УДК 340.6

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЯГКИХ ТКАНЕЙ ТРУПОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ПОЧВЕННОМ ЗАХОРОНЕНИИ

[1]Лаврукова О. С., [1]Казакова Е. Л., [2,3]Приходько А. Н., [1]Неженец С. П.

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования» «Петрозаводский государственный университет», Петрозаводск, Российская Федерация, e-mail: olgalavrukova@yandex.ru;
[2]Государственное бюджетное учреждение здравоохранения «Бюро судебно-медицинской экспертизы Департамента здравоохранения города Москвы», Москва, Российская Федерация;
[3] Федеральное государственное автономное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, Москва, Российская Федерация

Цель исследования – разработать стандартизированный протокол импедансометрического исследования мягких тканей в лабораторной модели почвенного захоронения. Материал и методы. Исследовали кожно-мышечные лоскуты, полученные от трупа мужчины 55 лет массой 100 кг и трупа свиньи мужского пола в возрасте 8 месяцев массой 100 кг. От каждого донорского объекта получили по девять лоскутов размером 15×15×6 см; общее количество образцов составило 18. Каждый лоскут помещали в отдельную круглую стеклянную ёмкость диаметром 40 см и глубиной 20 см. Образцы заглубляли в суглинистую почву таким образом, чтобы верхняя поверхность лоскута располагалась примерно на глубине 10 см от поверхности почвы. Образцы содержали в термостатах при постоянной температуре +9 °С и относительной влажности воздуха 80%. Импеданс и угол сдвига фаз регистрировали портативным LCR-метром Keysight U1733C на частотах 100 и 120 Гц, 1, 10 и 100 кГц один раз в сутки в течение 31 суток. Одновременно проводили макроскопическую оценку тканей. Результаты. Разработан лабораторный протокол, предусматривающий унификацию размеров образцов, типа почвенного субстрата, температурно-влажностного режима, геометрии расположения электродов, частот измерения и периодичности наблюдений. За весь период исследования зарегистрировано 2790 значений импеданса и 2790 значений угла сдвига фаз. Настоящая работа посвящена методическому этапу исследования и не включает статистического сравнения динамики показателей между образцами человека и свиньи. Заключение. Предложенный протокол может применяться в экспериментальных исследованиях посмертных изменений электрических свойств кожно-мышечных лоскутов в условиях контакта с суглинистой почвой. Для разработки диагностических критериев длительности постмортального периода необходимы исследования с участием большего числа независимых донорских объектов, различных типов почв и разных температурно-влажностных режимов.

Ключевые слова: импеданс, угол сдвига фаз, почвенные захоронения, давность смерти, кожно-мышечный лоскут, судебная медицина, постмортальный период.

A METHOD FOR STUDYING THE ELECTRICAL PROPERTIES OF SOFT TISSUES OF CORPSES IN EXPERIMENTAL SOIL BURIAL

[1]Lavrukova O. S., [1]Kazakova E. L., [2]Prikhodko A. N., [1]Nezhenets S. P.

[1] Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Petrozavodsk State University", Petrozavodsk, Russian Federation, e-mail: olgalavrukova@yandex.ru;
2 State Budgetary Healthcare Institution "Bureau of Forensic Medical Examination of the Moscow City Health Department", Moscow, Russian Federation;
3 Federal State Autonomous Educational Institution of Additional Professional Education "Russian Medical Academy of Continuous Professional Education" of the Ministry of Health of Russia, Moscow, Russian Federation.

Objective. To develop a standardized protocol for impedance measurements of soft tissues in a laboratory model of soil burial. Material and methods. Skin–muscle flaps were obtained from the body of a 55-year-old man weighing 100 kg and the carcass of an 8-month-old male pig weighing 100 kg. Nine flaps measuring 15×15×6 cm were obtained from each donor, providing a total of 18 samples. Each flap was placed in a separate round glass container measuring 40 cm in diameter and 20 cm in depth. The flaps were buried in loamy soil, with the upper surface of each sample positioned approximately 10 cm below the soil surface. The samples were maintained in thermostatically controlled chambers at +9 °C and 80% relative air humidity. Impedance and phase angle were measured using a Keysight U1733C portable LCR meter at frequencies of 100 and 120 Hz and 1, 10, and 100 kHz

once daily for 31 days. Macroscopic tissue changes were evaluated simultaneously. Results. A laboratory protocol was developed to standardize sample dimensions, soil substrate, temperature and humidity conditions, electrode placement geometry, measurement frequencies, and observation intervals. A total of 2790 impedance values and 2790 phase-angle values were recorded. The present article describes the methodological stage of the study and does not include statistical comparisons of temporal changes between human and pig samples. Conclusion. The proposed protocol may be used in experimental studies of postmortem changes in the electrical properties of skin–muscle flaps placed in loamy soil. Studies involving a larger number of independent donors, different soil types, and different temperature and moisture conditions are required before criteria for estimating the postmortem interval can be developed.

