

28. Panychev A.I., Dubinskaya I.V. Sintez luchevoy traektorii proniknoveniya signalov WLAN v smezhnye pomeshcheniya [Synthesis of ray trajectory penetration WLAN signals in adjacent rooms], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 5(142), pp. 116-122.
29. Panychev A.I., Vaganova A.A. Three-dimensional Tracing of WLAN Signals Between Rooms, *25th Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2015)*. - Sevastopol, Crimea, 6-12 September 2015, Vol. 1, pp. 211-212.
30. Panychev A.I., Vaganova A.A. Sintez traektorii lucheвого prelomleniya signalov lo-kal'noy besprovodnoy seti svyazi na elementakh konstruksiy zdaniya [The synthesis of the trajectory of beam refraction signals lo-cal wireless communication network on the elements of building structures], *Izluchenie i rasseyanie elektromagnitnykh voln: Trudy Mezhdunar. nauchn. konf. «Izluchenie i rasseyanie elektromagnitnykh voln – IREMV-2015»* [Radiation and scattering of electromagnetic waves: proceedings of the International scientific conference "Radiation and scattering of electromagnetic waves – IRANG-2015"]. Rostov-na-Donu: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 396-400.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Бутенко.

Панычев Андрей Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: ruu2011@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; кафедра антенн и радиопередающих устройств; к.т.н.; доцент.

Ваганова Анастасия Алексеевна – e-mail: anastasia_vaganova@mail.ru; магистрант.

Panychev Andrey Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: ruu2011@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; the department of antenna and radio transmitter units; cand. of eng. sc.; associate professor.

Vaganova Anastasia Alekseevna – e-mail: anastasia_vaganova@mail.ru; master student.

УДК 621.396.93

Н.Н. Кисель

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВНУТРИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В связи с расширением функциональных возможностей мобильных средств связи и существенного увеличения времени их использования абонентами в течение дня возрастает внимание к исследованию по определению степени влияния электромагнитного воздействия на пользователя. Создание адекватной электродинамической модели биологической ткани для исследования влияния СВЧ-колебаний связано с необходимостью решения задачи о возбуждении электромагнитной волны в среде с резко меняющимися параметрами (кожа, мышцы, кости, жировая ткань). При этом характерные неоднородности оказываются соизмеримыми с длиной волны или меньше ее, из-за чего применение ряда приближенных асимптотических методов решения соответствующих модельных задач оказывается практически невозможным. Строгий расчет поля внутри человека можно выполнить только на основе трехмерного моделирования биологической среды с произвольными параметрами диэлектрической проницаемости ϵ и проводимости σ , что лежит на пределе возможностей самой современной вычислительной техники. В работе проведены исследования для упрощенных электродинамических моделей биологической ткани, в частности, в виде многослойной среды с плоскими слоями, а также многослойной сферы или эллипсоида. Для описания модели головы более предпочтительными являются модели, построенные на основе многослойных сфер или эллипсоидов, внутри которых расположен объем более сложной конфигурации, описывающей мозг. В работе рассмотрен случай трехслойной модели головы человека в виде эллипсоида вращения с усеченным эллипсоидом внутри для описания мозга человека и двух моделей сотового телефона с микрополосковой антенной и со

спиральной антенной. Расчеты распределения электромагнитных полей и SAR выполнены в программе FEKO. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что пространственный пик SAR, усредненный на 10 г/см^3 модели человеческого тела, ниже порогового значения, рекомендованного международными стандартами. Увеличивая расстояние между мобильным устройством и головой можно значительно снизить уровень SAR. При этом, однако, не наблюдается изменение положения области, где достигаются пиковые значения SAR.

Удельная поглощаемая мощность; SAR; микрополосковая антенна; биологическая среда.

N.N. Kisel

INVESTIGATION OF DISTRIBUTION OF ELECTROMAGNETIC FIELDS IN BIOLOGICAL OBJECTS

Attention to the study to determine the degree of influence of electromagnetic effects on the user is increased by the expansion of the functionality of mobile communications and a significant increase in the time of their subscribers use throughout the day. Creating adequate electrodynamic model of biological tissue to study the influence of electromagnetic waves due to the necessity of solving the problem of the excitation of the electromagnetic wave in a dramatically changing parameters (skin, muscle, bone, fat tissue). This characteristic inhomogeneity are comparable to the wavelength or smaller than it, which is why the use of the approximate number of asymptotic methods for solving the corresponding model problems is practically impossible. A rigorous method for computing field inside a person can be done only on the basis of three-dimensional modeling of a biological medium with arbitrary parameters of the permittivity and conductivity, which lies at the limits of the most modern computer technology. Studies conducted for electrodynamic simplified models of biological tissue, in particular, the model is represented as a multilayer medium with flat layers, and a multilayer of a sphere or ellipsoid. For a description of the head model are more preferred model constructed on the basis of multi-layer spheres or ellipsoids, which are located within the volume of a more complex configuration, which describes the brain. Modeling using the scope is particularly advantageous and widely used, allowing to perform a primary SAR estimation by the example of the multi-layer sphere. Research work carried out using a three-layer model of the human head in the form of an ellipsoid of revolution with a truncated ellipsoid inside to describe the human brain and two cell phone models with a microstrip antenna and a spiral antenna. Distribution Calculations of electromagnetic fields and SAR performed in FEKO program. These results suggest that the spatial peak SAR averaged over 10 g/cm^3 model of the human body are obtained below the threshold recommended by international standards. Increasing the distance between the mobile device and the head can be significantly reduced SAR levels. In this case, however, there is no change in position of the region where the peak SAR values are reached.

