

А. З. Салахов, аспирант, e-mail: alisalahov@gmail.com
Азербайджанский технический университет, г. Баку

Исследование рассеяния электромагнитных полей в биообъектах методом компьютерного моделирования

За последние годы функциональная возможность мобильных средств связи растет в геометрической прогрессии. В связи с тем, что популярность мобильных телефонов и продолжительность их использования увеличивается с каждым днем, беспокойство по поводу безопасности электромагнитного излучения от них становится все более обоснованным, и изучение влияния электромагнитного излучения на пользователя представляет интерес и научную ценность. Исследование данного влияния связано с созданием адекватной модели биологического объекта и с изучением рассеяния электрических волн в среде с меняющимися электрофизическими параметрами. Приняв во внимание невозможность проведения такого рода исследования непосредственно на человеке, можно говорить о компьютерном моделировании биологической среды. В данном случае речь идет о многослойной модели с произвольными параметрами удельной проводимости, диэлектрической проницаемости и исследовании распространения и поглощения электромагнитного излучения в нем.

Ключевые слова: напряженность электрического поля, удельный коэффициент поглощения, диэлектрическая проницаемость, компьютерное моделирование

Введение

В связи с широким распространением мобильных средств связи, а также многочисленных коммуникационных устройств, входящих в их состав, возрастают опасения по поводу безопасности электромагнитных волн, излучаемых ими. В данной работе проведен анализ влияния электромагнитного излучения на организм человека, рассмотрена предыстория болезней, вызванных мобильными системами связи. Показаны сравнительные графики напряженности электрического поля и удельной поглощаемой мощности внутри слоев модели.

В данной статье исследуется многослойная электродинамическая модель, приближенная к анатомической структуре головы человека. Расчеты рассеяния электромагнитных полей и поглощения электромагнитного поля внутри этой модели выполнены с помощью компьютерного моделирования. Модели, построенные на основе многослойной структуры, схожей с анатомическими особенностями человека, наиболее информативны в плане исследования влияния электромагнитных излучений на человека.

Цель и задачи. Основной целью проведенных исследований является повышение достоверности распределения уровней поглощаемой мощности в биологической среде в результате воздействия электромагнитного поля. Исследование проводится путем разработки адекватных компьютерных и математических моделей биологической среды и изучения воздействия электромагнитного излучения на них.

Особенности исследования рассеяния электромагнитных волн в биообъектах

Следует отметить, что негативное влияние на живые организмы может оказывать как излучение низкого уровня, так и излучения высокого уровня, поглощаемое в сравнительно малых областях биологической ткани с более высокой удельной проводимостью. 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 [1]. В связи с этим в настоящее время исследование рассеяния электромагнитных полей и поглощаемой мощности является достаточно актуальной задачей в плане контроля значений поглощаемой мощности внутри тканей человека. Поскольку проведение экспериментальных работ непосредственно на человеке не представляется возможным, необходимо изучение вопроса влияния электромагнитных излучений на биообъекты с использованием компьютерного трехмерного моделирования [2].

В большинстве случаев после длительного использования беспроводных средств связи у владельцев появляются такие жалобы, как головные боли, напряжение в области уха, приступы внезапной усталости, потеря концентрации, нарушение сна и т. д. [3]. Основным эффектом воздействия электромагнитного излучения частотой выше 1 МГц считается эффект нагре-

вания области, подвергнутой излучению [4]. Также предполагается, что электромагнитное излучение способствует изменению потенциалов мембран клеток нервной системы, а это может привести к нарушениям нервной системы [5, 6]. Все эти эффекты возникают вследствие поглощения энергии электромагнитного поля биологической тканью человека.

На сегодняшний день основным параметром, характеризующим уровень поглощения электромагнитной энергии в биологической среде, является SAR (Specific Absorption Rates) — удельный коэффициент поглощения (Вт/кг) [7]:

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

где E — напряженность электрического поля; ρ — плотность среды; σ — удельная проводимость. Как видно из формулы, интенсивность поглощения SAR зависит от напряженности электрического поля, плотности среды и ее удельной проводимости.

