

DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-1-57-67

EDN: CGGMIM

УДК 504.75

Научная статья / Research article

Оценка плотности индуцированных токов в органах человека, находящегося в зоне прохождения воздушных линий электропередачи

С.Ю. Перов¹, В.С. Орлова², В.В. Журов^{1,3}¹Научно-исследовательский институт медицины труда

имени академика Н.Ф. Измерова, Москва, Российская Федерация

²Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация³Российский государственный социальный университет, Москва, Российская Федерацияvl.jurov@mail.ru

Аннотация. На основании результатов натурных измерений, в ходе которых были зафиксированы превышения предельно допустимых уровней напряженности электрического поля (до 11,5 кВ/м), разработаны математические модели экологической обстановки электрических и магнитных полей промышленной частоты вблизи прохождения линий электропередачи сверхвысокого напряжения. Проанализировано сочетанное влияние сверхнизкочастотных электрических и магнитных полей на организм человека в контексте плотности индуцированных токов в органах. Особое внимание уделено анализу систем органов, которые больше всего подвержены биологическому действию фактора. Моделирование с использованием фантома человека выявило превышающую нормативы (до 161,5247 мА/м²) плотность индуцированных токов в нервной, зрительной и эндокринной системах. Проведен анализ градации влияния фактора в зависимости от расположения человека относительно источника электрических и магнитных полей промышленной частоты и подтверждено, что наибольшее влияние происходит под проекцией средней фазы под максимальным провисом и уменьшается при удалении человека от провиса к самой опоре или к границам санитарно-защитной зоны.

Ключевые слова: электрические поля, магнитные поля, промышленная частота, математическое моделирование, фантом человека

Вклад авторов. Перов С.Ю. – концепция и дизайн исследования, его проведение, написание текста статьи; Орлова В.С. – концепция и дизайн исследования; Журов В.В. – проведение исследования, анализ полученных данных, написание текста статьи.

© Перов С.Ю., Орлова В.С., Журов В.В., 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

История статьи: поступила в редакцию 23.09.2024; доработана после рецензирования 21.11.2024; принята к публикации 01.12.2024.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Перов С.Ю., Орлова В.С., Журов В.В. Оценка плотности индуцированных токов в органах человека, находящегося в зоне прохождения воздушных линий электропередачи // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 1. С. 57–67. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-1-57-67>

Induced current density evaluation in organs of a human, located in the overhead power lines passage zone

Sergey Yu. Perov¹, Valentina S. Orlova², Vladimir V. Zhurov^{1,3}

¹*Izmerov Research Institute of Occupational Health, Moscow, Russian Federation*

²*RUDN University, Moscow, Russian Federation*

³*Russian State Social University, Moscow, Russian Federation*

 vl.jurov@mail.ru

Abstract. Based on the results of field measurements, during which exceedances of maximum permissible levels of electric field strength (up to 11.5 kV/m) were recorded, mathematical models of the ecological situation of electric and magnetic fields of industrial frequency near the passage of ultra-high voltage power lines have been developed. The combined effect of ultra-low-frequency electric and magnetic fields on the human body in the context of the density of induced currents in organs has been analyzed. Special attention is paid to the analysis of organ systems that are most exposed to the biological effects of the factor. Modeling with the use of human phantom revealed the density of induced currents in the nervous, visual, endocrine systems exceeding the norms (up to 161.5247 mA/m²). The analysis of gradation of the factor influence depending on the location of a person directly from the source of electric and magnetic fields of industrial frequency has been carried out and it has been confirmed that the greatest influence occurs under the projection of the middle phase under the maximum sag and decreases at removal of a person from the sag to the support itself or to the boundaries of the sanitary protection zone.

Keywords: electric fields, magnetic fields, industrial frequency, mathematical modeling, human phantom

Authors' contribution. *Perov S.Yu.* – research concept and design, research conduct, text writing; *Orlova V.S.* – research concept and design; *Zhurov V.V.* – conducting the study, data analysis, text writing.

