

**ПОДХОДЫ К НОРМИРОВАНИЮ ФИЗИОТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
НИЗКОЧАСТОТНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

М.Ю. ГОТОВСКИЙ\*, С.Ю. ПЕРОВ\*\*

\*ООО "Центр интеллектуальных медицинских систем «ИМЕДИС»,  
ул. Авиамоторная, 12, Москва, 111024, Россия

\*\*ФГБНУ НИИ медицины труда, проспект Буденного д.31, Москва, 105272, Россия

**Аннотация.** Использование низкочастотных электромагнитных полей в медицине является одним из перспективных разделов физиотерапии, обусловленное низкими уровнями воздействия при высокой эффективности терапевтических показателей. Однако выбор уровней воздействия крайне затруднен из-за отсутствия чувствительности пациента к действующему фактору, а также недостаточно быстрых ответных биологических эффектов облучения. Предложена возможность объективной оценки дозы для биологического и лечебного действия низкочастотных магнитных полей. Рассмотрен подход к нормированию зависимости доза-терапевтического эффекта с позиций соотношения величин внутренних индуцированных токов и магнитной индукции низкочастотного магнитного поля. С помощью методов теоретической дозиметрии на численных моделях лабораторных животных и человека предложен метод коэффициента пересчета биологически значимых значений магнитной индукции с учетом нормирования и возможность его распространения на область практического применения лечебного действия низкочастотных магнитных полей. Предложенный подход в низкочастотном нормировании на величину магнитной индукции в исследуемом объекте (органе или всем теле) позволяет сопоставлять данные различных вариантов (терапевтических схем) воздействия на биологический объект, не прибегая к использованию лишних параметров и опираясь лишь на значимую физическую величину магнитной индукции, которая и является физиотерапевтическим параметром.

**Ключевые слова:** переменные магнитные поля, дозиметрия, численные методы, индуцированные токи, зависимость доза-эффект, доза-терапевтический эффект, коэффициент нормирования

**APPROACHES TO RATIONING OF PHYSIOTHERAPEUTIC EFFECTS OF LOW FREQUENCY  
MAGNETIC FIELDS**

M.YU. GOTOVSKIY\*, S.YU. PEROV\*\*

\*Center of Intellectual Medical Systems IMEDIS, Aviamotornaya st., 12, Moscow, 111024, Russia

\*\*FSBSI "Research Institute of Occupational Health", Budennov av., 31, Moscow, 105272, Russia

**Abstract.** The use of low frequency electromagnetic fields in medicine is one of the most promising sections of physiotherapy due to low levels of exposure to the high efficiency of therapeutic indices. However, the choice of exposure levels is extremely difficult because of absence of patient sensitivity to the operating factors, as well as insufficient quick response of the biological effects of exposure. The possible evaluation of the dose for biological and therapeutic influence of low frequency magnetic fields was suggested. This approach is rationing dose-therapeutic effect by ratio of the induced currents and levels of magnetic induction of low-frequency magnetic field. Using theoretical dosimetry methods on numerical models of laboratory animals and humans, the authors proposed a method of conversion rate of biologically significant values of magnetic induction based on of rationing and the possibility of its spread in the area of practical application of the therapeutic effect of low-frequency magnetic fields. The suggested approach in the low frequency normalized to the magnitude of the magnetic induction in the studied object (an organ or the whole body) allows to compare the data of different variants (therapeutic regimens) effect on a biological object, without having to use additional parameters and using only the a significant physical quantity of magnetic induction, which it is a physical rationing coefficient.

**Key words:** the varying magnetic field dosimetry, numerical methods, induced currents dose-effect dose therapeutic effect, rationing coefficient.

**Введение.** Использование низкочастотных электромагнитных полей (НЧ ЭМП) в медицине является одним из перспективных разделов физиотерапии, обусловленное низкими уровнями воздействия при высокой эффективности терапевтических показателей. В связи с тем, что в отличие от высокочастотной физиотерапии, когда подбор уровня воздействия производится по субъективным ощущениям пациента, при лечении низкочастотным электрическим или магнитным полем, оценка и подбор эффективного значения крайне затруднен из-за отсутствия чувствительности пациента к действующему фактору, а также недоста-

точно быстрых ответных биологических эффектов облучения. Проблема в определении эффективной дозы воздействия является актуальной и сложной задачей [3]. При внешнем воздействии на организм в низкочастотном диапазоне электромагнитных полей сложно оценить дозу, которая выражается в единицах массы вещества или энергии (мощности) излучения, приходящегося на единицу массы или объема биологического объекта. Выраженность развивающегося биологического или лечебного эффекта при действии физического фактора является функцией их количества или интенсивности. Таким образом, доза является количественной характеристикой действующего фактора, а под оказываемым эффектом подразумевается качественный или количественный отклик биологического объекта на оказываемое воздействие.

