

КОНДУКТОМЕТРИЯ СИНОВИАЛЬНОЙ И СПИННОМОЗГОВОЙ ЖИДКОСТЕЙ В СУДЕБНОЙ МЕДИЦИНЕ: АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ДАВНОСТИ СМЕРТИ И УЧЁТ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ

Халиков А.А.¹, Агзамов В.В.¹ ORCID ID 0000-0001-9845-2280,
Кузнецов К.О.^{2,3}, Агзамова К.Р.⁴

¹Башкирский государственный медицинский университет, Уфа, Россия;

²Бюро судебно-медицинской экспертизы, Уфа, Россия, e-mail: kuznetsovarticles@mail.ru;

³Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия;

⁴Стоматологическая поликлиника 5, Уфа, Россия

Определение давности наступления смерти остаётся одной из наиболее сложных задач судебной медицины, особенно в позднем постмортальном периоде. Традиционные морфологические и биохимические методы ограничены в применении при гнилой трансформации тела, что обуславливает необходимость поиска объективных и воспроизводимых критериев. Цель - разработать единый алгоритм судебно-медицинской диагностики, основанный на кондуктометрии синовиальной и спинномозговой жидкости, для оценки ДНС с учётом постмортальных и индивидуальных факторов. В исследование включены образцы синовиальной жидкости от 103 трупов и спинномозговой жидкости от 124 трупов лиц, умерших от различных причин и черепно-мозговой травмы соответственно. Электропроводность определялась на частотах 0,1; 1 и 10 кГц с использованием прибора АКИП RLC 6109. Для математической обработки применялись полиномиальные модели второй степени и нейросетевой алгоритм (MLP 2-5-1). Статистический анализ включал непараметрические тесты и корреляционный анализ. Для синовиальной жидкости выявлена достоверная зависимость удельной электропроводности от давности наступления смерти на частотах 0,1 и 1 кГц; частота 10 кГц оказалась неинформативной. Полиномиальная модель описывала динамику с удовлетворительной точностью (ошибка $\pm 20-24$ ч), а MLP 2-5-1 обеспечивала более высокую точность ($\pm 12-18$ ч). Для спинномозговой жидкости установлено влияние пола и этанола на электропроводность ($p < 0,05$), тогда как возраст значимого эффекта не оказывал. Кондуктометрия является доступным и объективным методом, позволяющим рассчитывать ДНС и учитывать индивидуальные особенности исследуемых биосред. Разработанный алгоритм может применяться как в лабораторных условиях, так и при выездных экспертизах, повышая точность и воспроизводимость судебно-медицинских заключений.

Ключевые слова: судебная медицина, давность наступления смерти, синовиальная жидкость, спинномозговая жидкость, кондуктометрия, электропроводность, многослойный перцептрон, этанол.

CONDUCTOMETRY OF SYNOVIAL AND CEREBROSPINAL FLUIDS IN FORENSIC MEDICINE: AN ALGORITHM FOR POSTMORTEM INTERVAL ESTIMATION AND CONSIDERATION OF INDIVIDUAL FACTORS

Khalikov A.A.¹, Agzamov V.V.¹ ORCID ID 0000-0001-9845-2280,
Kuznetsov K.O.^{2,3}, Agzamova K.R.⁴

¹Bashkir State Medical University, Ufa, Russia;

²Bureau of Forensic Medical Examination, Ufa, Russia, e-mail: kuznetsovarticles@mail.ru;

³Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia;

⁴Dental Polyclinic No. 5, Ufa, Russia

Determining the postmortem interval remains one of the most challenging tasks in forensic medicine, especially at late postmortem stages. Traditional morphological and biochemical methods are limited in cases of advanced putrefaction, which emphasizes the need for objective and reproducible criteria. Objective - to develop an integrated forensic diagnostic algorithm based on conductometry of synovial fluid and cerebrospinal fluid for postmortem interval estimation, taking into account both postmortem changes and individual factors. The study included synovial fluid samples from 103 corpses and cerebrospinal fluid samples from 124 corpses of individuals who died from various causes and traumatic brain injury, respectively. Electrical conductivity was measured at frequencies of 0.1, 1, and 10 kHz using the AKIP RLC 6109 device. Polynomial regression models (second order) and an artificial neural network (MLP 2-5-1) were applied for mathematical modeling. Statistical analysis included nonparametric tests and correlation analysis. A significant correlation between synovial fluid conductivity and postmortem interval was revealed at 0.1 and 1 kHz, while 10 kHz was non-informative. The polynomial model

