

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА И АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ТОКОВ В МОДЕЛИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ, ИНДУЦИРОВАННЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ

СООБЩЕНИЕ 1. ГОМОГЕННЫЕ ФАНТОМЫ

М.Ю. Готовский¹, С.Ю. Перов²

¹Центр интеллектуальных медицинских систем «ИМЕДИС» (г. Москва),

²Научно-исследовательский институт медицины труда РАМН (г. Москва)

Theoretical evaluation and analysis of distribution of internal currents induced by low frequency electromagnetic fields in the model of biological tissues Publication 1. Homogenous phantoms

M.Yu. Gotovskiy¹, S.Yu. Perov²

¹Center of intellectual medical systems «IMEDIS» (Moscow, Russia),

²RAMS Research institute of occupational health (Moscow, Russia)

РЕЗЮМЕ

Выполнена теоретическая оценка распределения внутренних (индуцированных) токов в гомогенных фантомах мышечной, жировой и костной тканей с использованием программы SEMCAD X при действии переменных электромагнитных полей. Показана перспективность использования метода теоретической дозиметрии для изучения и оптимизации терапевтического применения переменных магнитных полей.

Ключевые слова: теоретическая дозиметрия, низкочастотные электромагнитные поля, гомогенная модель мышечной ткани, жировая ткань, костная ткань, внутренние токи.

RESUME

Results of theoretical evaluation of distribution of internal currents induced by alternating electromagnetic fields in homogenous phantoms of muscle, fat and bone tissue using SEMCAD X software are presented. The perspective of using the method of theoretical dosimetry to study and optimize the therapeutic use of alternating magnetic fields is shown.

Keywords: theoretical dosimetry, low-frequency electromagnetic fields, homogenous model of muscle, homogenous model of fat, homogenous model of bone, internal currents.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в физической терапии используется широкий спектр физических факторов, отличающихся как методикой и техникой применения, так и механизмом действия и лечебной эффективностью. Терапия с использованием физических факторов низкой интенсивности относится к одной из перспективных и наиболее быстро развивающихся отраслей практической медицины. Дальнейшее повышение эффективности терапии физическими факторами с такой интенсивностью становится невозможным без изучения механиз-

мов действия, развития и совершенствования биофизических подходов к методам лечения. Все это даст новые критерии оценки влияния физических факторов, включая определение терапевтической дозы. Нельзя не согласиться с мнением В.С. Улащика, что воздействие на организм человека лечебных физических факторов должно быть физиологичным, селективным, адекватным, разнообразным, менее нагрузочным и весьма эффективным [1].

В медицинской практике широко применяются все доступные формы электромагнитной энергии – от статического электричества

до сверхвысокочастотных электромагнитных полей, которые обеспечивают широкий спектр терапевтических эффектов: стимуляции обменных процессов, факторов неспецифического и специфического иммунитета, нормализации нейроэндокринной регуляции, улучшения реологических свойств крови, микроциркуляции и др. [2]. В последние десятилетия акцент применения электромагнитной энергии в физической терапии сместился в сторону использования низкочастотных электрических и магнитных полей с различными способами генерации и особенностями воздействия [3]. В то же время, основное направление исследований сосредоточено в области лечебного действия и расширения возможностей применения низкочастотных электромагнитных полей, тогда как биофизическим механизмам действия, несмотря на появившиеся в последнее время отдельные публикации, внимание уделяется в значительно меньшей степени [4].

В литературе описаны различные терапевтические методики использования низкочастотных электрических и магнитных полей, однако не всегда имеется информация об их оптимальности, что связано с недостаточной изученностью механизмов действия, не позволяющей реализовать адекватную дозировку лечебного фактора. На современном этапе развития терапии электрическими и магнитными полями низкой частоты эти проблемы решаются путем эмпирического подбора конкретных параметров воздействия. В физиотерапии при подборе дозы высокочастотных и сверхвысокочастотных электромагнитных полей ориентируются на несколько градаций ощущения пациентом тепла, возникающих при воздействии поля [2]. Подобный метод дозиметрии, основанный на сенсорных реакциях человека, носит субъективный характер, и, вполне естественно, что его объективность крайне сомнительна. Однако при терапии низкочастотными электрическими и магнитными полями даже подобный метод становится практически невозможным. Сенсорные реакции человека (фосфены или магнитофосфены) в ответ на воздействие, например, низкочастотными магнитными полями, являются зрительными и заключаются в появлении у человека при воздействии на голову ощущений в виде вспышек света, которое происходит при закрытых глазах. Однако феномен магнитофосфена характерен для узкого диапазона

частот (20–30 Гц) и при величинах индукции переменного магнитного поля от 10 до 12 мТл. Влияние в этом случае происходит непосредственно на фоторецепторный аппарат глаза, а не на структуры головного мозга, как считалось ранее [5]. Таким образом, отсутствие методов дозиметрии переменных низкочастотных электромагнитных полей препятствует оптимизации лечебного процесса. Сказанное относится, в том числе, и к воздействию импульсного магнитного поля при экзогенной биорезонансной терапии [6].

