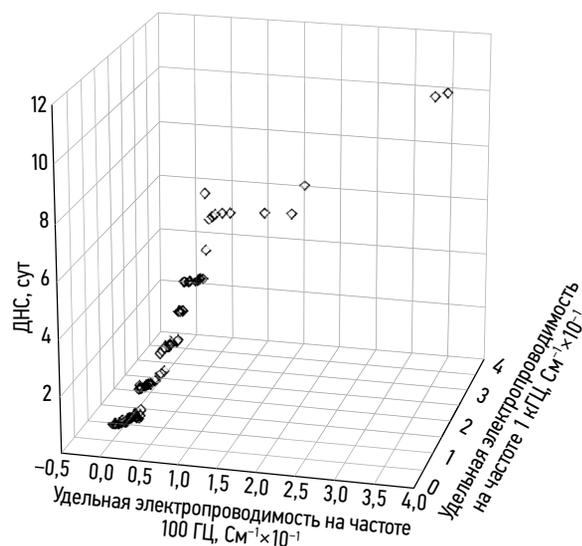


Рис. 3. Диаграмма рассеяния для, иллюстрирующая зависимость давности наступления смерти от удельной электропроводности при частотах тока 100 Гц и 1 кГц. ДНС — давность наступления смерти.

Fig. 3. Scatter plot illustrating the dependence of the time since on the specific conductivity at current frequencies of 100 Hz and 1 kHz. ДНС — time since death.

Таблица 2. Описательная статистика модели № 2 с архитектурой многослойного перцептрона 2-5-1**Table 2.** Descriptive statistic of the model No. 2 with the architecture of a multilayer perceptron 2-5-1

Варианты выборок	X01k	X1k	Давность наступления смерти, сут
Минимальное значение (обучающая выборка)	0,139 836	0,189 524	1
Максимальное значение (обучающая выборка)	3,371 541	3,569 507	10
Среднее значение (обучающая выборка)	0,585 607	0,868 022	3,014 29
Стандартное отклонение (обучающая выборка)	0,479 766	0,605 873	2,274 58
Минимальное значение (контрольная выборка)	0,123 623	0,183 834	1
Максимальное значение (контрольная выборка)	3,495 901	3,737 089	10
Среднее значение (контрольная выборка)	0,630 112	0,860 494	2,8
Стандартное отклонение (контрольная выборка)	0,832 917	0,910 015	2,541 09
Минимальное значение (тестовая выборка)	0,181 489	0,221 111	1
Максимальное значение (тестовая выборка)	2,075 426	1,975 186	8
Среднее значение (тестовая выборка)	0,532 192	0,721 428	2,266 67
Стандартное отклонение (тестовая выборка)	0,344 573	0,480 98	1,311 12
Минимальное значение (общая выборка)	0,123 623	0,183 834	1
Максимальное значение (общая выборка)	3,495 901	3,737 089	10
Среднее значение (общая выборка)	0,584 271	0,844 903	2,87
Стандартное отклонение (общая выборка)	0,538 828	0,641 749	2,272 61

Примечание. X01k и X1k — вход; давность наступления смерти — целевая.

Note. X01k and X1k — input; time since death — target.