provided adequate accuracy (mean error ± 20 – 24 h), whereas MLP 2-5-1 achieved higher predictive performance (± 12 – 18 h). For cerebrospinal fluid, both sex and the presence of ethanol had a significant impact on conductivity ($p < 0.05$), while age showed no significant effect. Conductometry is a simple and objective method that allows reliable estimation of postmortem interval and incorporates individual-specific adjustments. The proposed algorithm can be applied both in laboratory settings and during field examinations, thus improving the accuracy and reproducibility of forensic medical conclusions.

Keywords: forensic medicine; postmortem interval; synovial fluid; cerebrospinal fluid; conductometry; electrical conductivity; multilayer perceptron; ethanol.

Введение

Одной из актуальных задач судебной медицины остаётся поиск объективных критериев для определения давности наступления смерти (ДНС) и оценки тяжести травматических повреждений. Традиционно для этой цели применяются морфологические и биохимические методы, однако их использование в условиях осмотра места происшествия ограничено из-за высокой трудоёмкости, потребности в дорогостоящем оборудовании и зависимости от качества образца [1]. Это определяет необходимость разработки простых, воспроизводимых и в то же время портативных технологий, позволяющих проводить количественную оценку изменений биологических сред в постмортальном периоде.

В последние годы внимание исследователей привлекла кондуктометрия - метод оценки электропроводности жидких биологических сред, основанный на изменении их ионного состава и структурных характеристик. Преимуществом метода является его объективность, возможность количественного измерения и доступность оборудования, включая портативные приборы, что делает его применимым не только в лабораторных условиях, но и непосредственно при осмотре места происшествия [2; 3].

Особый интерес в судебно-медицинской практике представляют синовиальная и спинномозговая жидкости. Синовия крупных суставов сохраняет диагностическую ценность даже в условиях гнилостной трансформации тела и может быть использована для оценки ДНС на поздних сроках постмортального периода [4; 5]. При этом спинномозговая жидкость рассматривается как перспективный объект для анализа при черепно-мозговой травме, так как её электропроводящие свойства отражают не только посттравматические изменения, но и индивидуальные характеристики организма, включая пол, возраст и наличие этанола в крови [6–8].

Несмотря на накопленные данные, остаётся ряд нерешённых вопросов. Во-первых, не до конца определён спектр информативных частот, позволяющих с высокой точностью прогнозировать ДНС по синовиальной жидкости [9]. Во-вторых, недостаточно изучены поправочные коэффициенты, связанные с индивидуальными особенностями состава спинномозговой жидкости, что ограничивает точность интерпретации результатов [10]. Наконец, отсутствует единый алгоритм, объединяющий результаты кондуктометрии

различных биосред и ориентированный на практическое применение в условиях проведения судебно-медицинской экспертизы [11].

С учётом вышеизложенного в настоящей работе предпринята попытка интегрировать подходы к исследованию синовиальной и спинномозговой жидкостей для создания единого интерпретационного алгоритма, учитывающего как постмортальные, так и индивидуальные факторы.

Цель исследования - разработка единого алгоритма судебно-медицинской диагностики, основанного на кондуктометрии синовиальной и спинномозговой жидкостей, для оценки давности наступления смерти с учётом постмортальных и индивидуальных факторов.