В связи с этим, целью настоящей работы является теоретическая оценка индуцированных в моделях (фантомах) некоторых тканей токов при воздействии низкочастотными магнитными полями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время установлен единственный механизм взаимодействия низкочастотных электрических и магнитных полей с биологическими объектами – возникновение на поверхности и в глубине тела индуцированных (наведенных) токов, которые и являются основными дозиметрическими параметрами, определяющими биологический эффект воздействия [7]. В качестве количественной величины оценки допустимого уровня воздействия электрических и магнитных полей в диапазоне ниже 10 МГц на человека и определения терапевтической дозы используется плотность тока, величина которой выражается в $\text{мА}/\text{м}^2$ [8].

В связи с этим, в исследованиях применялась теоретическая дозиметрия, с помощью которой возможно получить точные данные о величине и характере пространственного распределения индуцированных токов в гомогенных моделях (фантомах), численно имитирующие основные биологические ткани. Отличительной особенностью теоретических методов дозиметрии является возможность получения таких результатов, которые невозможно получить экспериментально в результате трудностей как методического, так и технического характера в работе с биологическими объектами. Так, например, разработанные Nagmann и Babij методы неинвазивного измерения индуцированных в биологическом объекте токов с использованием плоской измерительной рамки позволяют получить лишь интегральную характеристику, тогда

как тонкая структура распределения вихревых токов в различных органах и тканях для этого метода остается недоступной [9]. К тому же, эта система измерений предназначена для дозиметрии электрических и магнитных полей высокой интенсивности, воздействие которых сопровождается возникновением тепла в объекте. Последнее обстоятельство также является причиной неприемлемости такого инструментального метода дозиметрии при использовании низкочастотных магнитных полей относительно низких интенсивностей, которые применяются с лечебной целью.

В теоретической дозиметрии решаются уравнения Максвелла, для E - и H -векторов электромагнитного поля для модели (фантома) с заданными электрическими параметрами, например, мышечной, жировой, костной и других видов тканей [6]. В расчетах применяется метод конечных разностей во временной области, математический аппарат которого реализован в наиболее близкой для решаемых задач дозиметрии программе SEMCAD X (Simulation Platform for Electromagnetic Compatibility Antenna Design and Dosimetry), разработанная Schmid&Partner Engineering AG, Швейцария¹ [10]. Эта разработка, являющаяся последним поколением программного обеспечения, созданного для моделирования в 3-хмерном пространстве электромагнитных полей и излучений в очень широком диапазоне частот – от статических полей до излучений оптического диапазона, и применялась в наших исследованиях.

Моделировались плоскостные гомогенные фантомы следующих тканей: скелетная мышца, жировая и костная ткани. При моделировании использовались общепринятые в дозиметрическом моделировании диэлектрические параметры тканей в исследуемом диапазоне частот при температуре 37 °C [11]. В качестве источника переменного магнитного поля использовался индуктор-соленоид аппарата для экзогенной биорезонансной терапии «МИНИ-ЭКСПЕРТ-Т». Величина индукции магнитного поля при моделировании составляла 2 мТл, при этом исполь-

¹ Авторы выражают благодарность профессору N. Kuster (IT'IS Foundation Swiss Federal Institute of Technology, Zurich) за предоставление программы SEMCAD для выполнения исследований.