Keywords: impedance, phase shift angle, soil burials, time of death, skin-muscle flap, forensic medicine, postmortem period.

Введение

Изучение посмертных изменений тканей в различных условиях внешней среды остаётся актуальной задачей судебной медицины, поскольку с увеличением длительности постмортального периода диагностическая ценность традиционных признаков снижается. Это обусловливает необходимость разработки объективных количественных методов исследования биологических тканей.

Одним из перспективных методов является импедансометрия. Электрические свойства тканей зависят от их структуры, содержания воды, состояния клеточных мембран и соотношения внутри- и внеклеточных компонентов [1; 2]. После смерти аутолитические и гнилостные процессы изменяют структуру и гидратацию тканей, что отражается на динамике импеданса и угла сдвига фаз [3; 4]. Результаты измерений также зависят от частоты тока, геометрии и глубины введения электродов, температуры и других условий, поэтому требуют стандартизации процедуры [1; 2].

В условиях почвенного захоронения на процессы разложения влияют температура, влажность, аэрация и физико-химические свойства субстрата [5; 6]; изучаются также изменения химического состава почвы и распространение продуктов разложения [7]. Геофизические методы обнаружения захоронений преимущественно оценивают электрические свойства почвы и подповерхностные аномалии, а не импеданс мягких тканей [8; 9]. В качестве модели человека часто используют свиней, однако различия в процессах разложения требуют осторожной экстраполяции результатов [10; 11]. Несмотря на наличие отечественных исследований электрических свойств трупных тканей и методики импедансометрии [3; 4], протокол серийного исследования кожно-мышечных лоскутов человека и свиньи в стандартизированной модели почвенного захоронения ранее подробно не описывался.

Цель исследования – разработать стандартизированный протокол импедансометрического исследования мягких тканей в лабораторной модели почвенного захоронения.

Материал и методы исследования

Дизайн исследования

Проведено экспериментальное методическое исследование. Объектами служили кожно-мышечные лоскуты, полученные от трупа мужчины 55 лет массой 100 кг и от трупа свиньи мужского пола в возрасте 8 месяцев массой 100 кг. От каждого донорского объекта получили по девять лоскутов. Общее количество образцов составило 18. Размер каждого лоскута 15×15×6 см. Биологическая выборка включала одного человека и одну свинью. Девять лоскутов от каждого донорского объекта рассматривали как внутридонорские образцы, а не как девять независимых биологических наблюдений. Выбор кожно-мышечных лоскутов обусловлен наличием в них нескольких тканевых компонентов, различающихся строением, степенью гидратации и электрическими свойствами. Измеряемое значение характеризовало кожно-мышечный комплекс в зоне расположения электродов, а не каждый тканевой компонент отдельно.

Лабораторная модель почвенного захоронения

Каждый лоскут помещали в отдельную круглую стеклянную ёмкость диаметром 40 см и глубиной 20 см. В качестве субстрата использовали суглинистую почву. Образцы заглубляли в средний слой почвы таким образом, чтобы верхняя поверхность лоскута располагалась примерно на глубине 10 см от поверхности почвы. Таким образом, глубина захоронения имела ориентировочный, а не строго измеренный характер.

Использованная конструкция представляла собой лабораторную модель почвенного захоронения. Она позволяла унифицировать объём ёмкости, тип субстрата и условия содержания образцов, но не воспроизводила в полном объёме естественные процессы массообмена, газообмена, движения грунтовой влаги, воздействия корней растений, насекомых и почвенной мезофауны. Выбор суглинистой почвы связан с её водно-физическими свойствами. По сравнению с песчаными почвами суглинок обычно лучше удерживает влагу и хуже аэрируется, что может влиять на интенсивность микробиологических процессов и темп посмертной трансформации тканей [5]. Все образцы содержали в термостатах при постоянной температуре +9 °C и относительной влажности воздуха 80%. Влажность непосредственно в почвенном субстрате, его pH, гранулометрический состав и плотность укладки в рамках настоящего методического этапа не определяли. Поэтому влияние указанных параметров на электрические характеристики тканей отдельно не оценивали.