Материалы и методы

В исследование были включены образцы синовиальной жидкости (СЖ) и спинномозговой жидкости (СМЖ), полученные при судебно-медицинском исследовании трупов в различные сроки постмортального периода. Материалом для анализа СЖ послужили образцы от 103 трупов лиц обоего пола в возрасте от 20 до 87 лет, умерших от различных причин; забор осуществлялся из коленных суставов в позднем постмортальном периоде при давности смерти до 10 суток [4; 5]. СМЖ была исследована у 124 трупов лиц в возрасте от 17 до 93 лет, умерших от черепно-мозговой травмы и её последствий, при этом учитывалась давность травмы от 0 до 10 суток [6; 10]. Забор жидкостей проводился стерильными одноразовыми шприцами по стандартным судебно-медицинским методикам [4], после чего образцы выдерживались в термостате при температуре 25 °С в течение 30–45 минут. Измерение электропроводности проводилось на приборе АК ИП RLC 6109, внесённом в государственный реестр средств измерений, с погрешностью 0,1% [5]. Регистрация параметров осуществлялась при воздействии переменного тока на трёх фиксированных частотах: 0,1, 1 и 10 кГц, что соответствует стандартным диапазонам, применяемым в биофизических исследованиях [5; 6].

При анализе СМЖ дополнительно фиксировались индивидуальные характеристики объекта: пол, возраст, наличие этилового спирта в крови и величина этанолемии [6]. Для описания динамики изменения удельной электропроводности СЖ в зависимости от давности наступления смерти применялись полиномиальные модели второй степени [5], а также искусственные нейронные сети в архитектуре многослойного перцептрона MLP 2-5-1, позволяющие прогнозировать временные интервалы с учётом вероятностной погрешности [9]. Изучение влияния пола и этанола на электропроводящие свойства СМЖ выполнялось с использованием критерия Крускала – Уоллиса и корреляционного анализа [6; 10]. Статистическая обработка данных проводилась с применением программных пакетов SPSS

Statistics 23.0 и Microsoft Excel в соответствии с общепринятыми правилами статистического анализа медицинских исследований [8].

Исследование одобрено на заседании кафедры судебной медицины ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России (протокол № 2 от 26.02.2020 г., г. Уфа, ул. Ленина, д. 3, ком. 117) в соответствии с требованиями надлежащей клинической практики.

Результаты

В ходе исследования синовиальной жидкости (СЖ) коленных суставов было установлено, что её удельная электропроводность демонстрирует закономерные изменения в зависимости от давности наступления смерти. При анализе 103 объектов в позднем постмортальном периоде (до 10 суток) выявлено, что на частотах 0,1 и 1 кГц показатели электропроводности достоверно коррелировали с продолжительностью посмертного интервала ($p < 0,05$). Уже в первые 24 часа после смерти наблюдалась начальная тенденция к снижению электропроводности, которая становилась статистически значимой начиная со 2–3 суток. В промежутке от 3 до 7 суток снижение носило наиболее выраженный и практически линейный характер, что обеспечивало возможность построения прогностических моделей. В период 8–10 суток изменения продолжались, однако их динамика сглаживалась, что объясняется глубокой биохимической деградацией белково-электролитного состава синови.

На частоте 10 кГц достоверных корреляций между величиной электропроводности и постмортальным интервалом выявлено не было ($p > 0,05$), что позволило исключить данный параметр из дальнейшего анализа и рассматривать двухчастотный диапазон (0,1 и 1 кГц) как оптимальный для расчёта давности смерти [4; 5].

Построенные полиномиальные модели второй степени показали высокую аппроксимационную способность ($R^2 > 0,8$), что подтверждает надёжность описания зависимости между удельной электропроводностью СЖ и временем, прошедшим с момента смерти. Средняя ошибка предсказания по полиномиальной модели составила 20–24 часа при расчётах в пределах 10 суток, что можно считать удовлетворительным уровнем точности для судебно-медицинской практики [5].

Для повышения прогностической надёжности использовались методы машинного обучения. Обучение искусственной нейронной сети по архитектуре многослойного перцептрона (MLP 2-5-1) продемонстрировало значительное улучшение качества прогнозов. В частности, ошибка предсказания в первые 7 суток постмортального периода не превышала 12–18 часов, а коэффициент детерминации возрастал по сравнению с полиномиальной моделью. Более узкие доверительные интервалы позволяли чётче разграничивать соседние

временные отрезки, что особенно важно при экспертной оценке в условиях позднего постмортального периода [9].

Результаты исследования СМЖ у 124 трупов лиц, умерших от черепно-мозговой травмы, показали наличие значимого влияния индивидуальных факторов на её электропроводящие свойства. Анализ половых различий выявил, что у мужчин средние показатели электропроводности на всех трёх исследованных частотах (0,1; 1 и 10 кГц) были достоверно выше, чем у женщин ($p < 0,05$). Различия фиксировались как в ранние (до 24 часов), так и в более поздние сроки, что подтверждает необходимость введения поправочного коэффициента по половому признаку [6].