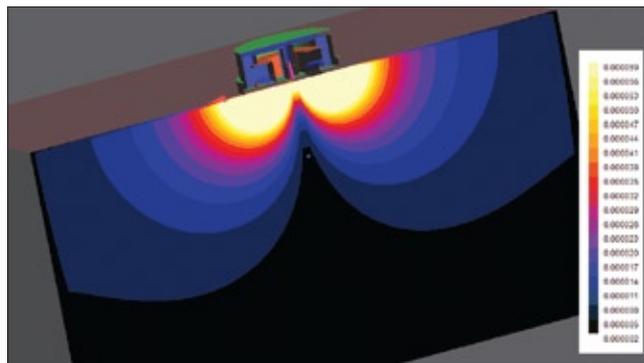


Рис. 1. Визуализация плотности индуцированного тока в гомогенном фантоме мышечной ткани при воздействии индуктором-соленоидом аппарата для экзогенной биорезонансной терапии «МИНИ-ЭКСПЕРТ-Т» при частоте 20 Гц и интенсивности воздействия 2 мТл. Индуктор-соленоид расположен вплотную к поверхности фантома.

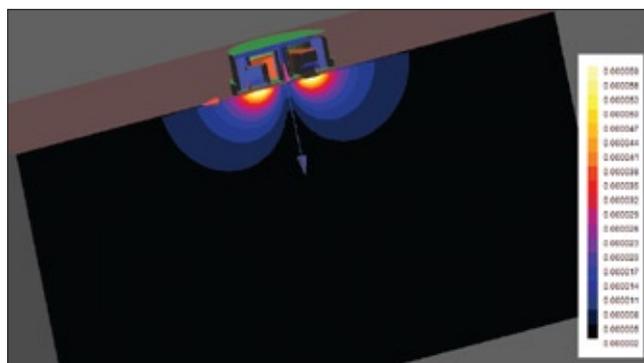


Рис. 2. Визуализация плотности индуцированного тока в гомогенном фантоме жировой ткани при воздействии индуктором-соленоидом аппарата для экзогенной биорезонансной терапии «МИНИ-ЭКСПЕРТ-Т» при частоте 20 Гц и интенсивности воздействия 2 мТл. Индуктор-соленоид расположен вплотную к поверхности фантома.

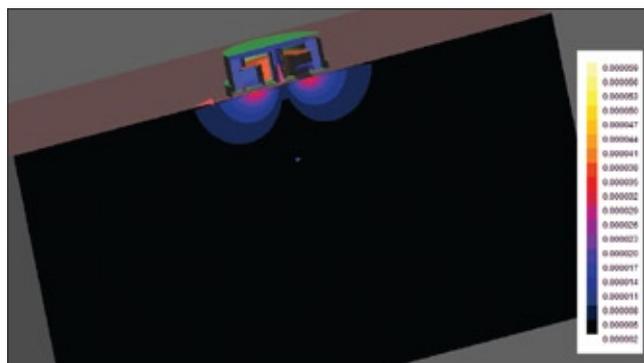


Рис. 3. Визуализация плотности индуцированного тока в гомогенном фантоме костной ткани при воздействии индуктором-соленоидом аппарата для экзогенной биорезонансной терапии «МИНИ-ЭКСПЕРТ-Т» при частоте 20 Гц и интенсивности воздействия 2 мТл. Индуктор-соленоид расположен вплотную к поверхности фантома.

зовались частоты 9,4 Гц, 20 Гц, 100 Гц, 250 Гц, 465 Гц, 600 Гц и 800 Гц. В моделях индуктор-соленоид располагался непосредственно на поверхности плоскостного фантома ткани (рис. 1, 2 и 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате выполненных исследований, получены величины, частотная зависимость и глубина индуцирования токов J в гомогенных фантомах мышечной, жировой и костной

