

И.А. Шестюк, М.Ю. Копытова

**РОЛЬ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ОЦЕНКЕ И КОНТРОЛЯ
ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ОТ НОСИМЫХ ИСТОЧНИКОВ В ЧЕЛЮСТНО-ЛИЦЕВОЙ ОБЛАСТИ**

***Научные руководители: канд. мед. наук, доц. Л.А. Лунёва,
канд. техн. наук, доц. Е.С. Максимович***

*Кафедра челюстно-лицевой хирургии и пластической хирургии лица
с курсом повышения квалификации и переподготовки*

Белорусский государственный медицинский университет, г. Минск

Кафедра радиофизики и цифровых медиа технологий

Белорусский государственный университет, г. Минск

I.A. Shestiuk, M.Y. Kopytova

**THE ROLE OF NUMERICAL SIMULATION IN ASSESSING
AND CONTROLLING THE IMPACT OF ELECTROMAGNETIC RADIATION
FROM WEARABLE SOURCES
IN THE MAXILLOFACIAL REGION**

***Tutors: PhD in Medicine, associate professors L.A. Luneva,
PhD in Technical Sciences Ye.S. Maksimovitch***

*Department of Maxillofacial Surgery and Facial Plastic Surgery
with a Course of Advanced Training and Retraining*

Belarusian State Medical University, Minsk

*Department of Radiophysics and Digital Media Technologies,
Belarusian State University, Minsk*

Резюме. Прямое измерение поглощённой энергии электромагнитного поля в тканях головы человека невозможно по этическим и техническим причинам, а физические фантомы дают усреднённые результаты без учёта индивидуальной анатомии. В работе методом численного моделирования снимков выполнена количественная оценка эффекта переизлучения ЭМИ титановыми имплантатами в челюстно-лицевой области в диапазонах 0,8 и 2,4 ГГц.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, численное моделирование, фантом головы человека, титановые импланты, удельный коэффициент поглощения (SAR), челюстно-лицевая область.

Resume. Direct measurement of absorbed electromagnetic field energy in human head tissues is impossible for ethical and technical reasons, while physical phantoms provide averaged results without accounting for individual anatomy. In this work, using numerical simulation, a quantitative assessment of the EMF re-emission effect by titanium implants in the maxillofacial region in the 0.8 and 2.4 GHz bands was performed.

Keywords: electromagnetic radiation, numerical simulation, titanium implants, specific absorption rate (SAR), maxillofacial region.

Актуальность. Распространение носимых устройств связи и рост числа операций остеосинтеза с использованием металлоконструкций делают проблему взаимодействия электромагнитного излучения (ЭМИ) с тканями организма человека при наличии имплантов клинически значимой. Прямое измерение поглощённой энергии электромагнитного поля в тканях головы живого человека невозможно по этическим и техническим причинам, а физические фантомы дают усреднённые

результаты и не учитывают индивидуальную анатомию [1, 2]. Для челюстно-лицевой области это критически важно, поскольку титановые мини-пластины и шурупы, применяемые при остеосинтезе, а также эндопротезы височно-нижнечелюстного сустава (ВНЧС) могут выступать в роли вторичных излучателей: статистически плотность тока в окружающей костной ткани может возрастать в 3–5 раз, а локальная напряжённость электрического поля достигать 138 В/м против 61 В/м на модели без имплантата [1]. Пиковый SAR при этом в малом объёме (1 г ткани) у края имплантата может достигнуть 4.9 Вт/кг, что вдвое превышает безопасный порог ICNIRP (2 Вт/кг) [2, 3]. При этом, приведенные в [4] исследования *in vivo* на кроликах с титановой фиксацией кости бедра показали, что низкоинтенсивное СВЧ-воздействие (частота излучения 2.45 ГГц, мощность - 25 Вт) не вызывало тепловых повреждений и даже улучшало заживление переломов, однако толерантность воспалённой послеоперационной ткани к нагреву существенно ниже, что требует количественной оценки рисков для каждого клинического сценария.

Цель: обосновать возможности численного моделирования в оценке и контроля воздействия электромагнитного излучения от носимых источников в челюстно-лицевой области.