Specific absorbed power; the SAR; microstrip antenna; the biological media.

Введение. В связи с расширением функциональных возможностей мобильных средств связи и существенного увеличения времени их использования абонентами в течение дня возрос интерес к исследованиям по определению степени влияния электромагнитного воздействия на пользователя. Причем следует отметить, что негативное влияние на пользователя могут оказывать как низкие уровни излучения, так и высокие уровни поглощения в малых областях биологической ткани, характеризующихся высокой проводимостью. Используемые антенны сотовых телефонов должны быть хорошо согласованы с передатчиком, обеспечивая эффективное излучение сигнала, в противном случае реактивная мощность поля ближней зоны приведет к росту уровня поглощаемой мощности внутри биологической среды. В связи с этим в настоящее время достаточно актуальным является задача исследования распределения электрических полей и удельной поглощаемой мощности как с целью сертификации мобильных средств связи, так и для контроля значений поглощаемой мощности внутри тканей человека [1–18].

Цели и задачи. Основной целью проведенных исследований является повышение достоверности уровней и распределений поглощаемой мощности в биологической среде в результате воздействия реальных антенн сотовых телефонов путем разработки адекватных математических моделей биологической среды.

Основная часть. Основным параметром для описания взаимодействия электромагнитного излучения с биологической средой принят параметр SAR (Specific Absorption Rate) – удельная поглощаемая мощность внутри среды. Распределение интенсивности поглощения SAR зависит от напряженности электрического поля, плотности материала ρ и электрическая проводимость σ (См/м) [1].

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho}$$

Для параметра SAR установлены национальными и международными стандартами предельные нормы на средние значения SAR в ячейке весом в 1 грамм или в ячейке весом 10 граммов. Наибольший интерес представляет область головы, как наиболее близко расположенная к источнику излучения - мобильному телефону. В нормативно-технической документации на мобильные средства всегда указывается SAR (как правило, значение при работе телефона на максимальной мощности). Следует отметить, что в зоне слабого приема текущий уровень SAR выше, чем SAR для того же телефона, работающего в зоне уверенного приема.

В [7] приведены результаты эксперимента с участием добровольцев по определению влияния сотовых средств связи в зависимости от расположения телефона по отношению к телу человека. Субъективные симптомы воздействия, такие, как головная боль, были отмечены при использовании телефонов с уровнем SAR выше 0,5 Вт/кг в течение нескольких минут.

Существуют специальные центры по радиационной и ядерной безопасности, в которых проводится тестирования моделей телефонов на их соответствия стандартам.

В диапазоне СВЧ магнитные свойства биологических сред мало выражены. Наиболее полно электрофизические параметры биологических тканей в СВЧ-диапазоне исследованы в работах [9]. Ниже в таблице представлены значения диэлектрической проницаемости, электропроводности и тангенса угла потерь биологических тканей с большим содержанием воды (мышцы, кожа, печень, почки, сердце, кровь и другие) и с малым содержанием воды (жир, костный мозг, костная ткань).

Электрофизические свойства биологических сред

Вид ткани	Частота, МГц	Диэлектрическая проницаемость	Проводимость	Тангенс угла потерь
Ткани с высоким содержанием воды	915	51	1,28	0,49
Ткани с низким содержанием воды	915	5,6	55,6–147	0,25

Создание адекватной электродинамической модели биологической ткани для исследования влияния СВЧ-колебаний связано с необходимостью решения задачи о возбуждении электромагнитной волны в среде с резко меняющимися параметрами (кожа, мышцы, кости, жировая ткань). При этом характерные неоднородности оказываются соизмеримыми с длиной волны или меньше ее, из-за чего примене-

ние ряда приближенных асимптотических методов решения соответствующих модельных задач оказывается практически невозможным. Строгий расчет поля внутри человека можно выполнить только на основе трехмерного моделирования биологической среды с произвольными параметрами диэлектрической проницаемости ε и проводимости σ , что лежит на пределе возможностей самой современной вычислительной техники [10–18].

Наиболее приемлемый подход – использование упрощенных электродинамических моделей биологической ткани, в частности, в виде многослойной среды с плоскими слоями, а также многослойной сферы или эллипсоида.