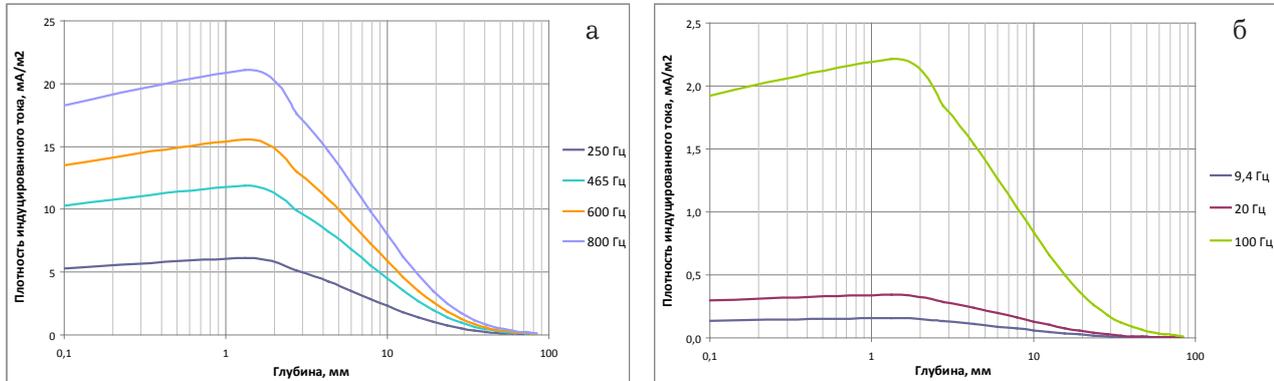


Рис. 4. Зависимость плотности индуцированных токов (J , mA/m^2) от глубины проникновения в гомогенный фантом, моделирующий мышечную ткань, при воздействии переменным магнитным полем с индукцией 2,0 мТл на частотах 9,4 Гц, 20 Гц, 100 Гц (а) и 250 Гц, 465 Гц, 600 Гц, 800 Гц (б). Индуктор-соленоид расположен вплотную к поверхности фантома.

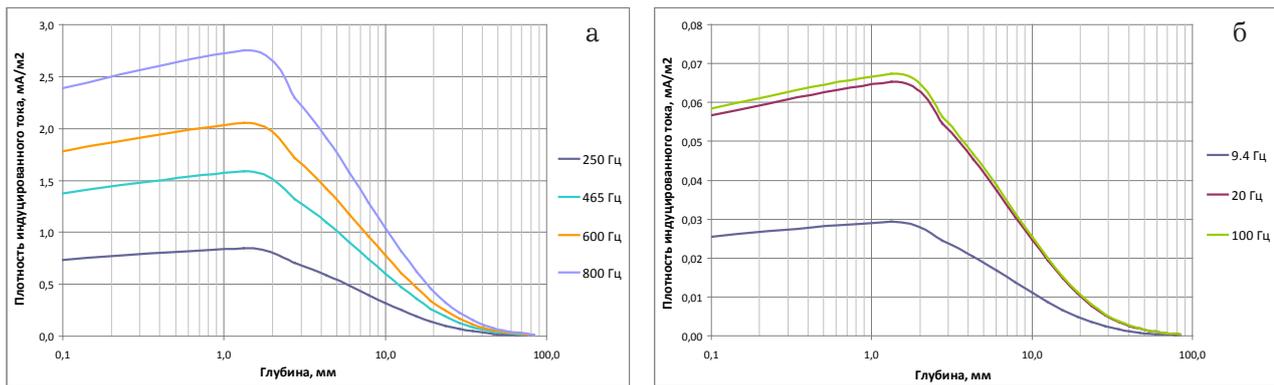


Рис. 5. Зависимость плотности индуцированных токов (J , mA/m^2) от глубины проникновения в гомогенный фантом, моделирующий жировую ткань, при воздействии переменным магнитным полем с индукцией 2,0 мТл на частотах 9,4 Гц, 20 Гц, 100 Гц (а) и 250 Гц, 465 Гц, 600 Гц, 800 Гц (б). Индуктор-соленоид расположен вплотную к поверхности фантома.