Задачи:

1. Проанализировать распределение электрического поля в тканях головы человека.

2. Оценить переизлучение ЭМП титановым имплантом: измерить усиление напряжённости электрического поля (E , В/м) и удельного коэффициента поглощения (SAR, Вт/кг) у края пластины и у кончиков шурупов.

2. На примере двух частотных режимов работы телефонов и носимых устройств – 0.8 ГГц (голосовая связь) и 2.4 ГГц (Wi-Fi/Bluetooth), определить, какой из них создаёт большую нагрузку на имплант.

3. На основании полученных численных результатов и анализа мирового опыта оценить риск для остеосинтеза: локальный нагрев на границе «металл–кость», влияние на воспалённую после операции ткань, потенциальное замедление консолидации.

Материалы и методы. В работе использованы два независимых численных метода - метод конечных разностей и метод конечных элементов, что обеспечило взаимную верификацию результатов. Использован численный 3D-фантом головы человека, построенный на основе реальных МРТ/КТ-снимков с шагом 1–3 мм, учитывающий индивидуальную анатомию. Диэлектрические параметры тканей (удельная проводимость σ , См/м; диэлектрическая проницаемость ϵ' ; плотность, кг/м³) для частоты 2.4 ГГц заданы по классическому отчёту Gabriel (1996) (Табл. 1).

Табл. 1. Диэлектрические параметры тканей на частоте 2,4 ГГц (по Gabriel, 1996)

Ткань	σ , См/м	ϵ'	Плотность, кг/м ³
Кости	0.65	11.4	1850
Мышцы	1.45	52.7	1040
Кровь	2.19	58.3	1050
Кожа	1.46	38.0	1100
Жир	0.10	5.3	900

Моделирование выполнено в программной среде CST Studio Suite 2021. Источником излучения служил макет мобильного телефона, удерживаемый макетом руки (Рис. 1).

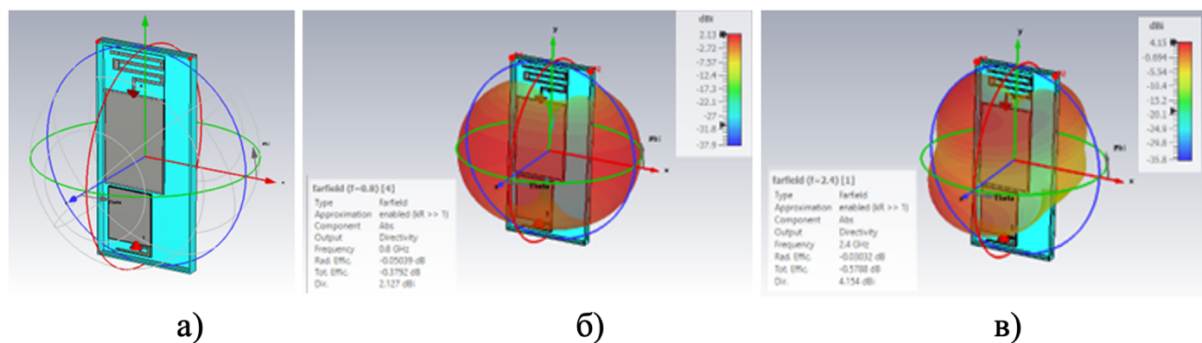


Рис. 1 – Численная модель мобильного телефона (а) – расположение антенн, б) – диаграмма направленности на частоте 0.8 ГГц, в) – диаграмма направленности на частоте 2.4 ГГц)

Мощность излучения на входе антенн - 100 мВт (средняя мощность Bluetooth-гарнитуры и телефона в режиме разговора), расстояние от антенны до ткани - 5–15 мм. Антенны согласованы с учетом материалов корпуса и экрана телефона: коэффициент стоячей волны для обеих антенн был меньше 1.5, учтён сдвиг частоты при контакте с высокодиелектрической биотканью. На основании модели получены результаты распределения электрического поля, формируемого антеннами в свободном пространстве, в присутствии биологических фантомов головы и руки человека без имплантов, с одиночным титановым имплантом и с множественными имплантами в нижней челюсти фантома (Рис. 2, 3).

