

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА БИОТКАНИ

A.V. Sauts, S.V. Ereгина

MODELING AND EVALUATION OF ELECTROTHERMAL EFFECT OF VERY HIGH FREQUENCY RADIATION ON BIOLOGICAL TISSUES

Сауц А.В. – канд. техн. наук, доц. каф. маркетинга и социальных коммуникаций Санкт-Петербургского университета технологий управления и экономики, г. Санкт-Петербург. E-mail: art_88@bk.ru

Ерегина С.В. – канд. геогр. наук, доц. каф. геоэкологии и инженерной геологии Вологодского государственного университета, г. Вологда. E-mail: ereginasv@mail.ru

Sauts A.V. – Cand. Techn. Sci., Assoc. Prof., Chair of Marketing and Social Communications, St. Petersburg University of Technologies of Management and Economy, St. Petersburg. E-mail: art_88@bk.ru

Ereгина S.V. – Cand. Geogr. Sci., Assoc. Prof., Chair of Geocology and Engineering Geology, Vologda State University, Vologda. E-mail: ereginasv@mail.ru

В статье рассмотрено электротермическое действие электромагнитного поля (ЭМП) очень высокой частоты (ОВЧ) на биоткани (на примере левой человеческой голени). ОВЧ-излучение в настоящее время широко используется в различных областях техники (телевидение, радиовещание, радиосвязь тропосферная и прямой волной, рации), в связи с чем высок фоновый уровень загрязнения окружающей среды данным видом излучения. Особенностью действия ЭМП ОВЧ-диапазона на биоткани является относительно высокая глубина его проникновения, степень отражения от границ раздела между тканями, диэлектрическая проницаемость и электрическое сопротивление тканей среди всего высокочастотного диапазона. Также размеры человека сопоставимы с длиной волны ОВЧ-излучения. Предложена математическая модель и приведены результаты расчетов электрической и магнитной составляющей ЭМП, поляризации, электрического смещения, плотности тока, выделяющейся теплоты от электропрогрева и метаболизма, температуры в левой человеческой голени под действием плотности потока мощности излучения 10 мВт/см^2 на частоте 100 МГц. Выполнен анализ полученных результатов с точки зрения воздействия на организм человека. В рамках данной модели биоткань считается однородной изотропной средой, без учета влияния биотоков. Направлениями дальнейшей работы будут являться учет влияния процессов на клеточном уровне, энтропийные потери при превращении электрической энергии в тепло. Результаты исследования имеют перспективы практического использования при эколого-гигиенической оценке действия ЭМП высоких частот на живые организмы, проектировании радиоэлектронного оборудования, проведении гипертермической терапии, физиотерапии в медицине и т. д.

Ключевые слова: биоткань, электромагнитное поле, ОВЧ-диапазон, биотеплообмен, индукция, метаболизм, поляризация, электрическое смещение.

The study describes electrothermal action of electromagnetic fields (EMF) very high frequency (VHF) on biological tissue (for example, as the left human tibia). Currently VHF radiation is widely used in various fields of technology (television, radio, and direct troposphere radio wave, radio), in con-

nection with which there is high background level of environmental pollution by this type of radiation. The feature of EMF in the VHF-band on biological tissue is relatively high, and the depth of its penetration, the degree of the reflections from boundaries between tissues, the permittivity and electrical resistance of the tissues among all the high-frequency range. Also the size is comparable with the wavelength of the VHF radiation. Proposed mathematical model and the results of calculations of electric and magnetic component fields, polarization, electric displacement, current density, emitted heat from electrical warming up and metabolism, temperature in the left human tibia under the action of the flux density of radiation power of 10 mW/cm^2 at the frequency of 100 MHz. The analysis of obtained results in the terms of the impact on human body was made. In this model, a biological tissue RAS was selected as a homogeneous isotropic medium, the influence of the currents was not considered. The direction for future work would be to account for the influence of processes at the cellular level, entropic losses in the conversion of electrical energy into heat. The results of the research have prospects of practical use in environmental and hygienic assessment of the effect of high-frequency electromagnetic fields on living organisms, the design of electronic equipment, conducting hyperthermal therapy, physical therapy, medicine, etc.

Keywords: biological tissues, electromagnetic field, frequency range, bioheat transfer, induction, metabolism, polarization, electric displacement.

Введение. Одной из важнейших задач современной факториальной экологии является исследование влияния абиотических и антропогенных факторов на живые организмы в природных и антропогенных экосистемах. Одним из таких факторов является электромагнитное поле (ЭМП) очень высоких частот (ОВЧ), источниками которого могут быть телевидение, радиовещание, рации, а также иметь космическое происхождение с учетом влияния тропосферы и ионосферы.