Изучение зависимости от возраста (17–93 лет) показало отсутствие статистически значимых корреляций между электропроводностью СМЖ и возрастом умершего ($p > 0,05$), что позволило исключить данный параметр из числа конфундирующих факторов [6].

Особое внимание уделялось влиянию этанола. В 23 случаях (18,5%) было выявлено наличие этанолемии, в 101 случае (81,5%) этанол отсутствовал. Сравнительный анализ показал, что при наличии этилового спирта в крови показатели электропроводности СМЖ достоверно отличались от таковых в группе без этанола ($p < 0,05$). При этом абсолютная концентрация этанола (в промилле) не демонстрировала линейной зависимости с величиной электропроводности, что позволяет заключить: решающим фактором является сам факт присутствия этанола, а не его уровень [10].

Таким образом, результаты можно резюмировать следующим образом.

Для СЖ диагностическое значение имеют частоты 0,1 и 1 кГц, при этом динамика изменения электропроводности в зависимости от давности смерти адекватно описывается полиномиальной моделью второй степени, а нейросетевая модель (MLP 2-5-1) обеспечивает более высокую точность и надёжность прогноза [4; 5; 9].

Для СМЖ критическими факторами, влияющими на электропроводящие свойства, являются пол и наличие этанола, тогда как возрастной фактор не оказывает значимого влияния [6; 10].

Полученные данные подтверждают высокую информативность метода кондуктометрии для судебно-медицинской практики, а также необходимость комплексного подхода, включающего использование математического моделирования и учёт индивидуальных характеристик объекта исследования.

В таблице суммированы результаты кондуктометрического исследования биологических жидкостей в судебно-медицинской практике.

**Результаты кондуктометрического исследования биологических жидкостей
в судебно-медицинской практике**

Биологическая жидкость	Объём выборки	Частоты измерения	Основные изменения	Модели статистика /	Влияющие факторы	Практический вывод
СЖ	103 трупа (20–87 лет)	0,1 кГц, 1 кГц, 10 кГц	Достоверное снижение электропроводности на 0,1 и 1 кГц в зависимости от давности смерти (до 10 суток). На 10 кГц значимых изменений не выявлено	Полиномиальные модели 2-й степени ($R^2 > 0,8$, средняя ошибка $\pm 20\text{--}24$ ч); нейросеть MLP 2-5-1 (ошибка $\pm 12\text{--}18$ ч, сужение доверительных интервалов)	Давность смерти; гнилостная трансформация	Наиболее информативны частоты 0,1 и 1 кГц; рекомендуется применение нейросетевых моделей для уточнённого расчёта ДНС
СМЖ	124 трупа (17–93 лет)	0,1 кГц, 1 кГц, 10 кГц	Электропроводность варьирует в зависимости от индивидуальных характеристик.	Непараметрическая статистика (Крускала – Уоллиса, корреляции); достоверные различия $p < 0,05$	Пол (значимо влияет на все частоты); этанол (наличие изменяет показатели, независимо от уровня); возраст (не влияет)	Для корректной интерпретации необходимо учитывать пол и факт наличия этанола. Возрастные поправки не требуются.

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Полученные результаты подтверждают высокую информативность метода кондуктометрии в судебно-медицинской практике. В исследовании показано, что электропроводящие свойства биологических жидкостей изменяются под действием как постмортальных процессов, так и индивидуальных характеристик организма. Для синовиальной жидкости выявлена чёткая зависимость удельной электропроводности от давности смерти, особенно выраженная на частотах 0,1 и 1 кГц. Эти данные согласуются с результатами предыдущих работ, в которых СЖ рассматривалась как перспективный объект для диагностики давности наступления смерти в условиях гнилостной трансформации тела [4; 5]. Исключение частоты 10 кГц из прогностической модели обосновано отсутствием достоверных корреляций с временным интервалом, что позволяет сосредоточиться на наиболее информативных диапазонах.