Article history: received 23.09.2024; revised 21.11.2024; accepted 01.12.2024.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Perov SYu, Orlova VS, Zhurov VV. Induced current density evaluation in organs of a human, located in the overhead power lines passage zone. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2025;33(1):57–67. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-1-57-67>

Введение

Технологический прогресс несет за собой необходимость активного развития и внедрения новых объектов передачи и распределения электрической энергии, что приводит к увеличению общего электромагнитного уровня в диапазоне промышленной частоты (ПЧ) – 50/60 Гц. Наиболее широко встречающимся примером мест превышения предельно допустимых уровней (ПДУ) ПЧ как для производственных условий, так и для окружающей среды, являются санитарно-защитные зоны (СЗЗ) прохождения воздушных линий электропередачи (ВЛ) сверхвысокого напряжения напряжением от 330 до 1150 кВ, где одновременно присутствуют электрические и магнитные поля (ЭП и МП) ПЧ. В настоящее время имеется сравнительно мало научных данных, посвященных комплексному изучению сочетанного влияния ЭП и МП ПЧ на организм человека. В основе биологического действия ЭП и МП ПЧ лежит плотность индуцированных токов внутри органов и тканей тела человека, которая является расчетной нормируемой величиной в A/m^2 ¹. Учитывая, что как в Российской Федерации, так и во всем мире, основным контролируемым показателем (ПДУ) является напряженность ЭП или МП ПЧ, а плотность индуцированных токов – расчетным показателем за рубежом, представляется целесообразным разработка математической модели оценки плотности индуцированных токов в численном фантоме тела человека на примере условий воздействия ЭП и МП ПЧ в зоне прохождения ВЛ сверхвысокого напряжения на организм человека, а также определение их сочетанного влияния на отдельные органы и ткани тела человека. Полученные данные будут основой для сопоставления отмеченных биологических эффектов с данными из проведенных за последнее десятилетие исследований.

Цель исследования – разработка математической модели для оценки плотности индуцированных токов в органах и тканях тела человека, находящегося в зоне прохождения воздушных линий электропередачи.

Материалы и методы

Объектами исследования были выбраны воздушные линии электропередачи напряжением 500 кВ. Исследование включало проведение измерений уровней ЭП и МП ПЧ на наземных рабочих местах и в пределах границ СЗЗ ВЛ.

¹ Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection / International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) // Health Phys. 1998. Vol. 74, no. 4. P. 494–522. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9525427/> (accessed: 23.08.2024).

Измерения напряженностей ЭП и МП ПЧ проводились с использованием измерителей ПЗ-50 (НПО «Доза», Россия) и NARDA EFA-300 (Narda Safety Test Solutions, Германия) с антеннами E-FIELD и B-FIELD.

Измерения проводились на высотах 0,5, 1,5 и 1,7 м от поверхности Земли, измеренные значения напряженности ЭП и МП корректировались с учетом максимального годового рабочего напряжения и тока соответственно.

Измерения в пределах границ СЗЗ ВЛ осуществлялись по заранее разработанной ФГБНУ НИИ МТ методике. Размещение точек измерений осуществлялось как непосредственно под проекциями проводов крайних и средней фаз, так и между ними, что обеспечивало комплексную картину распределения ЭП и МП в СЗЗ прохождения ВЛ.

Для математического моделирования условий воздействия ЭП и МП ПЧ на организм человека использовалось программное обеспечение SEMCAD X Matterhorn v.20 (SPEAG AG, Швейцария). Для оценки плотности индуцированных токов в теле человека в математических моделях применялся гетерогенный численный фантом взрослого человека с заданными диэлектрическими характеристиками 73 тканей и органов для частоты 50 Гц.

Результаты и их обсуждение

Инструментальные измерения ЭП и МП ПЧ проводились в границах СЗЗ воздушных линий электропередачи 500 кВ вблизи подстанций 750 кВ Металлургическая и 750 кВ Белозерская в теплое время года, находящихся в эксплуатации.