Задача об исследовании взаимодействия электромагнитной волны со слоистой плоской структурой формулируется следующим образом. Пусть в свободном пространстве с диэлектрической и магнитной проницаемостями ε_0, μ_0 параллельно плоскости XOZ прямоугольной декартовой системы координат XYZ расположена плоскостройная структура, отдельные слои которой имеют постоянную толщину и состоят из однородного изотропного диэлектрика с параметрами ε, μ_0 (рис. 1). На структуру из полупространства $y > 0$ падает плоская электромагнитная волна. Требуется проанализировать распределение вектора напряженности электрического поля и удельной поглощаемой мощности в объеме слоев, а также зависимости коэффициентов отражения и прохождения ЭМВ при различных электрофизических свойствах и геометрических параметрах среды.

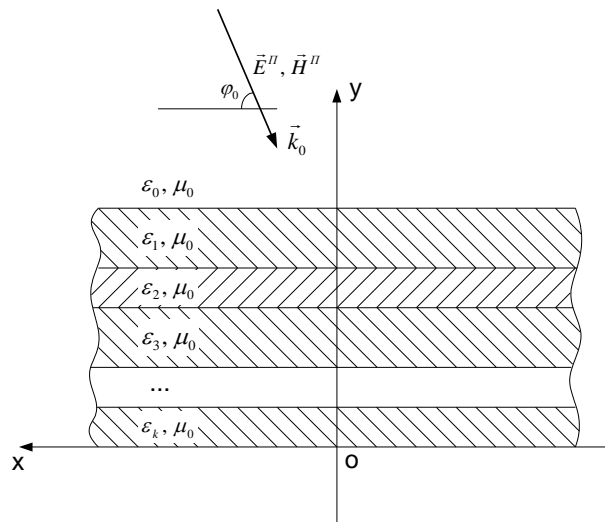


Рис. 1. Постановка задачи исследования взаимодействия электромагнитной волны с плоскостройной структурой

Решение задачи при произвольном законе изменения диэлектрической проницаемости и проводимости слоя вдоль его толщины получено универсальным строгим методом интегральных уравнений. В случае E-поляризации падающего поля ($\vec{E}^n = \vec{i}_z \vec{E}_z^n$) в области пространства V , занимаемой слоем, электрический ток поляризации с объемной плотностью

$$\vec{j}^{\text{pol}} = i\omega\varepsilon_0(\varepsilon - 1)\vec{E},$$

где \vec{E} – напряженность полного электрического поля; ε – относительная комплексная диэлектрическая проницаемость материала,

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad \varepsilon'' = \frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega}$$

ω – частота электромагнитного колебания, σ - объемная удельная проводимость среды. Вторичное поле, создаваемое токами поляризации, определяется из соотношения

$$E^p(p) = -\frac{1}{4\omega\epsilon_0} \iint J^{pol}(p') H_0^{(2)}(p, p') dx' dy'.$$

Добавив первичное (падающее) поле и заменив ток поляризации выражением через полное поле приходим к интегральному уравнению относительно напряженности электрического поля в объеме структуры

$$E_z(p) + \frac{i}{4} \iint (\epsilon(y') - 1) E_z(x', y') H_0^{(2)}(x', y, x, y) dx' dy' = E_z^n(x, y).$$

Учитывая, что при падении плоской волны зависимость поля от координаты x будет выражаться простой экспонентой

$$E(x, y) = \check{E}(x) \exp(i\beta x),$$

где $\beta = \cos\varphi_0$, а также применяя интегральное представление функции Ханкеля

$$H_0^{(2)}(p) = \frac{i}{\pi} \int_{\chi=-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-i\chi(x-x') - \sqrt{\chi^2-1}|y-y'|)}{\sqrt{\chi^2-1}} d\chi$$

получим следующее одномерное интегральное уравнение относительно напряженности электрического поля в объеме слоев вдоль оси y

$$\check{E}_z(y) - \frac{1}{2} \int_y (\epsilon(y') - 1) \check{E}_z(y') \frac{\exp(\sqrt{\beta^2-1}|y-y'|)}{\sqrt{\beta^2-1}} dy' = \check{E}_z^n(y).$$

Пользуясь теорией векторных потенциалов, поле рассеяния можно записать в виде

$$\check{E}_z^p(y) = \frac{1}{2} \int_y (\epsilon(y') - 1) \check{E}_z(y') \frac{\exp(\sqrt{\beta^2-1}|y-y'|)}{\sqrt{\beta^2-1}} dy'$$

тогда коэффициенты отражения R и прохождения T будут определяться соответственно следующими выражениями

$$R = -\frac{i}{2\sin\varphi_0} \int_y (\epsilon(y') - 1) \check{E}_z(y') \exp(isin\varphi_0 y') dy'$$

$$T = -\frac{i}{2\sin\varphi_0} \int_y (\epsilon(y') - 1) \check{E}_z(y') \exp(-isin\varphi_0 y') dy' + 1.$$