По современным воззрениям основным механизмом действия ЭМП на биологические объекты является индуцирование электротока, выделение метаболического, резистивного тепла при поляризации в биотканях. Для прогнозирования пределов толерантности, оценки устой-

чивости и защиты организмов от воздействия ОВЧ-излучения целесообразна количественная оценка его действия расчетным методом. Существующие методики расчета действия ЭМП ориентированы на контактное локальное облучение частей тела человека при проведении физиотерапии, гипертермической терапии при лечении онкозаболеваний и не пригодны для расчетов при облучении всего тела удаленным источником [1–3].

Цель исследования: разработка численной модели и оценка электрического и теплового воздействия ОВЧ-излучения на биоткани (на примере голени человека).

Задачи исследования: для количественной оценки электротермического действия ОВЧ-излучения на биоткани выполнить разработку, программную реализацию соответствующей численной модели, провести анализ результатов расчетов по ней и медико-биологических исследований.

Методы и результаты исследования. Электромагнитные процессы в биотканях можно описать гармоничным уравнением Ампера-Максвелла:

$$(j\omega\sigma - \omega^2\epsilon_0\epsilon_r)\mathbf{A} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_e, \quad (1)$$

где j – мнимая единица; σ – электропроводность, См/м; ω – угловая частота, рад; $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; \mathbf{J}_e – суммарная плотность тока, А/м²; \mathbf{A} – магнитный потенциал, Н/А.

Связь между магнитным векторным потенциалом и напряженностью магнитного поля \mathbf{H} , А/м, и электрического поля \mathbf{E} , В/м:

$$\mathbf{H} = \mu_0^{-1} \times \mathbf{A}; \quad (2)$$

$$\mathbf{E} = \nabla V - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}; \quad (3)$$

где t – время, с; V – скалярный электрический потенциал, В.

Так как расчетная область ограничивается поверхностью тела человека, то на ее поверхности задается граничное условие:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = \mathbf{J}_{sz}, \quad (4)$$

где \mathbf{n} – единичный вектор нормали к поверхности; \mathbf{J}_{sz} – напряженность магнитного поля на поверхности, А/м.

Процессы биотеплообмена можно описать уравнением Пинеса [1]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(k\nabla T) + \rho_b C_b \omega_b (T_b - T) = Q_{met} + Q_{ext}, \quad (5)$$

где ρ – плотность ткани, кг/м³; C – теплоемкость ткани, Дж/(кг·К); k – теплопроводность ткани, Вт/(м·К); ρ_b – плотность крови, кг/м³; C_b – теплоемкость крови, Дж/(кг·К); ω_b – скорость перфузии крови в ткани, м³/(м³·с); $T_b = 310,15$ К – температура артериальной крови; Q_{ext} – источник тепла, Вт/м³; Q_{met} – теплота метаболизма, Вт/м³, для кожи и мышечной ткани человека приближенно определяемая как [2, 4]

$$Q_{met} = Q_{bas} \cdot 1,07^{(T-T_{bas})/0,5}; \quad (6)$$

где Q_{bas} – теплота метаболизма, Вт/м³, при температуре в биоткани T_{bas} , К.

В качестве начального условия ($t = 0$) значение температуры принято

$$T = T_{inf}, \quad (7)$$

где T_{inf} – температура окружающей среды, К.

Теплообмен организма с внешней средой путем конвекции, теплоизлучения и испарения учитывается с помощью уравнения

$$\mathbf{n} \cdot (k\nabla T) = \alpha_n (T_{inf} - T) + \epsilon\sigma(T_{inf}^4 - T^4) + K_{исп}(p_{inf} - p), \quad (8)$$

где $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8}$ Дж·с⁻¹·м⁻²/К⁴ – константа Стефана-Больцмана; ϵ – степень черноты поверхности, для кожи $\epsilon = 0,9$; $K_{исп} = 4,2-4,7$ Вт/(кПа·м²) – коэффициент испарительного теплообмена; p_{inf} и p_v – упругости насыщенного водяного пара соответственно при температурах окружающего воздуха и тела, кПа; α – коэффициент конвективного теплообмена с поверхности тела, Вт/(м²·К), при скорости движения воздуха $u \leq 4$ м/с, определяемый как [5]

$$\alpha_{конв} = 6,31u^{0,654} + 3,25e^{-1,91u}. \quad (9)$$

Упругость насыщенного водяного пара p , кПа, рассчитывается следующим образом [6]:

$$p = e^{(16,57T - 4410,380)/(506,1+T)}. \quad (10)$$

Контуры силовых линий ЭМП в теле человека приведены на рисунке 1.