Проведенные измерения показали наличие превышений ПДУ напряженности ЭП даже для условий производственных воздействий. Для ВЛ 500 кВ, расположенных параллельно друг другу, было проведено 900 измерений в 150 точках. Максимальные уровни ЭП не превысили 2,2 кВ/м, а МП – 4,4 мкТл на границах СЗЗ. Анализ показал, что максимальные уровни ЭП ВЛ 500 кВ превышали нормативы в определенных зонах, а именно наибольшая напряженность ЭП отмечалась до 11,5 кВ/м под проекциями крайних фаз и до 10,2 кВ/м под проекцией средней фазы в области максимального провиса, что более чем в 2 раза превышает установленный норматив для всей рабочей смены². Вблизи опоры максимальное значение не превышало ПДУ и составляло 3,5 кВ/м под проекциями крайних фаз.

Измеренные значения индукции МП достигали 12,3 мкТл под проекциями крайних фаз и 11,3 мкТл под проекцией средней фазы в точке максимального провиса линий. Во всех остальных случаях уровни МП не поднимались выше 10 мкТл. Все зарегистрированные значения значительно меньше

² СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания, утв. постановлением № 2 главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 г. URL: https://www.rospotrebnadzor.ru/files/news/GN_sreda%20_obitaniya_compressed.pdf (дата обращения: 04.09.2024).

норматива 100 мкТл на рабочем месте, для населения уровни ЭП и МП ПЧ в таких условиях не нормируются, имеются лишь ПДУ в жилых зданиях, детских, дошкольных, школьных, общеобразовательных учреждениях, общественных зданиях и на территориях жилой застройки. Для последних ПДУ составляют ≤ 1 кВ/м и 10 мкТл, но в этих случаях подразумевается постоянное нахождение человека в зоне воздействия, что нехарактерно для зоны прохода ВЛ.

Схожие данные отмечали и другие исследователи, например, В.Н. Никитина и др. [1], измерившие уровни ЭМП, создаваемые ВЛ напряжением 35, 110 и 220 кВ. Они также зафиксировали наибольшие значения напряженности ЭП в середине пролетов под проводами ВЛ 110 кВ, превышающие ПДУ 1 кВ/м.

Также в исследовании A.Z. El Dein с соавт. [2] проходило сравнение ЭП и МП ПЧ на ВЛ 500 кВ под проекцией средней фазы при повышении и понижении высоты проводов. Максимальное МП уменьшалось с 30,852 А/м до 23,432 А/м при увеличении высоты центральной фазы с 18 м до 26 м. Максимальное значение ЭП под центральной фазой достигало 1,2 кВ/м (что идентично уровням в нашем исследовании) при высоте центральной фазы 26 м (выше внешних фаз на 4 м), а при высоте центральной фазы 18 м (ниже внешних фаз на 4 м) оно составляло 6,13 кВ/м. В нашем же случае высота центральной фазы у опоры была 27 м, а при максимальном провисе 13 м, а следовательно, разница составила 14 м. Поэтому у нас уровни ЭП под максимальным провисом были больше (8,6 кВ/м).

На основании данных измерений в основе математического моделирования использовалась ВЛ 500 кВ с двумя типовыми опорами для имитации прямого пролета с расстоянием 400 метров между ними. Высота опор – 37 м, расщепление каждой фазы на 3 провода. За расчетное пространство модели принималась вся область пролета ВЛ от опоры до следующей опоры для оценки в том числе минимального габарита провиса проводов ВЛ. Для обеспечения корректности расчета устанавливался не только класс напряжения (рабочего напряжения), но и сдвиг фаз крайних проводов для моделирования условий экспозиции на рабочих местах и в местах возможного пребывания населения.