После решения интегрального уравнения можно рассчитывать распределения удельной поглощаемой мощности и напряженности электрического поля в различных точках биологической среды, а также значения комплексных коэффициентов отражения и прохождения. Величина объемной плотности мощности, поглощенной в ткани за счет наличия ионной проводимости и колебаний дипольных молекул, определяется как

$$p_t = \frac{\sigma}{2} |E|^2 = \frac{\omega\epsilon''}{2} |E|^2.$$

Используя данные для диэлектрической проницаемости и проводимости σ биологической ткани (жир, мышцы, кости) в требуемом диапазоне частот, проведено исследование свойств плоскостройной среды, моделирующей биологическую структуру. Показано, что изменение удельной проводимости ткани, связанное, например, с изменением концентрации в ней жидкости, оказывает заметное влияние на уровень напряженности поля в среде. Уровень объемной плотности поглощаемой мощности p_t зависит от наличия потерь в диэлектрике, поскольку величина p_t является функцией не только напряженности электрического поля, но и пропорциональна удельной проводимости ткани.

На рис. 2 приведены абсолютные значения напряженностей электрического поля и объемной плотности поглощаемой мощности для этой же плоскостойкой среды при плотности потока мощности падающей волны 1 мВт/см^2 . Из графиков видно, что при проводимостях жировой ткани $\sigma = 147 \text{ мСм/м}$ (это соответствует верхней границе значений σ жира, согласно данным [9]), наибольшее поглощение мощности происходит в приповерхностном жировом слое, в то время как при проводимости жира $\sigma = 55.6 \text{ мСм/м}$ (нижняя граница значений проводимости жира [9] для $f = 915 \text{ МГц}$) преимущественное поглощение происходит уже в мышечной ткани (второй по счету слой от поверхности).

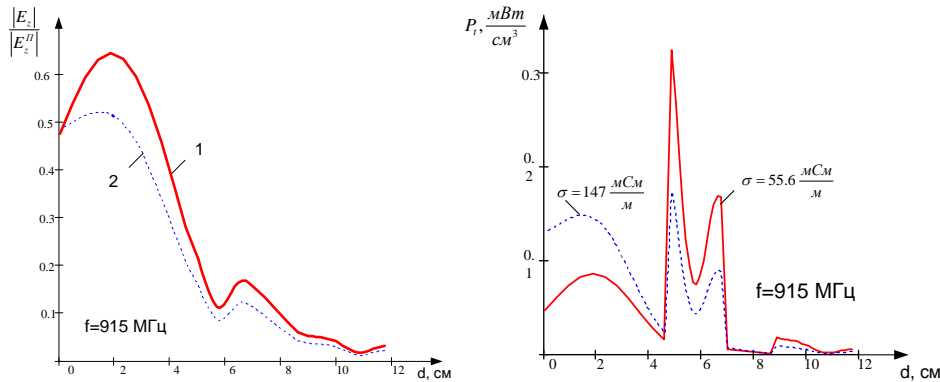


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля и удельной поглощаемой мощности внутри слоев многослойной среды, имитирующей параметры биологической среды

Этот вывод уточняет результаты статьи [9], где утверждается, что при исследовании модели с плоскими слоями относительный максимум всегда приходится на поверхностный слой, для которого характерно высокое содержание воды. Появление такого утверждения связано, вероятно, с тем, что в [9] получены зависимости поглощенной мощности для нижних значений границы проводимости материала.

Отметим также, что при изменении частоты излучения максимум поглощения в различных тканях может варьироваться в довольно широких пределах; в данном случае при плотности потока мощности падающей волны 1 мВт/см^2 колебания составляют от 0.01 мВт/см^3 до 0.3 мВт/см^3 (рис. 2). Очевидно, что получаемая в ходе подобных исследований информация об абсолютных значениях поглощенной мощности исключительно важна в целях безопасности персонала и пациентов при СВЧ-облучении, а также в терапевтических приложениях.

Однако модель многослойной плоской среды не отражает реальную конфигурацию биообъектов и может использоваться только на начальном этапе исследования для установления общих закономерностей. Для описания модели головы более предпочтительными являются модели, построенные на основе многослойных сфер или эллипсоидов, внутри которых расположено объем более сложной конфигурации, описывающей мозг.

Моделирование с помощью сферы имеет особое преимущество и широкое применение, позволяя выполнить первичную оценку SAR на примере многослойной сферы. Исследования в работе проведены с использованием трехслойной модели головы человека в виде эллипсоида вращения с усеченным эллипсоидом внутри для описания мозга человека и двух моделей сотового телефона с микро-

полосковой антенной и со спиральной антенной. Расчеты распределения электромагнитных полей и SAR выполнены в программе FEKO. Исследуемая модель приведена на рис. 3. Анализировались распределения и пространственные пиковые значения SAR в объеме модели для различных антенн мобильного телефона.