Для параметра удельного поглощения SAR по международным стандартам установлены нормы для вещества массой 1 и 10 г. Наибольший интерес представляет область головы, так как при использовании мобильных телефонов голова пользователя располагается в непосредственной близости от источника излучения. В технической документации на средства связи указывается значение SAR при работе устройства на максимальной мощности. Надо отметить что уровень SAR в зоне со слабым уровнем приема намного выше, чем в зоне с умеренным уровнем приема сигнала от базовой станции.

В работе [8] приведены результаты эксперимента при участии добровольцев, в котором проводилось исследование по выявлению влияния на человека сотового телефона в зависимости от его расположения по отношению к человеческому телу. Некоторые эффекты воздействия, к примеру головная боль, были отмечены уже после нескольких минут использования при уровне SAR свыше 0,5 Вт/кг.

В СВЧ диапазоне магнитные свойства среды настолько малозначительны, что их можно не учитывать.

Исследование данного влияния опирается на создание адекватной модели биологического объекта и изучение рассеяния электрических волн, а также их возбуждения в среде с меняющимися электрофизическими параметрами [9]. Для наиболее детального исследования влияния электромагнитных волн,

излучаемых средствами мобильной связи, была разработана максимально приближенная к анатомическим свойствам человека шестислойная модель головы (рис. 1).

Наиболее значимые электрофизические параметры биологической ткани для исследуемой шестислойной модели головы человека представлены в табл. 1.

Простой расчет электромагнитного поля внутри биологической среды в основном выполняется методом компьютерного моделирования этой среды с различными значениями диэлектрической проницаемости и удельной проводимости [10].

Взаимодействие многослойной структуры с электромагнитной волной можно сформулировать следующим образом. Представим, что в системе координат X, Y, Z расположена многослойная структура со слоями определен-

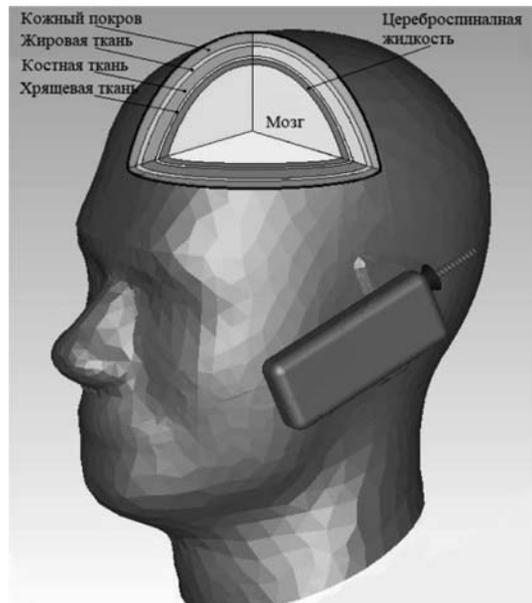


Рис. 1. Шестислойная модель головы человека

Таблица 1

Электрофизические параметры слоев модели

Тип ткани	Граничный радиус модели	Диэлектрическая проницаемость ϵ_r , Ф/м	Плотность тока j , А/м ²
Кожный покров	9,0	41,11	0,327
Жировая ткань	8,9	79,1	0,423
Костная ткань	8,76	40,7	0,25
Хрящевая ткань	8,35	20,9	0,247
Цереброспинальная жидкость	8,3	10	0,266
Мозговая ткань	8,1	40,7	0,25