Биологическое действие низкочастотных электрических и магнитных полей обусловлено возникновением наведенных токов в органах и тканях объекта экспозиции, которые выражаются в плотности токов в  $A/m^2$  [9]. Несмотря на хорошую проникающую способность низкочастотных магнитных полей через биологические ткани и, как следствие, однородность распространения, плотность токов в теле биологического объекта является неоднородной и зависит не только от интенсивности воздействия, например, *переменным магнитным полем* (ПМП), но обладает частотной зависимостью, кроме того форма органов и тканей оказывает влияние на структура распределения токов в рассматриваемом органе. Исходя из ослабления действующего низкочастотного магнитного поля при физиотерапии глубина проникновения в ткани намного превышает размеры самих тканей [6].

Глубина проникновения и проводимость для НЧ ЭМП показывают, что в практических условиях при лечении низкочастотными магнитными полями, величину глубины проникновения можно не принимать во внимание, а рассматривать плотность тока, вызванного воздействием низкочастотного поля на органы и ткани биологического объекта, как значимый параметр, определяющий возникновение ответных биологических эффектов на действие НЧ МП.

В настоящее время плотность токов (в  $mA/m^2$ ) индуцированных внешним магнитным полем в тканях является значимым параметром в оценке биологических эффектов воздействия на уровне целого организма и определяет дозу воздействия [13]. Однако непосредственное измерение величины индуцированных токов в биологическом объекте невозможно. Разработанные в настоящее время методы неинвазивного измерения индуцированных токов в биологическом объекте позволяют получить только интегральную характеристику, тогда как получение структуры распределения токов в органах и тканях, а также их величин остается недоступным [10].

В связи с этим получила распространение теоретическая (численная) дозиметрия, с помощью которой возможно получить сведения о величине и характере пространственного распределения индуцированных токов в математических (численных) моделях (фантомах), которые имитируют основные биологические органы и ткани [2]. В теоретической дозиметрии решаются уравнения Максвелла, для  $E$ - и  $H$ -векторов ЭМП для фантома с заданными электрическими параметрами, например, мышечной, жировой, костной и других видов тканей. Фантомы могут быть как простые гомогенные объекты, так и сложные гетерогенные объекты, в том числе модели реальных биологических объектов (лабораторных животных, людей) построенные на данных томографических исследований. В последние годы в численной дозиметрии используются модели всего тела человека или его отдельных частей [11], построенные с использованием данных компьютерной томографии, магнито-резонансной томографии и срезов замороженных тканей в рамках проекта «Видимый человек» Американской национальной медицинской библиотеки [10]. В число таких моделей входят, например, блочная модель тела мужчины [12], модели головы и туловища [8]; группа моделей, состоящая из нескольких взрослых и детей (виртуальная семья) [7]. Современные вычислительные возможности, а также наличие детальных, имеющих высокое разрешение, числовых фантомов биологических объектов, в том числе человека, позволяют оценить структуру распределения индуцированных токов в объекте исследования. В связи с отсутствием влияния биологических тканей на структуру внешнего НЧ ЭМП в теле объекта, различия в диэлектрических характеристиках, а также геометрических размерах биологических органов и тканей оказывают значительную роль на структуру распределения плотности токов, как для каждой ткани, так и для расположения относительно друг друга. Поэтому важность в оценке плотности тока в конкретном органе или ткани объекта является сложной задачей при моделировании всего объекта, т.к. помимо диэлектрических характеристик, важно оценивать разрешение всего объекта и выбора метода расчета [1].

Кроме особенностей моделирования биологического объекта, самым важным с позиций схемы проведения терапевтического воздействия помимо дозы, является расположение источника НЧ МП относительно тела человека. В современной физиотерапевтической аппаратуре и определенных схемах лечения может осуществляться как локальное (местное) воздействие (индукторы-соленоиды) на определенные органы, так и общее (на весь организм), что характеризуются сложной пространственной структурой НЧ МП не только источника, но индуцированных токов в теле пациента [4]. При облучении всего тела пациента погрешность в определении дозы может быть минимальна при сохранении напряженности и однородности НЧ ЭМП, однако при использовании подходов локального облучения, небольшие изменения положения

аппликаторов (индукторов-соленоидов) могут внести серьезные изменения в структуру плотности токов в теле пациента, особенно, если воздействие ориентировано на определенные органы и ткани.