Проведенные исследования показали, что уровень поглощаемой мощности существенно зависит от типа антенны. Рассчитанные пространственные пиковые значения SAR для выбранных моделей телефонов не превышают допустимых норм (рис. 4) и для выбранных моделей антенн не превышает 0,512 Вт/кг в на 10 г/см^3 . Для Европы максимальная средняя величина установлена в 2 Вт/кг в на 10 г/см^3 .

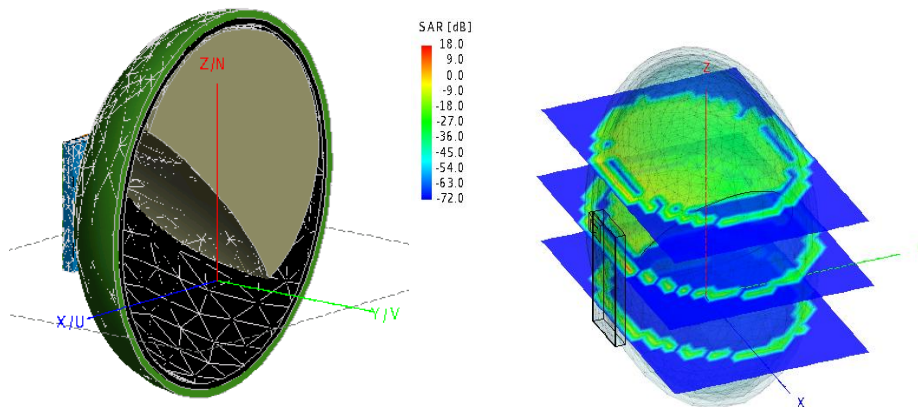


Рис. 3. Модель головы в программе FEKO и результаты вычисления SAR в различных сечениях модели

Как было отмечено ранее, важным фактором определяющим пиковое значение SAR, является месторасположения антенн по отношению к объекту. Удаление телефона существенно меняет картину распределения SAR и уровни пиковых значений.

Ниже приведены результаты расчетов усредненного значения SAR и максимального поглощения SAR на 10 г/см^3 для каждого случая расположения антенны по отношению к биообъекту. Считается, что нулевое расстояние соответствует плотно прижатому к эллипсоиду телефону. Расчетные значения сведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения SAR в зависимости от расположения микрополосковой антенны

SAR	Взаимное расположение модели телефона и модели головы, см			
	0	1	2	5
максимальное SAR на 10 г/см^3 , Вт/кг	0,512	0,449	0,319	0,142
усредненное SAR на 10 г/см^3 , Вт/кг	0,099	0,075	0,054	0,028

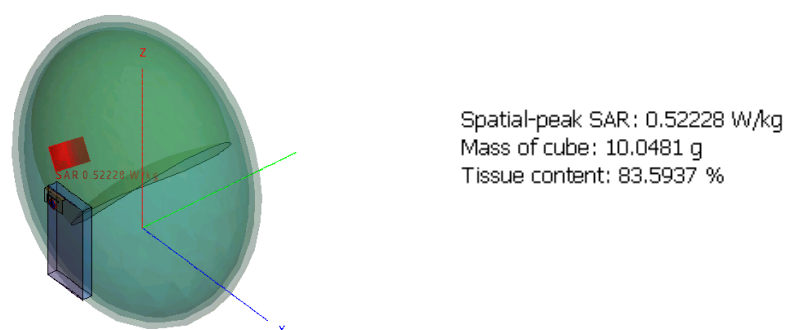


Рис. 4. Область пиковых значений SAR, полученных в программе FEKO

Как видно из приведенных результатов, при расстоянии 5 см от головы, что соответствует $0,15 \lambda$, наблюдается уменьшение максимального значения SAR в 3,6 раза по сравнению со случаем размещения антенны в непосредственной близости от головы, усредненное значение SAR для этого же случая уменьшилось в 3,5 раза. Следует отметить, что при изменении положения антенны не меняется расположение области с максимальным SAR.

Заключение. Таким образом, в работе представлены результаты расчета для неоднородной плоской среды и модели головы в виде эллипсоида с учетом реальной геометрической формы и электрофизических параметров, позволяющей получить достоверные результаты распределения полей и удельной поглощаемой мощности SAR. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что пространственный пик SAR, усредненный на 10 г/см^3 модели человеческого тела, ниже порогового значения, рекомендованного международными стандартами. Увеличивая расстояние между мобильным устройством и головой можно значительно снизить уровень SAR, удаление телефона от головы на 5 см приводит к снижению как усредненного, так и пикового значения SAR более чем в 3 раза. При этом, однако, не наблюдается изменение положения области, где достигаются пиковые значения SAR.