Таким образом, была разработана математическая модель электромагнитной обстановки в СЗЗ пролета воздушных линий электропередачи напряжением 500 кВ, основанная на данных, полученных при проведении натурных измерений уровней ЭП ВЛ электропередачи напряжением 500 кВ.

Различия в сходимости данных натурных измерений с результатами численного моделирования составили 4 % под провисом и 20 % под опорой (рис. 1), что указывает на адекватность разработанной математической модели электромагнитной обстановки и возможности ее применения для дозиметрической оценки на организм человека.

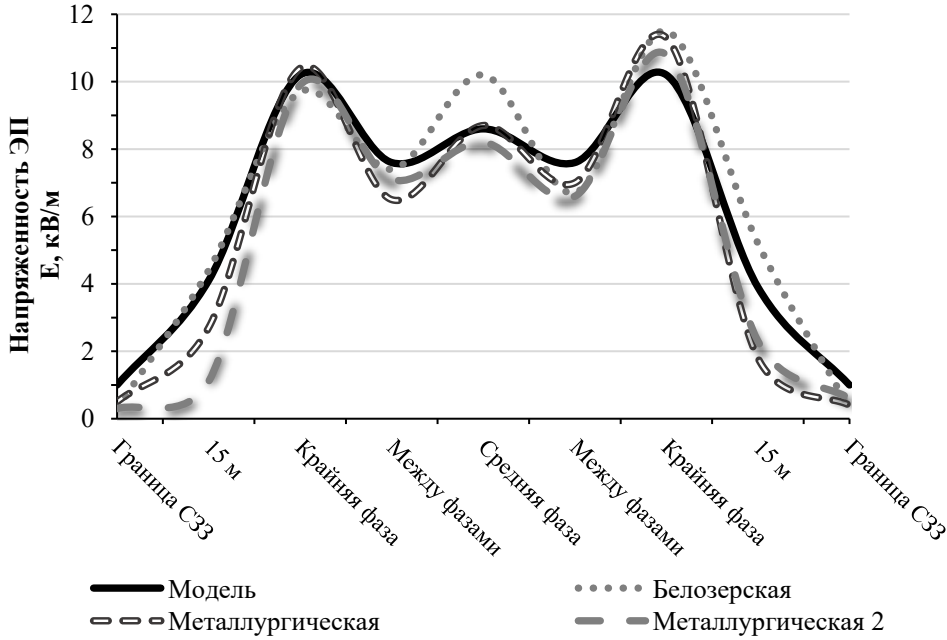


Рис. 1. Напряженность ЭП вблизи 1/2 пролета ВЛ (максимальный провис) на высоте 1,7 м
Источник: составлено С.Ю. Перовым, В.С. Орловой, В.В. Журовым.

