

ISSN 0869-8031

Том 64, Номер 3

Май – Июнь 2024



РАДИАЦИОННАЯ БИОЛОГИЯ РАДИОЭКОЛОГИЯ



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Том 64, номер 3, 2024

Неионизирующие излучения

Исследования биомедицинских эффектов электромагнитного поля в России за 130 лет:
Основные этапы развития и формирования научного знания

О. А. Григорьев, И. Б. Ушаков, В. А. Алексеева 227

Нейроэффекты ЭМП СВЧ диапазона нетепловой интенсивности и короткой экспозиции

С. Н. Лукьянова 244

Нейроморфологические эффекты острого и хронического электромагнитного облучения

И. Б. Ушаков, В. П. Федоров, Б. И. Давыдов 257

Экспериментальное исследование стрессорных реакций, индуцированных низкоинтенсивным
микроволновым излучением

О. С. Измestьева, О. И. Колганова, О. Ф. Чибисова, Л. П. Жаворонков 274

Влияние многократного воздействия сложноорганизованного электромагнитного излучения
на поведение крыс в тесте “Открытое поле”

*О. И. Колганова, В. В. Панфилова, О. С. Измestьева, Г. П. Жураковская, О. Ф. Чибисова,
Л. П. Жаворонков* 286

Экспериментальное исследование поведения животных при воздействии электромагнитного
поля стандарта мобильной связи 5G

В. Н. Никитина, Н. И. Калинина, Е. Н. Дубровская, В. П. Плеханов, А. А. Ковшов 295

Радиочастотный электромагнитный фон, создаваемый системами мобильной (сотовой) связи

В. И. Мордачев 305

Особенности формирования электромагнитных полей промышленного и радиочастотного
диапазонов в условиях современной жилой застройки высокой этажности

В. И. Стурман, А. Д. Пищугина, В. А. Черкасов 324

Рецензии

Сазыкина Т. Г., Крышев А. И., Крышев И. И. Аналитические методы дозиметрии ионизирующих
излучений в окружающей среде. М.: ООО “Маска”, 2024. 236 с.

С. В. Мамихин 335

CONTENTS

Vol. 64, No. 3, 2024

Non-Ionizing Radiation

Electromagnetic Field Bio-Medical Effects Researches in Russia over 130 Years: The Main Stages of the Scientific Knowledge Grows	
<i>O. A. Grigoriev, I. B. Ushakov, V. A. Alekseeva</i>	227
Neuroeffects of Microwave EMF Range of Non-Thermal Intensity and Short Exposure	
<i>S. N. Lukyanova</i>	244
Neuromorphological Effects of Acute and Chronic Electromagnetic Irradiation	
<i>I. B. Ushakov, V. P. Fedorov, B. I. Davydov</i>	257
Experimental Study of Stress Reactions Induced by Low-Intensity Microwave Radiation	
<i>O. S. Izmistieva, O. I. Kolganova, O. F. Chibisova, L. P. Zhavoronkov</i>	274
The Effect of Repeated Exposure to Complexly Organized Electromagnetic Radiation on the Rats Behavior in the “Open Field” Test	
<i>O. I. Kolganova, V. V. Panfilova, O. S. Izmistyeva, G. P. Zhurakovskaya, O. F. Chibisova, L. P. Zhavoronkov</i>	286
Experimental Study of Animal’s Behavior under the Influence of an Electromagnetic Field of the 5G Mobile Communication Standard	
<i>V. N. Nikitina, E. N. Dubrovskaya, N. I. Kalinina, V. P. Plekhanov, A. A. Kovshov</i>	295
Radio-Frequency Electromagnetic Background Created by Mobile (Cellular) Communications	
<i>V. I. Mordachev</i>	305
Features of Formation of Electromagnetic Fields of Industrial and Radio-Frequency Ranges in the Conditions of the Modern Residential Development of High Number of Storeys	
<i>V. I. Sturman, A. D. Pishchugina, V. A. Cherkasov</i>	323
Response of Spring Barley to UV and γ -Irradiation	
<i>O. A. Guseva, P. N. Tsygvintsev, L. I. Goncharova</i>	334

Reviews

Sazykina T. G., Kryshev A. I., Kryshev I. I. Analytical Methods of Dosimetry of Ionizing Radiation in the Environment. Moscow: LLC “Maska”, 2024. 236 p.	
<i>S. V. Mamikhin</i>	346

НЕИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

УДК 613.168/648.2:612.014.42+930.2

ИССЛЕДОВАНИЯ БИМЕДИЦИНСКИХ ЭФФЕКТОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В РОССИИ ЗА 130 ЛЕТ: ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ НАУЧНОГО ЗНАНИЯ

© 2024 г. О. А. Григорьев^{1, 2, 3, *}, И. Б. Ушаков^{2, 3, 4}, В. А. Алексеева¹

¹АНО «Национальный научно-исследовательский центр безопасности новых технологий», Москва, Россия

²Научный совет РАН по радиобиологии

³Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна, Москва, Россия

⁴Радиобиологическое общество РАН

*E-mail: oa.grigoriev@gmail.com

Поступила в редакцию 20.03.2024 г.

После доработки 20.04.2024 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

Рассмотрены ключевые этапы развития исследований биомедицинских эффектов электромагнетизма в России на протяжении 130 лет. Доказана непрерывность и преемственность научного знания о биомедицинских эффектах электромагнитного поля, поддерживаемая в исследовательском сообществе нашей страны благодаря существованию научных школ, системному характеру исследований и научно-координационной работе. Особое внимание уделено периоду становления плановых исследований, когда были заложены основные методологические принципы и обоснованы фундаментальные научные положения в понимании биологических эффектов электромагнетизма и их медицинских приложений. Обобщены основные представления отечественных ученых о механизме биологического действия электромагнитного поля и принципах его гигиенического нормирования.

Ключевые слова: электромагнитное поле, биологический эффект, неионизирующие излучения, радиобиология, гигиена, нервная система, радиочастоты, Россия, история науки

DOI: 10.31857/S0869803124030014, **EDN:** MBSILB

Исследования биологических эффектов электромагнетизма в нашей стране ведутся больше века. Однако до сих пор не предпринималось попыток обобщения научной истории развития этого направления исследований, анализа последовательного развития научного знания, роли ключевых исследовательских лабораторий и преемственности научных школ электромагнитобиологии, радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений. В настоящей работе мы предприняли такую попытку, заведомо осознавая сложности формата и ограничения журнального объема. Важным мотивом к написанию работы стала ответственность за сохранение научных достижений наших предшественников и учителей, понимание необходимости донести предысторию до новых поколений, позволяющую оценить усилия российских исследователей биоэффектов электромагнетизма, работы которых длительное время были безоговорочно

передовыми и оказывали влияние на направления исследований в мире.

Говоря об истории исследований биомедицинских эффектов электромагнетизма, не будет лишним напомнить принципиальное отличие электромагнитного поля от прочих физических факторов окружающей среды: электромагнитное поле — это особый вид материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между электрически заряженными частицами [1]. Акцент на особом виде материи — природа которого сама не ясна полностью для современной науки — требует отделить электромагнитное поле (ЭМП) от прочих физических факторов, с которыми взаимодействует человек как с точки зрения его биотропного значения, так и с точки зрения сложности исследования этого фактора.

Отчеты ученых Императорской медико-хирургической (Военно-медицинской) академии

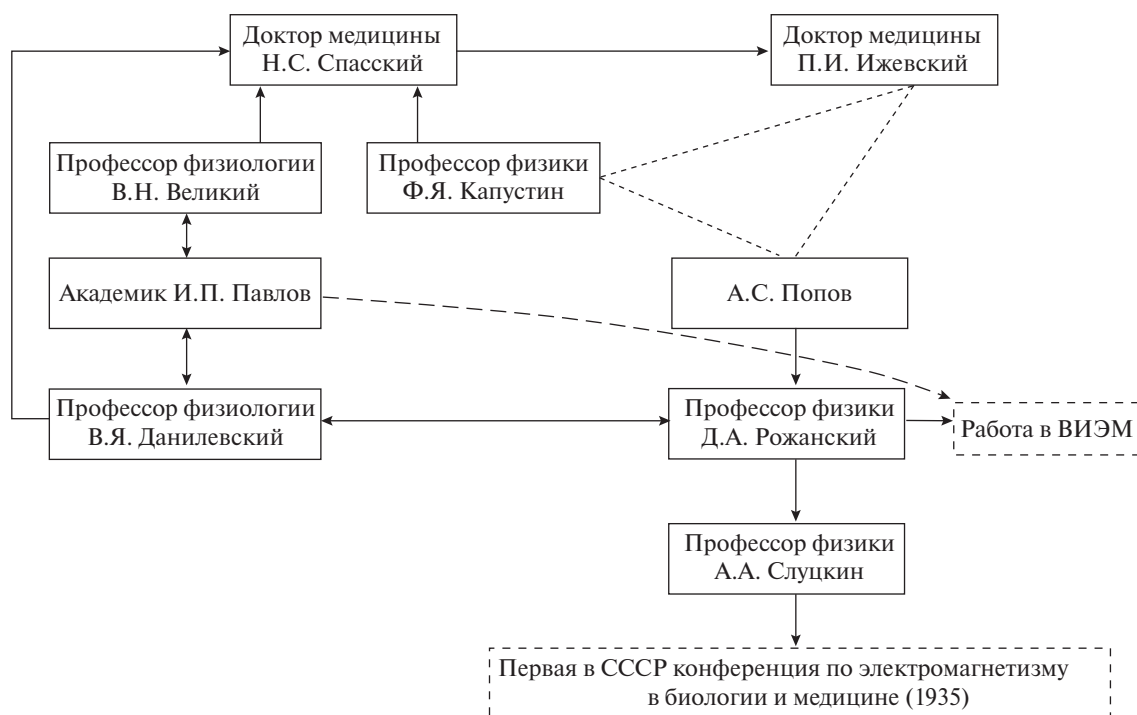


Рис. 1. Научные контакты и преемственность первых исследователей биомедицинских эффектов электромагнетизма в Российской Империи [6].

Fig. 1. Scientific contacts and continuity of the first researchers of the biomedical effects of electromagnetism in the Russian Empire [6].

об исследованиях биомедицинских эффектов электромагнетизма и электричества известны с 1840 г. (Шипулинский П.Д., Кабат И.И.). Российские авторы работ середины XIX века были знакомы с магнетизмом и электричеством на расстоянии, со способами индуцирования токов при помощи электромагнитов, но не использовали “дистанционное” воздействие, поскольку не видели преимуществ перед применением электричества в медицине. Исследовали физиологическую роль биоэлектричества в нервной системе и “электричество как раздражитель нервной системы”.

Биомедицинские эксперименты с электромагнетизмом стали логическим продолжением исследования роли электричества в организме, его значения в функционировании нервной системы в конце XIX века. Это стало возможным после работ Максвелла (1865) и Герца (1888), заложивших основу практической электродинамики и инженерных решений для электрофизических установок создания переменного ЭМП. Для перехода физиологии от электричества к электромагнетизму перво-степенное значение имело последовательное

формирование теории электромагнитного поля, развитие технических средств генерации и их внедрение в промышленность, быт и медицину.

Первыми в Российской Империи начиная с 1895 г. биоэффекты электромагнетизма в его классическом понимании исследовали профессор Императорского Харьковского университета В.Я. Данилевский и его ученик, доктор медицины С.И. Костин, фактически одновременно с изобретением практического радио А.С. Поповым: принципиальные схемы генерирующей переменное электромагнитное поле установки Данилевского/Костина и Попова были чрезвычайно схожи [2–4].

С.И. Костин – первый ученый в Российской Империи, защитивший “электромагнитную” диссертацию по физиологии, это произошло 25 мая 1898 г. по старому стилю, работа называлась “К учению о физиологическом действии электрического поля на двигательный нерв” [5].

Большая семья А.С. Попова, изобретателя практического радио в России, имела непосредственное влияние на первые исследования биомедицинских эффектов электромагнетизма в конце XIX – начале XX веков: это было

неформальное объединение докторов медицины, физиологов, электрофизиков, работавших совместно. А.С. Попов лично конструировал высокочастотные источники для сотрудников Императорской Военно-медицинской академии практически одновременно с разработкой собственной аппаратуры. Профессиоально-семейные связи способствовали защите первой в Российской Империи медико-биологической диссертации по непосредственному действию электромагнитного поля на человека (П.И. Ижевский, Императорская Военно-медицинская академия, 1900 г.) и к защите первой в Императорском Томском университете диссертации по медицине, посвященной физиологическим эффектам действия “электричества на расстоянии” (Н.С. Спасский, 1901), в которой диссертант и его руководители, профессора В.Н. Великий и Ф.Я. Капустин, поставили под сомнение “энергетическую” теорию физиологического действия “высокочастотного” электромагнитного поля француза д’Арсонваля, доминировавшую в Европе в последней декаде XIX века [6, 7].

В.Я. Данилевский и С.И. Костин экспериментально доказали, что электромагнитное поле является раздражителем нервной системы; при этом не изменяется общий энергетический баланс тела. Таким образом, профессор В.Я. Данилевский заложил основы подхода к электромагнитному полю радиочастотного диапазона как к раздражителю нервной системы. Наиболее важный результат его исследований — выявление ведущей роли нервной ткани в формировании реакции на переменное электрическое и электромагнитное поля. “Нерв” экспериментально показан как мишень для ЭМП вне зависимости от частоты: нервная ткань непосредственно “реагирует”, под действием ЭМП изменяется возбудимость нерва, в общем случае “заметно” повышается. Вывод о первичности реакции нервной системы на “электричество на расстоянии” поддержан академиком В.М. Бехтеревым и академиком И.П. Павловым.

