

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.3.9>

УДК: 537.876.4

О РАСПРОСТРАНЕНИИ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СЛОИСТЫХ БИОТКАНЯХ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ ЧЕЛОВЕКА

А.С. Зиненко, В.Л. Саввин

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, стр.2

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2023 г.

Аннотация. Изучены особенности распространения микроволн в модели слоистой биоткани, имитирующей участок грудной клетки человека, в широком диапазоне частот – от 1 до 100 ГГц. Модель содержала четыре слоя (кожа, подкожный жир, мышцы, легкое), и ограничена прямоугольным параллелепипедом. Подбор толщин слоев осуществлялся, исходя из биологической модели тела человека. Для численных расчетов были выбраны следующие характерные частоты: 1, 2, 5, 10, 20, 50 и 100 ГГц. Поперечный размер модели и волнового фронта падающей волны был выбран равным 5λ , что исключило влияние дифракции волны на боковой поверхности модели на ее распространения вдоль оси структуры. Выбор толщины последнего слоя в модели обеспечивал минимизацию эффектов интерференции с волной, проникающей в модель с ее тыльной поверхности. В результате моделирования выявлены особенности распространения микроволн в слоистой биоткани и рассчитана зависимость глубины проникновения микроволнового излучения в биоструктуру от частоты излучения.

Ключевые слова: слоистая биоструктура, электромагнитные волны, терагерцовый диапазон, численное моделирование.

Автор для переписки: Саввин Владимир Леонидович, vladimir.savvin@mail.ru

Введение

В последние годы растет интерес применения излучения микроволнового диапазона к биомедицинским приложениям. С появлением возможности имплантации электронных систем в организм человека сам состав устройства, как и техника его электропитания, продолжают совершенствоваться. Полупроводниковые технологии предлагают минимизацию имплантатов до миллиметрового размера. Однако ввиду ограниченной энергоемкости источников питания, требуются периодические хирургические вмешательства в организм пациента для замены источника питания после исчерпания их ресурса.

Идеальным вариантом передачи энергии на импланты является такая технология, которая полностью является неинвазивной и неспецифичной для отдельных участков тела. Большинство существующих подходов для этого типа передачи основаны на электромагнитной связи в ближнем поле [1]. Методы ближнего поля хорошо подходят для больших устройств и протезов, но они не решают основных, связанных с питанием микроимплантата, проблем – слабой связи между сильно асимметричными структурами источника и приемника, диссипативной и неоднородной тканью и нормативными порогами мощности для общей безопасности.

Все вышесказанное подчеркивает актуальность изучения процессов распространения электромагнитного излучения в микроволновом диапазоне частот в слоистой биосреде, содержащей различные слои биотканей.

Ранее были проведены измерения диэлектрических свойств биологических тканей (мозга, сердечной мышцы, почки, печени, легкого, селезенки, мышц разных типов, кожи) в диапазоне частот до 10 Гц до 20 ГГц [2]. Измерения проводились *in vivo* на доступных частях тела и *in vitro* на образцах биотканей.

Моделирование прохождения излучения миллиметровых длин волн через кожу человека с учетом ее слоистой структуры проведено в [3]. Модель слоистой структуры кожи состояла из четырех слоев: эпидермиса, дермы, гиподермы и четвертого полубесконечного слоя – мышечной ткани. При

расчетах в этой работе использовались данные по дисперсии комплексной диэлектрической проницаемости кожи, экспериментально полученные в [2], с учетом процентного содержания воды в различных слоях кожи.

Вопросы распространения микроволнового излучения в различных областях биологической ткани человека активно обсуждаются в работах, опубликованных в последние годы [4-7].

Приведенные выше публикации подчеркивают актуальность исследований в этой области. Однако в большинстве исследований рассмотрены лишь отдельные частоты и участки микроволнового диапазона, поэтому для понимания особенностей воздействия микроволн на слоистые биоструктуры необходимо изучить процессы распространения электромагнитного излучения в широком диапазоне частот.

1. Модель слоистой биоструктуры грудной клетки

Для исследования распространения микроволнового излучения в слоистой биоструктуре в широком диапазоне частот предложена модель, содержащая четыре слоя (кожа, подкожный жир, мышцы, легкое), ограниченная прямоугольным параллелепипедом (рис. 1).