Макроскопическое исследование

Макроскопическое состояние образцов оценивали один раз в сутки одновременно с регистрацией электрических показателей. Фиксировали: сохранность анатомического строения; наличие и выраженность запаха; цвет кожного покрова, подкожной жировой

клетчатки и мышц; консистенцию тканей; степень увлажнённости; наличие видимых признаков гнилостной трансформации. Макроскопическую оценку выполняли в одинаковой последовательности на протяжении всего периода наблюдения.

Импедансометрическое исследование

Измерения выполняли с помощью портативного LCR-метра Keysight U1733C. Использовали игольчатые электроды из нержавеющей стали диаметром 0,5 мм и длиной погружной части 5 мм. Электроды фиксировали на расстоянии 5 см друг от друга. Погружение в ткань осуществляли на глубину 5 мм. Измерения проводили на пяти частотах переменного тока: 100, 120 Гц и 1, 10, 100 кГц. В пределах одного измерительного сеанса при переключении частот электроды из ткани не извлекали. Для каждого нового суточного измерения проколы выполняли в новом участке лоскута, чтобы уменьшить влияние локальных механических изменений ткани и подсыхания в области предыдущего измерения [3]. В протоколе исследования не фиксировали сведения о процедуре калибровки LCR-метра непосредственно перед измерениями и величине измерительного напряжения. В связи с этим указанные параметры не могут быть включены в воспроизводимое описание измерительного протокола и рассматриваются как ограничение настоящей работы. Импеданс и угол сдвига фаз регистрировали один раз в сутки в течение 31 суток.

Объём зарегистрированных данных

Количество значений каждого электрического показателя рассчитывали следующим образом: для одного донорского объекта: 9 лоскутов × 31 срок наблюдения × 5 частот = 1395 значений; для двух донорских объектов: 1395 × 2 = 2790 значений. Таким образом, зарегистрировано: 2790 значений импеданса; 2790 значений угла сдвига фаз; всего 5580 электрических значений.

Подход к представлению данных

Настоящая статья посвящена описанию методического этапа исследования. Статистическое сравнение динамики импеданса и угла сдвига фаз между образцами человека и свиньи в рамках данной публикации не проводили. Производные коэффициенты частотной дисперсии не рассчитывали и не интерпретировали. В связи с этим формулы таких коэффициентов, критерии статистического сравнения, медианы, квартили и графики динамики электрических показателей в настоящей статье не приводятся. С учётом наличия только одного донорского объекта каждого вида полученные повторные измерения нельзя рассматривать как независимые биологические наблюдения и использовать для широких межвидовых выводов.

Этические аспекты

Исследование проведено в соответствии с применимыми правовыми и этическими требованиями. Проведение исследования одобрено Комитетом по медицинской этике при Министерстве здравоохранения и социального развития Республики Карелия и Петрозаводском государственном университете, заключение № 43 от 21 мая 2019 г.

Результаты исследования и их обсуждение

Разработан протокол лабораторного импедансометрического исследования кожно-мышечных лоскутов в условиях контакта с суглинистой почвой. Протокол предусматривал унификацию следующих параметров: источника и размеров образцов; типа исследуемого тканевого комплекса; типа почвенного субстрата; размеров стеклянных ёмкостей; ориентировочной глубины залегания образцов; температуры и относительной влажности воздуха; материала и размеров электродов; межэлектродного расстояния; глубины введения электродов; частот переменного тока; последовательности измерений; периодичности наблюдений; продолжительности эксперимента; перечня макроскопических признаков.

Использование лоскутов одинакового размера обеспечивало сопоставимость условий контакта образцов с почвенным субстратом. Однако оно не устраняло естественную внутридонорскую неоднородность тканей. Применение электродов с фиксированным межэлектродным расстоянием и одинаковой глубиной введения уменьшало техническую вариабельность измерений. Проведение каждого следующего измерения в новом участке позволяло снизить влияние повторного повреждения и локального подсыхания тканей. Использованный частотный диапазон от 100 Гц до 100 кГц позволял регистрировать частотозависимые электрические характеристики кожно-мышечного комплекса. Суточный интервал выбран как единый шаг серийного наблюдения.

