

РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКОСИСТЕМ

NATURE MANAGEMENT AND ECOSYSTEM SAFETY

Научная статья
УДК 537.876
<https://doi.org/10.24143/1812-9498-2023-1-72-79>
EDN DNORNZ

Развитие принципов контроля электромагнитной обстановки с учетом дозиметрических параметров

Александр Сергеевич Соловской

*Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
Барнаул, Россия, solovskoyas@mail.ru*

Аннотация. Рассматривается возможность усовершенствования способов контроля электромагнитной обстановки с учетом дополнительных параметров. Проведен анализ российских и международных стандартов по гигиенической регламентации электромагнитных полей для выявления параметров, характеризующих взаимодействия энергии электромагнитного поля с биологическими объектами. Количественными характеристиками взаимодействия электромагнитных полей с биологическими объектами являются удельная поглощенная мощность и удельная поглощенная энергия. Рассмотрены биологические эффекты воздействия электромагнитных излучений на биологические объекты. Перспективным направлением обеспечения безопасности от воздействия электромагнитных излучений является комплексная методология контроля и визуализации электромагнитной обстановки. Для совершенствования принципов контроля электромагнитной обстановки рассмотрены методы дозиметрии электромагнитных полей радиочастотного диапазона. Теоретические методы дозиметрии основаны на использовании анатомически реалистичных компьютерных моделей типичных моделей биологических объектов с учетом значений электрических свойств для различных моделируемых биологических тканей в моделях. Представлены преимущества и недостатки методов теоретической дозиметрии, основанных на вычислительных методах – методе конечных элементов, методе моментов, многополюсном методе, гибридных методах и аналитических обоснованных методах. Экспериментальная дозиметрия заключается в непосредственном измерении величины энергии электромагнитного поля излучающего объекта. Представлена современная система экспериментальной дозиметрии электромагнитного излучения для оценки дозиметрических параметров поглощенной энергии электромагнитного поля, включающая измерительные зонды, систему позиционирования зондов, систему тестирования, методику измерения параметров, а также систему управления и обработки данных. Проведенное исследование позволяет выявить теоретические и экспериментальные методы дозиметрии, которые могут быть использованы для контроля электромагнитной обстановки с учетом дозиметрических параметров.

Ключевые слова: электромагнитное поле, источник излучения, биологический эффект, электромагнитная обстановка, удельная поглощенная мощность, поглощение энергии, численная модель, дозиметрия

Для цитирования: Соловской А. С. Развитие принципов контроля электромагнитной обстановки с учетом дозиметрических параметров // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2023. № 1. С. 72–79. <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2023-1-72-79>. EDN DNORNZ.

Original article

Development of principles of electromagnetic environment control taking into account dosimetric parameters

Alexander S. Solovskoy

*Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia, solovskoyas@mail.ru*

Abstract. The article considers a possibility of improving the methods of controlling the electro-magnetic environment subject to additional parameters. There has been conducted analysis of the Russian and international standards on hygienic regulation of electromagnetic fields to reveal the parameters characterizing the interaction between the energy of an electromagnetic field and biological objects. A specific absorbed rate and a specific absorbed energy are quantitative characteristics of the interaction of electromagnetic fields with biological objects. The biological effects of electromagnetic radiation on the biological objects are considered. A promising direction for ensuring safety from the effects of electromagnetic radiation is a comprehensive methodology of monitoring and visualizing the electromagnetic environment. To improve the principles of monitoring the electromagnetic environment there have been considered the methods of dosimetry of electromagnetic fields of the radio frequency range. Theoretical dosimetry methods are based on the use of anatomically realistic computer models of typical biological objects, taking into account the values of electrical properties for different simulated biological tissues in the models. There have been shown the advantages and disadvantages of theoretical dosimetry methods based on computational methods: the finite element method, method of moments, multipolar method, hybrid methods and analytically based methods. Experimental dosimetry consists in direct measurement of the magnitude of the electromagnetic field energy of the emitting object. A modern system of experimental dosimetry of electromagnetic radiation for assessing the dosimetric parameters of the absorbed electromagnetic field energy is presented including measuring probes, a probe positioning system, a testing system, a method for measuring parameters, as well as a control and data processing system. The conducted research makes it possible to identify theoretical and experimental methods of dosimetry that can be used to control the electromagnetic environment, taking into account dosimetric parameters.