Все эти неоднозначности, связанные с разрешением численной модели, где структура и абсолютные значения внешнего НЧ ЭМП зависят от разрешения, а также структура плотности токов в органах и тканях пациента, зависящее от расположения источника относительно объекта экспозиции и его выходной мощности (значения напряженности НЧ ЭМП), требуется нормирования результатов моделирования для обеспечения адекватной величины действующего поля при соблюдении требуемой дозы при возможных изменениях схем физиотерапии.

*Подход к нормированию показателей воздействия.* Для определения оптимальных величин индукции действующего внешнего магнитного поля при оценке зависимостей доза-терапевтического эффекта, предлагается введение нормирования. Подобный подход реализован при изучении биологических эффектов ЭМП радиочастотного диапазона. При моделировании облучения, а также поставке экспериментов, преимущественно вблизи источника излучения важную роль играет сам объект экспозиции. Это обусловлено тем, что биологический объект или его модель является плохим проводником (объект с потерями) и вступает во взаимодействие с выходными параметрами излучателя посредством изменения импеданса среды, что в свою очередь влияет на согласованность излучающей системы. Поэтому при одной и той же выходной мощности источника излучения, даже в связи с изменением ориентации объекта экспозиции, уровни облучения, а, соответственно, и поглощаемая электромагнитная энергия могут меняться. Для репрезентативности получаемых данных используется нормирование полученных данных по параметру, отражающему возможные изменения системы «источник-объект» с позиций экспозиции. Такими параметрами могут выступать импеданс антенны, ток в антенне, напряженность электрического поля, плотность потока энергии и пр. При предоставлении и сопоставлении данных принято показывать нормированное значение с указанием размерности искомой величины на размерность нормированного показателя.

Однако, для низкочастотного воздействия, в связи с отсутствием связи источника излучения с объектом экспозиции нормирование не применялось ранее, в том числе из-за отсутствия возможности оценки плотности индуцированных токов в объектах сложной формы. Более того, биологические объекты имеют гетерогенную структуру с различными диэлектрическими характеристиками. Поэтому сложность в оценке индуцированных токов в интересующих органах может быть решена методами численной дозиметрии с использованием моделей биологических объектов.

Предлагаемый подход НЧ нормирования дозы является результатом деления величин плотности индуцированных токов ( $J$ ) в органах или тканях фантома на индукцию магнитного поля ( $B$ ) в этом органе. Для сопоставления данных, полученных при моделировании на различных числовых биологических объектах, необходимо проводить нормирование данных на действующее поле в тех условиях, где происходило воздействие. Это необходимо для уравнивания различных условий экспозиции для одних и тех же органов, а также сопоставления плотностей токов при различных уровнях воздействия.

На первом этапе анализа данных численного моделирования необходимо выделить средние значения магнитной индукции ( $B$ ) и плотности тока ( $J$ ) для конкретного органа или ткани для каждого из объектов. Рассмотрение максимальных значений  $B_{\max}$  и  $J_{\max}$  может носить лишь информационный характер и не должно учитываться в расчетах, т.к. при анализе данных в объектах сложной формы величины  $B$  и  $J$  могут отличаться более одного порядка от максимальных. Рассчитанные нормированные значения возможно сравнивать с другими, также нормированными, значениями для сопоставления и дальнейшего анализа.

Помимо полученных нормированных значений для определения действующей дозы, бывает необходимо сопоставить значения дозы при различных размещениях источника НЧ ЭМП относительно требуемых органов, а также использование различных моделей, в том числе лабораторных животных для оценки дозо-зависимых характеристик возникающих биологических эффектов в процессе медико-биологических исследований, и переносе необходимого воздействия на человека для получения требуемого терапевтического эффекта. В этом случае требуется, так называемый коэффициент нормирования, который обеспечивает пересчет требуемой дозы для человека при известных воздействиях и зарегистрированном биологическом эффекте у животных.

Например, в процессе оценки плотности тока для желчного пузыря человека  $J$  при магнитной индукции внутри тканей органа  $B$  зная внешнюю магнитную индукцию  $B_{\text{индуктор}}$  и размещение индуктора в проекции на желчный пузырь можно получить нормированное значение дозы как  $(J/B)$ , однако при изменении положения индуктора или  $B_{\text{индуктор}}$  изменится магнитная индукция в исследуемом органе  $B'$ , и следовательно изменится и значения плотности тока  $J'$ , поэтому получая новое нормированное значение

дозы  $(J'/B')$  существует возможность сравнения эффективности воздействия при изменении условий воздействия.