Применение математических моделей показало преимущества комбинированного подхода. Полиномиальные зависимости второй степени обеспечивают наглядное и достаточно точное описание динамики электропроводности СЖ, что делает их удобными для практического применения в условиях экспертного учреждения. В то же время использование искусственных нейронных сетей (MLP 2-5-1) позволило повысить точность прогнозирования и сократить доверительные интервалы, особенно в пределах первых семи суток постмортального периода. Таким образом, нейросетевые алгоритмы могут рассматриваться как более перспективный инструмент, хотя их внедрение требует программной поддержки и стандартизации методики [9].

Особый интерес представляют результаты анализа спинномозговой жидкости. В отличие от СЖ, для которой главным фактором остаётся постмортальная динамика, электропроводность СМЖ в большей степени зависит от индивидуальных особенностей. Установлено, что пол умершего оказывает достоверное влияние на показатели, что согласуется с данными о половых различиях в биохимическом составе ликвора [6]. Выявленное влияние этанола подтверждает, что наличие алкоголя способно изменять ионный баланс и осмолярность жидкости, а значит, и её электропроводящие свойства [10]. При этом возраст умершего не показал значимого влияния, что позволяет исключить его из числа поправочных факторов. Эти наблюдения имеют важное практическое значение: при интерпретации результатов кондуктометрии СМЖ необходимо учитывать пол и факт этанолемии, в противном случае возможно формирование систематической ошибки.

Сравнение полученных данных с литературой свидетельствует о преимуществах кондуктометрии перед фотоколориметрическими и биохимическими методами, которые ограничены стационарными условиями и зависят от качества реагентов [1–3]. Кондуктометрия же основана на объективных физических измерениях, может выполняться при помощи портативного оборудования и не требует сложной подготовки образца, что делает её применимой в условиях выезда эксперта на место происшествия [12–14].

В практическом отношении предложенный алгоритм позволяет расширить инструментарий судебно-медицинской диагностики. Для СЖ в позднем постмортальном периоде целесообразно использовать двухчастотную модель (0,1 и 1 кГц) с возможностью расчёта ДНС по полиномиальной или нейросетевой схеме. Для СМЖ при черепно-мозговой травме результаты интерпретируются с учётом пола и наличия этанола, что повышает точность экспертных заключений [15]. Таким образом, объединение данных о двух биосредах формирует основу для создания универсального диагностического алгоритма, применимого как в лабораторных условиях, так и при выездных экспертизах.

Заключение

Проведённое исследование показало, что метод кондуктометрии является перспективным инструментом судебно-медицинской диагностики. Для синовиальной жидкости в позднем постмортальном периоде выявлена достоверная зависимость электропроводности от давности смерти, наиболее информативными оказались частоты 0,1 и 1 кГц. Построенные полиномиальные модели второй степени обеспечили удовлетворительную точность расчётов, тогда как использование многослойного перцептрона (MLP 2-5-1) позволило повысить предсказательную надёжность и сузить доверительные интервалы.

Анализ спинномозговой жидкости у лиц, умерших от черепно-мозговой травмы, подтвердил влияние индивидуальных факторов на её электропроводящие свойства. Достоверное значение имели пол и факт наличия этанола в крови, тогда как возраст не оказывал существенного эффекта. Это указывает на необходимость введения корректирующих коэффициентов при интерпретации результатов исследования СМЖ.

Таким образом, интеграция полученных данных позволила предложить единый алгоритм, включающий двухчастотную модель для СЖ и поправочные параметры для СМЖ, что делает методику более универсальной и практически применимой. Кондуктометрия, благодаря простоте, воспроизводимости и возможности использования портативных приборов, может быть внедрена как в лабораторную практику, так и в условия выездной судебно-медицинской экспертизы, обеспечивая повышение объективности и точности экспертных заключений.