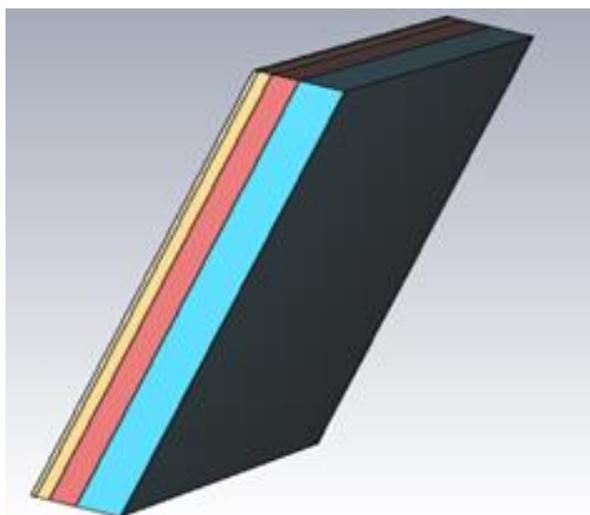


Рис. 1. Модель слоистой биоструктуры в виде параллелепипеда (слои слева направо: кожа, подкожный жир, мышцы, легкое).

Первый слой (светло-розовый на рис.1) – слой кожи, его толщина $d_1 = 1$ мм. Далее идет слой подкожного жира толщиной $d_2 = 3$ мм, затем слой мышц ($d_3 = 6$ мм). Последний (голубой на рис.1) слой – легкое толщиной d_4 . Толщина d_4 варьировалась в зависимости от условий моделирования. В рамках данной модели мы полагали, что исследуется межреберное пространство, поэтому описание слоя ребер здесь и далее не приводится. Подбор обозначенных выше толщин слоев осуществлялся, исходя из биологической модели тела человека [3-5]. Слева на структуру падала плоская волна микроволнового излучения с частотой, задаваемой в диапазоне от 1 до 100 ГГц. Поперечные размеры модели выбирались из расчета, чтобы минимизировать влияние дифракционных эффектов на распространение волны вдоль оси модели.

Поставленная задача решалась путем численного решения уравнений Максвелла, записанных в интегральной форме, методом конечных интегралов для выбранной сеточной области. Он эффективен при расчете статических полей сложной конфигурации и позволяет проводить моделирование трехмерных систем различной сложности.

2. Результаты моделирования

Задачей данного исследования являлось выяснение закономерностей и оценка глубины проникновения волны в модель слоистой биоткани, характерной для области грудной клетки человека.

Ниже приведены результаты, полученные для модели слоистой биоструктуры. Для численных расчетов были выбраны следующие характерные частоты: 1, 2, 5, 10, 20, 50 и 100 ГГц. Поперечный размер модели был выбран равным 5λ . Данный выбор был обусловлен характерными размерами волнового фронта – меньшие поперечные размеры привели бы к влиянию дифракции падающей волны на боковой поверхности рассматриваемой структуры на ее распространения вдоль оси структуры. Увеличение толщины последнего слоя способствовало минимизации эффектов интерференции с волной, проникающей в модель с ее тыльной поверхности.

В диапазоне частот от 1 до 10 ГГц поток мощности волны представляет собой убывающую вдоль глубины биоструктуры до нуля функцию (рис. 2).

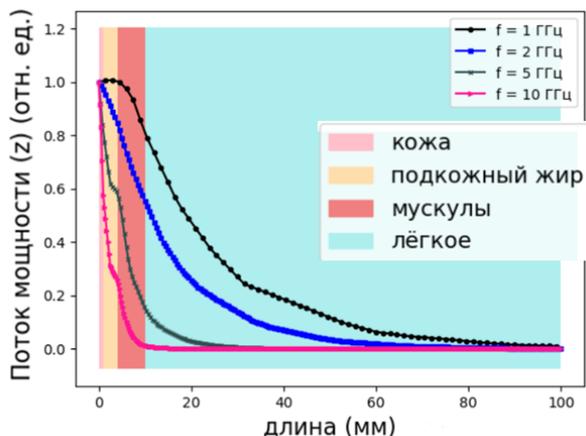


Рис. 2 Распределение потока мощности излучения в слоистой биоструктуре на частотах 1-10 ГГц.