Keywords: electromagnetic field, radiation source, biological effects, electromagnetic environment, specific absorbed rate, energy absorption, numerical model, dosimetry

For citation: Solovskoy A. S. Development of principles of electromagnetic environment control taking into account dosimetric parameters. *Oil and gas technologies and environmental safety*. 2023;1:72-79. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2023-1-72-79>. EDN DNORNZ.

Введение

Интенсивный рост современных беспроводных технологий характерен не только для бытовой сферы, но и для производственной сферы агропромышленного комплекса (АПК) [1–3]. Беспроводные технологии связаны с непосредственным использованием радиочастотных электромагнитных полей (ЭМП) для передачи информации. Большинство современных персональных устройств беспроводной связи представляют собой портативные приемопередатчики ЭМП, работающие вблизи биологических объектов. Поскольку электромагнитная энергия, поглощаемая тканями биологических объектов, вызывает неблагоприятные биологические эффекты, радиочастотные ЭМП от персональных телекоммуникационных устройств и технологий потенциально опасны для здоровья населения. Таким образом, для защиты пользователей, обслуживающего персонала от негативного влияния таких устройств необходимы корректные оценки воздействия радиочастотного ЭМП [2, 3]. Такой принцип важен для определения допустимого уровня ЭМП и приведения в соответствие российских и международных стандартов [1].

Международные пределы воздействия радиочастотных ЭМП на биологические объекты в ближнем поле имеют основные ограничения, определяемые уровнем дозиметрического значения удельной поглощенной мощности (УПМ) и удельной поглощенной энергии [4]. Удельная поглощенная мощность характеризуется скоростью поглощения электромагнитной энергии в единице массы биологической ткани или ткани, имитирующей фантомы. Оценка дозиметрических параметров поглощенной энергии ЭМП проводится с учетом измерения напряженности электрического поля. Такой метод позволяет анализировать пространственное распределение поглощенной мощности в облучаемом объекте и определяет «горячие точки», т. е. места максимального значения УПМ [4, 5].

Дозиметрия ЭМП необходима для того, чтобы определить количественную взаимосвязь между причиной и следствием [6, 7]. Зная взаимосвязь между причиной и следствием, можно предсказать эффект для различных значений величины причины, для которых даже не может быть экспериментальных данных. Наиболее точные прогнозы получают-

ся, когда причинно-следственная диаграмма представляет собой прямую линию, например, когда удвоение причины удваивает эффект (линейная причинно-следственная связь) [6]. Согласно экспериментальным данным [8–10], биологические эффекты, воздействие на здоровье от искусственных ЭМП неионизирующего излучения не подчиняются линейной зависимости «доза – реакция» (или причинно-следственной связи). Исследования показывают [9–11], что поглощение большего количества энергии той же массой данной ткани и в течение того же интервала времени не обязательно вызывает больший биологический эффект.

Проблемы взаимодействия неионизирующих электромагнитных излучений различной интенсивности и частоты с биологическими объектами

Биологический эффект от определенного количества поглощенной энергии биологическим объектом зависит, прежде всего, от конкретной биомолекулы, поглощающей некоторое количество энергии в течение интервала времени [9, 10]. Проведенные исследования [10, 11] указывают на серьезные биологические изменения (повреждение ДНК) в результате взаимодействия с источниками ЭМП без нагрева биологических тканей. Это может происходить с помощью нетепловых механизмов, которые включают прямые изменения внутриклеточных концентраций ионов или изменения ферментативной активности [5, 9, 10]. Повреждение ДНК может привести к раку, нейродегенеративным заболеваниям, снижению репродуктивной функции или даже наследственным мутациям. Опухоли головного мозга, снижение репродуктивной способности или симптомы, описываемые как «микроволновый синдром» (головные боли, потеря памяти, усталость и т. д.), характерны для людей, подвергшихся воздействию излучения мобильной телефонной связи в течение последних лет [8–10]. Международное агентство по изучению рака (МАИР) классифицировало радиочастотные/микроволновые ЭМП как «возможно канцерогенные для человека» [5, 9, 10].