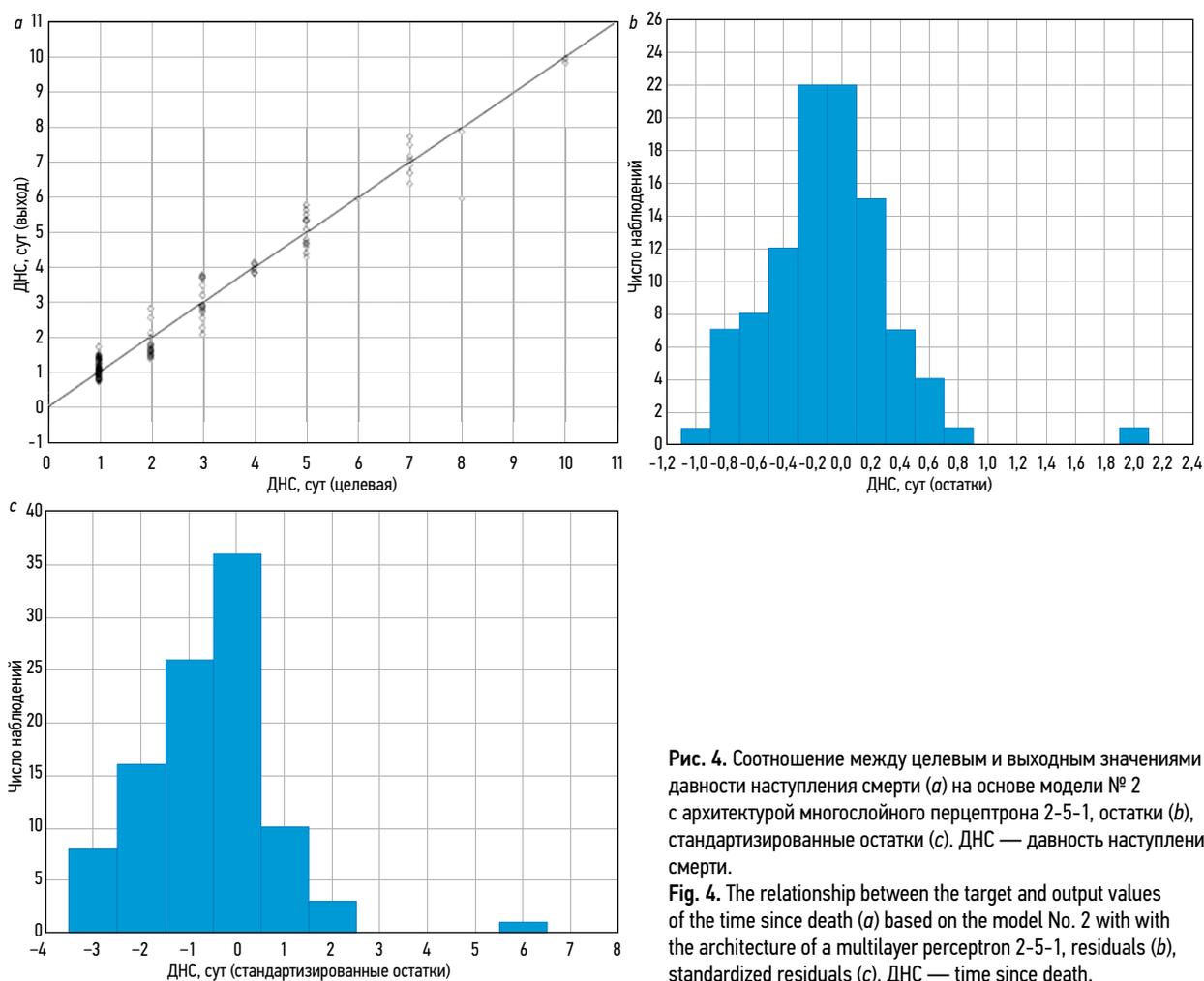


Рис. 4. Соотношение между целевым и выходным значениями давности наступления смерти (а) на основе модели № 2 с архитектурой многослойного перцептрона 2-5-1, остатки (b), стандартизированные остатки (c). ДНС — давность наступления смерти.

Fig. 4. The relationship between the target and output values of the time since death (a) based on the model No. 2 with the architecture of a multilayer perceptron 2-5-1, residuals (b), standardized residuals (c). ДНС — time since death.