Данные В.Я. Данилевского быстро вошли в научный оборот и были использованы академиком И.Р. Тархановым для объяснения противоречий в его опытах с рентгеновским излучением. Тарханов обнаружил, что под влиянием рентгеновских лучей, испускаемых трубкой Крукса, понижается возбудимость центральной нервной системы. Однако он наблюдал интенсивное сокращение мышц при облучении

нервно-мышечного препарата лягушки, что противоречило его же собственным данным о снижении возбудимости под влиянием рентгеновских лучей. И.Р. Тарханов (1897) писал: “Изученные мною в этом исследовании явления при помощи Круксовой трубки стоят, как видно, весьма близко к явлениям, недавно указанным проф. В. Данилевским насчет действия на расстоянии темных разрядов Румкорфовой спирали на нервно-мышечный препарат лягушки. Вся разница в том, что в цепи вторичной спирали Румкорфовой спирали у меня включена была Круксова трубка, возле которой я и группировал все свои опыты; тогда как проф. В.Я. Данилевский действовал просто полюсами от вторичной спирали Румкорфовой спирали” [8]. Это наблюдение имело существенные последствия для практики рентгенологии, так как в дальнейшем И.Р. Тарханов для исключения раздражающего действия импульсного электромагнитного поля катушки применял экран по методу Данилевского. Необходимость экранирования электрического поля рентгеновского аппарата была введена в практику. Радиобиологи факт влияния на ЦНС импульсного электрического поля рентгеновской установки забыли до 1950-х годов, когда случай Тарханова повторился при опытах в Институте биофизики Минздрава СССР под руководством академика М.Н. Ливанова [9].

В 1933 г. академик А.А. Ухтомский предложил продолжить исследования о физиологическом раздражителе как о фундаментальном свойстве электромагнетизма. Академик Ухтомский писал: “Физиология и электрофизиология строились до сих пор... на таких представлениях, которые звучат архаично... будет делом насущным пересмотреть положения электрофизиологии с точки зрения новой электромагнитной физики и учения о поле. Первоочередной задачей будет пересмотр учения о физиологическом раздражителе с точки зрения теории поля. Одним из первых камней в предстоящую работу положен В.Я. Данилевским его исследованиями над физиологическим действием электрических напряжений на расстоянии” [10]. Так задан главный вектор развития плановых научных исследований биоэффектов электромагнетизма, определивший перспективы последующих лет.

С 1930-х и до 1992 г. исследования биомедицинских эффектов электромагнетизма в СССР выполнялись в рамках плановой тематики, формируемой на всесоюзном уровне.

В период 1930-х годов ключевую роль играли Всесоюзный институт экспериментальной медицины (ВИЭМ), Военно-медицинская академия и Украинский институт экспериментальной медицины. Именно в этом институте А.А. Слуцкий в 1933 г. при прямой поддержке академика В. Я. Данилевского был основан отдел биофизики, который в значительной мере обеспечил преемственность с исследованиями периода Российской Империи, в том числе перенос их в ВИЭМ. Исследования Д.А. Рожанского и его учеников А.А. Слуцкого и М. Штернберга привели к созданию магнетронов дециметрового диапазона и сверхвысоких частот (СВЧ). Впоследствии Д.А. Рожанский продолжил исследования и разработки в области биологических эффектов ЭМП в Ленинградском филиале ВИЭМ совместно с Г.Л. Френкелем, а также в НИИ-9, где были использованы разработки его харьковских учеников по СВЧ-генерации. Учениками Данилевского и Попова в СССР были начаты исследования биоэффектов электромагнетизма по большому научному плану [11, 12]. В 1935 г. под председательством А.А. Слуцкого в Харькове состоялась Первая всесоюзная конференция “Ультракороткие волны в медицине и биологии” [13].

В декабре 1935 г. в Харькове был проведен Третий Всесоюзный съезд физиотерапевтов, на котором более половины докладов были посвящены вопросам использования электромагнетизма. Одним из важных решений было признать работу с источниками ЭМП ультравысоких частот (УВЧ) вредной профессией, и впервые был рекомендован предельно допустимый уровень (ПДУ) электромагнитного поля радиочастот равный 10 мкВт/см^2 [14, 15]. Несмотря на то, что ПДУ был рекомендательным и область применения ограничивалась физиотерапевтическими и исследовательскими установками генерации ЭМП, согласно материалам, которыми мы располагаем в настоящее время, это первая конкретизация гигиенического норматива ЭМП в нашей стране, коллегиально одобренная научным сообществом.

А.В. Лебединский считал, что традиция исследований влияния внешних факторов на организм на кафедре физиологии Военно-медицинской академии (ВМА) была заложена еще И.Р. Тархановым, что “нашло свое развитие в циклах работ кафедры, посвященных анализу влияния на организм ионизирующей радиации, лучистой энергии, ультракоротких

электромагнитных волн, измененных условий газовой среды и многих других”. В учебном курсе кафедры, по рекомендации И.П. Павлова, были использованы материалы В.Я. Данилевского, работы которого Павлов высоко ценил [16].

С 1933 г. кафедра физиологии ВМА РККА планомерно работала в области биофизики, главным образом — электрофизиологии и радиобиологии. Заведующий кафедрой Л.А. Орбели писал: “В царской России работы биофизического характера оказались отодвинутыми на второй план. Этому в значительной степени способствовала техническая и индустриальная отсталость нашей страны. В настоящее время намечается сильный сдвиг в сторону разработки биофизических вопросов отчасти в связи с требованиями обороны, отчасти в связи с бурным развитием индустрии” [17].

На кафедре физиологии ВМА исследовали электрофизические свойства тканей (А.В. Лебединский, А.И. Бронштейн), развивали теорию происхождения биоэлектрических явлений (А.В. Лебединский, А.С. Мозжухин, И.А. Пеймер), основываясь на представлениях И.М. Сеченова и В.Ю. Чаговца об образовании электрической энергии в живых тканях за счет энергии, освобождаемой в процессе обмена веществ. Вели работы по исследованию действия токов (в том числе индуцированных) высокого напряжения промышленной частоты (Л.А. Орбели, М.П. Бресткин). Однако большая часть работ посвящена исследованиям биоэффектов ультравысоких частот, коротких (КВ) и ультракоротких волн (Д.Я. Глезер, А.В. Тонких, Н.В. Бекаури, А.В. Лебединский) [18–28].

Совместно с ВМА плановые исследования биоэффектов электромагнетизма с 1934 г. вели в Ленинградском филиале Всесоюзного института экспериментальной медицины силами физико-биологического и физико-технического отдела, включая лабораторию спецназначения, работавшую совместно с Электрофизическим институтом Наркомтяжпрома (Д.А. Рожанский).

Перед коллективом из 28 человек в ВИЭМ была поставлена первоочередная задача предсказания биоэффекта в зависимости от “дозировки” электромагнитного поля — построение зависимости “доза—эффект”, пригодной для практического применения. В этой связи развивались методы оценки падающей и поглощенной электромагнитной энергии, в том числе расчетного моделирования с использованием

биоэлектрофизических характеристик тканей тела. Было положено начало методически точным исследованиям по действию ЭМП ультракоротковолнового (УКВ) и КВ диапазонов. В 1937 г. заведующий физико-биологическим отделом ВИЭМ Г.Л. Френкель писал, что на основании собственного экспериментального материала были “выявлены две чрезвычайно важные особенности” электромагнитного поля радиочастот — фазность и последствие. В период до 1940 г. в ВИЭМ для известных к тому времени диапазонов частот УКВ и КВ были построены зависимости “доза—эффект” для эффектов от недействующего до летального, дана биофизическая характеристика механизмов на уровне систем и организма в целом, преимущественным механизмом признавали биоэлектрические явления в клеточной мембранной и примембранной области клеток [29—31].

К середине 1930-х годов накопились данные о развитии заболеваемости у работающих с источниками электромагнитного поля радиочастот, прежде всего у радистов, а затем и у работающих с генераторами, прежде всего у физиков в Физическом институте Ленинградского государственного университета (ЛГУ) и у сотрудников ВИЭМ, а также у врачей-физиотерапевтов. Впервые в СССР клинико-физиологические обследования сотрудников Физического института ЛГУ, работавших с генераторами ЭМП, вел Б.В. Лихтерман. Был выявлен ряд функциональных сдвигов, в первую очередь повышение температуры тела при работе с генераторами при общем нарушении функции терморегуляции, при этом, как правило, отсутствовала корреляция головных болей и утомляемости с изменениями температуры тела [22].

В обобщающей монографии ВИЭМ (1937) в качестве основных симптомов вредного действия радиочастот, в частности, зафиксированы эффекты нервной системы: ослабление памяти, рассеянность, забывчивость, нервозность, бессонница, дрожь рук. Фиксировали головные боли, повышенную утомляемость, нарушения репродуктивной сферы, особенно у женщин, нарушения зрения. С 1935 г. на базе ВИЭМ силами Ленинградского института охраны труда впервые в СССР были проведены систематические гигиенические исследования условий работы с генераторами УКВ диапазона. ВИЭМ разрабатывал организационно-технические методы защиты, в том числе вопросы экранирования [33].

Физико-биологический отдел ВИЭМ выпустил в 1939—1940-х годах четыре обобщающих сборника по различным аспектам действия ультракоротких волн, в том числе действие на процессы развития и роста (включая злокачественные опухоли), на кровь и кровообращение, на инфекцию и иммунитет, а также действие на микроорганизмы [34].

В годы Великой Отечественной войны Г.Л. Френкель и часть его бывшего коллектива ВИЭМ работали в Военно-морской медицинской академии, разрабатывая вопросы военной электротравмы, обусловленной применением электричества “для боевых целей”. Кроме того, Г.Л. Френкель возглавлял исследования с использованием УКВ-источников ЭМП для лечения обморожений, лечебной гипертермии, а также для борьбы с развитием раневых инфекций, его монография “Электрическая лихорадка и обменные эффекты высокочастотного поля” (1945) до настоящего времени остается ценным практическим пособием [35].

Обобщение опыта госпитального применения магнитного поля в лечении раненых и больных во время Великой Отечественной войны выполнено в монографии ученых Молотовского медицинского института (г. Пермь) “Биологическое и лечебное действие магнитного поля и строго-периодической вибрации” (1948), которая также содержит важный материал для практики [36].

Особенностью исследований биоэффектов электромагнетизма в послереволюционный период было принципиальное рассмотрение вопроса потенциала военного применения электромагнитных излучений, который в различных формах обсуждался Совнаркомом и руководством РККА начиная с записки В.И. Ленина в 1921 г. (см. с. 88 в [36]). Чтобы окончательно разрешить вопрос, по поручению Реввоенсовета СССР лаборатория специального назначения ВИЭМ (А.М. Кугушев) с 1934 г. обеспечивала биофизическое сопровождение разработки УКВ-установки оборонного назначения, предложенной в 1932 г. академиком А.Ф. Иоффе. Эта установка должна была поражать противника на расстоянии 300—400 метров. Как известно, “электромагнитную пушку” в 1930-е годы не создали и убедились в бесперспективности “военного” направления биоэлектромагнетизма, а технические разработки были использованы при создании первой отечественной РЛС [38, 39].

После окончания Второй мировой войны, с развитием новых технологий, появилось большое количество генераторов радиочастот и увеличилось число людей, облучаемых ЭМП, прежде всего в производственных условиях, в исследовательских лабораториях и в Министерстве обороны.

В 1946–1947 гг. профессор А.А. Кеворкьян и его группа из Института гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР вели масштабное продолжительное клиничко-физиологическое обследование группы лиц (87 человек), работающих в зоне излучения импульсных генераторов УКВ (длина волны 3–5 см) [40, 41]. Впервые выделены особенности последствия импульсных генераторов, заключающиеся в преимущественном действии на вегетативную нервную систему, дан вывод о специфических реакциях на облучение, обусловленных “функциональным поражением головного мозга”. Общая клиническая картина хронического облучения соответствовала данным, полученным в довоенный период в ВИЭМ. Профессор А.А. Кеворкьян изложил полную клиническую картину нарушения здоровья при хроническом облучении радиочастотами, рекомендации по лечению и описал динамику выздоровления, в 1948 г. предложил периодичность медицинских осмотров и состав специалистов, а также противопоказания к работе с источниками электромагнитного поля радиочастот, которые принципиально не изменились до настоящего времени.

В начале 1950-х годов в связи с внедрением радиолокационных станций на флоте в Военно-морской медицинской академии при кафедре нервных болезней под руководством члена-корреспондента АМН СССР А.В. Триумфова была создана научная группа для изучения состояния здоровья личного состава ВМФ в условиях облучения электромагнитным полем РЛС, преобразованная в 1954 г. в штатную научно-исследовательскую лабораторию, ориентированную исключительно на “электромагнитную” проблематику. Комплексно решалась задача электромагнитной безопасности — гигиенические, клиничко-физиологические исследования дополнялись экспериментальными в физиологическом, электрофизиологическом, биохимическом и инженерно-гигиеническом направлениях. После объединения Военно-морской медицинской академии с ВМА в 1959 г. приказом Министра обороны СССР лаборатория выделена

в самостоятельное научное подразделение и введен ее новый штат.

Таким образом, исследования биологических и медицинских эффектов электромагнетизма в нашей стране за первые 50 лет эволюционировали от ученых-инициаторов в Российской империи к плановым работам в СССР и последующему созданию специализированных научных подразделений.

Следует отметить, что в 1930-е годы никогда не сходил из научных дискуссий вопрос — имеется ли значимое для физиологии специфическое биологическое действие ЭМП радиочастотного диапазона малой интенсивности или только тепловое действие способно привести к значимым эффектам [34, 40, 42]. “Энергетическое” или “тепловое” направление в исследованиях развивалось в неразрывной связи с рассмотрением электромагнитного поля в качестве раздражителя в ходе решения задачи построения зависимости “доза—эффект” в диапазоне от недействующих до летальных уровней.