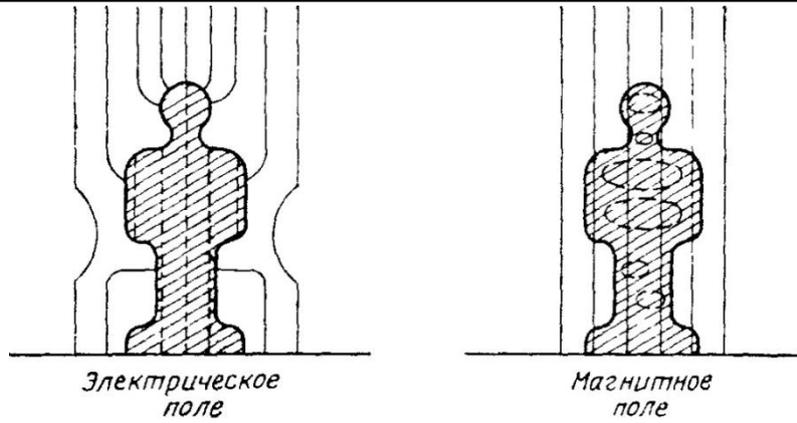


Рис. 1. Контуры силовых линий ЭМП в теле человека [7, 8]

Рассматривая туловище и ноги человека как электрические проводники, сходящиеся в одном узле, и руководствуясь законом Био-Савара-Лапласа, первым правилом Кирхгофа значение напряженности магнитного поля на поверхности голени J_{sz} , А/м, можно найти приближенно по формуле

$$J_{sz} \approx \frac{0,5I}{2\pi r_{\text{экв}}}, \quad (11)$$

где I – сила тока, создаваемого ЭМП в теле человека, А; $r_{\text{экв}} = 0,087$ м – эквивалентный радиус сечения голени, который оно бы имело, будучи круглым.

Значение силы тока I , проходящего внутри эллипсоидной модели человека, можно приближенно найти по формуле П.А. Долина [8]:

$$I \approx \omega E_0 h R_{\text{экв}} \varepsilon_0 K_{\phi}, \quad (12)$$

где $h = 1,76$ м – высота человека; $R_{\text{экв}} = 0,12$ м – средний эквивалентный радиус сечения, перпендикулярного высоте человеческого тела; K_{ϕ} – коэффициент, зависящий от формы модели, для эллипсоидной модели $K_{\phi} \approx 1$; E_0 – напряженность внешнего ЭМП, В/м, определяемая как

$$E_0 \approx \sqrt{W} / \sqrt{\varepsilon_0 c}, \quad (13)$$

где W – мощность ЭМП, Вт/м²; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

Расчеты выполнены в среде «Comsol Multiphysics» для ЭМП частотой 100 МГц, мощностью $W = 10$ мВт/см², при которой наблюдаются тепловые эффекты [10], на левую человеческую голень ноги площадью сечения 235 см². Характеристики биотканей приведены в таблице 1 по данным [1, 3, 11, 12]. Приняты допущения, что биоткань является однородной изотропной средой, влияние процессов – на клеточном уровне, наличие естественных биотоков в тканях не учитывается. Схема расчетной области приведена на рисунке 2 в соответствии с [10].