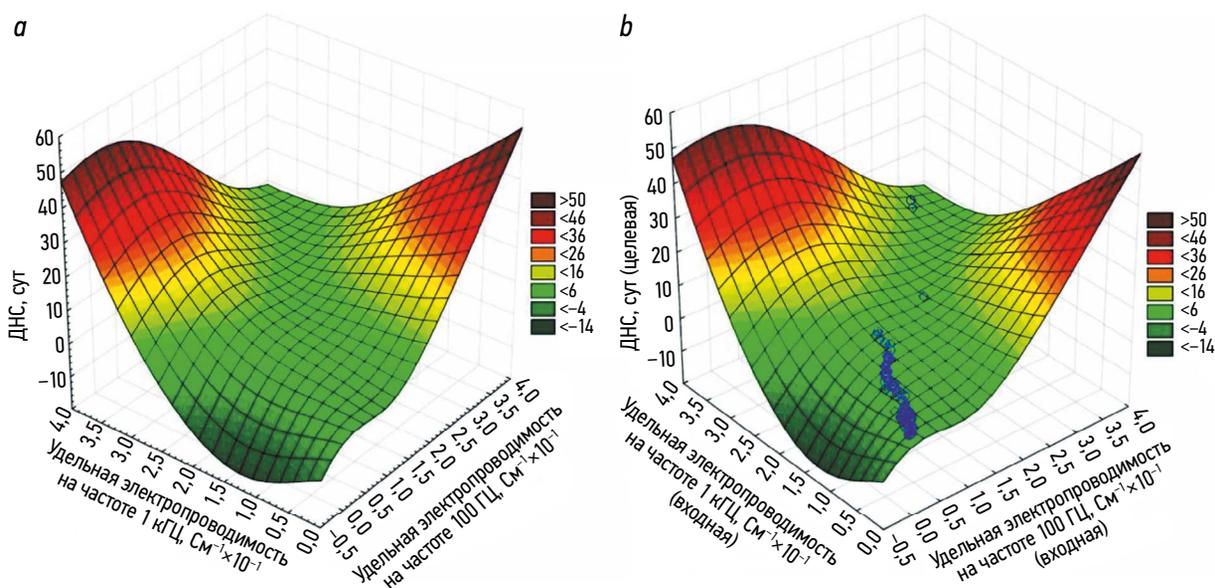


Рис. 5. Диаграммы поверхностей исходных данных (а) и данных, полученных с помощью модели № 2 с архитектурой многослойного перцептрона 2-5-1 (b). ДНС — давность наступления смерти.

Fig. 5. Surface diagrams of the original data (a) and the data obtained using model No. 2 with the architecture of a multilayer perceptron 2-5-1 (b). ДНС — time since death.

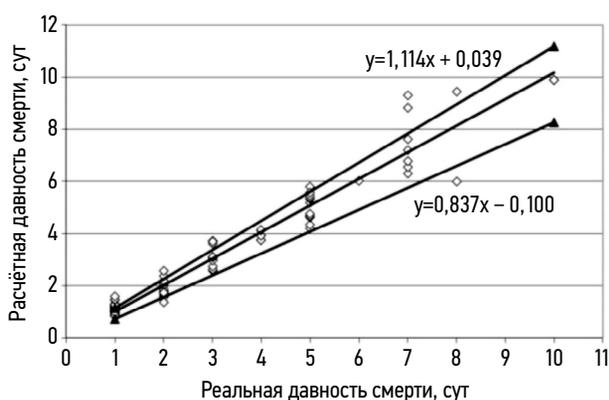


Рис. 6. Границы погрешности метода определения давности смерти с помощью модели № 2 с архитектурой многослойного перцептрона 2-5-1.

Fig. 6. Error limits of the method for determining the time of death using model No. 2 with the architecture of a multilayer perceptron 2-5-1.

(модель № 1) и четыре на архитектуре MLP 2-5-1 (модели № 2, 3, 4, 5).