В целостном виде теория биомедицинских эффектов электромагнетизма в СССР сформировалась к 1960-м годам, кратко ее можно охарактеризовать следующим образом. При воздействии электромагнитным полем во всем диапазоне частот нельзя противопоставлять или взаимно заменять тепловой и нетепловой эффект во всем диапазоне интенсивностей. Энергия поглощается в любом случае во всех тканях, в которые проникает электрический компонент поля, в зависимости от энергетического баланса можно говорить о “тепловом” эффекте. Независимо от энергии, электромагнитное поле выступает как раздражитель центральной нервной системы (ЦНС), которая ответно реагирует (на раздражитель), причем особенно выражена реакция высших отделов ЦНС, характер реакции зависит от параметров ЭМП: направленность реакций организма в эксперименте может быть противоположной в зависимости от способа организации сигнала (непрерывное или импульсно-модулированное). Вывод о роли ЦНС согласовывался с идеями академика И.П. Павлова о роли нервной системы в анализе и уравнивании всех раздражителей от внешней и внутренней среды организма.

Был определен принцип показателя вредного действия — развитие компенсаторных реакций организма, которые могут перейти в патологический процесс. На этой основе обоснованы

первые санитарные нормы для работающих с источниками радиочастот и для военных. Констатировалось, что разделение перехода физиологической компенсации в патологию весьма сложна, что требует исследования интегральных показателей, характеризующих общую реакцию организма на действие ЭМП и функций, чувствительных к его воздействию.

В 1960-х годах научная координация исследований биоэффектов электромагнетизма в масштабах страны осуществлялась Научным советом АН СССР по кибернетике, а также Научным советом по проблемам биосферы и проблемными комиссиями АМН СССР. Соответственно, фундаментальные исследования преимущественно вели в рамках кибернетического подхода, который заключался в том, что реакция ЦНС на изменение параметра внешней среды рассматривается как восприятие информации. Принималось, что если доказана реакция ЦНС и организма на “нетепловой” уровень ЭМП, то это можно называть “информационным действием электромагнитного поля”. Вопрос первичного механизма восприятия был основным предметом исследований и обсуждений в условиях отсутствия данных о специализированных рецепторах и анализаторах для восприятия ЭМП, в том числе в контексте механизмов природной ориентации и регуляции поведения. “Информационный” подход привел к последовательному принятию жестких обязательных государственных ПДУ радиочастот выше 300 МГц (для работающих и для военных — 10 мкВт/см², для населения 1 мкВт/см²) [43–45].

В этот период тематика плановых исследований формировалась по направлениям: биофизические механизмы; определение интенсивности, метрология, дозиметрия и организация условий облучения в эксперименте; характеристика теплового действия электромагнитного поля радиочастот, включая СВЧ; влияние на сердечно-сосудистую систему, на функцию органов пищеварения, на эндокринную систему и обмен, на иммунную систему, на систему крови, на ЦНС и поведение, на репродуктивную систему. Обобщались вопросы этиологии и патогенеза функциональных и морфологических изменений. После 1962 г. начато обсуждение необходимости разработки норм для условий локального облучения головы, критериев безопасности и методов контроля для множественных источников ЭМП СВЧ [46–51].

В 1960-х годах интенсивно развивали системы связи, радио- и телевидения, технологического применения электромагнетизма. Это сформировало потребность в регламентации ЭМП для населения и работающих, не связанных с эксплуатацией источников ЭМП, дало развитие исследованиям в интересах коммунальной гигиены, подтверждение надежности ПДУ для работающих [49, 50, 52].

На основании многолетних клинических наблюдений предложена новая единица — “радиоволновая болезнь”, клиническую картину которой определяют изменения функционального состояния нервной и сердечно-сосудистой систем [53]. Возникновение этой болезни связали с длительным нахождением в условиях облучения СВЧ с интенсивностью от десятков мкВт/см² до единиц мВт/см².

Гигиеническая характеристика условий облучения стала основной как для планирования эксперимента, так и для клинико-эпидемиологии. Дозиметрия обеспечивалась созданной во Всесоюзном научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений в 1960–1969-х годах единой системой метрологического сопровождения измерений напряженности электрического и магнитного полей, плотности потока электромагнитной энергии, включая систему производства средств измерения и их метрологического обеспечения, калибровки антенн и поверки средств измерений, первичные и рабочие эталоны [54]. Это позволяет говорить о высокой достоверности данных об условиях облучения в гигиенических и экспериментальных исследованиях.

Научно-координационные советы и проблемные комиссии АН СССР и АМН СССР обеспечивали плановость исследований и методическое руководство работ, проводимых в различных лабораториях страны по тематике. Первое методическое руководство “Принципы исследований биологического действия радиоволн” (1974), которое стандартизировало общие принципы организации исследований для лабораторий страны, было издано по результатам обсуждения на всесоюзном симпозиуме “Принципы и критерии оценки биологического действия радиоволн”, состоявшегося в ВМА им. С.М. Кирова в мае 1973 г. [55].

С 1978 г. научная координация фундаментальных вопросов действия электромагнитного фактора на биологические объекты и совершенствование научной основы нормирования

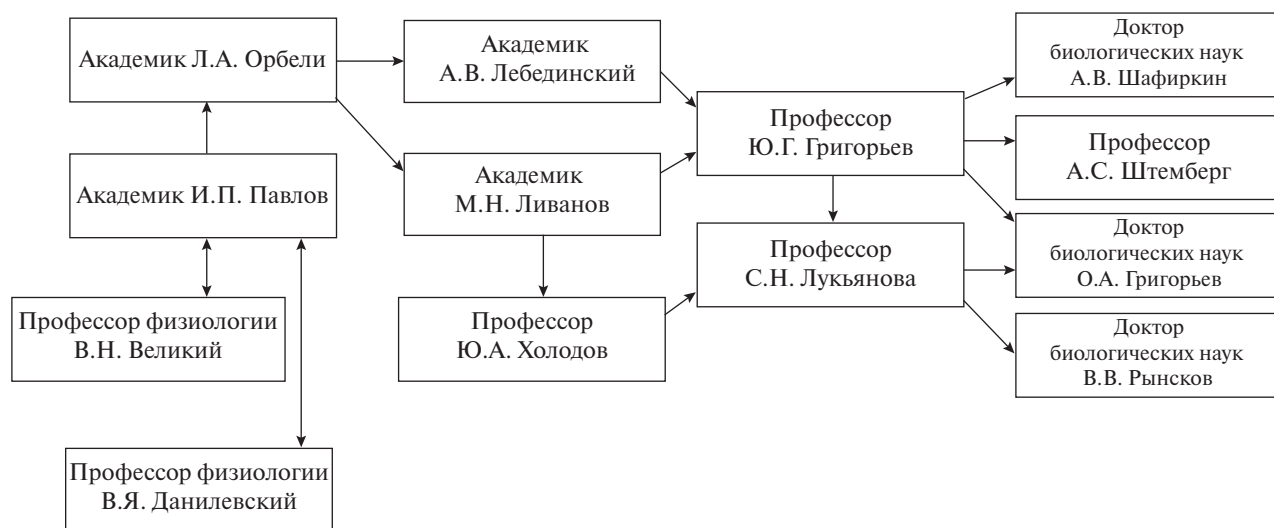


Рис. 2. Генеалогическая ветвь научной школы исследователей биомедицинских эффектов электромагнетизма через Институт биофизики Минздрава СССР.

Fig. 2. Genealogical branch of the scientific school of researchers of the biomedical effects of electromagnetism through the Institute of Biophysics of the USSR Ministry of Health.

воздействия фактора на человека и биообъекты поручена Объединенной секции электромагнитобиологии в рамках Научных советов АН СССР по проблемам биологической физики и радиационной биологии. Координационный план “Физическая среда” стал основой для государственного финансирования большей части исследований. В 1983 г. в рамках Объединенной секции были определены очередные задачи исследований — фактически на последний плановый период. В том числе исследование механизмов действия на разных уровнях биологической интеграции; оценка значимости наблюдаемых изменений и отнесение их к реакциям восприятия или адаптивно-компенсаторным и патологическим реакциям с анализом продолжительности сохранения наступивших изменений; поиск общих закономерностей эффекта от физических параметров ЭМП; определение пороговых параметров ЭМП для биологических реакций различной значимости; исследование физических полей биообъектов.

К концу 1980-х годов основные исследования в области биомедицинских эффектов электромагнетизма, радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений проводились скоординированно в научных учреждениях СССР, в которых были созданы специальные научные подразделения (лаборатории, отделы): Институт биофизики Минздрава СССР, Военно-медицинская академия и Институт авиационной и космической

медицины МО СССР, Киевский институт коммунальной гигиены им. Марзеева, Харьковский НИИ гигиены труда и профзаболеваний Минздрава УССР, Ленинградский НИИ гигиены труда и профзаболеваний Минздрава РСФСР, НИИ гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР, Томский университет, Институт медицинской радиологии АМН СССР, Институт биофизики и Институт медико-биологических проблем АН СССР [43, 56].

Несмотря на стремление к координации в области электромагнитобиологии, радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений, в 1970–1980-х годах медико-гигиеническое и биологическое направления исследований биоэффектов электромагнетизма развивались не совместно [57, 58]. По распоряжению Совета Министров СССР был разработан и в 1984 г. утвержден Совмином на период до 2004 года. “План-график научно-исследовательских работ, направленных на разработку гигиенических и технических мероприятий, связанных с размещением передающих радиотелевизионных и радиолокационных станций” [43]. Была поставлена задача обеспечить баланс научно обоснованных санитарно-эпидемиологических требований к условиям контакта населения страны с источниками ЭМП и тенденциями промышленно-технологического развития. “Гигиенисты” находились перед необходимостью обоснования конкретных значений ПДУ в условиях ограниченного времени,

обусловленного планами развития промышленности и связи [57, 58]. Решающее значение имело математическое и экспериментальное моделирование эксперимента, разработка методов математического прогноза в определении ПДУ на основе ограниченных экспериментальных данных [59, 60]. Нерешенную проблему механизма обошли, рассматривая в эксперименте организм как “черный ящик”, определяя методологию как кибернетический подход [43, 61, 63, 64]. Исходили из того, что влияние ЭМП проявляется на субклеточном, клеточном уровне, на уровне органов и систем, на уровне организма в целом, при повышении сложности организма возрастает чувствительность к электромагнитной энергии. Академик М.Г. Шандала обосновал понятие об оптимуме ЭМП обстановки — избыточные значения ЭМП и искусственная изоляция от природного комплекса факторов электромагнетизма действуют неблагоприятно на организм [58, 62]. По его мнению, точно определить значение последствий воздействия ЭМП на организм весьма трудно, часто из-за сложностей взаимодействия между электромагнитной энергией и здоровьем человека, недостатка знаний о факторе и механизмах его действия.

Во второй половине 1980-х гг. комплекс результатов исследований биомедицинских эффектов электромагнетизма был реализован в системе санитарного нормирования источников электромагнитного поля для населения и работающих, который охватывал все известные к тому времени принципы генерации: от электростатики и постоянного магнитного поля до модулированных радиочастот, создав наиболее совершенную в мире систему управления электромагнетизмом как фактором окружающей среды [43, 56, 62, 64, 65].

В период социально-экономической турбулентности 1990-х гг. для сохранения научного наследия практически столетних результатов исследований биоэффектов электромагнетизма в России трудно переоценить значение Научного совета РАН по радиобиологии и непосредственно заместителя Председателя Совета профессора Ю.Г. Григорьева, приложившего личные колоссальные усилия для координации исследований и консолидации ученых в условиях отсутствия финансирования. После 1995 г. под эгидой Научного совета РАН по радиобиологии проведена серия конференций по радиобиологии и гигиене неионизирующих излучений, в том числе совместно со Всемирной организацией

здравоохранения и с Российским национальным комитетом по защите от неионизирующих излучений [65]. Конференции позволили организовать обмен научными данными, наметить цели и задачи исследований, отвечающие принципиальному изменению условий контакта населения и работающих с источниками электромагнитного поля, обусловленными технологической революцией компьютеризации и беспроводной передачи данных.

В 1990-х гг. базовый комплекс санитарных норм адаптирован к условиям новых источников (компьютеры, сотовая связь) [43, 56, 62]. Развитая теория, которая позволяет прогнозировать биоэффекты и их медицинские последствия для большинства условий облучения. Важным является ряд обобщений, выполненных коллегами в эти годы, в том числе развивающих проблематику “дозного” подхода, являющегося основным в радиобиологии ионизирующих излучений, но проблемным для радиобиологии неионизирующих излучений.

Данные радиобиологических исследований, в которых использовали сложные режимы облучения, позволяют считать, что ЭМП СВЧ со средними значениями ППЭ ≤ 500 мкВт/см² (в непрерывном режиме или в импульсе) необходимо рассматривать как раздражитель центральной нервной системы. Поэтому справедливо применять законы физиологии о биологической силе, адаптационном ответе и путях усиления биологической значимости слабого раздражителя [67, 68].

Обобщение экспериментальных данных о количественных показателях микроволнового поражения показало особенность реакции ЦНС на импульсное СВЧ-излучение при оценке по порогам равнозначных биологических реакций (например, скорость угасания условных рефлексов, скорость формирования реакции избегания и т.д.): импульсное облучение биологически в 25–100 раз более эффективно по сравнению с непрерывным облучением по оценке средней мощности в импульсе. Была доказана экспериментально и по эпидемиологическим данным и обратная зависимость: при равной суммарной мощности облучения воздействие импульсом приводит к более тяжелым биологическим и клиническим последствиям по сравнению с непрерывным облучением [69].