Защита от вредного воздействия ЭМП на биологический объект основывается на нескольких принципах: защита по времени, защита на расстоянии и использование защитных средств (коллективные и индивидуальные) [11]. Принцип защиты на расстоянии заключается в максимальном удалении рабочих мест или мест непрофессионального воздействия от источника ЭМП и зоны воздействия ЭМП высокой интенсивности. В частности, для общей защиты населения организованы полосы отвода (санитарно-защитные зоны). Защита по времени позволяет уменьшить предельные значения воздействия на персонал выше гигиенических норм в течение всего рабочего дня. Этот принцип

защиты применяется, когда необходимо работать при более высоких уровнях ЭМП в течение короткого периода времени и нет возможности уменьшить его. Использование средств коллективной и индивидуальной защиты позволяет снизить высокую интенсивность ЭМП на рабочих местах до допустимых уровней с помощью экранирующих устройств, одежды [3, 10–12].

Методы дозиметрии электромагнитных полей радиочастотного диапазона для совершенствования принципов контроля электромагнитной обстановки

Безопасные уровни воздействия ЭМП на человека должны соответствовать допустимым уровням, установленным в качестве гигиенических требований [4], при этом представленные принципы защиты должны опираться на конкретные данные для определения необходимости проведения того или иного мероприятия по защите. Для этого разработана комплексная методология контроля и визуализации электромагнитной обстановки в АПК, суть которой подробно рассматривается в работах [2, 13, 14]. Принципы комплексного контроля и визуализации электромагнитной обстановки основаны на использовании динамичной информационно-измерительной системы с изменяемой структурой [14]. Однако существенным недостатком представленной методологии является отсутствие возможности учета дозиметрических параметров поглощенной энергии ЭМП [1]. В соответствии с этим необходимо провести анализ методов дозиметрии ЭМП для совершенствования контроля электромагнитной обстановки.

Определение характеристик распределения и поглощения энергии ЭМП в биологических объектах основывается на использовании теоретических и экспериментальных методов дозиметрии [6, 15–17].

Методы теоретической дозиметрии основаны на вычислительных методах, позволяющих определить величину энергии ЭМП, которая поглощается биологическим объектом, с учетом различных характеристик (форма объекта, его расположение, электрические свойства). Теоретическая дозиметрия связана с определением величин дозиметрических параметров поглощенной энергии в моделях, которые в той или иной степени близки аппроксимацией к биологическим объектам с простейшей геометрической формой (сфера, шар, цилиндр) [6].

Численная модель для дозиметрической оценки включает источник излучения, объект воздействия и окружающую среду, которые оказывают влияние на воздействие. Точность и пространственное разрешение дозиметрии обычно ограничены качеством определенной модели. На практике модель представляет собой массив расчетных ячеек, каждая из которых описывает электрические свойства материала, расположенного в определенной точке

расчетного пространства, а также электрические источники и завершение расчетной сетки [15, 16]. Модели могут быть созданы с помощью генератора моделей, входящего в состав программных пакетов FDTD, или на основе доступных САД (автоматизированное проектирование) или воксельных данных [15–17].

Для детальной дозиметрии необходимы гетерогенные модели тканей. Точные численные модели для конкретного случая могут быть сгенерированы на основе данных магнитно-резонансной томографии или компьютерной томографии. Повышение точности и доступности томографии в последние годы привело к увеличению доступности численных моделей. Однако для того, чтобы сгенерировать численную модель на основе данных визуализации, типы биологических тканей должны быть сегментированы, что означает идентификацию типов тканей различных областей на изображении.

Кроме того, должны быть известны диэлектрические параметры типов тканей [16, 17].

Теоретические методы дозиметрии используют анатомически реалистичные компьютерные модели типичных моделей биологических объектов, а также значения электрических свойств для различных моделируемых биологических тканей в моделях [6, 15]. Распределение дозиметрических параметров в биологическом объекте оценивается на основе численного решения уравнений Максвелла. Одной из сложностей методов теоретической дозиметрии является корректное моделирование излучающего источника. Однако использование моделей в ограниченном частотном диапазоне и условий облучения ЭМП обуславливает существование нескольких методов теоретической дозиметрии. На рис. 1 представлены основные методы дозиметрии с учетом преимуществ и недостатков конкретного метода [17].