Другим примером возможности нормирования при применении НЧ ЭМП может служить оценка требуемой дозы для пациента при постановке медико-биологических исследований на животных. При получении устойчивых биологических эффектов НЧ ЭМП на животных, можно рассчитать нормированные значения  $\left( \frac{J'_{\text{животное}}}{B'_{\text{животное}}} \right)$  при известной интенсивности внешнего поля и частоты в биологическом эксперименте. Используя идентичные условия, провести моделирование воздействия на человека и получить нормированные значения  $\left( \frac{J'_{\text{человек}}}{B'_{\text{человек}}} \right)$  для человека. Исходя из полученных нормированных значений, можно вычислить коэффициент пересчета эффективных уровней магнитной индукции (плотности тока) от лабораторного животного к человеку в зависимости от частоты для рассматриваемых органов.

$$\frac{\left( \frac{J'_{\text{животное}}}{B'_{\text{животное}}} \right)}{\left( \frac{J'_{\text{человек}}}{B'_{\text{человек}}} \right)} = K(f)$$

Полученные значения позволяют построить зависимость коэффициента пересчета животное-человек от частоты воздействия. Исходя из анализа функции  $K(f)$ , можно получить функцию коэффициента пересчета для конкретного органа от частоты. Следовательно по результатам нормирования и коэффициента пересчета можно определить какую величину магнитной индукции нужно иметь для достижения биологического (терапевтического) эффекта у человека. Использование в практике значений внешнего поля нормированию не подлежит, т.к. выходная мощность не имеет обратной связи с объектом облучения в отличие от радиочастотного диапазона.

Для пересчета эффективного значения ПМП необходимо использовать следующую формулу:

$$B_{\text{индуктора}} = \frac{B'_{\text{человек}}}{K(f)}$$

Тем самым получается эффективное значение магнитной индукции у индуктора (выходная мощность индуктора), при котором наблюдался биологический эффект у животного на той же частоте при заданной мощности.

Нормирование может осуществляться на любой из параметров, который адекватно отражает изменение рассматриваемой системы. Предложенный подход в низкочастотном нормировании на величину магнитной индукции в исследуемом объекте (органе или всем теле) позволяет сопоставлять данные различных вариантов (терапевтических схем) воздействия на биологический объект, не прибегая к использованию лишних параметров и опираясь лишь на значимую физическую величину магнитной индукции, которая и является физиотерапевтическим параметром.

**Выводы.** Впервые предложен подход нормирования для низкочастотного диапазона, который позволяет оценить влияние индуцированных токов в биологическом объекте при различных вариантах облучения. Предложенный коэффициент нормирования является объективной оценкой зависимости физиотерапевтического эффекта при использовании низкочастотных магнитных полей в терапевтических целях, а также как исследовательский метод оценки пересчета биологически значимых доз у животных на человека. Для подтверждения предложенного подхода требуется комплексное изучение с использованием численной дозиметрии, а также проведением отдельных медико-биологических исследований.

### Литература

1. Готовский М.Ю., Перов С.Ю., Белая О.В. Численные методы дозиметрии в оценке биологически значимых уровней низкочастотных электромагнитных полей // Биомедицинская радиоэлектроника. 2014. № 12. С. 12–17.
2. Готовский М.Ю., Перов С.Ю. Возможности использования численных методов теоретической дозиметрии в импульсной магнитотерапии // Традиционная медицина. 2010. № 2. С. 4–8.
3. Криштопенко С.В., Тихов М.С., Попова Е.Б. Доза-эффект. М.: «Медицина», 2008.
4. Системы комплексной электромагнитотерапии / Под ред. Беркутова А.М., Жулева В.И., Кураева Г.А., Прошина Е.М. М.: БИНОМ - Лаборатория Базовых Знаний, 2000.
5. Ackerman M.J. The Visible Human Project // Proc. IEEE. 1998. Vol.86, №3. P. 504–511.
6. Andreuccetti D., Fossi R., Petrucci C. An Internet resource for the calculation of the dielectric properties of body tissues in the frequency range 10 Hz - 100 GHz // IFAC-CNR. 1997. URL: <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>.
7. Christ A., Kainz W., Hahn E.G., Honegger K., Zefferer M., Neufeld E., Rascher W., Janka R., Bautz W., Chen J., Kiefer B., Schmitt P., Hollenbach H.P., Shen J., Oberle M., Szczerba D., Kam A., Guag J.W., Kuster N. The Virtual Family – development of surface-based anatomical models of two adults and two children for dosimetric simulations // Phys. Med. Biol. 2010. Vol.55, №2. P. 23–38.