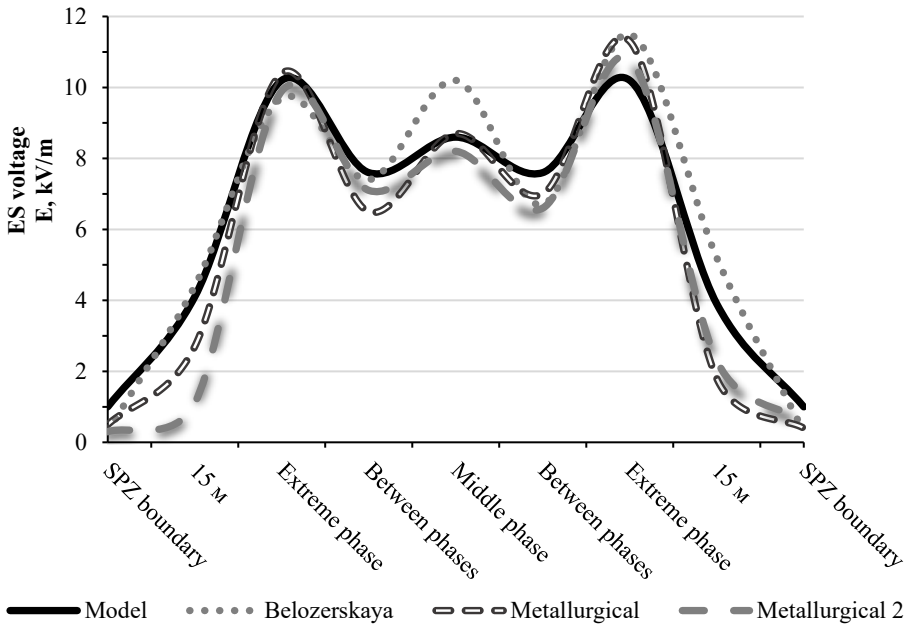


Figure 1. ES voltage near 1/2 of the overhead line span (maximum sag) at a height of 1.7 m
Source: compiled by S.Yu. Perov, V.S. Orlova, V.V. Zhurov.

Разработанная модель зоны пролета позволила провести расчеты экспозиции ЭП и МП ПЧ с фантомом человека в разных точках (вблизи опоры, под максимальным провисом и на границе СЗЗ для указанного класса напряжения ВЛ³.

Анализ данных напряженности ЭП модели ВЛ 500 кВ (табл.) показал, что наибольшие индуцированные токи отмечались в тканях и органах нервной системы под проекцией средней фазы с максимальным провисом (напряженность поля 8,6 кВ/м), где максимальный усредненный уровень плотности тока составил 161,5247 мА/м² в спинномозговой жидкости. Похожий результат получили R. Tian с соавт. [6] в вагоне поезда с пассажирами, где напряжение высоковольтных проводов было 25 кВ. Ими был сделан вывод, что максимальная напряженность индуцированного ЭП в теле пассажира возникает в области спинномозговой жидкости с максимальным значением 202,817 мВ/м. К тому же это может свидетельствовать о подтверждении исследования F. Teimori с соавт. [5], которые в своей работе после экспозиции МП интенсивностью 3 мТл в течение 4 ч в день лабораторных крыс на протяжении 10 нед., делают вывод, что воздействие МП частотой 50 Гц может изменять ультраструктуру ткани гиппокампа и усиливать апоптоз в гиппокампе крыс, ссылаясь на исследование H. Lai с соавт. [3], результаты которого показали, что влияние 24- и 48-часового воздействия МП 0,01 мТл, 60 Гц на одонитовые и двунитовые разрывы ДНК в клетках мозга крыс приводит к увеличению апоптоза и некроза в клетках мозга крыс. Также исследователи отмечали, что такое увеличение апоптоза и некроза может быть связано со свободнорадикальными процессами, образующимися под действием фактора, приводящего к разрушению ДНК и гибели нервных клеток.

Второй по уровню воздействия ЭП ПЧ (наличие высоких значений индуцированных токов) была зрительная система, где наибольшая плотность тока наблюдалась в стекловидном теле глаза. Это может свидетельствовать о возможном взаимодействии между плотностью тока и палочковидными клетками сетчатки. Также возможными последствиями могут быть мерцающие визуальные ощущения, или магнитофосфены, о чем говорится в недавнем исследовании A. Legros с соавт. [4].

Затем следует эндокринная система, где больше всего страдает гипофиз. Далее – сердечно-сосудистая система, где наибольшие уровни индуцированных токов отмечались в венах (рис. 2). Во всех этих случаях уровень плотности индуцированных токов был выше 10 мА/м² и 2 мА/м², что составляет

³ СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов, утв. постановлением № 74 главного государственного санитарного врача РФ от 25.09.2007 г. (действуют до 01.01.2025 г.). URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294844/4294844925.pdf> (дата обращения: 04.09.2024).

максимальные нормируемые уровни по рекомендациям ICNIRP⁴ на рабочих местах и в местах возможного пребывания населения соответственно.