Рис. 1. Методы теоретической дозиметрии

Fig. 1. Methods of theoretical dosimetry

Распространенным алгоритмом теоретической дозиметрии для оценки параметров является метод конечных разностей во временной области (FDTD). Однако численные модели и процедуры моделирования для дозиметрической оценки зависят от конкретного случая [6].

Основная проблема теоретической дозиметрии заключается в том, что метод чувствителен ко многим параметрам. Недостатки в численной модели трудно распознать, основываясь только на результатах моделирования. Следовательно, моделирование всегда должно быть подтверждено другим

независимым методом, таким как экспериментальная измерительная установка, аналитическое решение в упрощенном случае или, по крайней мере, моделирование с использованием другой численной модели и алгоритма [15–17].

Экспериментальные установки используются для оценки эффектов воздействия радиочастотных полей на биологические объекты. Специально разработанные системы облучения обеспечивают воздействие на исследуемый образец строго определенным электромагнитным полем, избегая помех от других источников облучения. Такие системы обычно представляют собой контролируемую среду с точки зрения температуры и защиты от различных загрязнений [18, 19].

Первые результаты экспериментальной дозиметрии были получены на основе использования

теплофизических методов, в основе которых лежит приращение тепловой энергии объекта при облучении ЭМП [5, 18]. В таких случаях дозиметрия использовалась для определения облучения от носимого оборудования с помощью термисторных зондов. Основным недостатком таких методов экспериментальной дозиметрии является низкая точность температурных измерений с учетом большого количества ограничений [18, 19].

К другой группе методов экспериментальной дозиметрии относятся измерения величин электрической или магнитной составляющих электромагнитного излучения [18–20]. Современная система дозиметрии электромагнитного излучения для оценки дозиметрических параметров поглощенной энергии ЭМП включает в свой состав определенное оборудование (рис. 2).



Рис. 2. Современная система экспериментальной дозиметрии [20]

Fig. 2. Modern system of experimental dosimetry [20]

Одной из систем экспериментальной дозиметрии является использование фантомов и тканезквивалентных жидкостей [6, 18, 19]. В таком случае экспериментальная установка состоит из некоторых компонентов: датчиков электрического поля, системы сканирования, дистанционного управления и записи данных. Фантом должен обладать электрическими свойствами, аналогичными свой-

ствам биологических тканей. Разработаны различные жидкие и твердые материалы, соответствующие электрическим свойствам различных тканей человека в широком диапазоне частот [6–8]. Небольшие датчики электрического поля используются для измерения электрических полей внутри физического фантома, сводя к минимуму изменения полей, создаваемых присутствием зонда. Эти

процедуры были стандартизированы для проверки соответствия различных устройств рекомендациям по радиочастотной безопасности, которые требуют высокой воспроизводимости [18–20].

Основное преимущество использования экспериментальной дозиметрии для оценки дозиметрических параметров заключается в отсутствии чувствительности к грубым ошибкам. При измерениях используется фактическая антенна, поэтому определение параметров внутренних структур антенны не требуется. Настройка измерения дозиметрических параметров может быть проверена, например, с помощью стандартного измерения источника (диполя) перед фактическими измерениями, чтобы убедиться в приемлемости результатов. Надежность и воспроизводимость измерений параметров особенно способствуют использованию таких измерений в качестве метода проверки для теоретической дозиметрии [18–20].

Главное преимущество использования теоретических методов дозиметрии заключается в получении подробной информации о воздействии [5, 15–17]. Более того, поскольку генерируется исходная модель, различные биологические модели, позы и расстояния могут быть проанализированы с относительно небольшими усилиями.

Теоретические и экспериментальные методы дозиметрии обладают не только вышеуказанными преимуществами, но и существенными недостат-

ками, заключающимися в наличии ошибок и погрешностей при определении структуры распределения и поглощения энергии ЭМП и определении величины дозиметрических параметров.

Заключение

В результате увеличения количества разнообразных источников ЭМП, а также учитывая эпидемиологические исследования, подтверждающие негативное влияние ЭМП на биологические объекты, для защиты от электромагнитных полей и излучений необходимо выявить перспективные направления контроля электромагнитной обстановки. Одним из таких направлений является взаимосвязанное применение теоретических и экспериментальных методов дозиметрии. Экспериментальные методы дозиметрии позволяют измерять величины электрической или магнитной составляющих электромагнитного излучения, с последующим использованием полученных результатов в теоретических методах дозиметрии. При этом полученные результаты оказывают непосредственное влияние на оценку опасности электромагнитной обстановки по результатам математического моделирования.