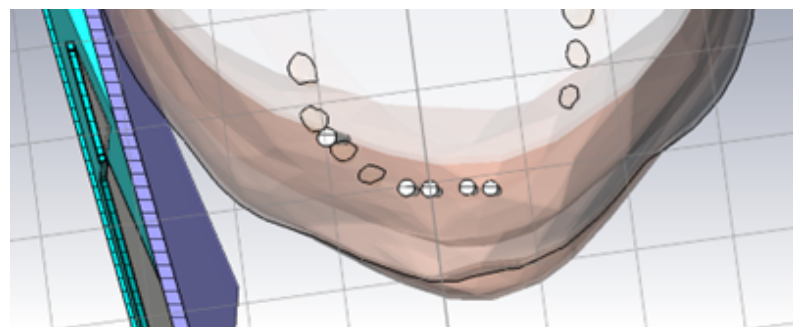


Рис. 2 – Численная модель с установленными имплантами (белый цвет)

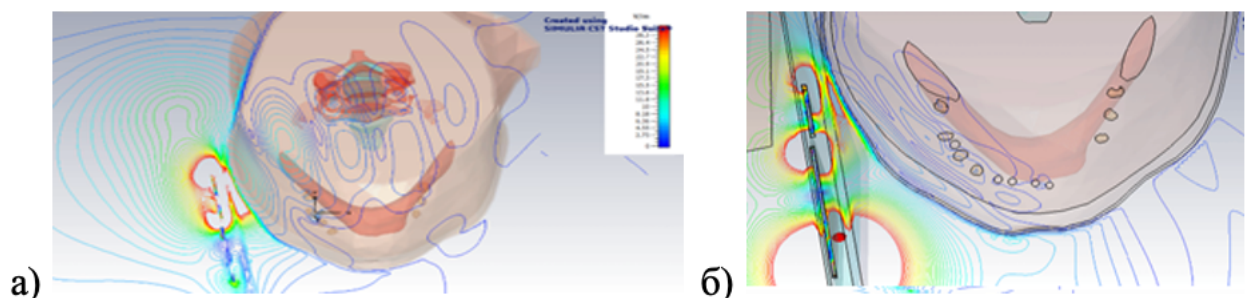


Рис. 3 – Результаты численного моделирования распределения электрического поля в фантоме головы человека с встроенными имплантами. а) - Распределение электрического поля для антенны 1 (0.8 ГГц) с одиночным имплантом, б) - Распределение электрического поля для антенны 2 (2.4 ГГц) с множественными имплантами

Результаты и их обсуждение. Диаграммы направленности в свободном пространстве показали, что антенна 1 (0,8 ГГц) имеет близкую к тороидальной характеристику, тогда как антенна 2 (2,4 ГГц) - более направленную, с основным лепестком в сторону пользователя. При введении в модель фантомов головы и руки диаграммы направленности существенно изменились, как и распределение электрического поля. Поле сконцентрировалось в области головы, причём на частоте 2,4 ГГц - локально в проекции околоушной слюнной железы (Рис. 3). Без импланта глубина проникновения поля составила 15–18 мм, что полностью охватывает околоушную железу анатомически. Фоновые значения: $E = 61$ В/м, $SAR = 2,1$ Вт/кг, превышение порога ICNIRP составило 5%.

Кроме того, было установлено, что наличие нескольких имплантов в одном ряду физически формирует “волновой канал”, перенаправляя электрическое поле, как, фактически, встроенная антенна. При этом, на имплантах формируются поверхностные токи (рис.4).

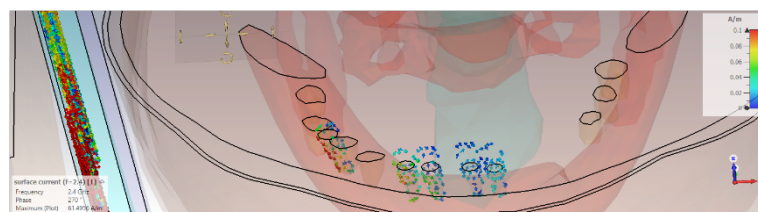


Рис. 4 – Формирование поверхностных токов на металлических имплантах. Результаты численного моделирования