Результаты исследований могут представлять интерес для разработчиков средств мобильной связи, позволяющие надежно прогнозировать электромагнитную обстановку и распределение внутренних полей, а также оптимизировать конфигурацию антенны сотового телефона по критерию минимума SAR.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hanus, X., Luong, M. and Lethimonnier, F. (2005) Electromagnetics Fields and SAR Computations in a Human Head with a Multi-Port Driven RF Coil at 11.7 Tesla. Proceedings of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine, 13, 876.
2. Khalatbari S., Sardari D., Mirzaee A., A. Sadafi H.A. Calculating SAR in Two Models of the Human Head Exposed to Mobile Phones Radiations at 900 and 1800 MHz // Progress In Electromagnetics Research Symposium 2006, Cambridge, USA, March 26-29.
3. Stavroulakis P. Biological Effects of Electromagnetic Fields, Springer, 2002.
4. Персон Т., Торневич К. Мобильная связь и здоровье человека // Мобильные телекоммуникации. – 2004. – № 1. – С. 25-30.
5. Schwan H.P. Classical theory of microwave interactions with biological system. In.: The physical bases of electromagnetic interactions with biological system. - Rockville, Maryland. 1977. – P. 70.
6. Paolo Bernardi, etc. Specific Absorption Rate and Temperature Increases in the Head of a Cellular-Phone User // IEEE Trans. on MTT. – July 2000. – Vol. 48, No. 7.
7. Lagroy I. Poullietier de Ganas F. Effect of GSM 900 radiofrequency on apoptosis of immune and nervous cells // Proceedings of the XXVIIth General Assembly of the International Union of Radio Science, Netherlands, 2002.

8. *Xu Li, Henri Tandradinata, Susan C. Hagness.* Anatomically realistic FDTD modeling of microwave interactions with human breast // *Priceedings of the XXVIIth General Assembly of the International Union of Radio Science, Netherlands, 2002.*
9. *Гай А.В., Леманн Ю.Ф., Строунбридж Дж.* Применение электромагнитной энергии в терапии // *ТИИЭР.* – 1974. – Т. 62, № 1. – С. 66-93.
10. *Kisel N.N., Grishchenko S.G.* Structured modeling of the biological media in the form of grid resistive wires // В сборнике: *СriMiCo 2014 - 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology. Conference Proceedings.* – 2014. – P. 1065-1066.
11. *Кисель Н.Н., Грищенко С.Г.* Использование эффекта деполяризации электромагнитной волны для задач медицинской диагностики // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2014. – № 11 (160). – С. 99-109.
12. *Грищенко С.Г., Кисель Н.Н., Ваганова А.А.* Рассеяние электромагнитных волн телом вращения, расположенным на многослойном полупространстве // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2013. – № 11 (148). – С. 141-150.
13. *Кисель Н.Н., Клименко П.П.* Математическое моделирование взаимодействия электромагнитного поля с биологическими средами // *Депонированная рукопись ВИНТИ № 1380-В2006 14.11.2006.*
14. *Кисель В.Н., Кисель Н.Н., Алтапова А.В.* Расчет электромагнитного поля в объеме кругового диэлектрического цилиндра с неоднородным включением // *Радиотехника и электроника.* – 2003. – Т. 48, № 1. – С. 64-69.
15. *Кисель В.Н., Алтапова А.В., Кисель Н.Н.* Эффективный алгоритм расчета электромагнитного поля в неоднородном цилиндре // *Известия ТРТУ.* – 2001. – № 1 (19). – С. 28-32.
16. *Алтапова А.В., Кисель Н.Н., Кисель В.Н.* Исследование электромагнитного поля внутри кругового неоднородного цилиндра // *Известия ТРТУ.* – 2001. – № 3 (21). – С. 45-46.
17. *Кисель Н.Н., Алтапова А.В., Кисель В.Н.* Разработка и исследование приближенных методов учета тонких покрытий // *Известия ТРТУ.* – 2001. – № 3 (21). – С. 46-47.
18. *Кисель Н.Н., Кисель В.Н., Обуховец В.А.* Моделирование взаимодействия СВЧ-колебаний с биологическими структурами // *Известия ТРТУ.* – 1995. – № 1 (1). – С. 37-38.
19. *Кисель Н.Н., Грищенко С.Г., Дерачиц Д.С.* Исследование низкопрофильных микрополосковых антенн // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2015. – № 3 (164). – С. 240-248.
20. *Ноаман Х.И.А., Галев Х.А.Н., Кисель Н.Н.* Моделирование и оптимизация характеристик микрополосковой антенны для WIMAX связи // *Новые технологии и проблемы технических наук: Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. Инновационный центр развития образования и науки.* – 2014. – С. 115-118.
21. *Галев Х.А.Н., Ноаман Х.И.А., Кисель Н.Н.* Моделирование и оптимизация характеристик микрополосковой антенны с использованием SIMPLEX-метода // *Новые технологии и проблемы технических наук: Сборник научных трудов по итогам Международной научно-практической конференции. Инновационный центр развития образования и науки.* – 2014. – С. 118-121.
22. *Хамед М., Кисель Н.Н.* Моделирование характеристик микрополосковой антенной решетки S-диапазона // *Новые технологии и проблемы технических наук: Сборник научных трудов по итогам Международной научно-практической конференции. Инновационный центр развития образования и науки.* – 2014. – С. 121-124.
23. *Кисель Н.Н., Грищенко С.Г., Челобитчиков М.О.* Исследование характеристик микрополосковой антенны на подложке с неоднородным заполнением // *Проблемы техники и технологий телекоммуникаций ПТиТТ-2014; Оптические технологии в телекоммуникациях ОТТ-2014: Материалы Международных научно-технических конференций.* – 2014. – С. 54-55.
24. *Кисель Н.Н., Грищенко С.Г., Кардос Д.А.* Оптимизация параметров комбинированной микрополосковой антенны // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2012. – № 11 (136). – С. 25-31.
25. *Pelosi M., Franek O., Knudsen M.B., Pedersen G.F., and Andersen J.B.* Antenna Proximity Effects for Talk and Data Modes in Mobile Phones // *IEEE Antennas and Propagation Magazine.* – June 2010. – Vol. 52, No 3. – P. 15-27.