Модель № 2 с наивысшей производительностью на обучающей выборке (0,980) имеет архитектуру MLP 2-5-1, она обучена с использованием алгоритма второго порядка BFGS (алгоритм Бройдена–Флетчера–Гольдфарба–Шанно) с 52 итерациями. Функция активации выходного нейрона — гиперболическая. На контрольной выборке отмечена одинаковая производительность у всех пяти моделей (0,930). На обучающей выборке ошибка обучения была ниже (0,103), в то время как на контрольной выборке — увеличена на 0,003. При этом лучшую производительность на контрольной выборке показала модель № 4 с архитектурой MLP 2-5-1, также обученная с использованием алгоритма

второго порядка BFGS (23 итерации), с гиперболической функцией выходных нейронов. На тестовой выборке ошибка самая низкая у модели № 2 (0,063). Таким образом, данная модель продемонстрировала наивысшие показатели точности при предсказании давности наступления смерти в соответствии со значением удельной электропроводности синовиальной жидкости коленных суставов трупа человека: 98,0, 99,3 и 98,8% ($p < 0,05$), что делает её оптимальной для решения данной задачи. В табл. 1 представлена структура модели № 2 с архитектурой MLP 2-5-1, а её описательная статистика продемонстрирована в табл. 2.

Данная модель демонстрирует высокую степень соотношения ($p \geq 95$) между целевым и выходным значениями давности наступления смерти (рис. 4, а). Остатки (см. рис. 4, b) и стандартизированные остатки (см. рис. 4, c) также подтверждают её согласование с исходными данными.

Более наглядно согласованность исходных и расчётными данными для модели № 2 показана на рис. 5 в виде графиков поверхностей.

Проверка точности предсказания давности наступления смерти в зависимости от величины удельной электропроводности синовиальной жидкости трупа, находящегося в стадии гнилостных изменений, выполнена путём сопоставления с контрольными значениями давности наступления смерти, установленными комплексно с учётом всех данных, доступных судебно-медицинскому эксперту. Получено неравенство (3), определяющее границы доверительного интервала, в котором с вероятностью $>95\%$ находятся значения давности наступления смерти, рассчитанные с помощью модели № 2 с архитектурой MLP 2-5-1. Графически полученные результаты представлены на рис. 6.

Ограничения исследования

В связи с тем, что трупы исследовали на поздних сроках посмертного периода, установить точное значение давности наступления смерти (до часов или минут) было невозможно. Однако, сопоставляя объективные данные, полученные из официальных источников и в ходе судебно-медицинской экспертизы, мы стремились к достижению максимально возможной точности установления контрольного значения давности смерти.

При этом размер выборки для достижения требуемой статистической мощности предварительно не рассчитан, что ограничивает репрезентативность полученных данных. Именно поэтому результаты исследования нельзя экстраполировать на генеральную совокупность аналогичных пациентов за пределами исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кондуктометрическое исследование синовиальной жидкости коленных суставов трупа в позднем постмортальном периоде позволяет с высокой степенью достоверности выявлять изменения её удельной электропроводности, напрямую связанные с временем, прошедшим с момента смерти человека.

Считаем, что разработанный алгоритм исследования и созданную модель на основе многослойного перцептрона после официальной регистрации в Федеральной службе по интеллектуальной собственности можно успешно применить на практике в качестве дополнительного метода для определения давности наступления смерти в течение 10 сут после её наступления.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. А.А. Халиков — научное редактирование рукописи; А.Ю. Вавилов — написание и редактирование рукописи; В.В. Агзамов — сбор данных; А.Р. Поздеев — сбор данных, написание и редактирование рукописи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Tenkov AA, Plaksin VO. *Forensic examination of a corpse in the late postmortem period: (rotting, adipocere, mummification, damage assessment): monograph*. Kursk: Publishing House of Kursk State Medical University; 2005. (In Russ.) EDN: QLKVZL
2. Tomilin VV, Zharov VV, Melnikov GM. Determining the time of death. *Forensic Medical Expertise*. 1984;27(4):44–47. (In Russ.)
3. Froede RC. *Handbook of forensic pathology*. 2nd edition. College of American pathologist; 2003.
4. Kil'dyushov EM, Ermakova YuV, 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. doi: 10.19048/2411-8729-2018-4-1-34-38 EDN: YWDARF
5. Indiaminov SI, Zhumanov ZE, Blinova SA. Problems of establishing the prescription of death. *Forensic Medical Expertise*. 2020;63(6):45–50. doi: 10.17116/sudmed20206306145 EDN: FXLSCS

Этическая экспертиза. Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России (протокол заседания № 3 от 26.02.2020).