На частоте 1 ГГц плотность потока мощности незначительно изменяется в слоях кожи и жира, а затем заметно убывает в мышечном слое и в лёгком. На частотах от 2 до 10 ГГц кривая имеет вид убывающей функции, причем на частотах 5 и 10 ГГц наблюдается локальный пик в слое мышц.

При частотах 20 ГГц и более график зависимости плотности потока мощности волны от глубины ее проникновения в биоструктуру имеет пик в области подкожного жира (рис. 3).

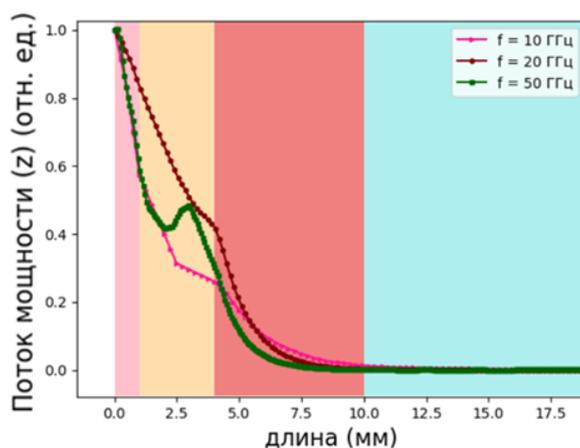


Рис. 3 Распределение потока мощности излучения в слоистой биоструктуре на частотах 10-50 ГГц.

На частотах 50 и 100 ГГц поток мощности имеет провал, сменяющийся резким подъемом в слое подкожного жира (рис. 4).

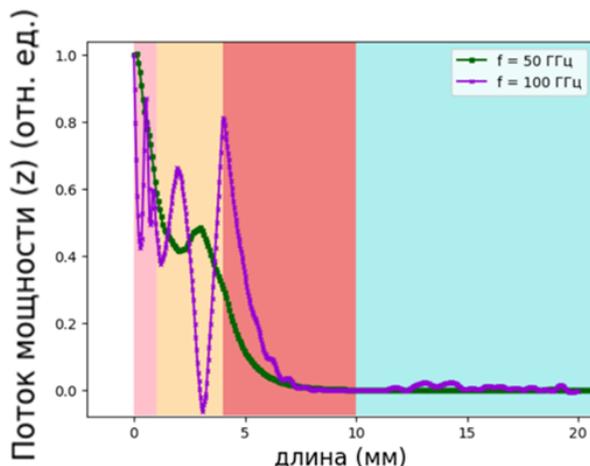


Рис. 4 Распределение потока мощности излучения в слоистой биоструктуре на частотах 50-100 ГГц.

На этих частотах длина падающей волны составляет 6 мм и 3 мм соответственно, что сопоставимо с толщиной слоев подкожного жира и мышц. Поэтому такая особенность в виде изрезанной зависимости потока мощности от глубины проникновения в структуру является результатом интерференции излучения, отраженного от этих слоев.

Интерференция становится заметна и на графике зависимости плотности потерь мощности в слоях биоструктуры от глубины проникновения на частотах 50-100 ГГц в виде «волн» и «изрезанности» рядом с пиками (рис. 5-8):

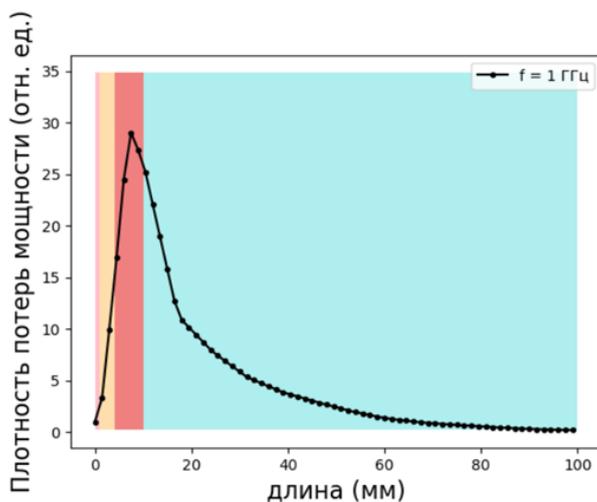


Рис. 5 Распределение потерь мощности излучения в слоях биоструктуры на частоте 1 ГГц.