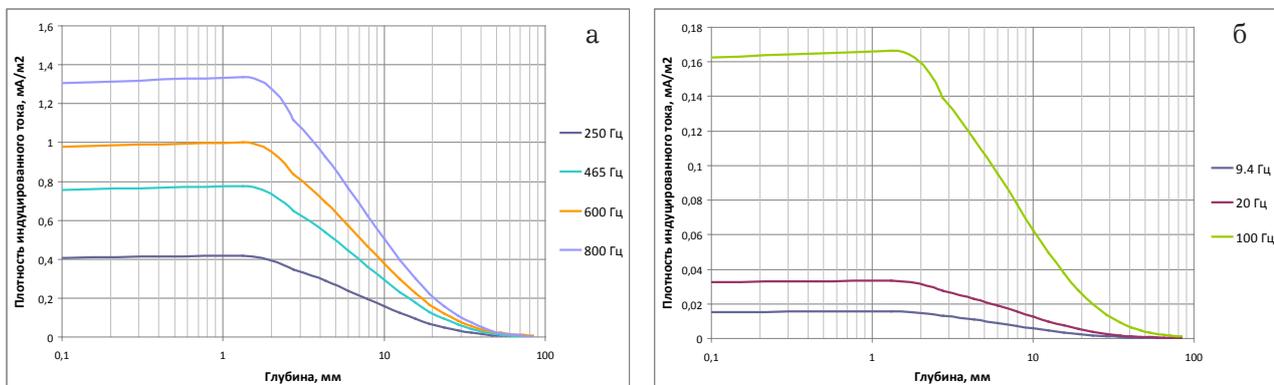


Рис. 6. Зависимость плотности индуцированных токов (J , mA/m^2) от глубины проникновения в гомогенный фантом, моделирующий костную ткань, при воздействии переменным магнитным полем с индукцией 2,0 мТл на частотах 9,4 Гц, 20 Гц, 100 Гц (а) и 250 Гц, 465 Гц, 600 Гц, 800 Гц (б). Индуктор-соленоид расположен вплотную к поверхности фантома.

тканей в результате воздействия переменным магнитным полем. Полученные результаты приведены на рис. 4, 5, 6 и 7.

Максимальное расстояние от поверхности фантома, на котором отмечалось индуцирование токов J для переменного магнитного поля, одинаково для мышечной, жировой и костной тканей, и характер его зависимости является однонаправленным для всех использованных частот (рис. 4, 5, 6). Величины индуцированных токов J для разных тканей неодинаковы: наибольшая величина ($> 20 \text{ мА/м}^2$) отмечается для мышечной (рис. 4), значительно меньшая для жировой ($> 2,5 \text{ мА/м}^2$) (рис. 5) и наименьшая – для костной ткани ($> 1,25 \text{ мА/м}^2$) (рис. 6).

Приведенные величины получены для самой высокой используемой в расчетах частоты – 800 Гц, в то время как со снижением частоты до 9,4 Гц снижаются и величины индуцированных токов, причем с одинаковым характером зависимости. Обращает на себя внимание частотная зависимость глубины индуцирования токов: близкие, минимальные величины отмечаются на самых низких частотах, вошедших в исследование – 9,4 Гц и 20 Гц, тогда как с повышением частоты эта закономерность нарушается. В этом смысле более показательны результаты индуцированных токов, полученные для трех видов тканей (мышечная, жировая, костная) в зависимости от частоты переменного магнитного поля и приведенные на рис. 7. Представленные данные иллюстрируют наибольшую частотную зависимость величины индуцированных токов

для мышечной ткани, меньшую у жировой и наименьшую для костной ткани.

В отличие от электрического, переменное магнитное поле практически без искажения или затухания проникает в тело человека в том случае, если там отсутствуют какие-либо магнитные включения. Вместе с тем нельзя не принимать во внимание, что величина магнитной индукции падает при удалении от источника пропорционально кубу расстояния от него. В настоящее время принято считать, что биологический эффект определяет не индукция переменного магнитного поля, а величина индуцированных в тканях токов [12]. Биологические ткани в большинстве своем являются диэлектриками, для которых характерна поляризация вследствие наличия у молекул дипольного момента и проводимость за счет диффузии зарядов в виде ионов. Таким образом, в биологическом объекте, помещенном в переменное электромагнитное поле, будут протекать токи двух видов – проводимости и смещения. Токи проводимости возникают благодаря перемещению свободных зарядов, а токи смещения – благодаря ориентации связанных. Токи проводимости определяют величину электрической проводимости, а токи смещения – величину диэлектрической проницаемости биологического объекта. Важнейшие для дозиметрии диэлектрические параметры биологических тканей (диэлектрическая проницаемость и проводимость) имеют ярко выраженную дисперсию (зависимость от частоты). Эта зависимость их значений от частоты носит

противоположный характер – проницаемость уменьшается, в то время как проводимость увеличивается с ростом частоты [13]. Существует несколько видов дисперсий, обозначаемые как α -, β - и γ -дисперсии на низких, средних и высоких частотах, соответственно. В наших исследованиях представляет интерес только α -дисперсия, которая наблюдается в диапазоне частот $1-10^4$ Гц.