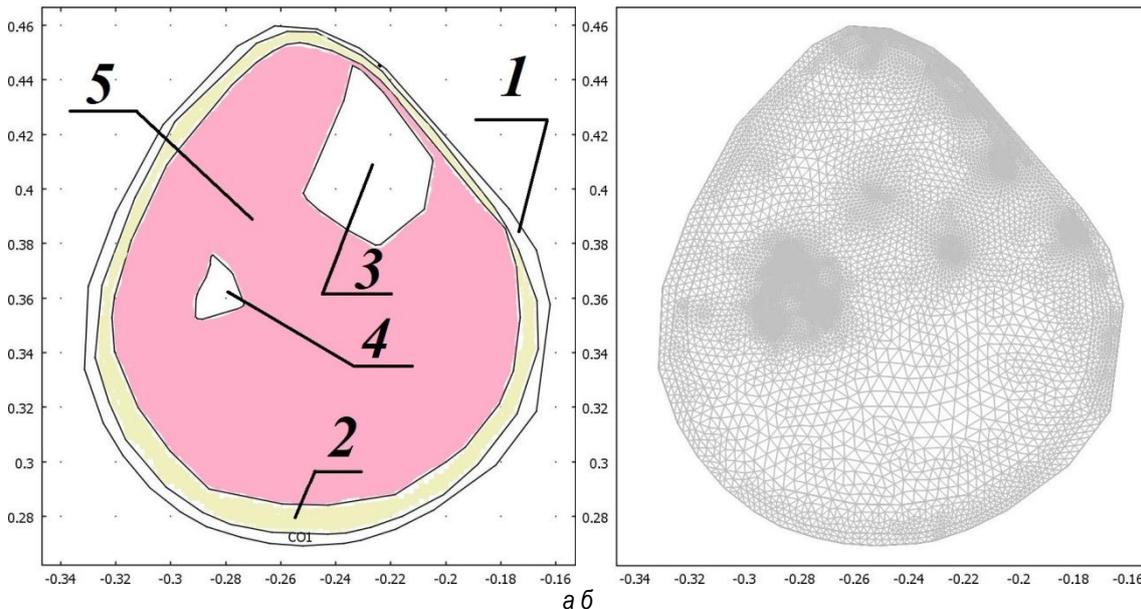


Рис. 2. Схема расчетной области: а – геометрия модели (1 – кожа; 2 – жировая ткань; 3 – большая берцовая кость; 4 – малая берцовая кость; 5 – мышцы); б – конечно-элементная сетка модели

Характеристики биотканей

Параметр	Кожа	Мышцы	Жир	Кости	Кровь
Плотность, кг/м ³	1108	1041	920	1990	1058
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	3150	3500	3700	2238	3645
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,251	0,49	0,19	0,36	0,51
Теплота метаболизма, Вт/м ³	1125	758	0	0	-
Скорость перфузии крови в ткани, м ³ /(м ³ ·с)	0,002	0,00008	0,0001	0,00025	-
Относительная диэлектрическая проницаемость*	65	73,5	6,0	5.5	-
Удельная электропроводность, См/м*	0,769	0,953	0,435	0,003	-

*При температуре 37 °С.

Результаты расчетов электрической и магнитной напряженностей поля в биотканях приведены на рисунке 3. Под действием ЭМП происходят электрическое смещение и поляризация в биотканях, оказывающие сопротивление действию внешнего ЭМП, и накопление электрического заряда (рис. 4).

Протекающий ток в биотканях приводит к тепловыделению (рис. 5).

На рисунках 6 и 7 приведены результаты расчетов теплоты метаболизма и температуры в биотканях соответственно при отсутствии и наличии ОБЧ-излучения.

Анализируя результаты расчета, можно предвидеть следующие результаты действия ОБЧ-излучения на био-

ткани. Максимальная расчетная плотность тока вызовет стимуляцию сенсорных рецепторов нервных и мышечных клеток в конечностях [8]. Также видно, что действие излучения приводит к повышению теплоты метаболизма и температуры в биотканях. Однако данное повышение температуры вызывает небольшое ощущение прогрева и не приводит к серьезным паталогическим нарушениям, связанным с перегревом тела [13].

В таблице 2 выполнено сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных.