Таким образом, совершенствование методологии контроля электромагнитной обстановки с учетом дозиметрических параметров поглощенной энергии ЭМП заключается в объединении теоретических и экспериментальных методов дозиметрии.

Список источников

1. Соловской А. С., Васильев В. Ю., Титов Е. В. Методика контроля электромагнитной обстановки с учетом дополнительных энергетических параметров // Ползунов. альм. 2022. № 2. С. 91–93.
2. Титов Е. В., Сошников А. А., Васильев В. Ю., Соловской А. С. Компьютерное моделирование наложенных электромагнитных волн от источников электромагнитного поля в широком диапазоне частот // Вестн. Алт. гос. аграр. ун-та. 2022. № 3 (209). С. 102–108.
3. Титов Е. В., Мигалев И. Е., Устюгов Д. В., Барсуков Д. В. Исследование устройства для защиты от электромагнитных излучений // Горизонты образования. 2017. № 19 (23). URL: http://edu.secna.ru/media/f/epb_tez_2017.pdf (дата обращения 11.01.2023).
4. Barnes F., Greenebaum B. Setting Guidelines for Electromagnetic Exposures and Research Needs // *Bioelectromagnetics*. 2020. V. 41. N. 5. P. 392–397.
5. Russell C. L. 5 G wireless telecommunications expansion: Public health and environmental implications // *Environmental Research*. 2018. V. 165. P. 484–495.
6. Рубцова Н. Б., Перов С. Ю. Методы дозиметрии электромагнитных полей при оценке их биологического действия // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2012. Т. 46. № 3. С. 3–8.
7. Соловской А. С., Титов Е. В. Контроль электромагнитной обстановки с учетом количественной оценки поглощенной электромагнитной энергии // *Ресурсоберегающие технологии в агропромышленном комплексе России: материалы III Междунар. науч. конф. (Красноярск, 24 ноября 2022 г.)*. Красноярск: Изд-во КГАУ, 2022. С. 121–124.
8. Rubtsova N. B., Perov S. Y., Belaya O. V. The Model of Equivalent Radiofrequency Electromagnetic Field Exposure for Biological Effect Assessment // *Progress in Electromagnetics Research Symposium: 2019 Photonics and Electromagnetics Research Symposium - Spring, PIERS-Spring 2019 - Proceedings, Rome*. Rome: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 1413–1415.
9. Штэйн Я. Профилактические меры по снижению негативного воздействия электромагнитного излучения на здоровье // *Анализ риска здоровью*. 2021. № 3. С. 42–53.
10. Бухтияров И. В., Рубцова Н. Б., Перов С. Ю., Беляя О. В. Современные требования к средствам индивидуальной защиты от электрических полей промышленной частоты и сопутствующих факторов производственной среды // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2018. № 5 (50). С. 114–116.
11. Mariscotti A. Assessment of human exposure (Including interference to implantable devices) to low-frequency electromagnetic field in modern microgrids, power systems and electric transports // *Energies*. 2021. V. 14. N. 20. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/20/6789/xml> (дата обращения 12.01.2023).
12. Евстафьев В. Н. Электромагнитные излучения, создаваемые транкинговыми станциями на объектах

транспорта и связи // Актуальные проблемы транспортной медицины. 2011. № 4 (26). С. 30–36.

13. Titov E. V., Soshnikov A. A., Drobyazko O. N. Experimental research of electromagnetic environment in domestic environment with computer visualization of electromagnetic pollution // Proceedings 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, Sochi. Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. P. 9112010.

14. Сошников А. А., Мигалев И. Е., Титов Е. В. Мобильная система интегрированной оценки опасности электромагнитных излучений // Электротехника. 2018. № 12. С. 10–14.

15. Гапеев А. Б., Чемерис Н. К. Вопросы дозиметрии при исследовании биологического действия электромагнитного излучения крайне высоких частот // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. № 1. С. 13–36.