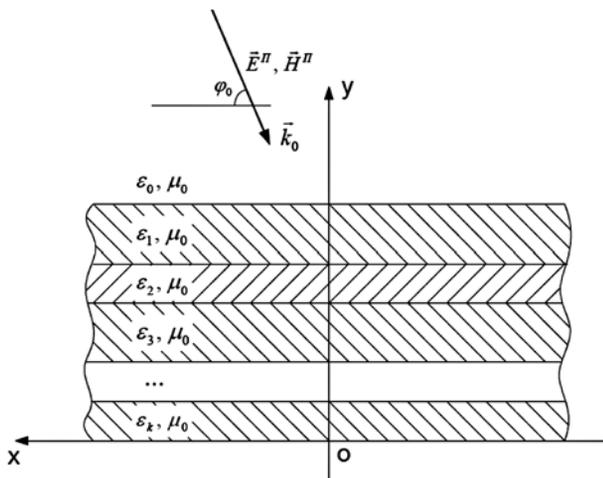


Рис. 2. Иллюстрация взаимодействия электромагнитной волны с многослойной структурой

ной толщины, каждый из которых состоит из изотопного однородного диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ϵ_i и магнитной проницаемостью μ_0 . На эту структуру из пространства воздействует электромагнитная волна.

Задача заключается в определении зависимости показателей отражения и проникновения электромагнитных волн в среду с различными электрофизическими свойствами и геометрическими параметрами, а также в анализе распределения вектора напряженности электрического поля (рис. 2).

Расчет напряженности электрического поля и удельной поглощаемой мощности в исследуемой среде

При условии произвольного изменения удельной проводимости и диэлектрической проницаемости среды расчет электрического тока поляризации с объемной плотностью проводится универсальным методом интегральных уравнений. При линейной поляризации падающего поля $\vec{E}^II = \vec{i}_z \vec{E}_z^II$ в области пространства V определенного слоя объемная плотность электрического тока может быть записана в виде

$$\vec{J}^{\Delta pol} = i\omega\epsilon_0(\epsilon - 1)\vec{E},$$

где $\vec{J}^{\Delta pol}$ — объемная плотность электрического тока; \vec{E} — напряженность электрического поля; ϵ — диэлектрическая проницаемость материала; ω — частота электромагнитных колебаний:

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon'', \quad \epsilon'' = \frac{\sigma}{\epsilon_0\omega},$$

σ — удельная проводимость среды; ϵ' — вещественная, ϵ'' — мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости.

Вторичное электрическое поле, создаваемое токами поляризации, можно записать в виде

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

Если добавить первичное (внешнее) поле и заменить ток поляризации, то получим интегральное уравнение относительно напряженности электрического поля в определенном объеме материала:

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

Зависимость поля от координаты x при падении волны на объект исследования можно выразить как простую экспонентную

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

где $\beta = \cos\phi$. Применив интегральную функцию Хенкеля

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

где χ — диэлектрическая восприимчивость (способность вещества поляризоваться под действием электрического поля), получим интегральное уравнение для напряженности электрического поля в слоях относительно оси y :

$$E_z(y) - \frac{1}{2} \int_y (\epsilon(y') - 1) \frac{\exp(\sqrt{\beta^2-1}|y-y'|)}{\sqrt{\beta^2-1}} dy'.$$

В таком случае для коэффициентов отражения R и его преодоления T можем записать следующие выражения:

$$R = -\frac{i}{2 \sin \phi_0} \int_y (\epsilon(y') - 1) \vec{E}_z(y') \exp(i \sin \phi_0 y') dy';$$

$$T = -\frac{i}{2 \sin \phi_0} \int_y (\epsilon(y') - 1) \vec{E}_z(y') \exp(-i \sin \phi_0 y') dy' + 1.$$

Таким образом, решив интегральные уравнения, можем рассчитать уровни коэффициентов поглощаемой мощности, распределение напряженности электрического поля в тех или иных точках, находящихся в структуре ис-

следуемой среды, а также значения коэффициентов преодоления и отражения. Плотность мощности, поглощенной в ткани за счет колебаний дипольных молекул и наличия ионной проводимости, можно определить так:

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

Используя значения удельной проводимости и диэлектрической проницаемости слоистой структуры в определенном диапазоне частот, можно исследовать свойства структуры модели, имитирующей биологическую ткань (кожный покров, жировая ткань, костная ткань, хрящевая ткань, цереброспинальная жидкость, мозговая ткань). Выявлено, что значения удельной поглощаемой мощности в ткани зависят от изменения в ней концентрации жидкости. По причине изменения концентрации жидкости в ткани изменяется также значение ее удельной проводимости, которое также оказывает заметное влияние на уровень напряженности электрического поля в ткани. Поскольку плотность поглощаемой мощности зависит от наличия потерь в диэлектрике, она пропорциональна удельной проводимости ткани, а также является функцией напряженности электрического поля.

На рис. 3 показаны графики уровней плотности поглощаемой мощности и напряженности электрического поля для многослойной среды при плотности потока мощности внешней волны 1 мВт/см^2 . Из кривых на графике видно, что при проводимости жировой ткани $\sigma = 147 \text{ См/м}$, соответствующей верхней границе проводимости этой ткани, наибольшее поглощение мощности происходит в поверхностных жировых тканях, а при значении удельной проводимости $\sigma = 55,6 \text{ См/м}$, соответствующей нижней границе проводимости для радиоча-

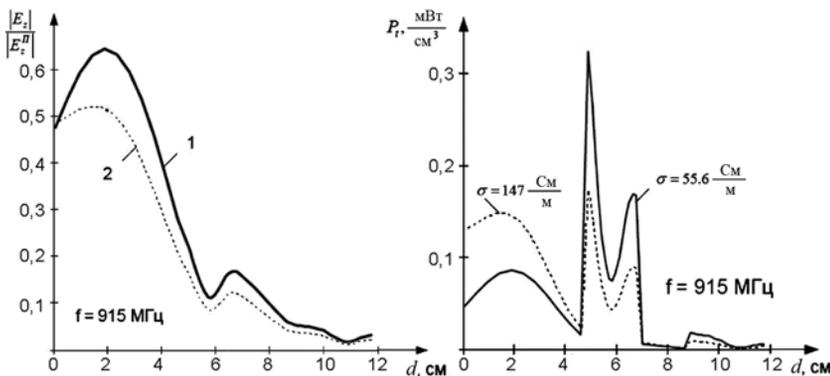


Рис. 3. Рассеяние удельной поглощаемой мощности и напряженности электрического поля в многослойной биологической среде

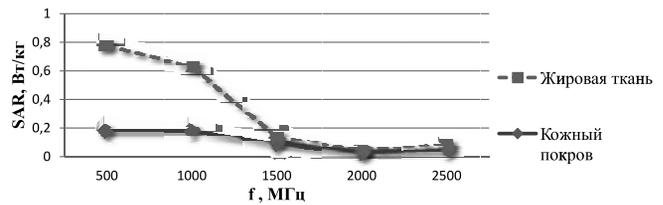


Рис. 4. Зависимость SAR от частоты в первых двух слоях биологической ткани

стоты $f = 915 \text{ МГц}$, основное поглощение происходит в цереброспинальной жидкости.

Это объясняется тем, что при исследовании многослойной структуры максимальное значение удельной поглощаемой мощности всегда достигается в слоях, для которых характерно высокое содержание жидкости. Также отметим, что коэффициент удельной поглощаемой мощности в различных тканях может изменяться в довольно широких пределах частот излучения.

На рис. 4 показаны зависимости коэффициента удельной поглощаемой мощности от частоты для представляющих наибольший интерес первых двух слоев шестислойной модели головы человека (кожи и жировой ткани).

Результаты проведенных расчетов, полученные с помощью компьютерного моделирования

Наиболее полное представление о распределении напряженности электрического поля и SAR в конкретном слое электрофизической модели может дать график, характеризующий распределение SAR в выбранном слое сферического образования для диапазона углов θ и φ от 0 до 180° в сферической системе координат (рис. 5).