REFERENCES

1. Hanus, X., Luong, M. and Lethimonnier, F. (2005) Electromagnetics Fields and SAR Computations in a Human Head with a Multi-Port Driven RF Coil at 11.7 Tesla. Proceedings of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine, 13, 876.
2. Khalatbari S., Sardari D., Mirzaee A., A. Sadafi H.A. Calculating SAR in Two Models of the Human Head Exposed to Mobile Phones Radiations at 900 and 1800 MHz, *Progress In Electromagnetics Research Symposium 2006, Cambridge, USA, March 26-29*.
3. Stavroulakis P. Biological Effects of Electromagnetic Fields, Springer, 2002.
4. Person T., Tornevich K. Mobil'naya svyaz' i zdorov'e cheloveka [Mobile communication and human health], *Mobil'nye telekommunikatsii* [Mobile Telecommunications], 2004, No. 1, pp. 25-30.
5. Schwan H.P. Classical theory of microwave interactions with biological system. In.: The physical bases of electromagnetic interactions with biological system. Rockville, Maryland. 1977, 70 p.
6. Paolo Bernardi, etc. Specific Absorption Rate and Temperature Increases in the Head of a Cellular-Phone User, *IEEE Trans. on MTT*, July 2000, Vol. 48, No. 7.
7. Lagroy I. Poullietier de Ganas F. Effect of GSM 900 radiofrequency on apoptosis of immune and nervous cells, *Proceedings of the XXVIIIth General Assembly of the International Union of Radio Science, Netherlands, 2002*.
8. Xu Li, Henri Tandradinata, Susan C. Hagness. Anatomically realistic FDTD modeling of microwave interactions with human breast, *Proceedings of the XXVIIIth General Assembly of the International Union of Radio Science, Netherlands, 2002*.
9. Gay A.V., Lemann Yu.F., Strounbridzh Dz. Primenenie elektromagnitnoy energii v terapii [The application of electromagnetic energy in therapy], *TIIER* [Proceedings of the Institute of engineers on electrical and electronics], 1974, Vol. 62, No. 1, pp. 66-93.
10. Kisel' N.N., Grishchenko S.G. Structured modeling of the biological media in the form of grid resistive wires, *In the collection: CriMiCo 2014 - 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology. Conference Proceedings*, 2014, pp. 1065-1066.
11. Kisel' N.N., Grishchenko S.G. Ispol'zovanie effekta depolyarizatsii elektromagnitnoy volny dlya zadach meditsinskoj diagnostiki [Using the depolarization effect of electromagnetic wave problems for medical diagnosis], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, № 11 (160), pp. 99-109.
12. Grishchenko S.G., Kisel' N.N., Vaganova A.A. Rasseyanie elektromagnitnykh voln telom vrashcheniya, raspolozhennym na mnogosloynnom poluprostranstve [Scattering of electromagnetic waves by body of revolution located on multilayered half-space], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 11 (148), pp. 141-150.
13. Kisel' N.N., Klimenko P.P. Matematicheskoe modelirovanie vzaimodeystviya elektromagnitnogo polya s biologicheskimi sredami [Mathematical modeling of the interaction electromagnetic field with biological media], *Deponirovannaya rukopis' VINITI № 1380-B2006 14.11.2006* [Deposited manuscript VINITI, № 1380-B2006 14.11.2006].
14. Kisel' V.N., Kisel' N.N., Alpatova A.V. Raschet elektromagnitnogo polya v ob'eme krugovogo dielektricheskogo tsilindra s neodnorodnym vklyucheniem [The calculation of the electromagnetic field in the volume of dielectric circular cylinder with inhomogeneous inclusion], *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 2003, Vol. 48, No. 1, pp. 64-69.
15. Kisel' V.N., Alpatova A.V., Kisel' N.N. Effektivnyy algoritm rascheta elektromagnitnogo polya v neodnorodnom tsilindre [An efficient algorithm of calculation of electromagnetic fields in inhomogeneous cylinder], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURe], 2001, No. 1 (19), pp. 28-32.
16. Alpatova A.V., Kisel' N.N., Kisel' V.N. Issledovanie elektromagnitnogo polya vnuti krugovogo neodnorodnogo tsilindra [Study of electromagnetic field inside an inhomogeneous circular cylinder], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURe], 2001, No. 3 (21), pp. 45-46.
17. Kisel' N.N., Alpatova A.V., Kisel' V.N. Razrabotka i issledovanie priblizhennykh metodik ucheta tonkikh pokrytiy [Development and investigation of approximate IU-nique accounting for thin coatings], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURe], 2001, No. 3 (21), pp. 46-47.
18. Kisel' N.N., Kisel' V.N., Obukhovets V.A. Modelirovanie vzaimodeystviya SVCh-kolebaniy s biologicheskimi strukturami [Modeling the interaction of microwave oscillations with biological structures], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURe], 1995, No. 1 (1), pp. 37-38.