16. Rubtsova N. B., Perov S. Y., Belaya O. V. The Comparison of Approaches to Power Frequency Electromagnetic Field Hygienic Regulations // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2020. V. 598 LNEE. P. 131–137.

1. Solovskoy A. S., Vasil'ev V. Iu., Titov E. V. Metodika kontrolya elektromagnitnoi obstanovki s uchetom dopolnitel'nykh energeticheskikh parametrov [Technique of monitoring electromagnetic environment taking into account additional energy parameters]. *Polzunovskii al'manakh*, 2022, no. 2, pp. 91-93.

2. Titov E. V., Soshnikov A. A., Vasil'ev V. Iu., Solovskoy A. S. Komp'yuternoe modelirovanie nalozhenykh elektromagnitnykh voln ot istochnikov elektromagnitnogo polia v shirokom diapazone chastot [Computer simulation of superimposed electromagnetic waves from electromagnetic field sources in wide frequency range]. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2022, no. 3 (209), pp. 102-108.

3. Titov E. V., Migalev I. E., Ustiugov D. V., Barsukov D. V. Issledovanie ustroystva dlia zashchity ot elektromagnitnykh izlucheniya [Studying device for protection against electromagnetic radiation]. *Gorizonty obrazovaniya*, 2017, no. 19 (23). Available at: http://edu.secna.ru/media/f/epb_tez_2017.pdf (accessed 11.01.2023).

4. Barnes F., Greenebaum B. Setting Guidelines for Electromagnetic Exposures and Research Needs. *Bioelectromagnetics*, 2020, vol. 41, no. 5, pp. 392-397.

5. Russell C. L. 5 G wireless telecommunications expansion: Public health and environmental implications. *Environmental Research*, 2018, vol. 165, pp. 484-495.

6. Rubtsova N. B., Perov S. Iu. Metody dozimetrii elektromagnitnykh polei pri otsenke ikh biologicheskogo deystviya [Methods of dosimetry of electromagnetic fields in assessing their biological effect]. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*, 2012, vol. 46, no. 3, pp. 3-8.

7. Solovskoy A. S., Titov E. V. Kontrol' elektromagnitnoi obstanovki s uchetom kolichestvennoi otsenki pogloshchennoi elektromagnitnoi energii [Control of electromagnetic environment, taking into account quantitative assessment of absorbed electromagnetic energy]. *Resursyoberegayushchie tekhnologii v agropromyshlennom komplekse Rossii: materialy III Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii*

17. Перов С. Ю., Кудряшов Ю. Б., Рубцова Н. Б. Оценка информативности теоретических основ и ограничений расчетной дозиметрии радиочастотных электромагнитных излучений // Радиационная биология. Радиоэкология. 2012. Т. 52. № 2. С. 181.

18. Перов С. Ю., Кудряшов Ю. Б., Рубцова Н. Б. Инструментальная дозиметрия радиочастотных электромагнитных излучений: общие принципы и современная // Радиационная биология. Радиоэкология. 2012. Т. 52. № 3. С. 276.

19. Перов С. Ю. Экспериментальная дозиметрия радиочастотных электромагнитных полей персональных средств связи в гигиеническом нормировании (обзор литературы) // Вестн. новых медиц. технологий. 2011. Т. 18. № 3. С. 286–288.

20. Рубцова Н. Б., Перов С. Ю. Методы дозиметрии электромагнитных полей при оценке их биологического действия // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2012. Т. 46. № 3. С. 3–8.

References

(Krasnoyarsk, 24 noiabria 2022 g.). Krasnoyarsk, Izd-vo KGAU, 2022. Pp. 121-124.

8. Rubtsova N. B., Perov S. Y., Belaya O. V. The Model of Equivalent Radiofrequency Electromagnetic Field Exposure for Biological Effect Assessment. *Progress in Electromagnetics Research Symposium: 2019 Photonics and Electromagnetics Research Symposium - Spring, PIERS-Spring 2019 - Proceedings, Rome*. Rome, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. Pp. 1413-1415.

9. Shtein Ia. Profilakticheskie mery po snizheniiu negativnogo vozdeystviya elektromagnitnogo izlucheniya na zdorov'e [Preventive measures to reduce negative impact of electromagnetic radiation on health]. *Analiz riska zdorov'yu*, 2021, no. 3, pp. 42-53.