Результаты исследований показали, что наличие одиночного титанового импланта на частоте 0,8 ГГц выявило глобальный максимум напряжённости поля у края импланта - 10835 В/м (пиковое), в окружающей ткани осреднённая $E = 138$ В/м, $SAR = 4,9$ Вт/кг (превышение порога ICNIRP - 145%) (Табл. 2). При множественных имплантах на той же частоте $E = 152$ В/м, $SAR = 5,6$ Вт/кг (180%). Наиболее неблагоприятный сценарий - множественные импланты на частоте 2,4 ГГц: $E = 161$ В/м, $SAR = 6,1$ Вт/кг, превышение порога ICNIRP - 205% (Табл. 2). Горячие точки жёстко привязаны к краям пластин и кончикам шурупов (яркие точки). При замене титана на диэлектрический имитатор эффект исчезает, что подтверждает природу вторичного излучения.

Табл. 2. Результаты численного моделирования

Конфигурация	E , В/м	SAR (1 г), Вт/кг	Превышение ICNIRP, %
Контроль (без импланта)	61	2,1	5
Одиночный имплант, 0,8 ГГц	138	4,9	145
Множественные импланты, 0,8 ГГц	152	5,6	180
Множественные импланты, 2,4 ГГц	161	6,1	205

С клинической точки зрения большую опасность представляют обе частоты излучения телефона. Проводятся исследования оценки накопительного эффекта (общепринятая норма - 10 лет) [6]. При этом, частота 2,4 ГГц (Bluetooth-гарнитуры) вызывает особый интерес. Глубина проникновения поля полностью охватывает околоушную слюнную железу, а зоны с $E > 60$ В/м (порог возбуждения нервных мембран) проецируются на ветви лицевого нерва [1]. Мета-анализ показал ассоциацию использования телефона с повышением риска опухолей околоушной железы на 28%. Эндопротезы ВНЧС создают градиент температуры на границе «металл–кость» в пределах 1–2 °С, что критично для воспалённой послеоперационной ткани [1,4]. Это обосновывает рекомендацию отказа от Bluetooth-гарнитуры на стороне операции в течение 21 дня. Численный эксперимент замещает невозможный прямой контроль *in vivo* и позволяет рассчитать «красную зону», где тепловой эффект переходит из стимулирующего остеогенез в деструктивный.

Выводы:

1. Титановые импланты в челюстно-лицевой области являются вторичными излучателями, создавая локальные «яркие точки» с усилением E до 138–161 В/м и SAR до 4,9–6,1 Вт/кг.
2. На частоте 2,4 ГГц эффект максимален: зоны с $E > 60$ В/м проецируются на ветви лицевого нерва.
3. Превышение порога ICNIRP достигает 145–205%, что обосновывает ограничение использования носимых устройств на стороне операции в течение 21 дня.
4. Численное моделирование – единственный этичный метод количественной оценки SAR в тканях пациента с имплантом.

Литература

1. Jovanović D. [et al.] Modelovanje i analiza uticaja metalnih medicinskih implantata na raspodelu elektromagnetskog polja mobilnih telefona u tkivima korisnika : PhD Thesis. - Niš : University of Niš, 2021.
2. ICNIRP Guidelines. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (Up to 300 GHz) // Health Physics. - 1998. - Vol. 74, № 4. - P. 494–522.
3. IEEE Std C95.1-2005. Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz. - New York : IEEE, 2005.
4. Ye D., Xu Y., Zhang H. [et al.] Effects of low-dose microwave on healing of fractures with titanium alloy internal fixation: an experimental study in a rabbit model // PLoS One. - 2013. - Vol. 8, № 9. - e75756.
5. Gabriel S. [et al.] Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies : Report N.AL/OE-TR-1996-0037. - Brooks AFB, Texas : Occupational and Environmental Health Directorate, Radiofrequency Radiation Division, 1996.
6. Siqueira E. C., Souza F. T. A., Gomez R. S., Gomes C. C., Souza R. P. Does cell phone use increase the chances of parotid gland tumor development? A systematic review and meta-analysis // Journal of Oral Pathology & Medicine. - 2017. - Vol. 46, № 7. - P. 480–483.