После 2000-х годов сотовая связь стала массовым продуктом, и электромагнитный фактор

превратился в популяционно значимый. На основе фундаментальных представлений о медико-биологических эффектах электромагнетизма, исходя из принципиальных изменений условий облучения населения и недостаточности научных данных о последствиях облучения головного мозга в неконтролируемых условиях во всех группах населения, включая детей, в период 2000–2008 гг. были обоснованы прогнозы возможного роста заболеваемости в связи с облучением ЭМП сотовой связи. Это злокачественные новообразования (в том числе опухоли в головном мозге, в том числе в слуховом нерве), болезни и функциональные расстройства нервной системы, включая провокацию эпилептической готовности, заболевания, связанные с нарушением иммунного статуса [43].

По современным данным Росстат фиксируют рост заболеваемости за 25 лет по прогнозируемым группам болезней в популяции подростков 15–17 лет (злокачественные опухоли, болезни нервной системы, нарушение иммунного статуса, болезни органа слуха и зрения). Данные фундаментальных исследований, а также оценка возможного вклада электромагнитного поля сотовой связи в рост заболеваемости, выполненная на основе методологии IARC, показывает, что обусловленность роста заболеваемости влиянием электромагнитного поля скорее достоверно существует, чем является случайным совпадением. Однако непосредственное определение риска затруднено в связи с неопределенностью данных дозиметрии, отсутствием современных групп сравнения и неразработанностью концепции приемлемого риска для массовой технологии сотовой связи [70].

Вопрос обусловленности прироста заболеваемости воздействием облучения электромагнитным полем оборудования сотовой связи является ключевым. Одновременное облучение ЭМП разных стандартов связи ведет к разным индивидуальным способам организации облучения, что значимо для биоэффекта и последующей их кумуляции при повторном действии; возможно, это указывает на путь к компенсаторным реакциям и к развитию заболеваний. Для новых условий облучения у нас практически не существует дозиметрии как для ближней, так и дальней зоны. Требуется национальное программное обеспечение расчетного прогнозирования падающей и поглощенной электромагнитной энергии, в том числе необходим национальный

цифровой “электромагнитный” фантом (детский и взрослый).

Международное агентство по раку (IARC) присвоило канцерогенный класс 2В для электромагнитного поля радиочастот в 2011 г., в 2019 г. внесло фактор в список наивысших приоритетов для пересмотра канцер-классификации с учетом новых данных, а в марте 2024 г. это решение подтверждено. Впервые механизм “окислительного стресса” признан основным для увеличения вероятности новообразований [71, 72]. В нашей стране нет собственных данных по теме “ЭМП радиочастот и новообразования”, учитываемых IARC, хотя уже известное количество учтенных опухолей в детском контингенте позволяет провести анализ “случай–контроль”.

В связи с развитием стандартов связи 4–6-х поколений наиболее важно следующее: оценка действия на поверхностные ткани; возможность локальных повреждений мозга в связи с реализацией механизма поглощения “мощного импульсного микроволнового излучения в микросекундном диапазоне длительности импульса”; влияние импульсных сигналов на рост меланомы.

В настоящее время вопрос обусловленности прироста заболеваемости облучением ЭМП сотовой связи является ключевым. Однако непосредственное определение риска затруднено в связи с неопределенностью данных дозиметрии и неразработанностью концепции приемлемого риска для массовой технологии сотовой связи. Учитывая глубину проработки принципов нормирования электромагнитного поля и достаточные коэффициенты гигиенического запаса, следует предполагать, что проблема роста заболеваемости, обусловленной современной электромагнитной обстановкой в России, связана не с нормами, а с недостатками системы контроля за источниками и их распространением, в том числе из стран, придерживающихся “теплового” принципа ограничения электромагнитного поля.

Работы и труды отечественных ученых в монографиях, ключевых статьях и диссертациях на соискание степени доктора наук составили основной корпус знаний на русском языке о биологическом действии электромагнетизма, радиобиологии и гигиене неионизирующих излучений.

В первую половину истории исследований важнейший вклад внесли доктора наук Данилевский В.Я., Костин С.И., Абрикосов И.А., Глезер Д.Я., Голышева К.П., Ижевский П.И., Кеворкьян А.А., Купалов П.С., Лазарев П.П.,

Лебединский А.В., Лившиц Н.Н., Лихтерман Б.В., Малов Н.Н., Обросов А.Н., Рожанский Д.А., Славский Г.М., Спасский Н.С., Супоницкая Ф.М., Слуцкий А.А., Тарханов И.Р., Татаринов В.В., Френкель Г.Л.

Вторая половина истории исследований характеризуется сформировавшейся системой организации исследований и подготовки научных кадров по электромагнитобиологии, радиобиологии и гигиене неионизирующих излучений, что позволяет выделить три группы докторов биологических и медицинских наук:

1) прошедшие полный курс специализации с защитой кандидатской и докторской диссертации по “электромагнитной” тематике: Гордон З.В., Григорьев О.А., Думанский Ю.Д., Евтушенко Г.И., Иванов Д.С., Исмаилов Э.Ш., Лось И.П., Лукьянова С.Н., Лысина Г.Г., Меркулова Л.М., Никитина В.Н., Перов С.Ю., Плеханов Г.Ф., Подковкин В.Г., Походзей Л.В., Рынсков В.В., Сердюк А.М., Тихончук В.С., Томашевская Л.А., Холодов Ю.А., Чиженкова Р.А.;

2) защитившие докторскую диссертацию по “электромагнитной” тематике, но имевшие первичную специализацию (кандидатскую диссертацию) по другой тематике: Алексеев С.И., Барышев М.Г., Виноградов Г.И., Воронцова З.А., Гавриш Н.Н., Денисова Т.В., Жаворонков Л.П., Журавлев В.А., Залюбовская Н.П., Каляда Т.В., Лебедева Н.Н., Лобкаева Е.П., Лысков Е.Б., Малиновская С.Л., Никогосян С.В., Обухан Е.И., Перов Ю.Ф., Пряхин Е.А., Рубцова Н.Б., Сарapulцева Е.И., Садчикова М.Н., Суббота А.Г., Толгская М.С., Тягин Н.В., Черенков Д.А., Чухловин Б.А., Цимбал А.А., Яковлева М.И.;

3) получившие научную специализацию по не-электромагнитной тематике и обратившиеся к теме, будучи зрелыми учеными, что позволило им внести важный вклад в научное направление в виде монографий и принципиально значимых научных статей: Акоев И.Г., Антипов А.А., Григорьев Ю.Г., Давыдов Б.И., Дубров А.П., Кудряшов Ю.Б., Леднев В.В., Ломов О.П., Осипов Ю.А., Пальцев Ю.П., Петин В.Г., Петров И.Р., Савин Б.М., Судаков К.В., Ушаков И.Б., Фесенко Е.Е., Шандала М.Г., Шафиркин А.В., Штемберг А.С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящий обзор истории исследований электромагнитобиологии, радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений в России

нельзя считать полным и завершенным — велик материал, накопленный более чем за век. Не включены вопросы прикладных работ, которых касались исследователи биоэффектов электромагнетизма на протяжении этого времени: физиотерапии и клинической диагностики, сельского хозяйства, в том числе борьбы с вредителями и стимулированием роста растений; вопросы влияния на экологические системы, митогенетическое излучение и собственные электромагнитные поля организмов, влияние солнечно-земной электромагнитной связи, проблемы электромагнитной коммуникации в природе и вопрос влияния антропогенного электромагнитного загрязнения на глобальный природный фон.

В развитии научной мысли очевидна преемственность: анализ публикаций показывает, что многие принципиальные положения о биоэффектах электромагнетизма, их медицинских и экологических последствиях были сформулированы до 1960-х годов, а затем подтверждались в экспериментах, дополнялись и уточнялись в различных условиях облучения во всех диапазонах частот от постоянного электромагнитного поля до КВЧ и модулированного ЭМП. Фундаментальные результаты плановых исследований, давшие возможность прогнозировать эффекты, и встроены “электромагнитной” тематики в систему радиобиологии и гигиены позволили сформировать научную теорию и методологию нормирования электромагнитного поля в 1970–1980-х годах. Преемственность знаний составляет основную характеристику, позволяющую говорить о непрерывном и последовательном развитии научной школы в электромагнитобиологии, радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений от первых исследователей в Российской империи до наших современников — ученых Российской Федерации за прошедшие 130 лет.

На наш взгляд, обсуждая проблемы биоэффектов ЭМП, необходимо учесть, что никогда не прекращалась дискуссия о природе электромагнетизма, его физической основе, о существовании “эфира” или эквивалентного физического понятия. Относительность представлений о природе электромагнитного фактора допускает относительность знания о его взаимодействии с живыми объектами, тем более что знание о живом тоже нельзя считать полным.

Научная школа исследований биомедицинских эффектов электромагнетизма не прерывается в Российской империи, Советском Союзе

и Российской Федерации уже 130 лет и имеет глубокие корни в национальной науке. Число отдельных публикаций по тематике радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений на русском языке давно превысило 10 000 единиц и сегодня еще большую актуальность приобретают слова профессора Б.И. Давыдова: “требуется периодическая систематизация накопленного материала, установление единой терминологии, стандартизации методов исследований и анализа полученных данных”.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа не имела целевого финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физический энциклопедический словарь. Гл. ред. А.М. Прохоров. Ред. кол. Д.М. Алексеев, А.М. Бонч-Бруевич, А.С. Боровик-Романов и др. М.: Сов. энциклопедия, 1984. 944 с. [Physical encyclopedia. Chief ed. A.M. Prokhorov. Ed. count D.M. Alekseev, A.M. Bonch-Bruevich, A.S. Borovik-Romanov and others. Moscow: Sov. encyclopedia, 1984. 944 p. (in Russ.)]
2. Данилевский В.Я. Новый электро-индуктивный способ раздражения нервов. *Вестник медицины*. 1896. № 24. С. 457–458. [Danilevskii V.Ya. New electro-inductive method of nerve stimulation. *Vestnik meditsiny*. 1896. №. 24. P. 457–458 (in Russ.)]
3. Костин С.И. О физиологическом действии электричества на расстоянии: Ист.-крит. обзор лит. вопроса. [Соч.] Д-ра С.И. Костина. [Харьков]. Санкт-Петербург: К.Л. Риккер, 1899. 20 с. [Kostin S.I. On the physiological effect of electricity at a distance: Ist.-crit. review of the issue. [Op.] Dr. S.I. Kostina. [Kharkiv]. St. Petersburg: K.L. Ricker, 1899. 20 p. (in Russ.)]
4. Данилевский В.Я. Исследования над физиологическим действием электричества на расстоянии: Т. 1. Электрическое раздражение нервов. Харьков: Паровая тип. и лит. М.Ф. Зильберберг, 1900. 280 с. [Danilevskii V.Ya. Research on the physiological effect of electricity at a distance: V. 1. Electrical irritation of nerves. Kharkov: Steam typography by Zilberberg, 1900. 280 p. (in Russ.)]
5. Алексеева В.А. С.И.Костин и становление исследований биологических эффектов электромагнитного поля в Российской империи. *Вопросы истории естествознания и техники*. 2019; 681–683. [Alekseeva V.A. S.I.Kostin and the formation of research into the biological effects of the electromagnetic field in the Russian Empire. *Voprosy istorii estestvoznaniya i tekhniki*. 2019; P. 681–683. (in Russ.)]
6. Алексеева В.А., Зубарев Ю.Б., Григорьев О.А. Изобретатель радио А.С. Попов и первые исследователи биологических эффектов электромагнитного поля в Российской Империи. *История науки и техники*. 2020(11):10–18. [Alekseeva V.A., Zubarev Yu.B., Grigor'ev O.A. Radio inventor A.S. Popov and the first researchers of the biological effects of the electromagnetic field in the Russian Empire. *Istoriya nauki i tekhniki*. 2020(11):10–18. (in Russ.)]
7. Алексеева В.А., Григорьев О.А., Меньшиков В.Ф. Начальный период исследований биоэффектов электромагнитного поля в России и вклад томской научной школы. *Известия высших учебных заведений. ФИЗИКА*. 2015; 58(10/3): 175–178. [Alekseeva V.A., Grigor'ev O.A., Men'shchikov V.F. The initial period of research into the bioeffects of the electromagnetic field in Russia and the contribution of the Tomsk scientific school. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. FIZIKA*. 2015; 58(10/3):175–178. (in Russ.)]
8. Тарханов И.М. Электрические действия круковой трубки в качестве возбудителя животных тканей на расстоянии. *Больничная Газета С.П.Боткина*. 1897. № 13. С. 466. [Tarkhanov I.M. Electrical actions of the Crookes tube as an irritant of animal tissues at a distance. *Bol'nichnaya Gazeta S.P.Botkina*. 1897. №. 13. P. 466. (in Russ.)]
9. Ливанов М.Н., Цыпин А.Б., Григорьев Ю.Г. и др. К вопросу о действии электромагнитного поля на электрическую активность коры головного мозга кролика. *Бюлл. эксперим. биол. и мед.* 1960(5): 63–67. [Livanov M.N., Tsypin A.B., Grigor'ev Yu.G. and others. On the issue of the effect of the electromagnetic field on the electrical activity of the cerebral cortex of rabbit. *Byulleten' eksperimental'noi biologii i meditsiny*. 1960(5): 3–67. (in Russ.)]
10. Ухтомский А.А. 15 лет советской физиологии. Ленинград; Москва: ОГИЗ-Медгиз, 1933. 97 с. [Ukhtomskii A.A. 15 years of Soviet physiology. Leningrad; Moscow: OGIZ-Medgiz, 1933. 97 p. (in Russ.)]
11. Протокол планового совещания. “О тематике работ медицинских научно-исследовательских институтов по изучению УКВ”. В кн.: Ультракороткие волны в медицине и биологии. (Труды Первой конференции Украинского института экспериментальной медицины по ультракоротким волнам). Под ред. проф. Я.И. Лифшица, проф. А.А. Слуцкина и др. Харьков: Гос. мед. изд-во УССР, 1935. С. 245–250. [The protocol of the planned meeting. “About the research topics of medical institutes on the study of VHF.” In the book: Ultrashort waves in medicine and biology. Proceedings of the First Conference on ultrashort waves of the