За 31 сутки получено 2790 значений импеданса и 2790 значений угла сдвига фаз. Одновременно проводили ежедневное макроскопическое наблюдение за состоянием образцов. Поскольку целью настоящей статьи являлось описание методики, числовые характеристики динамики электрических показателей, графики и межвидовые статистические сравнения не приводятся. По представленным данным нельзя делать выводы о направлении, форме или статистической значимости изменений импеданса и угла сдвига фаз во времени.

Импедансометрия отражает зависимость электрических характеристик тканей от их структуры, содержания жидкости и состояния клеточных мембран [1; 2]. После смерти аутолитические, дегидратационные и гнилостные процессы могут изменять электрофизические свойства тканей, что определяет перспективность метода для изучения посмертных изменений [3; 4]. Результаты измерений зависят от частоты и напряжения тока, характеристик электродов, глубины их введения и межэлектродного расстояния; эти параметры должны быть постоянными и фиксироваться в протоколе [1; 2].

В исследовании стандартизировали размеры образцов, тип почвы, ориентировочную глубину их расположения, температурно-влажностный режим, положение электродов, частоты и периодичность измерений. Отсутствие данных о калибровке прибора и измерительном напряжении ограничивает воспроизводимость методики. Несмотря на постоянство температуры, влажности воздуха, типа почвы и размеров ёмкостей, влажность, pH, гранулометрический состав и плотность укладки почвы не определяли. Лабораторная модель также не воспроизводила всех условий естественного захоронения [5; 6].

Предшествующие исследования преимущественно изучали химические изменения почвы и миграцию продуктов разложения [7], а геофизические работы - свойства почвы и подповерхностные аномалии [8; 9]. В отличие от них предложенный подход предусматривает непосредственное измерение электрических характеристик кожно-мышечного комплекса. Использование свиньи как модели человека требует осторожности из-за возможных различий в динамике разложения тканей [10; 11].

Интерпретация результатов импедансометрии требует учитывать частотную зависимость электрических свойств тканей и влияние параметров измерительной системы [12]. Изменения микробного сообщества могут дополнительно использоваться для оценки постмортального периода, однако требуют самостоятельной валидации и не заменяют оценку физического состояния тканей [13]. Результаты тафономических экспериментов следует интерпретировать с учётом биологических, почвенных и климатических факторов, поскольку лабораторные модели лишь частично воспроизводят естественное захоронение [14].

Девять лоскутов от каждого объекта увеличивают число внутридонорских измерений, но не количество независимых доноров. Поэтому 1395 значений для одного вида нельзя рассматривать как независимые наблюдения. Игнорирование этого обстоятельства может привести к псевдорепликации и завышению объёма биологических данных [15]. Дальнейший анализ должен учитывать иерархическую структуру данных, включать нескольких независимых доноров и использовать методы анализа повторных измерений или смешанные модели.

Практическое применение методики для определения длительности постмортального периода пока преждевременно: необходимо установить воспроизводимые временные зависимости, оценить межиндивидуальную вариабельность и диагностическую точность, а также провести независимую валидацию. Предложенный протокол следует рассматривать как методическую основу последующих исследований, а не как готовый инструмент экспертного определения давности смерти.

Ограничения исследования

Исследование ограничено одним человеком и одной свиньёй; внутридонорский характер образцов исключает обобщающие межвидовые выводы. Изучали только суглинистую почву, глубину залегания определяли ориентировочно. Лабораторная модель не воспроизводит всех условий естественного захоронения, а влажность, pH и состав почвы не определяли. Отсутствие данных о калибровке и измерительном напряжении снижает воспроизводимость. Макроскопическая оценка требует стандартизации; диагностическую эффективность и внутри- и межоператорную воспроизводимость не оценивали.

Выводы

1. Разработан протокол импедансометрического исследования кожно-мышечных лоскутов человека и свиньи в лабораторной модели контакта с суглинистой почвой при постоянной температуре +9 °C и относительной влажности воздуха 80%.

2. Образцы располагали так, чтобы верхняя поверхность лоскута находилась примерно на глубине 10 см от поверхности почвы. Протокол предусматривал унификацию размеров образцов, типа субстрата, параметров окружающей среды, геометрии расположения электродов, частот измерения и периодичности наблюдений.

3. Измерения импеданса и угла сдвига фаз выполняли один раз в сутки в течение 31 суток на частотах 100 и 120 Гц, 1, 10 и 100 кГц. Зарегистрировано 2790 значений импеданса и 2790 значений угла сдвига фаз. Одновременно проводили макроскопическую оценку состояния тканей.