Вероятно, именно эта зависимость от частоты в виде α -дисперсии и определяет характер индуцированных в тканях токов, которые были получены в результате проведенного нами моделирования. В пользу этого суждения свидетельствует структура распределения индуцированных токов в гомогенном фантоме, которая не

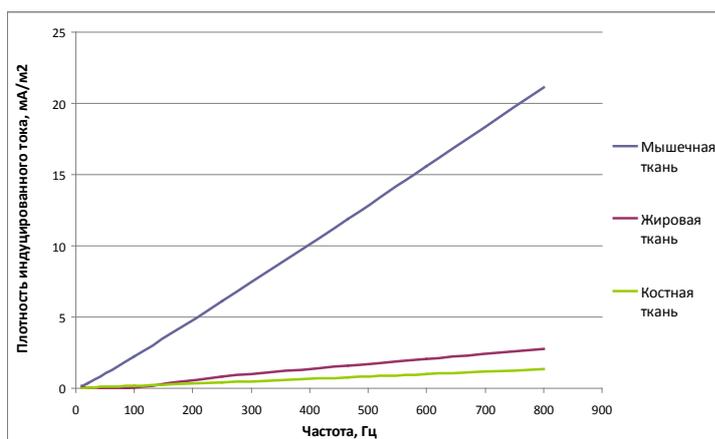


Рис. 7. Характер зависимости величины максимальной плотности токов (J , мА/м^2) индуцированных в гомогенных фантомах, моделирующих мышечную, жировую и костную ткань от частоты переменного магнитного поля с индукцией 2,0 мТл.

зависит от диэлектрических свойств и одинакова, а различия наблюдаются только в величинах. Следует также обратить внимание на то, что величина α -дисперсии в диапазоне использованных частот для разных тканей неодинакова. Максимальная дисперсия наблюдается у мышечной ткани, затем следуют жировая и костная ткани. Также небезразличным для характера формирования индуцированных токов является и проводимость тканей, которая определяется содержанием в них воды. Таким образом, максимальная проводимость у мышечной ткани, меньшая у жировой ткани и самая низкая у костной ткани. Все эти зависимости определяют характер и величину индуцированных в исследованных моделях тканей токов, которые играют самую непосредственную роль в формировании биологических эффектов действия переменного магнитного поля низкой частоты, как и показано в проведенных нами исследованиях.

ВЫВОДЫ

В результате выполненного моделирования получены величины и частотные зависимости для индуцированных токов в однородных фантомах мышечной, жировой и костной тканей при воздействии переменным магнитным полем.

Проведенный анализ распределения индуцированных в однородных фантомах мышечной, жировой и костной тканей токов показал их зависимость от диэлектрических параметров тканей и также характера их дисперсии в исследованном диапазоне частот.

Показана возможность и перспективность использования метода теоретического моделирования с помощью программы SEMCAD X в дозиметрических исследованиях, направленных на оптимизацию терапевтического применения переменных магнитных полей при экзогенной биорезонансной терапии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Улащик В.С. Очерки общей физиотерапии. – Мн.: Наука і тэхніка, 1994.
2. Боголюбов В.М., Пономаренко Г.Н. Общая физиотерапия. – М.: Медицина, 2003.
3. Системы комплексной электромагнитотерапии / Под ред. А.М. Беркутова, В.И. Жулева, Г.А. Кураева, Е.М. Прошина. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2000.
4. Пономаренко Г.Н., Турковский И.И. Биофизические основы физиотерапии. – М.: Медицина, 2006.
5. Lovsung P., Oberg P.A., Nilsson S.E.G., Reuter T.

Magnetophosphenus: A quantitative analysis of thresholds // Med. Biol. Eng. Comput. – 1980. – V.18, N.3. – P. 326–334.

6. Готовский М.Ю., Перов С.Ю. Возможности использования численных методов теоретической дозиметрии в импульсной магнитотерапии // Традиционная медицина. – 2010. – №2. – С. 4–8.

7. Кузнецов А.Н. Биофизика низкочастотных электромагнитных воздействий. – М.: МФТИ, 1994.

8. ICNIRP Guidelines / Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz) // Health Physics – 1998. – V.74, N.4. – P. 494–522.

9. Hagmann M.J., Babij T.M. Non-invasive measurement of current in the human body for electromagnetic dosimetry // IEEE Trans. Biomed. Eng. 1993. – V.40, N.5. – P. 418–423.

10. <http://www.speag.com/>

11. <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.htm>

12. Stuchly M.A., Dawson T.W. Interaction of low-frequency electric and magnetic fields with the human body // Proc. IEEE. – 2000. – V.88, N.5. – P.643–664.

13. Schwan H.P. Dielectric properties of biological tissue and biophysical mechanisms of electromagnetic-field interaction // Biological Effects of Nonionizing Radiation. ACS Symposium Series. – 1981. – V.157, ch.8. – P. 109–131.

Адрес автора

К.т.н. Готовский М.Ю.
ООО «ЦИМС «ИМЕДИС»
info@imedis.ru