8. Dimbylow P. Development of the female voxel phantom, NAOMI, and its application to calculations of induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic and electric fields // *Phys. Med. Biol.* 2005. Vol.50, №6. P. 1047–1070.
9. Extremely Low Frequency Fields // *Environmental Health Criteria Monograph.* 2007. № 238.
10. Hagmann M.J., Babij T.M. Non-invasive measurement of current in the human body for electromagnetic dosimetry // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 1993. Vol.40, №5. P. 418–423.
11. Hand J. W. Modelling the interaction of electromagnetic fields (10 MHz-10 GHz) with the human body: methods and applications // *Phys. Med. Biol.* 2008. Vol.53, №16. P. 243–286.
12. Mason P.A., Hurt W.D., Walters T.J., D'Andrea J.A., Gajsek P., Ryan K.L., Nelson D.A., Smith K.I., Ziriak J.M. Effects of frequency, permittivity, and voxel size on predicted specific absorption rate values in biological tissue during electromagnetic-field exposure // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2000. Vol.48, №11. P. 2050–2058.
13. Stuchly M.A., Dawson T.W. Interaction of low-frequency electric and magnetic fields with the human body // *Proc. IEEE.* 2000. Vol.88, №5. P. 643–664.

### References

1. Gotovskiy MY, Perov SY, Belaya OV. Chislennye metody dozimetrii v otsenke biologicheskii znachimykh urovney nizkochastotnykh elektromagnitnykh poley [Numerical methods for dosimetry evaluation biologically significant levels of low-frequency electromagnetic fields]. *Biomeditsinskaya radioelektronika.* 2014;12:12-7. Russian.
2. Gotovskiy MY, Perov SY. Vozmozhnosti ispol'zovaniya chislennykh metodov teoreti-cheskoy dozimetrii v impul'snoy magnitoterapii [The possibilities of using numerical methods, theoretical cal dosimetry in pulsed magnetic therapy]. *Traditsionnaya meditsina.* 2010;2:4-8. Russian.
3. Krishtopenko SV, Tikhov MS, Popova EB. Doza-effekt [Dose-effect]. Moscow: «Meditsina»; 2008. Russian.
4. Sistemy kompleksnoy elektromagnitoterapii [Systems integrated elektromagnitoterapii]. Pod red. Berkutova AM, Zhuleva VI, Kuraeva GA, Proshina EM. Moscow: BINOM - Laboratoriya Bazovykh Znaniy; 2000. Russian.
5. Ackerman MJ. The Visible Human Project. *Proc. IEEE.* 1998;86(3):504-11.
6. Andreuccetti D, Fossi R, Petrucci C. An Internet resource for the calculation of the dielectric properties of body tissues in the frequency range 10 Hz - 100 GHz. IFAC-CNR. 1997. URL: <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>.
7. Christ A, Kainz W, Hahn EG, Honegger K, Zefferer M, Neufeld E, Rascher W, Janka R, Bautz W, Chen J, Kiefer B, Schmitt P, Hollenbach HP, Shen J, Oberle M, Szczerba D, Kam A, Guag JW, Kuster N. The Virtual Family—development of surface-based anatomical models of two adults and two children for dosimetric simulations. *Phys. Med. Biol.* 2010;55(2):23-38.
8. Dimbylow P. Development of the female voxel phantom, NAOMI, and its application to calculations of induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic and electric fields. *Phys. Med. Biol.* 2005;50(6):1047-70.
9. Extremely Low Frequency Fields. *Environmental Health Criteria Monograph.* 2007;238.
10. Hagmann MJ, Babij TM. Non invasive measurement of current in the human body for electromagnetic dosimetry. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 1993;40(5):418-23.
11. Hand JW. Modelling the interaction of electromagnetic fields (10 MHz-10 GHz) with the human body: methods and applications. *Phys. Med. Biol.* 2008;53(16):243-86.
12. Mason PA, Hurt WD, Walters TJ, D'Andrea JA, Gajsek P, Ryan KL, Nelson DA, Smith KI, Ziriak JM. Effects of frequency, permittivity, and voxel size on predicted specific absorption rate values in biological tissue during electromagnetic-field exposure. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2000;48(11):2050-8.
13. Stuchly MA, Dawson TW. Interaction of low-frequency electric and magnetic fields with the human body. *Proc. IEEE.* 2000;88(5):643-64.

---

### Библиографическая ссылка:

Готовский М.Ю., Перов С.Ю. Подходы к нормированию физиотерапевтического воздействия низкочастотных магнитных полей // *Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание.* 2017. №1. Публикация 3-2. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2017-1/3-2.pdf> (дата обращения: 01.03.2017). DOI: 10.12737/25085.