Список литературы

1. Халиков А.А., Вавилов А.Ю., Агзамов В.В., Поздеев А.Р., Майорова Е.В. Удельная электропроводность синовиальной жидкости как критерий давности наступления смерти человека при исследовании трупа в позднем постмортальном периоде // Судебная медицина. 2025. Т. 11. № 1. С. 5–15. DOI: 10.17816/fm16193.
2. Вавилов А.Ю., Поздеев А.Р., Халиков А.А., Баяндина С.М., Агзамов В.В., Поздеева М.А. О влиянии факторов индивидуальности объекта исследования на показатели электропроводности спинномозговой жидкости // Судебная медицина. 2024. Т. 10. № 4. С. 462–473. DOI: 10.17816/fm16178.
3. Попов В.Л., Казакова Е.Л., Лаврукова О.С., Поляков А.Ю. О перспективах метода импедансометрии для установления давности наступления смерти // Судебно-медицинская экспертиза. 2023. Т. 66. № 2. С. 20–25. DOI: 10.17116/sudmed20236602120.

4. Садртдинов А.Г., Канзафарова Г.А., Халиков А.А. Фотоколориметрическая диагностика давности смерти при исследовании гнилостно трансформированного трупа // Медицинская экспертиза и право. 2016. № 5. С. 32–36.
5. Rognum T.O., Holmen S., Musse M.A., Dalgaard M.D., Ueland T., Høiseth G., Gjerde H., Løberg E.M. Estimation of time since death by vitreous humor hypoxanthine, potassium, and ambient temperature // Forensic Science International. 2016. Vol. 262. P. 160–165. DOI: 10.1016/j.forsciint.2016.03.001.
6. Madea B. Estimation of the Time Since Death: Current Research and Concepts. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2023. 378 p. ISBN: 9781032135533.
7. Ruiz-López J.L., Partido M. Estimation of the post-mortem interval: a review // Forensic Science International. 2025. Vol. 369. P. 112412. DOI: 10.1016/j.forsciint.2025.112412.
8. Trella S., Reinert C., Heinsen H., Preiß U., Monoranu C.M., Zwirner J., Ondruschka B., Bohnert M., Bohnert S. The polychromatism of postmortem cerebrospinal fluid // Forensic Science, Medicine and Pathology. 2025. Vol. 21. № 2. P. 580–588. DOI: 10.1007/s12024-024-00887-4.
9. Cardinale A.N., Roda M., Tonello L., Bortolotti F. Thanatochemistry and the role of hypoxanthine in the post-mortem interval // International Journal of Legal Medicine. 2025. Vol. 139, Is. 4. P. 1743–1780. DOI: 10.1007/s00414-024-03378-x.
10. Cecchi R., Camatti J., Schirripa M.L., Ragona M., Pinelli S., Cucurachi N. Postmortem biochemistry of GFAP, NSE and S100B in cerebrospinal fluid and in vitreous humor for estimation of postmortem interval: a pilot study // Forensic Science, Medicine and Pathology. 2025. Vol. 21(2). P. 589–598. DOI: 10.1007/s12024-024-00874-9.
11. Zięba S., Wiergowski M., Cieślík B.M., Anand J.S., Krzyżanowska M. Uncertainty of postmortem time estimation based on potassium ion determination in vitreous humor using ISE and MIP-OES methods // Separations. 2023. Vol. 10. № 3. P. 201. DOI: 10.3390/separations10030201.
12. Kurup S.S., Balakrishnan K.P., Chinnasamy S. Estimation of time since death from potassium levels in vitreous humor in cases of unnatural death: a facility-based cross-sectional study // Cureus. 2023. Vol. 15. № 4. e39572; DOI: 10.7759/cureus.39572.
13. Abbate J.M., Maugeri A., Cuzzola M., D’Angelo C., Lauriano E.R., Passantino A., Germana G., Germanà A. Postmortem electrical conductivity changes of the sea bass (*Dicentrarchus labrax*) skeletal muscle // Animals. 2022. Vol. 12. № 9. P. 1062. DOI: 10.3390/ani12091062.
14. Lee J.H., Yoo S.H., Oh S.H., Park J.W., Kim Y.H., Lee H.J., Ryu K.H. In vivo electrical conductivity measurement of muscle, cartilage, and peripheral nerve around knee joint using MR-electrical properties tomography // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. P. 73. DOI: 10.1038/s41598-021-03928-y.

15. McCann H., Pisano G., Beltrachini L. Variation in reported human head tissue electrical conductivity values: a systematic review // Brain Topography. 2019. Vol. 32. P. 825–858. DOI: 10.1007/s10548-019-00710-2.