**Средняя плотность тока (мА/м²) в системах органов человека
под проекциями ВЛ 500 кВ, модель ЭП**
**Average current density (mA/m²) in human organ systems under projections
of 500 kV overhead power lines, model ES**

Системы органов человека / Human organ systems	Максимальный провис / Maximum sag			Вблизи опоры / Near the support		
	Проекция средней фазы / Projection of the middle phase	Проекция крайней фазы / Projection of the outermost phase	30 м от ВЛ (СЗЗ) / 30 m from overhead line (SPZ)	Проекция средней фазы / Projection of the middle phase	Проекция крайней фазы / Projection of the outermost phase	30 м от ВЛ (СЗЗ) / 30 m from overhead line (SPZ)
Все системы / All systems	8,7528	2,7545	0,3784	3,5903	1,7238	0,2540
Нервная система / Nervous system	51,1203*	3,6335	1,9109	22,5241*	9,2752	1,0733
Зрительная система / Visual system	5,3668	1,6959	1,3572	2,0296	23,0433*	1,0584
Эндокринная система / Endocrine system	19,2508*	3,6369	0,3241	7,3814	1,4051	0,2423
Сердечно-сосудистая система / Cardiovascular system	10,2560*	3,4732	0,3975	3,7644	0,8273	0,2632
Пищеварительная система / Digestive system	2,7497	2,3378	0,3156	0,7410	1,5305	0,2376
Опорно-двигательная система / Musculoskeletal system	2,9726	2,0003	0,2660	0,8331	0,5492	0,1738
Дыхательная система / Respiratory system	1,8391	2,1594	0,2391	0,2680	0,3365	0,1572
Кожная система / Skin system	1,6641	1,2720	0,1643	0,7544	0,3352	0,1113
Иммунная система / Immune system	2,4980	1,6431	0,2031	0,8935	0,2997	0,1349
Мочевыделительная система / Urinary system	1,0348	1,3437	0,1472	0,1289	0,1939	0,0971
Репродуктивная система / Reproductive system	0,4789	0,6653	0,0655	0,0578	0,0883	0,0428

* – превышение норматива / exceeding the standard.

Источник: составлено С.Ю. Перовым, В.С. Орловой, В.В. Журовым.

Source: compiled by S.Yu. Perov, V.S. Orlova, V.V. Zhurov.

Наибольший средний показатель по всем органам среди всех проекций проводов фаз был под проекцией средней фазы в области максимального провиса, уровень плотности индуцированных токов составлял около 9 мА/м², что может быть допустимым условием для производственных условий, но не для мест пребывания населения. То же самое можно отметить для условий нахождения человека в точках проекции средней фазы вблизи непосредственно

⁴ Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection / International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) // Health Phys. 1998. Vol. 74, no. 4. P. 494–522. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9525427/> (accessed: 23.08.2024).

самой опоры, а также проекции крайних фаз под провисом и вблизи опоры, где уровни составили 3,6; 3,4 и 2,2 мА/м² соответственно.

Во всех остальных случаях уровни редко превышали 1 мА/м². Это же касается и всех полученных данных по модели МП ВЛ 500 кВ. Максимальное значение плотности индуцированного тока МП наблюдалось также в нервной системе в спинномозговой жидкости и спинном мозгу, значения составили 0,1508 и 0,1118 мА/м² соответственно, что подтверждается результатами натурных измерений, указывающих на отсутствие превышений ПДУ МП даже для населения.