Данные зависимости для первых двух слоев многослойной модели приведены на рис. 6—9 (рис. 6, 8 см. четвертую сторону обложки). Расчетные данные получены для частоты 915 МГц .

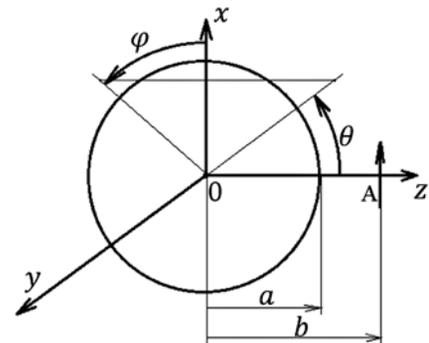


Рис. 5. Модель в сферической системе координат: А — вибраторная антенна; а — радиус модели; b — расстояние до антенны; θ и φ — углы в системе координат

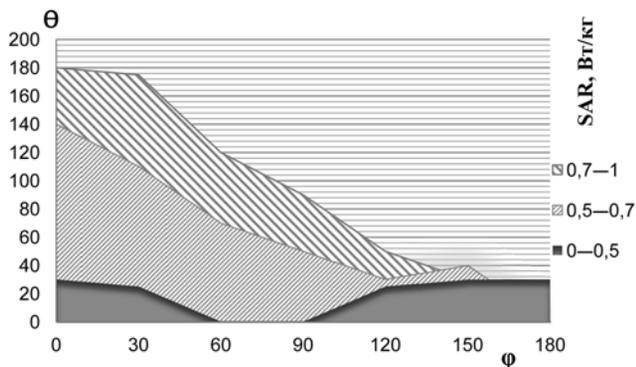


Рис. 7. Карта уровней распределения SAR в первом слое (кожа) для диапазона углов θ и φ от 0 до 180°

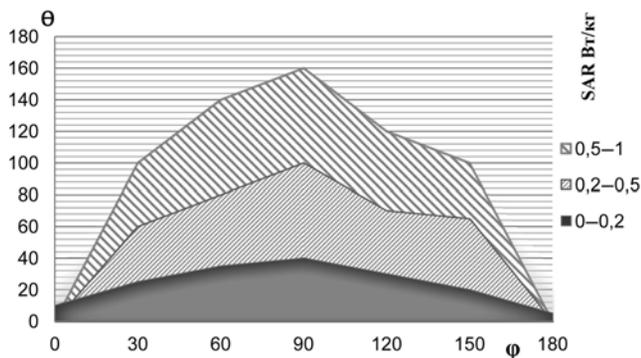


Рис. 9. Карта уровней распределения SAR во втором слое (жировая ткань) для диапазона углов θ и φ от 0 до 180°

Как видно из графиков, значение SAR меняется в зависимости от расположения антенны по отношению к модели. Также отметим, что удаление источника излучения от модели также существенно меняет картину рассеяния SAR и уровни ее пиковых значений.

В исследованиях данного типа используется моделирование с помощью многослойной структуры. Данное моделирование имеет особое преимущество и широко применяется для выполнения оценки рассеяния SAR [11]. В работе проведено исследование с использованием шестислойной модели головы человека. Проведена оценка рассеяния SAR с учетом изменения угла излучения электромагнитной волны. Расчеты рассеяния электромагнитных волн и рас-

Таблица 2

Значения SAR в зависимости от расположения антенны

SAR	Расстояние расположения антенны 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

пределения SAR выполнено программой FEKO. Данная модель, а также результаты значений SAR в различных сечениях модели показаны на рис. 10 (см. третью сторону обложки).

В табл. 2 приведены результаты расчетов усредненного значения максимального поглощения SAR в 10 г/см³ биологической ткани при различных позициях расположения источника излучения по отношению к биообъекту.