- Ukrainian Institute of Experimental Medicine). Ed. prof. Ya.I. Lifshitz, prof. A.A. Slutskina and others. Kharkov: State. Med. Publishing House of the Ukrainian SSR, 1935. P. 245–250. (in Russ.)]
12. Емец Б.Г. Биофизика электромагнитных волн на радиофизическом факультете. *Вісник Харківського державного університету*. 2015. №03 С. 91–105. [Электронный ресурс]. URL: http://rbecs.karazin.ua/wp-content/uploads/2015/03/Research_biophysics_Emets.pdf [Emets B.G. Biophysics of electromagnetic waves at the Faculty of Radiophysics. *Bulletin of Kharkiv State University*. 2015. No. 03 P. 91–105. [Electronic resource]. URL: http://rbecs.karazin.ua/wp-content/uploads/2015/03/Research_biophysics_Emets.pdf (in Russ.)]
 13. Ультракоткие волны в медицине и биологии (Труды Первой конференции Украинского института экспериментальной медицины по ультракотким волнам). Под ред. проф. Я.И. Лифшица, проф. А.А. Слуцкина и др. Харьков: Гос. мед. изд-во УССР, 1935. 250 с. [Ultrashort waves in medicine and biology (Proceedings of the First Conference on ultrashort waves of the Ukrainian Institute of Experimental Medicine). Ed. prof. Ya.I. Lifshitz, prof. A.A. Slutskina and others. Kharkov: State. Med. Publishing House of the Ukrainian SSR, 1935. 250 p. (in Russ.)]
 14. Крылов Н. Итоги III всесоюзного съезда физиотерапевтов. *Фронт науки и техники*. 1936(3): 85–88. [Krylov N. Results of the III All-Union Congress of Physiotherapists. *Front nauki i tekhniki*. 1936(3): 85–88. (in Russ.)]
 15. Труды Третьего Всесоюзного съезда физиотерапевтов. Харьков 19–24 декабря 1935 года / Отв. ред. засл. деятель науки проф. С.А. Бруштейн; Всес. ассоциация физиотерапевтов. Киев, 1937 [Proceedings of the Third All-Union Congress of Physiotherapists. Kharkov December 19–24, 1935 / Rep. ed. Honored Scientist Prof. S.A. Brustein; All Association of Physiotherapists. Kyiv, 1937. (in Russ.)]
 16. Лебединский А.В., Мозжухин А.С. Очерки истории кафедры физиологии военно-медицинской академии. Л.: Картфабрика ВМФ, 1971. 168 с. [Lebedinskii A.V., Mozhukhin A.S. Essays on the history of the Department of Physiology of the Military Medical Academy. L.: Navy Card Factory, 1971. 168 p. (in Russ.)]
 17. Орбели Л.А. Основные проблемы физиологии животных и человека во вторую пятилетку. *Физиол. журн. СССР*. 1933;16(2): 255–272. [Orbeli L.A. The main problems of animal and human physiology in the second five-year plan. *Fiziologicheskii zhurnal USSR*. 1933;16(2): 255–272. (in Russ.)]
 18. Лебединский А.В. Влияние ультракотких электрических волн на животный организм. *Природа*. 1933;5–6;79–85. [Lebedinskii A.V. The influence of ultrashort electrical waves on the animal organism. *Priroda*. 1933;5–6;79–85. (in Russ.)]
 19. Лебединский А.В., Загоруйко Л.Т. Влияние облучения на спинномозговые рефлексy. *Физиол. журн. СССР*. 1933;16(3):472–479. [Lebedinskii A.V., Zagorul'ko L.T. Effect of irradiation on spinal reflexes. *Fiziologicheskii zhurnal USSR*. 1933;16(3):472–479. (in Russ.)]
 20. Лебединский А.В. О физиологическом механизме действия УВЧ на организм животных и человека. Матер. Ленингр. конф. по УВЧ Л.: Изд-во ВМА и ВИЭМ, 1937. С. 45–54. [Lebedinskii A.V. On the physiological mechanism of UHF action on the body of animals and humans. Proceedings of Leningr. conference on UHF. Leningrad: Ed. VMA and VIEM, 1937. P. 45–54. (in Russ.)]
 21. Лебединский А.В. О физиологических изменениях в организме под влиянием токов ультравысокой частоты (УВЧ). Тр. 1-го Всесоюз. совещ. врачей биологов и физиологов по вопросам применения коротких и ультракотких волн в медицине. М.–Л.: Медгиз, 1940. С. 121–129. [Lebedinskii A.V. On physiological changes in the organism under the influence of ultra-high frequency (UHF) currents. Proceedings 1th All-Union meeting doctors, biologists and physiologists on the use of short and ultrashort waves in medicine. Moscow–Leningrad: Medgiz, 1940. P. 121–129. (in Russ.)]
 22. Тонких А.В. Влияние УВЧ на основной обмен. Тр. Военно-мед. акад. Л.: Изд-во ВМА, 1941. 34. С. 13–18. [Tonkikh A.V. The influence of UHF on basal metabolism. Tr. Military medical acad. Leningrad: Ed. VMA, 1941. 34. P. 13–18. (in Russ.)]
 23. Глезер Д.Я. О механизме действия УВЧ на биологический объект. Мат. Ленингр. конф. по УВЧ (ультракоткие волны). Л.: Изд-во Военно-мед. акад. РКК им. С.М. Кирова и Всесоюзн. ин-та эксперим. медицины, 1937. С. 5–18. [Glezer D.Ya. On the mechanism of action of UHF on a biological object. Proc. of Leningrad conference on UHF (ultra-short waves). Leningrad: Military Medical Publishing House. acad. RKK im. SM. Kirov and All-Union. Institute of Experimental Medicine, 1937. P. 5–18. (in Russ.)]
 24. Глезер Д.Я. О механизме биологического действия УВЧ. Тр. 1-го Всесоюз. Совещ. врачей-биологов и физиков по вопросам применения коротких и ультра коротких волн в медицине. М.–Л.: Медгиз, 1940. С. 44–55. [Glezer D.Ya. On the mechanism of biological action of UHF. Proceedings 1st All. Union meeting of doctors, biologists and physiologists on the use of short and ultrashort waves in medicine. Moscow–Leningrad: Medgiz, 1940. С. 44–55. (in Russ.)]
 25. Глезер Д.Я. Ультракоткие волны и их действие на органы кровообращения. *Изв. Научн. инст. им. Лесгафта*. 1940;22:1–146. [Glezer D.Ya. Ultrashort waves and their effect on the circulatory organs. *Izvestiya Leningradskogo nauchnogo instituta imeni P.F.Lesgafta*. 1940;22:1–146. (in Russ.)]

26. Тонких А.В. Влияние УВЧ на основной обмен. Тр. 1-го Всесоюз. совещ. врачей, биологов и физиков по вопросам применения коротких и ультракоротких волн в медицине. М.—Л.: Медгиз, 1940. С. 67—73. [Tonkikh A.V. The influence of UHF on basal metabolism. Tr. 1st All. meeting of doctors, biologists and physicists on the use of short and ultrashort waves in medicine. Moscow—Leningrad: Medgiz, 1940. P. 67—73. (in Russ.)]
27. Лившиц Н.Н. Об индивидуальной чувствительности к УВЧ. Тр. Физиол. ин-та им. Павлова. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1947, 2. С. 64—76. [Livshits N.N. On individual sensitivity to UHF. Tr. Physiol. inst. them. Pavlova. Moscow—Leningrad: Ed. AN SSSR, 1947, 2. P. 64—76. (in Russ.)]
28. Лебединский А.В., Моззхухин А.С. К вопросу о происхождении биоэлектрических явлений. Тр. Военно-мед. акад. Л.: Изд-во ВМА, 1950; 45. С. 5—18. [Lebedinskii A.V., Mozzhukhin A.S. On the issue of the origin of bioelectric phenomena. Tr. Military medical acad. Leningrad: Ed. VMA, 1950; 45. P. 5—18. (in Russ.)]
29. Френкель Г.Л. Пути развития изучения биодействия УВЧ (УКВ) и наши работы в этом направлении. Бюлл. ВИЭМ. № 2, 28, Л., 1936. [Frenkel' G.L. Ways to develop the study of the bioaction of UHF (UHF) and our researches. Bulletin VIEM. №. 2, 28. Leningrad, 1936. (in Russ.)]
30. Биологическое действие ультравысокой частоты (ультракоротких волн). Под ред. П.С. Купалова и Г.Л. Френкеля. М.: Изд-во ВИЭМ, 1937. 472 с. [Biological effect of ultra-high frequency (ultra-short waves). Ed. P.S. Kupalov and G.L. Frenkel. Moscow: VIEM, 1937. 472 p. (in Russ.)]
31. Вопросы метрики и дозиметрии ультравысокой частоты (ультракоротких волн) в биологии и медицине. Под общей ред. В.В. Татаринова, Г.Л. Френкеля. М.: Изд-во ВИЭМ, 1937. 96 с. [Issues of metrics and dosimetry of ultra-high frequency (ultra-short waves) in biology and medicine. Under the edit. V.V. Tatarinov, G.L. Frenkel. Moscow: VIEM, 1937. 96 p. (in Russ.)]
32. Лихтерман Б.В. Влияние работы у высокочастотных установок на обслуживающий персонал. Бюл. Сеченовского ин-та. 1933. С. 8—10, 421—455. [Likhterman B.V. The influence of work at high-frequency installations on maintenance personnel. Bull. Sech. Int. 1933. P. 8—10, 421—455. (in Russ.)]
33. Андрияшева Н.М. О профвредности УВЧ и защитных мероприятиях. В сб. Биологическое действие ультравысокой частоты (ультракоротких волн). Под ред. П.С. Купалова и Г.Л. Френкеля. М.: Изд-во ВИЭМ, 1937. С. 373—379. [Andriyasheva N.M. About the occupational hazards of UHF and protective measures. In Biological effect of ultra-high frequency (ultra-short waves). Ed. P.S. Kupalov and G.L. Frenkel, Moscow: VIEM, 1937. P. 373—379. (in Russ.)]
34. Электрическое поле ультравысокой частоты (ультракороткие волны) в биологии и экспериментальной медицине. Вып. 1—4. Всесоюз. ин-т эксперим. медицины им. А.М. Горького (Ленингр. филиал), Физ.-биол. отдел. М.—Л.: Медгиз, 1939—1940. [Electric field of ultra-high frequency (ultra-short waves) in biology and experimental medicine. V. 1—4. All-Union Institute of Experiments. medicine named after A. M. Gorky (Leningrad branch), Phys.-Biol. Department. Moscow—Leningrad: Medgiz, 1939—1940. (in Russ.)]
35. Френкель Г.Л. Электрическая лихорадка и обменные эффекты высокочастотного поля: (В свете запросов лечебной практики). Мед.-санит. упр. ВМФ. Воен.-морск. мед. акад. Ленинград: Изд-во Военно-морской мед. акад., 1945. 124 с. [Frenkel' G.L. Electric fever and metabolic effects of a high-frequency field: (In the light of the requests of medical practice). Med.-sanit. ex. Navy. Military Naval Med. Acad. Leningrad: Publ. house. Navy Med. Acad., 1945. 124 p. (in Russ.)]
36. Биологическое и лечебное действие магнитного поля и строго-периодической вибрации (экспериментальные и клинические материалы): Сб. статей. Под ред. доц. В. И. Кармилова, проф. М. Р. Могендовича и проф. А. В. Селезнева. Молотов ГИЗ, 1948. 168 с. [Biological and therapeutic effects of a magnetic field and strictly periodic vibration (experimental and clinical materials): Collection. Articles. Ed. V. I. Karmilov, M.R. Mogendovich and A. V. Seleznev. Molotov GIZ, 1948. 168 p. (in Russ.)]
37. Кржижановский Г.М. Социалистическое строительство. Сочинения. Т. 3. М.—Л.: ОНТИ, 1936. 499 с. [Krzhizhanovskii G.M. Socialist construction. Essays. V. 3. Moscow—Leningrad: ONTI, 1936. 499 p. (in Russ.)]
38. Александр Иванович Шокин. Портрет на фоне эпохи. Серия “Созидатели отечественной электроники”. Кн. 6. М.: Техносфера, 2014. 549 с. [Alexander Ivanovich Shokin. Portrait against the background of the era. Series “Creators of Domestic Electronics”. V. 6. M.: Technosphere, 2014. 549 p. (in Russ.)]
39. Борисов В.П. Мрачное очарование “лучей смерти” Н. Теслы (1930-е гг.): Цена властного вмешательства в решение научно-технической проблемы. В сб. Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова. Годичная научная конференция, 2019. Саратов: Амирит, 2019. С. 175—178. [Borisov V.P. The gloomy charm of N. Tesla's “death rays” (1930s): the price of government intervention in solving a scientific and technical problem. On Proceedings Annual scientific conference of Institute of History of Natural Science and Technology named after. S. I. Vavilova. 2019. Saratov: Amirit, 2019. P. 175—178. (in Russ.)]
40. Кеворкян А.А. Работа с ультравысокочастотными импульсными генераторами с точки зрения гигиены труда. Гигиена и санитария. 1948(4):26—30.