10. Bukhtiarov I. V., Rubtsova N. B., Perov S. Iu., Belaya O. V. Sovremennye trebovaniya k sredstvam individual'noi zashchity ot elektricheskikh polei promyshlennoi chastoty i sopushtvuyushchikh faktorov proizvodstvennoi sredy [Modern requirements for means of individual protection against electric fields of industrial frequency and related factors of production environment]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2018, no. 5 (50), pp. 114-116.

11. Mariscotti A. Assessment of human exposure (Including interference to implantable devices) to low-frequency electromagnetic field in modern microgrids, power systems and electric transports. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 20. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/20/6789/xml> (accessed 12.01.2023).

12. Evstaf'ev V. N. Elektromagnitnye izlucheniya, sozdavaemye trunkingovymi stantsiyami na ob'ektakh transporta i svyazi [Electromagnetic radiation generated by trunking stations at transport and communication facilities]. *Aktual'nye problemy transportnoi meditsiny*, 2011, no. 4 (26), pp. 30-36.

13. Titov E. V., Soshnikov A. A., Drobyazko O. N. Experimental research of electromagnetic environment in domestic environment with computer visualization of electromagnetic pollution. *Proceedings 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufac-*

turing, ICIEAM 2020, Sochi. Sochi, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. P. 9112010.

14. Soshnikov A. A., Migalev I. E., Titov E. V. Mobil'naya sistema integrirovanoi otsenki opasnosti elektromagnitnykh izlucheni [Mobile system for integrated risk assessment of electromagnetic radiation]. *Elektrotehnika*, 2018, no. 12, pp. 10-14.

15. Gapeev A. B., Chemeris N. K. Voprosy dozimetrii pri issledovanii biologicheskogo deistviia elektromagnitnogo izlucheniia kraine vysokikh chastot [Issues of dosimetry in studying biological effect of electromagnetic radiation of extremely high frequencies]. *Biomeditsinskaya radioelektronika*, 2010, no. 1, pp. 13-36.

16. Rubtsova N. B., Perov S. Y., Belaya O. V. The Comparison of Approaches to Power Frequency Electromagnetic Field Hygienic Regulations. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2020, vol. 598 LNEE, pp. 131-137.

17. Perov S. Iu., Kudriashov Iu. B., Rubtsova N. B. Otsenka informativnosti teoreticheskikh osnov i ogranichenii raschetnoi dozimetrii radiochastotnykh elektromagnitnykh izlucheni [Assessment of informativeness of theoretical

foundations and limitations of calculated dosimetry of radiofrequency electromagnetic radiation]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*, 2012, vol. 52, no. 2, p. 181.

18. Perov S. Iu., Kudriashov Iu. B., Rubtsova N. B. Instrumental'naya dozimetriia radiochastotnykh elektromagnitnykh izlucheni: obshchie printsipy i sovremennaya [Instrumental dosimetry of radio frequency electromagnetic radiation: general principles and modern]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*, 2012, vol. 52, no. 3, p. 276.

19. Perov S. Iu. Eksperimental'naya dozimetriia radiochastotnykh elektromagnitnykh polei personal'nykh sredstv svyazi v gigienicheskom normirovanii (obzor literatury) [Experimental dosimetry of radio frequency electromagnetic fields of personal communications in hygienic regulation (literature review)]. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologii*, 2011, vol. 18, no. 3, pp. 286-288.

20. Rubtsova N. B., Perov S. Iu. Metody dozimetrii elektromagnitnykh polei pri otsenke ikh biologicheskogo deistviia [Methods of dosimetry of electromagnetic fields in assessing their biological effect]. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*, 2012, vol. 46, no. 3, pp. 3-8.

Статья поступила в редакцию 18.01.2023; одобрена после рецензирования 24.01.2023; принята к публикации 08.02.2023
The article is submitted 18.01.2023; approved after reviewing 24.01.2023; accepted for publication 08.02.2023

Информация об авторе / Information about the author

Александр Сергеевич Соловской – аспирант кафедры электрификации производства и быта; Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова; solovskoyas@mail.ru

Alexander S. Solovskoy – Postgraduate Student of the Department of Production and Household Electrification; Polzunov Altai State Technical University; solovskoyas@mail.ru