19. Kisel' N.N., Grishchenko S.G., Derachits D.S. Issledovanie nizkoprofil'nykh mikropoloskovykh antenn [Study conformal low-profile patch antenna], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 3 (164), pp. 240-248.
20. Noaman Kh.I.A., Galeb Kh.A.N., Kisel' N.N. Modelirovanie i optimizatsiya kharakteristik mikropoloskovoy anteny dlya WIMAX svyazi [Modeling and optimization of characteristics of microstrip antennas for WIMAX communication], *Novye tekhnologii i problemy tekhnicheskikh nauk: Sbornik nauchnykh trudov po itogam mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Innovatsionnyy tsentr razvitiya obrazovaniya i nauki* [New technologies and technical problems of science: Collection of scientific papers on the results of international scientific-practical conference. Innovation center for the development of education and science], 2014, pp. 115-118.
21. Galeb Kh.A.N., Noaman Kh.I.A., Kisel' N.N. Modelirovanie i optimizatsiya kharakteristik mikropoloskovoy anteny s ispol'zovaniem SIMPLEX-metoda [Simulation and optimization of microstrip antenna characteristics using SIMPLEX method], *Novye tekhnologii i problemy tekhnicheskikh nauk: Sbornik nauchnykh trudov po itogam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Innovatsionnyy tsentr razvitiya obrazovaniya i nauki* [New technologies and technical problems of science: Collection of scientific papers on the results of International scientific-practical conference. Innovation center for the development of education and science], 2014, pp. 118-121.
22. Khamed M., Kisel' N.N. Modelirovanie kharakteristik mikropoloskovoy antennoy reshetki S-diapazona [The modeling of the characteristics of microstrip antenna array S-band], *Novye tekhnologii i problemy tekhnicheskikh nauk: Sbornik nauchnykh trudov po itogam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Innovatsionnyy tsentr razvitiya obrazovaniya i nauki* [New technologies and technical problems of science: Collection of scientific papers on the results of International scientific-practical conference. Innovation center for the development of education and science], 2014, pp. 121-124.
23. Kisel' N.N., Grishchenko S.G., Chelobitchikov M.O. Issledovanie kharakteristik mikropoloskovoy anteny na podlozhke s neodnorodnym zapolneniem [Study of characteristics of microstrip antennas on a substrate with inhomogeneous filling], *Problemy tekhniki i tekhnologii telekommunikatsiy PTiTT-2014; Opticheskie tekhnologii v telekommunika-tsiyakh OTT-2014: Materialy Mezhdunarodnykh nauchno-tekhnicheskikh konferentsiy* [Problems of technics and technology of telecommunications Ptitt-2014; Optical technologies in telecommunications OTT-2014: the Materials of International scientific-technical conferences], 2014, pp. 54-55.
24. Kisel' N.N., Grishchenko S.G., Kardos D.A. Optimizatsiya parametrov kombinirovannoy mikropoloskovoy anteny [Optimisation dual-resonant patch antenna], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 11 (136), pp. 25-31.
25. Pelosi M., Franek O., Knudsen M.B., Pedersen G.F., and Andersen J.B. Antenna Proximity Effects for Talk and Data Modes in Mobile Phones, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, June 2010, Vol. 52, No 3, pp. 15-27.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.М. Макаров.

Кисель Наталья Николаевна – Южный федеральный университет; e-mail: nnkisel@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; кафедра антенн и радиопередающих устройств; профессор; к.т.н.; доцент.

Kisel Natalia Nikolayevna – Southern Federal University; e-mail: nnkisel@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; the department of antennas and radio transmitters; professor; cand. of eng. sc.; associate professor.