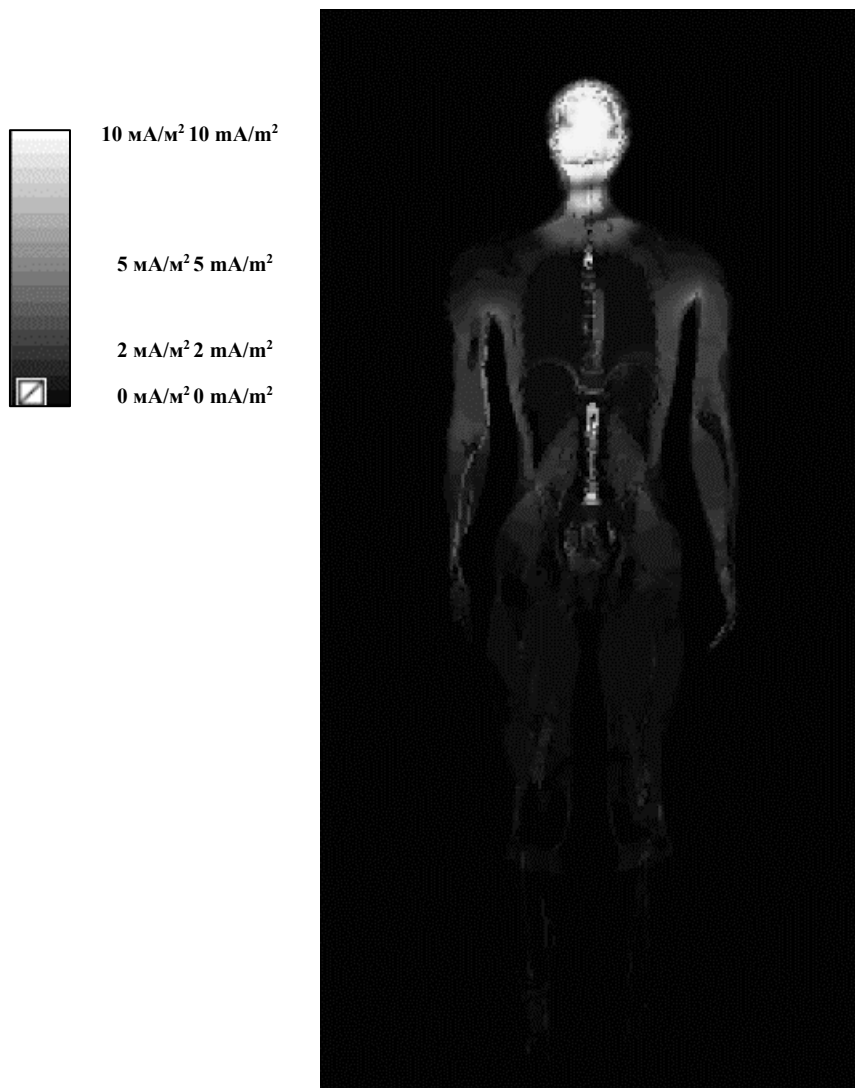


Рис. 2. Плотность индуцированных токов в разрезе органов и тканей фантома человека под проекцией средней фазы под максимальным провисом

Источник: фото С.Ю. Перова, В.С. Орловой, В.В. Журова.

Figure 2. Density of induced currents in the section of organs and tissues of the human phantom under the projection of the average phase under the maximum sag

Source: photo by S.Yu. Perov, V.S. Orlova, V.V. Zhurov.

Заключение

Разработана и апробирована математическая модель оценки плотности индуцированных токов в органах человека, находящегося в зоне воздействия воздушных линий электропередачи напряжением 500 кВ. Модель показала сходимость с натурными измерениями. Исследование подтвердило наличие превышений ПДУ напряженности ЭП и нормируемых уровней плотности индуцированных токов на рабочих местах и в местах возможного пребывания населения в ряде зон, особенно под проекциями проводов, что свидетельствует о потенциальных рисках для здоровья человека, в частности для нервной, зрительной и эндокринной систем. На основе полученных данных рекомендуется продолжить исследования для оценки долгосрочных эффектов электромагнитного воздействия и использовать предложенную модель для оценки экологических рисков в других зонах прохождения воздушных линий электропередачи, что позволит минимизировать негативное воздействие на окружающую среду и здоровье населения.