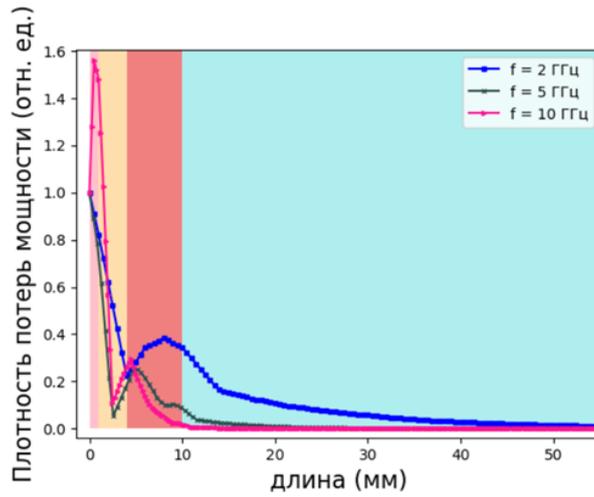


Рис. 6 Распределение потерь мощности излучения в слоях биоструктуры на частотах 2-10 ГГц.

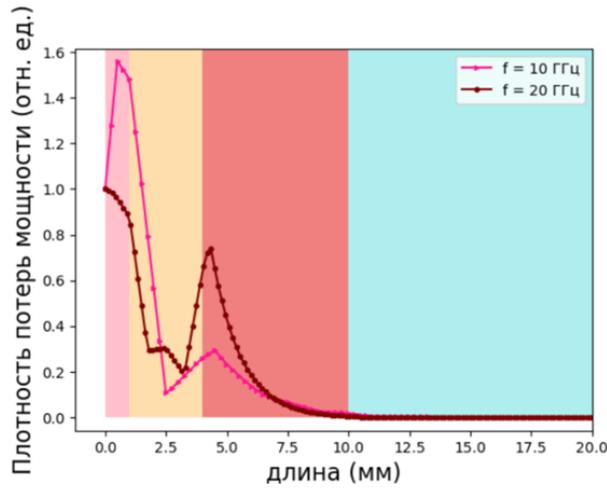


Рис. 7 Распределение потерь мощности излучения в слоях биоструктуры на частотах 10-20 ГГц.

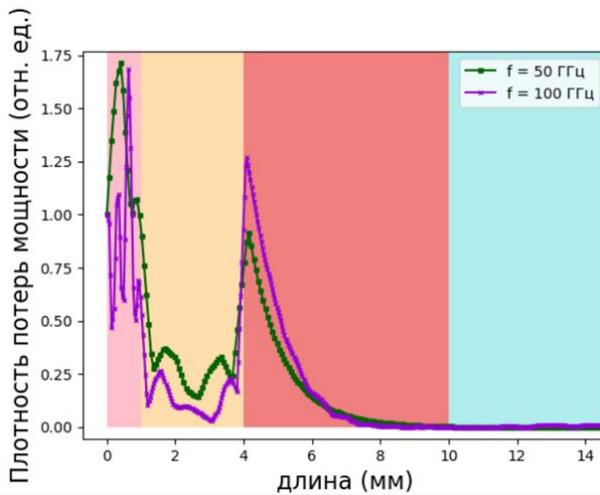


Рис. 8 Распределение потерь мощности излучения в слоях биоструктуры на частотах 50-100 ГГц.

На низких частотах – от 1 до 10 ГГц (рис. 5) наибольшие потери происходят в первых двух слоях – коже и подкожном жире (уменьшение потока мощности в 2 раза). При более высоких частотах (рис. 6-8) наибольшее затухание микроволнового излучения происходит уже в коже.

На основе полученных данных можно провести оценку глубины проникновения волны в био-структуру, описанную выше. Критерием падения мощности волны выберем ее уменьшение в 10 раз. Ниже приведена зависимость глубины проникновения высокочастотной электромагнитной волны в зависимости от частоты (рис. 9).