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали один внешний рецензент, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. A.A. Khalikov: scientific editing of the manuscript; A.Yu. Vavilov writing and scientific editing of the manuscript text; V.V. Agzamov: data collection; A.R. Pozdeev writing and scientific editing of the manuscript text. Thereby, all authors provided approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval. The study was approved by the local ethics committee of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Bashkir State Medical University" of the Ministry of Health of the Russian Federation (protocol No. 3 dated 02/26/2020).

Funding sources. No funding.

Disclosure of interests. The authors have no relationships, activities or interests for the last three years related with for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality. When creating this work, the authors did not use previously published information (text, illustrations, data).

Data availability statement. The editorial policy on data sharing does not apply to this work.

Generative AI. Generative AI technologies were not used for this article creation.

Provenance and peer-review. This article was submitted to the Journal on an unsolicited basis and reviewed according to the usual procedure. One external reviewer, a member of the editorial board, and the scientific editor of the Journal participated in the peer-review.

6. Sadrtidinov A, Khalikov A, Kanzafarova G. Photocolorimetric diagnosis of period of death, for the examination of putrid transformed corpse. *Meditinskaya ekspertiza i parvo*. 2016;(5):32–36. EDN: WWYWFT
7. Sadrtidinov AG, Vavilov AYU, Khalikov AA, Naydenova TV. Determination of time of death by photocolorimetric method in putrid biotransformation corpse. *Modern problems of science and education*. 2017;(2):10. EDN: YLKHRZ
8. Popov VL, Kazakova EL, Lavrukova OS, Polyakov AY. On the prospects of the impedance monitoring method for determining the prescription of death coming. *Forensic Medical Expertise*. 2023;66(2):20–25. doi: 10.17116/sudmed20236602120 EDN: MQZICF
9. Yumashev GS. *Traumatology and orthopedics*. 2nd edition. Moscow: Meditsina; 1983. (In Russ.)
10. Tarnovskaya LI. *Statistics: a study guide*. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University; 2008. (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ

* **Агзамов Вадим Валерьевич;**

адрес: Россия, 450008, Уфа, ул. Ленина, д. 3;

ORCID: 0000-0001-9845-2280;

eLibrary SPIN: 2601-5385;

e-mail: expert.sudmed@yandex.ru

Халиков Айрат Анварович, д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0003-1045-5677;

eLibrary SPIN: 1895-7300;

e-mail: airat.expert@mail.ru

Вавилов Алексей Юрьевич, д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0002-9472-7264;

eLibrary SPIN: 3275-3730;

e-mail: izhsudmed@hotmail.com

Поздеев Алексей Родионович, д-р мед. наук, доцент;

ORCID: 0000-0002-6302-5219;

eLibrary SPIN: 2242-4828;

e-mail: apozdeev@bk.ru

AUTHORS' INFO

* **Vadim V. Agzamov,** MD;

address: 3 Lenin st, Ufa, Russia, 450008;

ORCID: 0000-0001-9845-2280;

eLibrary SPIN: 2601-5385;

e-mail: expert.sudmed@yandex.ru

Airat A. Khalikov, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;

ORCID: 0000-0003-1045-5677;

eLibrary SPIN: 1895-7300;

e-mail: airat.expert@mail.ru

Alexey Yu. Vavilov, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;

ORCID: 0000-0002-9472-7264;

eLibrary SPIN: 3275-3730;

e-mail: izhsudmed@hotmail.com

Alexey R. Pozdeev, MD, Dr. Sci. (Medicine), Assistant Professor;

ORCID: 0000-0002-6302-5219;

eLibrary SPIN: 2242-4828;

e-mail: apozdeev@bk.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author