Список литературы / References

- [1] Никитина В.Н., Калинина Н.И., Ляшко Г.Г., Плеханов В.П. Исследование электромагнитных полей частотой 50 Гц на селитебных территориях и экспертная оценка состояния здоровья населения // Гигиена и санитария. 2019. Т. 98. № 6. С. 665–670. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2019-98-6-665-670> EDN: IJEMGC
Nikitina VN, Kalinina NI, Lyashko GG, Plekhanov VP. Study of 50 hz electromagnetic fields in residential areas and expert assessment of the population health status. *Hygiene and Sanitation*. 2019;98(6):665–670. (In Russ.) <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2019-98-6-665-670> EDN: IJEMGC
- [2] El Dein AZ, Gouda OE, Lehtonen M, Darwish MMF. Mitigation of the electric and magnetic fields of 500-kV overhead transmission lines. *IEEE Access*. 2022;10:33900–33908. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3161932>
- [3] Lai H, Singh NP. Magnetic-field-induced DNA strand breaks in brain cells of the rat. *Environmental Health Perspectives*. 2004;112(6):687–694. <https://doi.org/10.1289/ehp.6355>
- [4] Legros A, Nissi J, Laakso I, Duprez J, Kavet R, Modolo J. Thresholds and mechanisms of human magnetophosphene perception induced by low frequency sinusoidal magnetic fields. *Brain Stimul*. 2024;17(3):668–675. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2024.05.004>. EDN: GWYMPF
- [5] Teimori F, Khaki AA, Rajabzadeh A, Roshangar L. The effects of 30 mT electromagnetic fields on hippocampus cells of rats. *Surgical Neurology International*. 2016;7(1):70. <https://doi.org/10.4103/2152-7806.185006>
- [6] Tian R, Zhang JQ, Lu M. Research on the influence of power frequency electric field of pantograph on passengers' health in high-speed EMU. *Archives Electrical Engineering*. 2023;72(2):483–501. (In Polish) <https://doi.org/10.24425/aec.2023.145421> EDN: EUSSHA

Сведения об авторах:

Перов Сергей Юрьевич, доктор биологических наук, заведующий лабораторией электромагнитных полей, Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова, Российская Федерация, 105275, г. Москва, пр-кт Буденного, д. 31. ORCID: 0000-0002-6903-4327; eLIBRARY SPIN-код: 2297-5903. E-mail: perov@irioh.ru

Орлова Валентина Сергеевна, доктор биологических наук, профессор департамента экологической безопасности и менеджмента качества продукции, институт экологии, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. eLIBRARY SPIN-код: 8078-0470. E-mail: bte2005@mail.ru

Журов Владимир Владимирович, аспирант, кафедра экологии и природоохранной деятельности, Российский государственный социальный университет, Российская Федерация, 129226, г. Москва, ул. Вильгельма Пика, д. 4; младший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова, Российская Федерация, 105275, г. Москва, пр-кт Буденного, д. 31. ORCID: 0009-0004-9783-1616; eLIBRARY SPIN-код: 3922-5071. E-mail: vl.jurov@mail.ru

Bio notes:

Sergey Yu. Perov, Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Electromagnetic Fields, Izmerov Research Institute of Occupational Health, 31 Budyonnogo Prospekt, Moscow, 105275, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-6903-4327; eLIBRARY SPIN-code: 2297-5903. E-mail: perov@irioh.ru

Valentina S. Orlova, Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Environmental Security and Product Quality Management, Institute of Environmental Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. eLIBRARY SPIN-code: 8078-0470. E-mail: bte2005@mail.ru

Vladimir V. Zhurov, postgraduate student, Department of Ecology and Environmental Protection Activities, Russian State Social University, 4 Wilhelma Pika St, Moscow, 129226, Russian Federation; Junior Researcher, Izmerov Research Institute of Occupational Health, 31 Budyonnogo Prospekt, Moscow, 105275, Russian Federation. ORCID: 0009-0004-9783-1616; eLIBRARY SPIN-code: 3922-5071. E-mail: vl.jurov@mail.ru