- [Kevork'yan A.A. Working with ultra-high-frequency pulse generators from the point of view of occupational hygiene. *Gigiena i sanitariya*. 1948(4):26–30. (in Russ.)]
41. Сосновик И.Я. Научные конференции Института гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР. *Гигиена и санитария*. 1948(3):56–57. [Sosnovik I.Ya. Scientific conferences of the Institute of Occupational Hygiene and Occupational Diseases of the USSR Academy of Medical Sciences. *Gigiena i sanitariya*. 1948(3):56–57. (in Russ.)]
 42. Лазарев П.П., Павлов П.П. Биофизика. Сб. статей по истории биофизики в СССР. М.: Московское общество испытателей природы, 1940. С. 76. [Lazarev P.P., Pavlov P.P. Biophysics. Collection of articles on the history of biophysics in the USSR. Moscow: Moscow Society of Natural Scientists, 1940. P. 76. (in Russ.)]
 43. Григорьев Ю.Г., Григорьев О.А. Сотовая связь и здоровье: электромагнитная обстановка, радиобиологические и гигиенические проблемы, прогноз опасности. М.: Экономика, 2016. 574 с. [Grigor'ev Yu.G., Grigor'ev O.A. Cellular communications and health: electromagnetic environment, radiobiological and hygienic problems, hazard forecast. Moscow: Economics, 2016. 574 p. (in Russ.)]
 44. Григорьев О.А. Радиобиология неионизирующих излучений за 60 лет: важнейшие итоги и актуальные задачи. Актуальные проблемы радиационной биологии: Мат. конф. (Дубна, 25–27 октября 2022 г.) – Дубна.: ОИЯИ, 2022. С. 25–29. [Grigor'ev O.A. Radiobiology of non-ionizing radiation over 60 years: the most important results and current tasks. Current problems of radiation biology: Conference proceedings (Dubna, October 25–27, 2022). Dubna: JINR, 2022. P. 25–29. (in Russ.)]
 45. Холодов Ю.А., Лукьянова С.Н., Чиженкова Р.А. Электрофизиологический анализ влияния электромагнитных полей на центральную нервную систему. Современные проблемы электрофизиологии центральной нервной системы. М.: Наука, 1967. С. 273. [Kholodov Yu.A., Luk'yanova S.N., Chizhenkova R.A. Electrophysiological analysis of the influence of electromagnetic fields on the central nervous system. Modern problems of electrophysiology of the central nervous system. Moscow: Science, 1967. P. 273. (in Russ.)]
 46. Абрикосов И.А. Импульсное электрическое поле ультравысокой частоты. М.: Медгиз, 1958. 174 с. [Abrikosov I.A. Pulsed electric field of ultra-high frequency. Moscow: Medgiz, 1958. 174 p. (in Russ.)]
 47. Кричагин В.И. Практические вопросы нормирования облучений полем сверхвысокой частоты. Вопросы биологического действия СВЧ-поля. Л.: ВМА им. Кирова, 1962. С. 27–28 [Krichagin V.I. Practical issues of rationing exposure to ultrahigh frequency fields. Issues of biological action of the microwave field. Leningrad: VMA named after. Kirov, 1962. P. 27–28. (in Russ.)]
 48. Суббота А.Г. О некоторых закономерностях адаптации и кумуляции при многократных воздействиях СВЧ-энергии. Вопросы биологического действия СВЧ-поля. Л.: ВМА им. Кирова, 1962. С. 49–50. [Subbota A.G. On some patterns of adaptation and cumulation under repeated exposure to microwave. Issues of the biological action of the microwave field. Leningrad: VMA named after. Kirov, 1962. P. 49–50. (in Russ.)]
 49. Гордон З.В. Вопросы гигиены труда и биологического действия электромагнитных полей сверхвысоких частот. М.: Медицина, 1966. 162 с. [Gordon Z.V. Issues of occupational hygiene and biological effects of electromagnetic fields of ultrahigh frequencies. Moscow: Medicine, 1966. 162 p. (in Russ.)]
 50. Медико-биологические проблемы СВЧ-излучений. Сб. статей под ред. И.Р. Петрова. Л.: ВМА, 1966. [Medical and biological problems of microwave radiation. Collection of articles edited by I.R. Petrov. Leningrad: VMA, 1966. (in Russ.)]
 51. Холодов Ю. А. Влияние электромагнитных и магнитных полей на центральную нервную систему. М.: Медицина, 1966. 283 с. [Kholodov Yu. A. The influence of electromagnetic and magnetic fields on the central nervous system. Moscow: Medicine, 1966. 283 p. (in Russ.)]
 52. Думанский Ю.Д., Сердюк А.М., Лось И.П. Влияние электромагнитных полей радиочастот на человека. К.: Здоровье, 1975. 159 с. [Dumanskii Yu.D., Serdyuk A.M., Los' I.P. The influence of radio frequency electromagnetic fields on humans. K.: Health, 1975. 159 p. (in Russ.)]
 53. Садчикова М.Н., Глотова К.В. Клиника, патогенез, лечение и исход радиоволновой болезни. В кн. О биологическом действии электромагнитных полей радиочастот. М., 1973. С. 43–51. [Sadchikova M.N., Glotova K.V. Clinic, pathogenesis, treatment and outcome of radio-wave disease. In the book. On the biological effect of electromagnetic fields of radio frequencies. Moscow, 1973. P. 43–51. (in Russ.)]
 54. Бузинов В.С. Эталонные измерения параметров радиочастотного электромагнитного поля. Сб. науч. тр. Под общ. ред. д. т. н., проф. С.И. Донченко. Менделеево: ФГУП “ВНИИФТРИ”, 2019. 260 с. [Buzinov V.S. Reference measurements of radio frequency electromagnetic field parameters: Collection. scientific tr.: Under general ed. Dr. Sc., Prof. S.I. Donchenko. Mendeleevo: FSUE “VNIIFTRI”, 2019. 260 p. (in Russ.)]
 55. Принципы исследований биологического действия радиоволн. Методическое пособие. Л.: Военно-медицинская академия им. Кирова, 1974. 22 с. [Principles of experimental research of the biological effects of radio-waves. L.: Military Medical Academy named after Kirov, 1974. 22 p. (in Russ.)]

56. Гигиенические проблемы неионизирующих излучений. Авт. коллектив под ред. Ю.Г. Григорьева и В.С. Степанова. Под общ. ред. акад. РАМН Л.А. Ильина. Т. 4. М.: Изд-во АТ, 1999. 304 с. [Hygienic problems of non-ionizing radiation. Edited by L.A. Ilyin, Yu. G. Grigoriev and V.S. Stepanova. V. 4. M.: Publ. house. AT, 1999, 304 p. (in Russ.)]
57. Шандала М.Г. Задачи гигиенических исследований по изучению физических факторов окружающей среды в свете решений XXVI съезда КПСС. *Гигиена и санитария*. 1981; (8):4–7. [Shandala M.G. Tasks for hygienic research on the study of physical environmental factors by context of decisions of the XXVI Congress of the Communist Party of Soviet Union. *Hygiene and Sanitation*. 1981; (8):4–7. (in Russ.)]
58. Шандала М.Г. Методологические вопросы гигиенического нормирования неионизирующих электромагнитных излучений для населения. В сб. научных трудов “Биологические эффекты электромагнитных полей. Вопросы их использования и нормирования”. Пушкино, 1986, С. 135–150. [Shandala M.G. Methodological issues of hygienic limitation for non-ionizing electromagnetic radiation for the population. On paper collection book “Biological effects of electromagnetic fields. Issues of their use and regulation”. Pushchino, 1986, P. 135–150. (in Russ.)]
59. Думанский Ю.Д., Иванов Д.С., Евреинов К.Г. и др. Прогнозирование предельно допустимых уровней при гигиенической регламентации ЭМП СВЧ. *Гигиена и санитария*. 1987(12):40–42. [Dumansky Yu.D., Ivanov D.S., Evreinov K.G. et al. Prediction of maximum permissible levels for hygienic regulation of microwave EMF. *Gigiena i sanitariya*. 1987(12):40–42. (in Russ.)]
60. Иванов Д.С. Учет вероятности риска при гигиеническом нормировании ЭМП. *Гигиена и санитария*. 1989(10):73–75. [Ivanov D.S. Taking into account the probability of risk during hygienic regulation of EMF. *Gigiena i sanitariya*. 1989(10):73–75. (in Russ.)]
61. Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений. Б.И. Давыдов, В.С. Тихончук, В.В. Антипов. Под ред. Ю.Г. Григорьева. М.: Энергоатомиздат, 1984. 176 с. [Biological action, regulation and protection from electromagnetic radiation. B.I. Davydov, V.S. Tikhonchuk, V.V. Antipov. Ed. Yu.G. Grigoriev. M.: Energoatomizdat, 1984. 176 p. (in Russ.)]
62. Шандала М.Г. Опыт гигиенической разработки проблемы физических факторов окружающей среды. *Гигиена и санитария*. 1999(4):3–9. [Shandala M.G. Experience in hygienic development of the problem of physical environmental factors. *Gigiena i sanitariya*. 1999(4):3–9. (in Russ.)]
63. Давыдов Б.И. Электромагнитные излучения радиочастот (микроволны): принципы, критерии нормирования, “пороговые” уровни доз. *Авиакосм. медицина*. 1985(3):8–21. [Davydov B.I. Electromagnetic radiation of radio frequencies (microwaves): principles, limitation criteria, “threshold” dose levels. *Aviakosmicheskaya meditsina*. 1985(3):8–21. (in Russ.)]
64. Логвинов С.В., Зуев В.Г., Ушаков И.Б., Тютрин И.И. Очерки неионизирующей радиобиологии: структурно-функциональный анализ. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1984. 208 с. [Logvinov S.V., Zuev V.G., Ushakov I.B., Tyutrin I.I. Essays on non-ionizing radiobiology: structural and functional analysis. Tomsk: Publishing house Tom. University, 1984. 208 p. (in Russ.)]
65. Справочник по электромагнитной безопасности работающих и населения. Шандала М.Г., Зуев В.Г., Ушаков И.Б., Попов В.И. Воронеж: РАМН, РАМТН, 1998. 82 с. [Handbook on electromagnetic safety of workers and the population. Shandala M.G., Zuev V.G., Ushakov I.B., Popov V.I. Voronezh: RAMS, RAMTN, 1998. 82 p. (in Russ.)]
66. Алексеева В.А., Григорьев О.А., Прокофьева А.С., Гошин М.Е. История научных конференций по электромагнитной биологии, радиобиологии и гигиене неионизирующих излучений в России за прошедшие сто лет. Актуальные вопросы радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений: сборник докладов всероссийской научной конференции, Москва, 12–13 ноября 2019 г. М.: Российский национальный комитет по защите от неионизирующих излучений, 2019. С. 178–182. [Alekseeva V.A., Grigor'ev O.A., Prokof'eva A.S., Goshin M.E. History of scientific conferences on electromagnetic biology, radiobiology and hygiene of non-ionizing radiation in Russia over the past hundred years. Proceedings All-Russian scientific conference “Current issues of radiobiology and hygiene of non-ionizing radiation”, Moscow, November 12–13, 2019. Moscow: Russian National Committee for Protection against Non-Ionizing Radiation, 2019. P. 178–182. (in Russ.)]
67. Лукьянова С.Н. Электромагнитное поле СВЧ диапазона нетепловой интенсивности как раздражитель для центральной нервной системы. М.: ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2015. 200 с. [Luk'yanova S.N. Electromagnetic field of the microwave range of non-thermal intensity as a stimulus for the central nervous system. Moscow: FMBC named after A.I. Burnazyan FMBA of Russia, 2015. 200 p. (in Russ.)]
68. Лукьянова С.Н., Карпикова Н.И., Григорьев О.А., Алексеева В.А. Кумуляция нейроэффектов повторных электромагнитных облучений нетепловой интенсивности. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2015;55(2): 169. [Luk'yanova S.N., Karpikova N.I., Grigor'ev O.A., Alekseeva V.A. Cumulation of neuroeffects of repeated electromagnetic irradiation of non-thermal intensity. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*. 2015;55(2):169. (in Russ.)]

69. Жаворонков Л.П., Петин В.Г. Количественные критерии микроволнового поражения. М.: ГЕОС, 2018. 232 с. [Zhavoronkov L.P., Petin V.G. Quantitative criteria for microwave damage. M.: GEOS, 2018. 232 p. (in Russ.)]
70. Григорьев О.А., Зубарев Ю.Б. Действие электромагнитной энергии беспроводной связи на человека: Прогнозы роста обусловленной заболеваемости, их реализация и проблемы оценки. Концепции. ЦЭМИ РАН. №1 (42), 2022. С. 4–17. <https://doi.org/10.34705/KO.2022.68.54.001>. [Grigoriev O.A., Zubarev Yu.B. The effect of electromagnetic energy of wireless communications on humans: forecasts for the growth of conditioned morbidity, their implementation and assessment problems. Kontseptsii. TsEMI RAN. №1 (42), 2022. P. 4–17. <https://doi.org/10.34705/KO.2022.68.54.001> (in Russ.)]
71. IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans. Report of the Advisory Group to Recommend Priorities for the IARC Monographs during 2020–2024. IARC 2019. P. 316.
72. Advisory Group recommendations on priorities for the IARC Monographs. The Lancet Oncology. Published online April 12, 2024 [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(24\)00208-0](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(24)00208-0).

Electromagnetic Field Bio-Medical Effects Researches in Russia over 130 Years: The Main Stages of the Scientific Knowledge Grows

O. A. Grigoriev^{1, 2, 3, *}, I. B. Ushakov^{2, 3, 4}, V. A. Alekseeva¹

¹ANO “National Research Centre for Safety of New Technology”, Moscow, Russia

²Scientific Consul for Radiobiology of the Russian Academy of Science

³A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

⁴Radiobiology Scientific Society of the Russian Academy of Science

*E-mail: oa.grigoriev@gmail.com

We analyzed the key stages in the scientific history for electromagnetic field bio-medical effects researches in Russia over 130 years. Has been proven the continuity of scientific knowledge about EMF biological effects and its transmission from one generation of scientists to the next because to exist of scientific schools, the systematic research and national scientific coordination. The main attention is paid to the period of formation of planned EMF health research, when the basic methodological principles were found and so as fundamental scientific basics for understanding the nature of EMF biological effects and their influence for health. The Russian scientists fundamental conceptions about the mechanism of the electromagnetic field biological action and the principles of its hygienic regulation are summarized.