Из полученных результатов видно, что на расстоянии 5 см от объекта (что соответствует 0,15 λ длины волны) значение SAR уменьшается в максимальной степени, а именно значение SAR уменьшается в 3,6 раза по сравнению с тем случаем, когда антенна размещена вблизи от головы пользователя. Среднее значение SAR уменьшилось в 3,5 раза для такого же случая.

Заключение

Таким образом, в работе представлены результаты расчета для модели головы человека, приближенной к анатомическим особенностям человека по форме и электрофизическим параметрам в виде сложной многослойной структуры, позволяющей получить достоверные результаты рассеяния полей, а также значения SAR в различных областях модели. Полученные результаты показывают, что максимальное значение удельной поглощаемой мощности при использовании мобильного телефона ниже порогового значения, установленного международными стандартами. Также можно отметить, что увеличив расстояние между сотовым телефоном и пользователем, можно ощутимо снизить уровень поглощения электромагнитного излучения. Удаление телефона от головы на 5 см приводит к снижению как усредненного, так и максимального значения поглощения более чем в 3 раза. Нужно отметить, что при этом не происходит смещение областей, где достигаются максимальные значения SAR.

Результаты данного исследования могут быть применены в разработках средств мобильной связи, благодаря чему можно достаточно достоверно прогнозировать распределение внутренних электромагнитных полей, а также оптимизировать конфигурацию антенны сотового телефона для получения минимального уровня излучений.

Полученные данные показывают, что с помощью разработки методов компьютерного моделирования взаимодействия электромагнитных волн с биообъектами можно опреде-

лить влияние высокочастотных излучений на организм человека. Исследуемый метод создает базу и для будущих теоретических и практических исследований в области предотвращения влияния электромагнитных излучений от мобильных телефонов на организм человека.

Список литературы

1. Салахов А. З. Антенны сотовых телефонов как излучатель // Петербургский журнал электроники. 2017. № 4 (89). С. 35—40.
2. Салахов А. З. Вспомогательные методы для вычисления поглощения мощности при высокочастотном излучении с помощью моделирования головы человека // Биомедицинская радиоэлектроника. 2018. № 11. С. 32—39.
3. Вершинин А. Е., Авдонина Л. А. Влияние сотовых телефонов на здоровье человека // Вестник Пензенского государственного университета. 2015. № 3 (11). С. 175—179.
4. Жаворонков Л. П., Петин В. Г. Влияние электромагнитных излучений сотовых телефонов на здоровье // Радиация и риск. 2016. Т. 25, № 2. С. 43—56.
5. Гайлус Т. Г. Влияние электромагнитного поля мобильного телефона на биоэлектрическую активность мозга человека // Биомедицинская радиоэлектроника. 1998. № 4. С. 36—42.

6. Горшунова Н. К., Тарасов А. Н. Влияние ЭМИ и ЭМИ мобильных телефонов на процессы старения и вегетативную нервную систему // Фундаментальные исследования. 2005. № 7. С. 84—85.

7. Адел Зин Елдин Мохамед Моусса. Контроль параметров мобильных средств связи по распределению удельной массовой мощности поглощения излучения телом человека: автореф. дис. канд. техн. наук. Казань: КГЭУ, 2005. 14 с.

8. Wilen J., Sandstrom M., Hansson Mild K. Subjective symptoms among mobile telephone users—a consequence of absorption of radiofrequency fields // Bioelectromagnetics. University of Washington, Seattle, Washington, 2003. P. 152—159.

9. Beard B. B., Kainz W., Onishi T. et al. Comparisons of Computed Mobile Phone Induced SAR in the SAM Phantom to that in Anatomically Correct Models of the Human Head // IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility. 2006. Vol. 48, N. 2. P. 397—407.

10. Keshvari J. et al. The Effect of Increase in Dielectric Values on Specific Absorption Rate (SAR) in Eye and Head Tissues Following 900, 1800 and 2450 MHz Radio Frequency (RF) Exposure // Physics in Medical and Biology. 2006. Vol. 51, N. 6. P. 1463—1477.