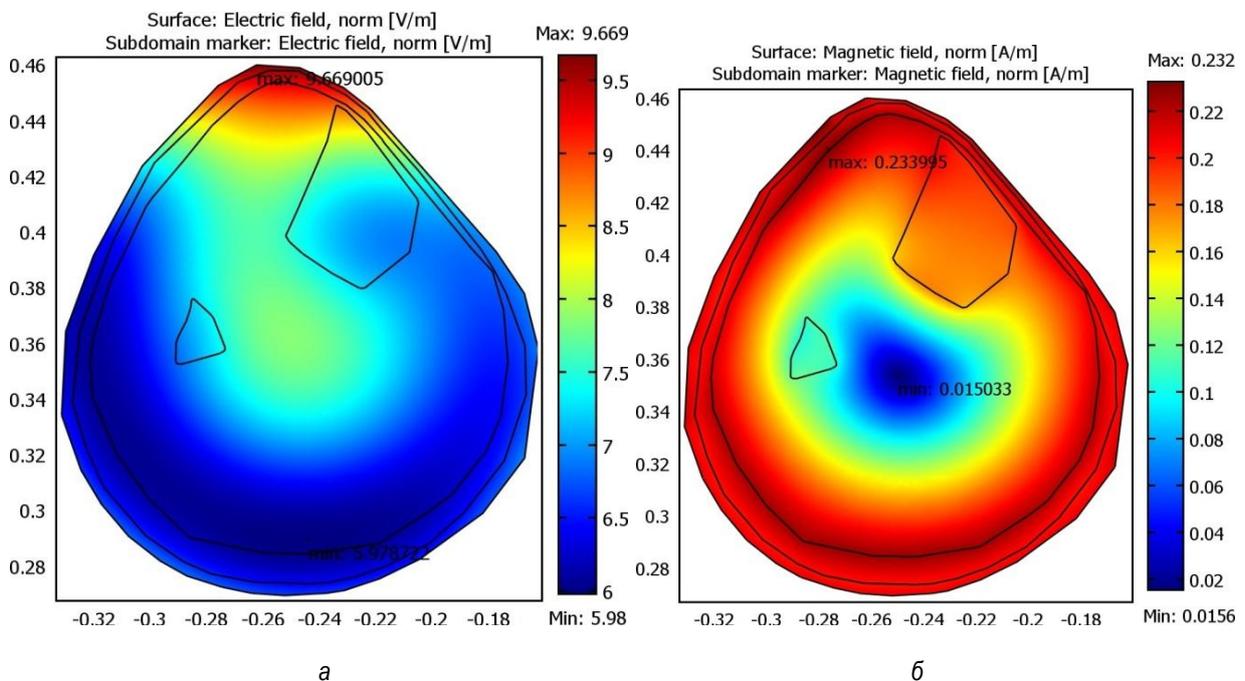


Рис. 3. Напряженности поля в биотканях под действием ОБЧ-излучения: а – электрического, В/м; б – магнитного, А/м

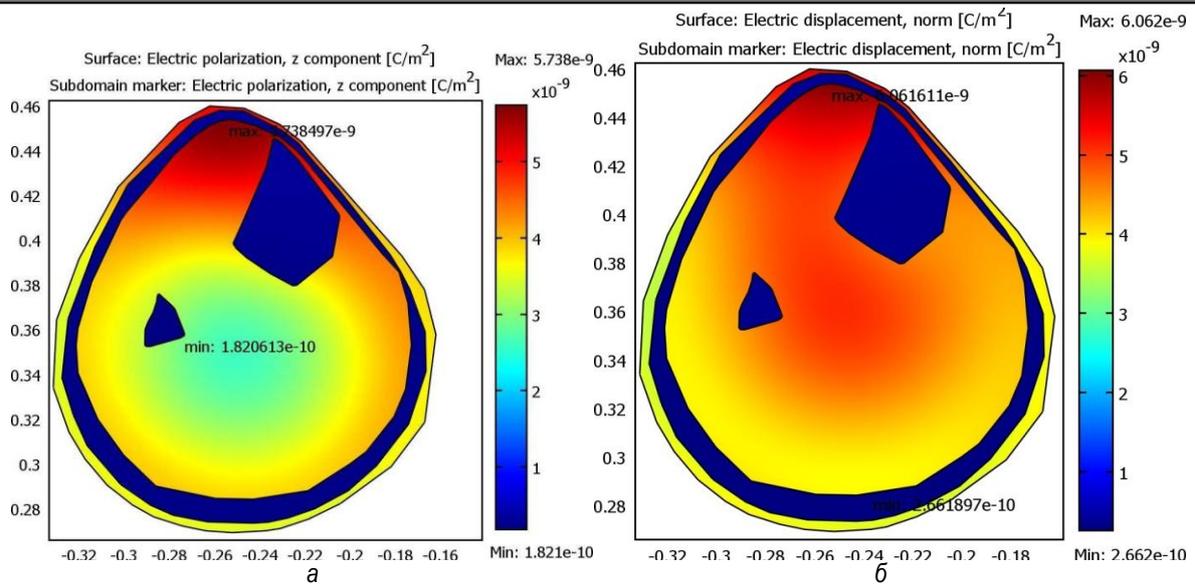


Рис. 4. Поляризация (а) и электрическое смещение в биотканях, Кл/м² (б)