Keywords: electromagnetic field, biological effect, non-ionizing radiation, radiobiology, hygiene, nervous system, radio frequencies, Russia, history of science

НЕЙРОЭФФЕКТЫ ЭМП СВЧ ДИАПАЗОНА НЕТЕПЛОВОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ И КОРОТКОЙ ЭКСПОЗИЦИИ

© 2024 г. С.Н. Лукьянова^{1, *}

¹Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва, Россия

*E-mail: lukyanovasn@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.06.2023 г.

После доработки 25.01.2024 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

Представлено обобщение и анализ результатов многолетних исследований автором нейроэффектов слабых электромагнитных воздействий с целью ответа на вопросы: существуют ли они, каковы их феноменология, нейрофизиологический механизм, пути модификации? Используя электрофизиологические и поведенческие методы исследования, показана линия эффектов слабых ЭМП от нейрона к отделу мозга, ЦНС (как системе) и организму. В экспериментах на животных и исследованиях с участием испытуемых-добровольцев статистически обоснована их феноменология, зависимость от параметров, режима модуляции, организации ЭМП. Сделан вывод, что слабые ЭМП – это полноправный раздражитель ЦНС, который в своем влиянии на организм подчиняется законам физиологии и биологической значимости ответной реакции, путях ее модификации и адаптационных механизмах, что целесообразно учитывать и использовать в условиях практического применения источников ЭМП.

Ключевые слова: микроволны, слабое воздействие, кролики, испытуемые, реакция, нейрон, отдел мозга, ЦНС, организм, полипараметрическая зависимость

DOI: 10.31857/S0869803124030026, **EDN:** MBQOJM

До настоящего времени в литературе нет однозначного мнения о нейроэффектах слабых электромагнитных воздействий (ЭМВ). Сохраняются вопросы о самом факте их существования, механизмах возникновения, феноменологии, зависимости от комплекса показателей. Соответствующие дискуссии ведутся давно и находят отражение в литературе. Их обобщение, анализ и пути развития (именно нейроэффектов) неоднократно описаны и в трудах Ю.А. Холодова – основоположника данного направления исследований. В своих монографиях он доказывал существование подобных ответов ЦНС, привлекаемая данные физиков, нейрофизиологов, морфологов, физиотерапевтов [1, 2]. Его представления о слабых ПМП и ЭМП как раздражителях ЦНС, о превалировании непосредственного действия на биологическую ткань, зависимости эффектов от параметров поля и состояния организма, действительно, являются основополагающими. Неоднозначность их отражения в последующих исследованиях других авторов связана с разнообразием условий и методов изучения данного направления. В большинстве случаев

это определялось отсутствием необходимого аппаратного и материального обеспечения экспериментальных исследований или их детального описания в опубликованных работах. Эта “разношерстность” материала не давала возможности представить единую базовую характеристику соответствующих нейроэффектов как научно обоснованной отправной точки.

Развитие техники дало возможность создать необходимые условия для корректного проведения таких работ, повысить разнообразие методик исследования с учетом статистической оценки. Одни из экспериментальных камер с соответствующим научно-техническим обеспечением были созданы в Институте биофизики МЗ СССР под руководством акад. Л.А. Ильина и проф. Ю.Г. Григорьева в 1976 г. В таких условиях появилась возможность продолжить и развить соответствующие исследования. В результате в единых корректных условиях *in vivo* с возможным анализом реакций ЦНС на различных уровнях ее функционирования выполнен большой объем экспериментов на животных и исследований с участием испытуемых-добровольцев.

Показана линия реакций от нейрона к отделу мозга, ЦНС (как системе) и организму, что имеет отношение к актуальному вопросу — формирование единого подхода к анализу данных эффектов с целью их оценки, систематизации, а также прогнозирования возможных вариантов новых воздействий. В основе — доказательство правомерности отношения к слабому ЭМП как раздражителю ЦНС, что позволило, используя неспецифические законы физиологии, представить пути модификации соответствующих эффектов. Совокупность таких исследований в работах других авторов (отечественных и зарубежных) не представлена. Полностью этот большой объем материала исследований изложен в статьях и двух монографиях автора [3, 4]. Настоящая работа отражает основные положения, которые обосновывают сам факт существования и представляют фундаментальную характеристику нейроэффектов слабых электромагнитных воздействий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

В статье приведены результаты многолетних работ, выполненных в условиях *in vivo* в экспериментах на животных (главным образом кроликах) и исследованиях с участием испытуемых-добровольцев. Количественная характеристика дана при описании результатов, так как она включает большое разнообразие серий с различными параметрами, экспозициями и условиями ЭМВ, показателями функционального состояния систем и организма.

Основное внимание уделяли реакциям ЦНС, используя поведенческие, условно-рефлекторные и электрофизиологические методы оценки. В условиях облучения, преимущественно головы, металлические детали (электроды, провода, микроманипулятор) были заменены на так называемые “безартефактные”. В самостоятельной серии исследований нашло свое подтверждение существующее мнение, что в месте контакта металл—биологическая ткань может возникать ток микрополяризации, существенно искажающий эффект слабого ЭМВ [3, 4]. На этом основании ЭЭГ электродами служили хлорвиниловые трубки, пипетки, воронки, заполненные физиологическим раствором на основе агар-агара. Они имели сопротивление около 1 МОм и удовлетворяли требованиям оценки результатов, полученных в условиях ЭМП СВЧ диапазона. Для записи нейронов использовали традиционные

стеклянные капилляры, а микроманипулятор был изготовлен из органического стекла по аналогии с (обычно применяемым) металлическим. Эти особенности позволяли регистрировать более корректную информацию, не только до и после, но и в период экспозиции ЭМП.

Для формирования отправной точки базовой характеристики нейроэффектов слабых ЭМВ использовали самый простой вариант (ЭМП нетепловой интенсивности, непрерывный режим, короткая однократная экспозиция, здоровые особи). Пути модификации изучаемой реакции включали изменение: параметров, режимов, экспозиций ЭМВ, состояния биообъектов и сочетанное действие с факторами других модальностей.

Все работы проводили в сопоставимых условиях камеры, удовлетворяющей проведению электрофизиологических исследований с учетом особенностей воздействующего фактора. Камера была изолирована от посторонних внешних влияний (свет, звук, и т.д.) и внутри выложена радиопоглощающим материалом “Дон” с коэффициентом отражения 30 дБ. Источниками линейно-поляризованного ЭМП служили высокочастотные промышленные генераторы сигналов (ГЗ-21, Г4-121, Г4-111, Россия) с соответствующими усилителями мощности и рупорными антеннами. Во время эксперимента биообъект находился в дальней зоне поля антенны, т.е. в области сформированной плоской электромагнитной волны. Основным воздействующим фактором было ЭМП СВЧ диапазона (1 ГГц–10 ГГц), которое не вызывало регистрируемого нагрева ткани (ППЭ эквивалентной плоской волны ≤ 300 мкВт/см² в НР или импульсе).

Использовали комплекс методов, позволяющий параллельно анализировать функциональное состояние не только ЦНС, но и изменения в дыхании, ССС, крови и мышечной ткани¹.

¹ Проведение исследований всегда осуществляли с соблюдением необходимых этических норм и правил, описанных в ряде соответствующих документов: “Правила лабораторной практики Хельсинкской декларации (2000)”; “Правила Европейской Конвенции ETS 123”; “Нормы обращения с животными на основе стандартных операционных процедур, принятых в ФГБНУ “НИИ фармакологии им. В.В. Закусова”. Исследования с участием испытуемых были полной копией предварительно проведенных экспериментов на кроликах. Испытуемые-добровольцы проходили медицинское обследование в клиническом отделе ФМБЦ им. А.И. Бурназяна и принимали участие в исследованиях в присутствии дежурного врача (сотрудника той же больницы).

Таблица 1. Сравнительная характеристика реакции нейронов зрительной области коры головного мозга кролика на слабые воздействия факторами различной модальности: ЭМП, ПМП, свет, звук
Table 1. Comparative characteristics of the reaction of neurons in the visual cortex of the rabbit cerebral cortex to weak effects by factors of various modalities: EMF, CMF, light, sound

Фактор (параметры)	Число нейронов	Число 1-минутных воздействий	Процент реакций — статистически значимых изменений фоновой частоты	
			учащение	урежение
ЭМП СВЧ (6 ГГц, меандр 50 Гц, ППЭимп. 200 мкВт/см ²)	60	87	6.6	58** ■
ПМП (100 мТл)	41	63	23.40*	36.36**
Звук, щелчки (50 Гц, на 15 дБ выше порога слышимости человека)	41	108	16.41	29.82*
Световые вспышки (50 Гц, τ — 1 мс, 0.62 Дж)	41	207	60.97** ■	25.47*
Контроль (ложные воздействия)	54	71	10.88	3.8

Примечание. По группе воздействий — *, ** $p < 0.05$, $p < 0.01$ соответственно, по χ^2 относительно контроля; ■ — $p < 0.05$ по χ^2 относительно реакций противоположного характера. Здесь и далее в таблицах шрифтом и цветом выделены наиболее важные изменения.

Нейроэффеkты ЭМП постоянно сопоставляли с соответствующими реакциями на ПМП, свет, звук, что позволяло оценить биологическую значимость, неспецифичность и особенность изучаемого ЭМВ как раздражителя ЦНС. Абсолютно все серии с ЭМП сопровождали соответствующими контролями с ложным предъявлением фактора, полностью сохраняя остальные условия проведения исследований. Необходимым был и статистический анализ сравнения результатов различных серий с истинными и ложными (контроль) воздействиями, используя компьютерную программу “Statistika”, параметрическую и непараметрическую оценки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Статистически обоснованное наличие реакций нейронов и возможность выработать условный рефлекс на слабое ЭМП (ППЭ ≤ 300 мкВт/см², короткая экспозиция) в корректных условиях проведения экспериментов — прямое доказательство того, что мы имеем дело с обычным раздражителем ЦНС.

Реакции нейронов реализовались с очень большими латентными периодами (секунды, а не мс) и сводились главным образом к уменьшению количества импульсов, т.е. усилению

процесса торможения по сравнению с ответами на известные адекватные раздражители пороговой величины. В специально проведенной серии на 70 нейронах зрительной области, предъявляя каждому из них свет, звук или СВЧ ЭМП, мы не встретили ни одного, который реагировал только на ЭМП. Это были главным образом клетки, отвечающие на все три стимула — 34%, тогда как на свет и СВЧ — 20%; на свет и звук — 13%, только на адекватный раздражитель свет — 23 и 10% вообще не реагировали. Приведенная в табл. 1 совокупность показателей статистически значимо отличает СВЧ ЭМП от адекватных стимулов пороговых значений и характеризует его как неспецифический и неадекватный раздражитель для нейрона.

Изучение нейрофизиологического механизма формирования этой реакции показало превалирующее значение непосредственного действия поля на ткань мозга в условиях облучения головы [3]. Исследования на препаратах головного мозга позволили сделать вывод: чем больше изоляция области нервной ткани от окружающих влияний, тем четче проявлялся основной ответ на слабое ЭМВ в виде торможения [рис. 1].

Полностью изолированная нервная ткань (нервная брюшная цепочка речного рака — препарат

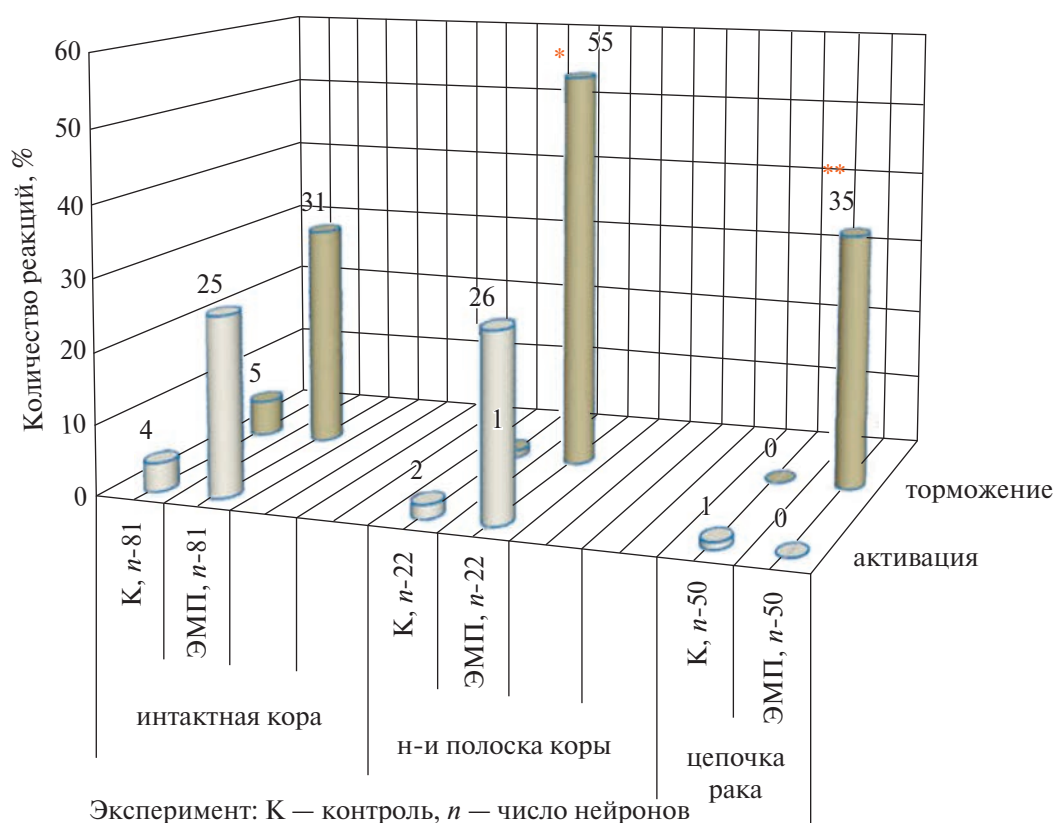


Рис. 1. Сравнительная характеристика реакций нейронов: коры интактного мозга, нейронально-изолированной полоски коры, нервной цепочки речного рака – на СВЧ ЭМП.