11. Amer I. A., Abdalgabar O. J., Vdovina N. V. Investigation of the Effects of Electromagnetic Radiation from a Cell Phone Antenna on a Human Head Model // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics. 2018. Vol. 18, N. 1. P. 163—170.

A. Z. Salahov, Postgraduate Student, e-mail: alisalahov@gmail.com,
Azerbaijan Technical University, Baku

The Study of the Scattering of Electromagnetic Fields in Biological Objects by Computer Simulation

In recent years, the functionality of mobile communications is growing exponentially. Due to the fact that the popularity of mobile phones and the increase in the duration of their use is growing every day, concerns about the safety of electromagnetic radiation from them become more and more justified. Given all this research, the effect of electromagnetic radiation on a user is of particular interest and scientific value. The study of this effect is associated with the creation of an adequate model of a biological object and the study of the scattering of electric waves in a medium with varying electrophysical parameters. Taking into account the impossibility of conducting this kind of research directly on a person, it is a matter of talking about computer modeling of the biological environment. In this case, we are talking about a multilayer model with arbitrary parameters of specific conductivity, dielectric constant and the study of the propagation and absorption of electromagnetic radiation in it.

Keywords: electric field strength, specific absorption coefficient, dielectric constant, computer simulation

DOI: 10.17587/it.25.718-723

References

1. Salahov A. Z. Cell phone antennas as a radiator, *Peterburgskij Zhurnal Jelektroniki*, 2017, no. 4 (89), pp. 35—40 (in Russian).
2. Salahov A. Z. Auxiliary methods for calculating the power absorption in high-frequency radiation using human head modeling, *Biomedicinskaja radiojelektronika*, 2018, no. 11, pp. 32—39 (in Russian).
3. Verшинin A. E., Avdonina L. A. Influence of cell phones on human health, *Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 3 (11), pp. 175—179 (in Russian).
4. Zhavoronkov L. P., Petin V. G. The Effect of Electromagnetic Radiation of Cell Phones on Health, *Radiacija i Risk*, 2016, vol. 25, no. 2, pp. 43—56 (in Russian).
5. Gajlus T. G. The influence of the electromagnetic field of a mobile phone on the bioelectric activity of the human brain, *Biomedicinskaja Radioelektronika*, 1998, no. 4, pp. 36—42 (in Russian).
6. Gorshunova N. K., Tarasov A. N. The influence of EMI and EMI of mobile phones on the aging process and the autonomic nervous system, *Fundamental'nye issledovaniya*, 2005, no. 7, pp. 84—85 (in Russian).

7. Adel Zin Eldin Mohamed Moussa. Control of parameters of mobile communication devices on the distribution of the specific mass absorption power of radiation by the human body, *avtoref. dis. kand. tehn.*, KGJEU. Kazan', 2005, 14 p. (in Russian).

8. Wilen J., Sandstrom M., Hansson Mild K. Subjective symptoms among mobile telephone users—a consequence of absorption of radiofrequency fields, *Bioelectromagnetics*, University of Washington, Seattle, Washington, 2003, p. 152—159.

9. Beard B. B., Kainz W., Onishi T. et al. Comparisons of Computed Mobile Phone Induced SAR in the SAM Phantom to that in Anatomically Correct Models of the Human Head, *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, 2006, vol. 48, no. 2, pp. 397—407.

10. Keshvari J. et al. The Effect of Increase in Dielectric Values on Specific Absorption Rate (SAR) in Eye and Head Tissues Following 900, 1800 and 2450 MHz Radio Frequency (RF) Exposure, *Physics in Medical and Biology*, 2006, vol. 51, no. 6, pp. 1463—1477.

11. Amer I. A., Abdalgabar O. J., Vdovina N. V. Investigation of the Effects of Electromagnetic Radiation from a Cell Phone Antenna on a Human Head Model, *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 163—170.