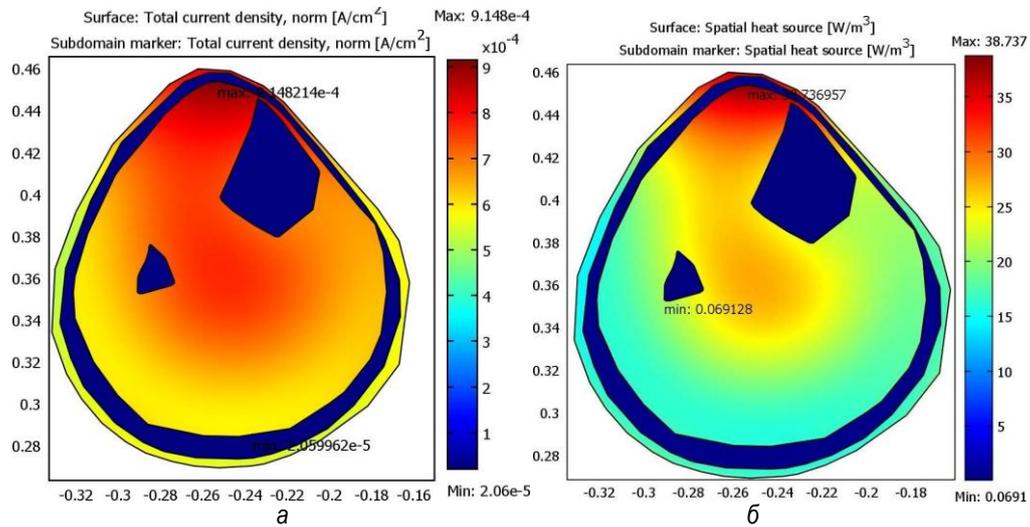


Рис. 5. Суммарная плотность тока проводимости и смещения, А/см² (а) и теплота, выделяющаяся в биотканях под действием ОВЧ-излучения, Вт/м³ (б)

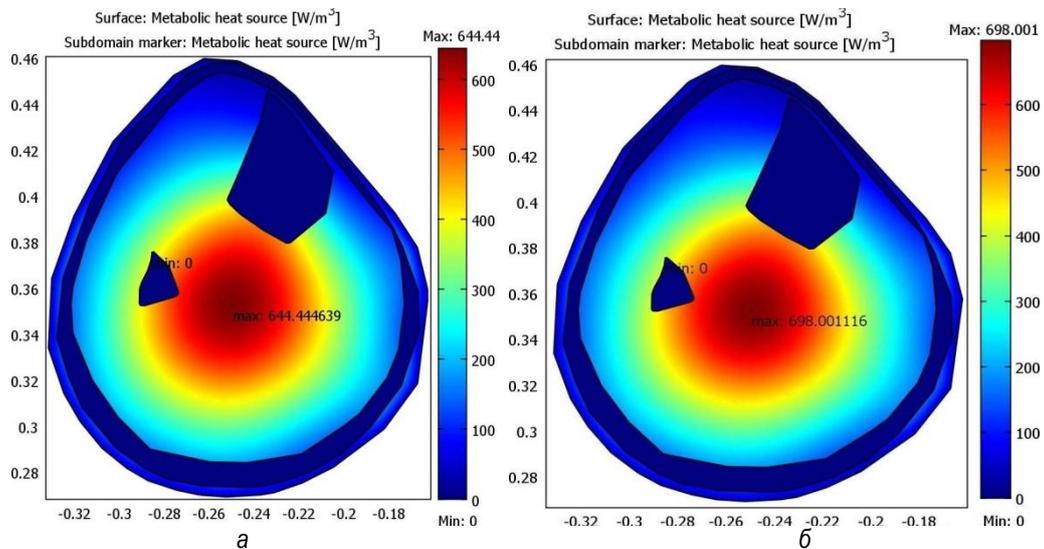


Рис. 6. Теплота метаболизма биотканей, Вт/м³: а – при отсутствии ОВЧ-излучения; б – под действием ОВЧ-излучения

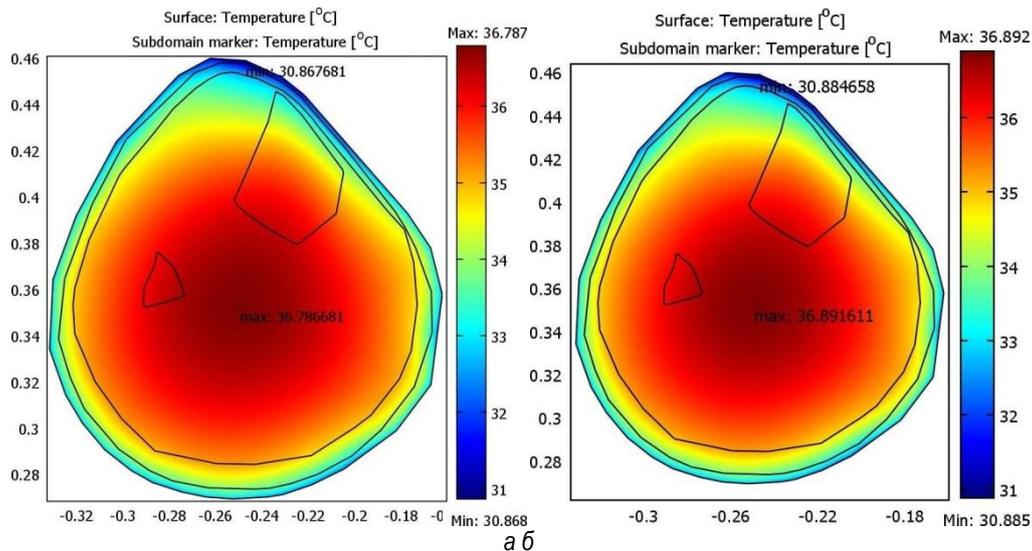


Рис. 7. Температура биотканей, °С: а – при отсутствии ОВЧ-излучения; б – под действием ОВЧ-излучения