С увеличением частоты до 10 ГГц глубина проникновения микроволн в слоистую биоструктуру резко уменьшается (с 50-60 мм до 5-6 мм) и в дальнейшем (при повышении частоты до 20-100 ГГц) ограничивается слоями кожи и подкожного жира.

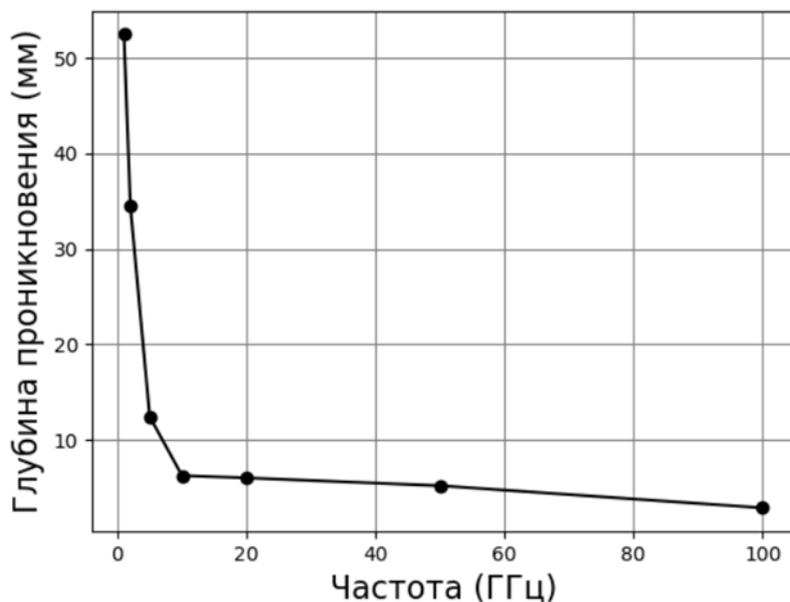


Рис. 9 Зависимость глубины проникновения высокочастотной электромагнитной волны в слоистую биоструктуру в зависимости от частоты.

Заключение

Проведено численное моделирование процессов распространения микроволнового излучения в слоистой биоструктуре в широком диапазоне частот на модели, содержащей четыре слоя (кожа, подкожный жир, мышцы, легкое) и характерной для грудной области человека. Изучено распределение потока мощности излучения и потерь мощности излучения на частотах от 1 до 100 ГГц при нормальном падении волны на слоистую биоструктуру.

Показано, что с увеличением частоты от 1 до 10 ГГц глубина проникновения микроволн в слоистую биоструктуру резко уменьшается – от 50-60 мм до 5-6 мм соответственно и в дальнейшем (при повышении частоты до 20-100 ГГц) ограничивается слоями кожи и подкожного жира.

Литература

1. Ho J. S. et al. Wireless power transfer to deep-tissue microimplants //Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2014. – Т. 111. – №. 22. – С. 7974-7979.
2. Gabriel C. The dielectric Properties of Biological Tissues: III. Measurements in the frequency range 10Hz to 20GHz //Phys. Med. Biol. – 1996. – Т. 41. – С. 2271-2293.
3. Козарь А.В. и др. Формирование интерференционной картины при моделировании воздействия ММ-облучения на многослойную кожную ткань //Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 2002. – №. 3. – С. 27.
4. Лагуцкий И.А. и др. Модель поглощения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона биологическими тканями //Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2021. – Т. 19. – №. 1. – С. 52-60.
5. Демьяненко А.В., Невструев Я.В., Семерник О.Е. Распространение электромагнитных волн в трехмерной упрощенной модели грудной клетки человека //Журнал радиоэлектроники. – 2019. – №. 10. – С. 8-8.
<http://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.10.3>

6. Стрелков Н.О., Крамм М.Н., Жихарева Г.В. Неоднородная электродинамическая модель грудной клетки человека в форме эллиптического цилиндра //Журнал радиоэлектроники. – 2011. – №. 7. – С. 6-6.
7. Sun Q. et al. Recent advances in terahertz technology for biomedical applications //Quantitative imaging in medicine and surgery. – 2017. – Т. 7. – №. 3. – С. 345.

Для цитирования:

А.С. Зиненко, В.Л. Саввин. О распространении микроволнового излучения в слоистых биотканях грудной клетки человека. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.3.9>