4. Представленная работа описывает методический этап исследования. Она не устанавливает количественную зависимость электрических показателей от длительности нахождения тканей в почве и не позволяет формулировать диагностические критерии длительности постмортального периода.

5. Неполная фиксация параметров калибровки LCR-метра и измерительного напряжения ограничивает воспроизводимость электрического измерительного протокола и должна быть устранена в последующих исследованиях.

6. Для дальнейшего развития методики необходимы эксперименты с участием нескольких независимых донорских объектов, различных типов почв и температурно-влажностных режимов, а также оценка повторяемости измерений и диагностической точности разрабатываемых моделей.

Список литературы

1. Grimnes S, Martinsen ØG. Bioimpedance and Bioelectricity Basics. 3rd ed. London: Academic Press; 2015. 584 p. ISBN: 978-0-12-411470-8.

2. Gabriel S, Lau RW, Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz. Physics in Medicine & Biology. 1996;41(11):2251–2269. DOI: 10.1088/0031-9155/41/11/002.

3. Лаврукова О.С., Казакова Е.Л. Методика изучения импеданса тканей трупов. Судебно-медицинская экспертиза. 2025;68(3):15–19. DOI: 10.17116/sudmed20256803115.

4. Попов В.Л., Казакова Е.Л., Лаврукова О.С., Поляков А.Ю. О перспективности метода импедансометрии для определения давности наступления смерти. Судебно-медицинская экспертиза. 2023;66(2):20–25. DOI: 10.17116/sudmed20236602120.

5. Carter DO, Yellowlees D, Tibbett M. Cadaver decomposition in terrestrial ecosystems. Naturwissenschaften. 2007;94(1):12–24. DOI: 10.1007/s00114-006-0159-1.

6. Vass AA. The elusive universal post-mortem interval formula. Forensic Science International. 2011;204(1–3):34–40. DOI: 10.1016/j.forsciint.2010.04.052.

7. Fancher JP, Aitkenhead-Peterson JA, Farris T, Mix K, Schwab AP, Wescott DJ, Hamilton MD. An evaluation of soil chemistry in human cadaver decomposition islands: potential for estimating postmortem interval (PMI). Forensic Science International. 2017;279:130–139. DOI: 10.1016/j.forsciint.2017.08.002.

8. Pringle JK, Stimpson IG, Wisniewski KD, Heaton V, Davenward B, Mirosch N, Spencer F, Jervis JR. Geophysical monitoring of simulated homicide burials for forensic investigations. Scientific Reports. 2020;10(1):7544. DOI: 10.1038/s41598-020-64262-3.

9. Cristino K, Doro KO, Armstrong A, Forbes S, Ribéreau-Gayon A, Bank CG. Electrical resistivity tomography of simulated graves with buried human and pig remains. Forensic Science International. 2024;364:112248. DOI: 10.1016/j.forsciint.2024.112248.

10. Matuszewski S, Hall MJR, Moreau G, Schoenly KG, Tarone AM, Villet MH. Pigs vs people: the use of pigs as analogues for humans in forensic entomology and taphonomy research. International Journal of Legal Medicine. 2020;134(2):793–810. DOI: 10.1007/s00414-019-02074-5.

11. Dautartas A, Kenyhercz MW, Vidoli GM, Meadows Jantz L, Mundorff A, Steadman DW. Differential decomposition among pig, rabbit, and human remains. Journal of Forensic Sciences. 2018;63(6):1673–1683. DOI: 10.1111/1556-4029.13784.

12. Pethig R. Dielectric properties of biological materials: biophysical and medical applications. IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1984;EI-19(5):453–474. DOI: 10.1109/TEI.1984.298769.

13. Pechal JL, Schmidt CJ, Jordan HR, Benbow ME. A large-scale survey of the postmortem human microbiome, and its potential to provide insight into the living health condition. Scientific Reports. 2018;8(1):5724. DOI: 10.1038/s41598-018-23989-w.

14. Forbes SL, Carter DO. Processes and Mechanisms of Death and Decomposition of Vertebrate Carrion. In: Benbow ME, Tomberlin JK, Tarone AM, eds. Carrion Ecology, Evolution, and Their Applications. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press; 2025:129–145.
15. Lazic SE, Clarke-Williams CJ, Munafò MR. What exactly is "N" in cell culture and animal experiments? PLoS Biology. 2018;16(4):e2005282. DOI: 10.1371/journal.pbio.2005282.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.
Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.
Financing: The research was performed without external funding.