Таблица 2

Сравнение расчетных и экспериментальных значений силы тока в конечностях и локальные повышения температуры биотканей под действием ОВЧ-излучения

Параметр	Расчетное значение	Экспериментальное значение
Сила тока, мА	113,87	100 [12]
Повышение температуры, °С	0,017–0,105	0,1 [9]

Заключение. В данной работе было разработана и верифицирована численная модель, с помощью которой выполнена оценка электрического и теплового воздействия ОВЧ-излучения на биоткани. В дальнейшем планируется учесть влияние процессов на клеточном уровне, энтропийные потери при превращении электроэнергии в тепло.

Результаты исследования целесообразно использовать при эколого-гигиенической оценке действия ЭМП ВЧ на живые организмы, проектировании радиооборудования, проведении гипертермийной терапии, термобработки сельскохозяйственной продукции, физиотерапии в медицине и т. д.

Литература

1. Квашнин Г.М., Квашнина О.П., Сорокина Т.П. Модель поглощения СВЧ-энергии в биологических тканях // Вестн. КрасГАУ. – 2009. – № 2. – С. 199–203.
2. Charyu S.K., Nagtann M.J., Levin R.L. A whole body thermal model of man during hyperthermia tissues // IEEE Trans. on Biomed. Eng. – 1987. – Vol. BME-34. – P. 375–386.
3. Лосев А.Г., Хоперсков А.В., Астахов А.С., Сулейманова Х.М. Проблемы измерения и моделирования тепловых и радиационных полей в биотканях: анализ данных микроволновой термометрии // Вестн. ВолГУ. Сер. 1 «Математика. Физика». – 2015. – № 6. – С. 31–37.
4. Садовский Д.Н., Калачик О.В., Жук Г.В. и др. Влияние оптимизации температурного фактора на начальную функцию трансплантата почки // Медицинский журнал БГМУ. – 2015. – № 4. – С. 101–104.
5. Четверухин Б.М. Контроль и управление искусственным микроклиматом. – М.: Стройиздат, 1984. – 135 с.
6. Тарабанов М.Г., Коркин В.Д., Сергеев В.Ф. Влажный воздух: справ. пособие. – М.: АВОК, 2004. – 72 с.
7. Чехов В.И. Экологические аспекты передачи электроэнергии. – М.: Изд-во МЭИ, 1991. – 44 с.
8. Медведев В.Т. и др. Инженерная экология: учебник. – М.: Гардарики, 2002. – 690 с.
9. Паршина Н.В. Разработка методов моделирования биологических структур и устройств, влияющих на метаболические процессы при воздействии электромагнитных волн миллиметрового диапазона: дис. ... канд. техн. наук. – Таганрог, 2017. – 157 с.
10. Неттер Ф. Атлас анатомии человека. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2017. – 624 с.
11. Рахманкулов Д.Л., Шавшукова С.Ю., Вихарева И.Н. Применение микроволнового излучения в терапии некоторых заболеваний // Башкирский химический журнал. – 2008. – Т. 15, № 2. – С. 94–98.
12. Харвей А.Ф. Техника сверхвысоких частот. Т. 2. – М.: Советское радио, 1965. – 373 с.
13. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz) é ICNIRP GUIDELINES. Preprint scheduled to appear in Health Physics April 1998, Volume 74, Number 4. – P. 494–522.

Literatura

1. *Kvashnin G.M., Kvashnina O.P., Sorokina T.P.* Model' pogloshheniya SVCh-jenergii v biologicheskikh tkanjah // Vestn. KrasGAU. – 2009. – № 2. – S. 199–203.
2. *Charny C.K., Hagmann M.J., Levin R.L.* A whole body thermal model of man during hyperthermia tissues // IEEE Trans. on Biomed. Eng. – 1987. – Vol. BME-34. – P. 375–386.
3. *Losev A.G., Hoperskov A.V., Astahov A.S., Sulejmanova H.M.* Problemy izmerenija i modelirovanija teplovyh i radiacionnyh polej v biotkanjah: analiz dannyh mikrovolnovoj termometrii // Vestn. VolGU. Ser. 1 «Matematika. Fizika». – 2015. – № 6. – S. 31–37.
4. *Sadovskij D.N., Kalachik O.V., Zhuk G.V.* i dr. Vlijanie optimizacii temperaturnogo faktora na nachal'nuju funkciju transplantata pochki // Medicinskij zhurnal BGMU. – 2015. – № 4. – S. 101–104.
5. *Chetveruhin B.M.* Kontrol' i upravlenie iskusstvennym mikroklimatom. – M.: Strojizdat, 1984. – 135 s.
6. *Tarabanov M.G., Korkin V.D., Sergeev V.F.* Vlazhnyj vozduh: sprav. poso-bie. – M.: AVOK, 2004. – 72 s.
7. *Chehov V.I.* Jekologicheskie aspekty peredachi jelektroenergii. – M.: Izd-vo MJel, 1991. – 44 s.
8. *Medvedev V.T.* i dr. Inzhenernaja jekologija: uchebnik. – M.: Gardarika, 2002. – 690 s.
9. *Parshina N.V.* Razrabotka metodov modelirovanija biologicheskikh struk-tur i ustrojstv, vlijajushhih na metabolicheskie processy pri vozdejstvii jelektromagnitnyh voln millimetrovogo diapazona: dis. ... kand. tehn. nauk. – Taganrog, 2017. – 157 s.
10. *Netter F.* Atlas anatomii cheloveka. – M.: GJeOTAR-Media, 2017. – 624 s.
11. *Rahmankulov D.L., Shavshukova S.Ju., Vihareva I.N.* Primenenie mikrovolnogo izluchenija v terapii nekotoryh zabolevanij // Bashkirskij himicheskij zhurnal. – 2008. – T. 15, № 2. – S. 94–98.
12. *Harvej A.F.* Tehnika sverhvysokih chastot. T. 2. – M.: Sovetskoe radio, 1965. – 373 s.
13. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz) é ICNIRP GUIDELINES. Preprint scheduled to appear in Health Physics April 1998, Volume 74, Number 4. – P. 494–522.

УДК 631/635

*Е.Я. Чебоचाков, Г.М. Шапошников,
Н.В. Идимешев, В.Н. Муртаев*

ПЕРИОДЫ УСИЛЕНИЯ ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОСВОЕНИИ ЦЕЛИННЫХ И ЗАЛЕЖНЫХ ЗЕМЕЛЬ
НА ЮГЕ СРЕДНЕЙ СИБИРИ

*E.Ya. Chebochakov, G.M. Shaposhnikov,
N.V. Idimeshev, V.N. Murtaev*

THE PERIODS OF EROSION PROCESSES STRENGTHENING AT THE DEVELOPMENT OF VIRGIN AND FALLOW LANDS
ON THE SOUTH OF CENTRAL SIBERIA

Чебоचाков Е.Я. – канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр. группы агропочвоведения и землепользования НИИ аграрных проблем Хакасии, Республика Хакасия, Усть-Абаканский район, с. Зеленое. E-mail: echebochakov@mail.ru

Шапошников Г.М. – ст. науч. сотр. отдела экономики Хакасского НИИ языка, литературы и истории, г. Абакан. E-mail: nadezhda.dankina@yandex.ru

Идимешев Н.В. – асп. каф. агрономии Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова. E-mail: idimeshev.nik@mail.ru

Муртаев В.Н. – инженер-исследователь, асп. группы агропочвоведения и землепользования НИИ аграрных проблем Хакасии, Республика Хакасия, Усть-Абаканский р-н, с. Зеленое. E-mail: valera.murtaev@mail.ru

Chebochakov E.Ya. – Cand. Agr. Sci., Senior Staff Scientist, Group of Agrology and Land Use, Research Institute of Agrarian Problems of Khakassia, Republic of Khakassia, Ust-Abakansky Area, V. Zelyonoe. E-mail: echebochakov@mail.ru

Shaposhnikov G.M. – Senior Staff Scientist, Department of Economy, Khakass Research Institute of Language, Literature and History, Abakan. E-mail: nadezhda .dankina@yandex.ru

Idimeshev N.V. – Post-Graduate Student, Chair of Agronomy, N.F. Katanov Khakass State University, Abakan. E-mail: idimeshev .nik@mail.ru0

Murtaev V.N. – Research Engineer, Post-Graduate Student, Group of Agrology and Land Use, Research Institute of Agrarian Problems of Khakassia, Republic of Khakassia, Ust-Abakansky Area, V. Zelyonoe. E-mail: valera .murtaev@mail.ru

Цель исследований – анализ эффективности освоения целинных и залежных земель в XX и начале XXI века в Республике Хакасия, его влияния на производство сельскохозяйственной продукции, проявление и развитие эрозионных процессов. Динамику посевных площадей сельскохозяйственных культур и валовый сбор зер-

на определяли по данным отчетов Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Хакасия. Выявлены периоды наибольшего освоения целинных и залежных земель, посевных площадей сельскохозяйственных культур и проявления эрозионных процессов в указанное время. При выполнении исследований приме-