Примечание. ЭМП: 1 ГГц, непрерывный режим, ППЭ – 200–300 мкВт/см². *, ** – $p < 0.05$ по χ^2 относительно К, К и реакции противоположного характера соответственно.

Fig. 1. Comparative characteristics of the reactions of neurons: the cortex of the intact brain, the neuronally isolated strip of the cortex, the neural chain of river cancer – on microwave EMF.

физиологической практики) отвечала на слабое ЭМП только торможением биоэлектрической активности, в отличие от нейронально-изолированной полоски коры и целостного мозга.

Особенности реакций нейронов на ЭМП были причиной более медленной выработки и меньшей прочности условных двигательных ответов на ЭМП при формировании электрооборонительных отставленных рефлексов избегания (табл. 2). Выработка условных рефлексов на ЭМП и ПМП требовала большего количества сочетаний для появления и укрепления двигательных условных реакций, а их прочность была ниже относительно соответствующих значений на свет и звук. Отличался и средний период запаздывания условного ответа. В случаях ЭМП и ПМП он был статистически значимо более длительным, по сравнению с теми же показателями на адекватные стимулы.

Важно отметить, что выработанная условная двигательная реакция сопровождалась

усилением τ -диапазона ЭЭГ, что наблюдали в одноименной ситуации и для звука [4]. По работам М.Н. Ливанова и его сотрудников, именно такая форма ЭЭГ-активности сопровождала соответствующие рефлекторные ответы на хорошо изученные адекватные стимулы [6]. Усиление τ -диапазона ЭЭГ отражает повышение биологической значимости воздействия (в частности, от раздражителя слабого до средней силы). Такое явление вполне вероятно и для слабых ЭМВ в условиях повторения коротких экспозиций (требование процедуры выработки рефлекса), что приводит к суммации эффектов. Эти данные еще раз подчеркивают, что мы имеем дело с обычным раздражителем ЦНС.

Огромный материал по изучению экстраклеточной активности нейронов различных областей коры головного мозга показал сходство феноменологии и прочности реакций нейронов в различных отделах коры (рис. 2). Эти данные и непосредственное действие поля на ткань

Таблица 2. Сравнительная характеристика выработки у кроликов условных электрооборонительных отставленных рефлексов избегания на ЭМП, ПМП, свет и звук

Table 2. Comparative characteristics of the development in rabbits of conditioned electrodefensive reflexes of avoidance to EMF, CMF, light and sound

Условный сигнал	Появление (№ сочетания)	Укрепление (№ сочетания)	Максимальная прочность за 50 сочетаний, %	Средний период запаздывания ответа после укрепления (с)
Вспышки света (50 Гц, 0.62 Дж)	8 ± 2.4	120.8 ± 7.9	78.8 ± 2.8	4.9 ± 1.1
Щелчки 50 Гц, на 15 дБ выше порога слышимости человека	$19.4 \pm 2.1 \bullet$	108 ± 6.1	70 ± 4.1	5.2 ± 0.2
СВЧ ЭМП 6 ГГц меандр 50 Гц, ППЭимп. = 200 мкВт/см	$40.2 \pm 6.2 \bullet \bullet$	$154 \pm 9.1 \bullet \bullet$	$54.7 \pm 5.2 \bullet \bullet$	$7.9 \pm 0.4 \bullet \bullet$
ПМП 100 мТл	$41.8 \pm 2.7 \bullet \bullet$	$248 \pm 4.8 \bullet \bullet$	$48.4 \pm 3.4 \bullet \bullet$	$8.5 \pm 0.12 \bullet \bullet$
Контроль	82.2 ± 38.9	—	5.5 ± 1	—

Примечание. В каждой серии по пять кроликов; отставление безусловного подкрепления от начала действия условного сигнала — 20 с. Безусловное подкрепление — электрический ток пороговой величины для проявления отклика на ЭМГ; совместное действие — 2.5 с; $\bullet \bullet$ — $p < 0,05$ по критерию Стьюдента по сравнению с выработкой рефлекса на вспышки света и щелчки.

мозга свидетельствуют о вероятности замыкания условной связи в пределах одного анализатора (в данном случае, представительство безусловного подкрепления). Как показано на рис. 2, эффекты ЭМВ зависели от режима облучения. Усложнение режима ЭМП повышало его биологическую значимость как раздражителя ЦНС, целиком поддерживая известное мнение — чем больше меняющихся параметров, тем эффективнее воздействие, подразумевая, что большее число элементов нервной ткани включается в реакцию. В итоге наблюдается возрастание числа ответов на ЭМП в виде активации, что соответствует усилению биологической значимости воздействия.

Погружая электрод в глубину мозга, можно наблюдать (отличную от коры) неоднозначную реактивность подкорковых структур головного мозга на одно и то же слабое ЭМВ. Вне зависимости от несущей частоты (1 ГГц или 10 ГГц, т.е. 30 см или 3 см), ЭМП в НР вызывало больший процент реакций в виде торможения в гипоталамусе, а наименьший — в ретикулярной формации (РФ) среднего мозга (табл. 3). Аналогичный результат был получен и в экспериментах с ПМП (46 мТл или 100 мТл). Казалось удивительным, что различные по частотным и энергетическим характеристикам поля вызывали однозначные “картины” распределения структур мозга по реактивности. При этом в каждом (отдельно взятом) образовании доминировала зависимость

ответа на слабое ЭМП от конкретных исходных фоновых характеристик [3]. Можно было предположить, что определяющую роль в пространственной организации реактивности структур мозга играло их исходное функциональное состояние. Это нашло подтверждение в сериях с предварительным введением кофеина или адреналина (рис. 3). В результате наибольший процент реакций отмечали в основных точках приложения данных фармакологических препаратов, соответственно, в коре (на фоне кофеина) и РФ среднего мозга (при введении адреналина). Эти эксперименты явно показывают, что перестройка пространственной организации биопотенциалов в мозге на слабое ЭМВ связана с исходной функциональной активностью его отделов. Это заключение не является специфическим для ЭМП, так как характерно и для других слабых раздражителей ЦНС (более изученной модальности), представляя один из возможных путей управления реакцией на слабое воздействие. На обычном спонтанном фоне наибольшую реактивность гипоталамуса можно объяснить его повышенной физиологической значимостью. Гипоталамус объединяет и связывает в единое целое механизмы гуморальной, гормональной, вегетативной и нервной регуляции.

Параллельная запись импульсной и суммарной биоэлектрической активности показала отражение реакции нейронов в отклике отделов головного мозга. Основной реакции нейронов

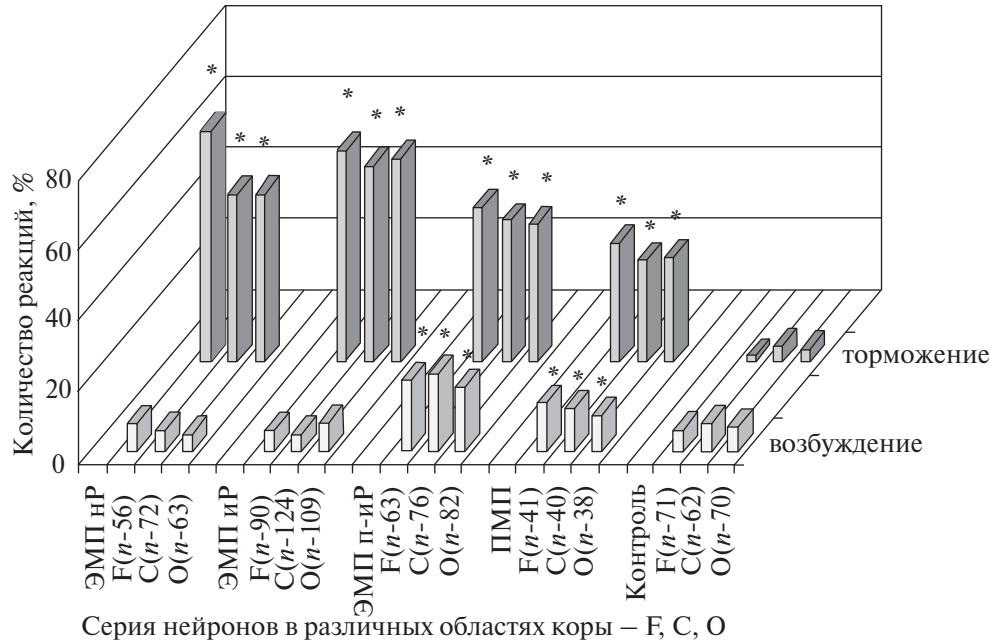


Рис. 2. Характеристика реакций нейронов на ЭМП в различных областях коры головного мозга.
Примечание. * – $p < 0.05$ по χ^2 относительно контроля и противоположной реакции соответственно, F, C, O – фронтальные, центральные, окципитальные области коры. 1.2 ГГц ЭМП, ППЭ в нР или в импульсе – 300 мкВт/см²; иР – импульсный режим: Гимп – 0.12 Гц, τ – 0.4 мс, п-иР – пачечно-импульсный режим: Гимп – 1000 Гц, Гпачек – 0.12 Гц, τ – 0.4 мс.

Fig. 2. Characterization of neuronal responses to EMF in various areas of the cerebral cortex.

Таблица 3. Сравнительная характеристика процента реакций нейронов на воздействие ПМП и ЭМП в разных отделах головного мозга кролика
Table 3. Comparative characteristics of the percentage of neuronal responses to the effects of CMF and EMF in different parts of the rabbit brain

Отделы мозга	Процент нейронов, статистически значимо урежающих частоту импульсации (относительно исходного фона) на воздействие:				
	ПМП, мТл		ЭМП, ГГц		Ложное воздействие (контроль)
	46	100	1	10	
Cort s-m	25.8* (n = 31)	37.8* (n = 45)	42.3** (n = 52)	39.5* (n = 38)	8.2 (n = 62)
Cort vis.	28.8* (n = 45)	33.9* (n = 53)	48.5* (n = 33)	48.6* (n = 35)	9.8 (n = 71)
Hippocampus	20.0 (n = 40)	18.9 (n = 37)	23.6 (n = 38)	27.2 (n = 33)	10.1 (n = 41)
Thalami	33.3* (n = 36)	29.6* (n = 27)	40.5* (n = 42)	27.7* (n = 54)	10.0 (n = 60)
Hypothalami	56.1*** (n = 41)	54.0*** (n = 37)	70.2*** (n = 37)	62.8*** (n = 43)	10.1 (n = 59)
R.F.	20.5 (n = 39)	22.5 (n = 40)	18.6 (n = 43)	22.6 (n = 31)	11.7 (n = 61)

Примечание. n – число записанных нейронов. *, **, *** – по группе статистически значимые изменения относительно контроля по критерию χ^2 при $p < 0.05$; $p < 0.005$ и $p < 0.001$ соответственно; выделено наиболее реактивное образование. ЭМП: непрерывный режим, ППЭ 200 мкВт/см².

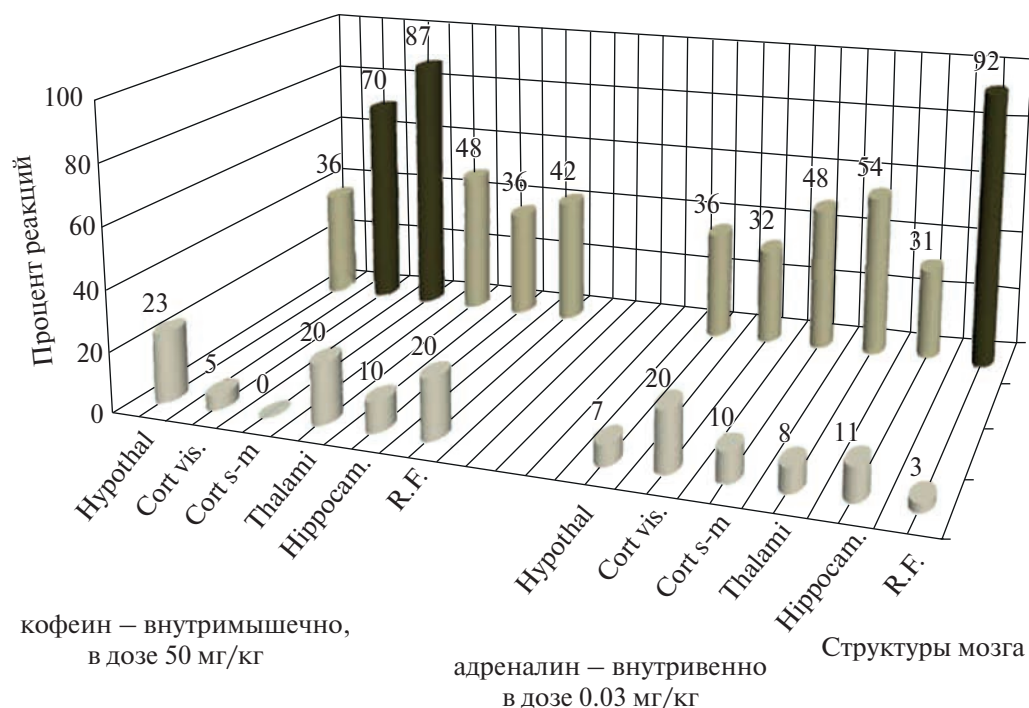


Рис. 3. Реактивность отделов мозга на ПМП 46 мТл на фоне кофеина или адреналина по анализу импульсной активности нейронов.

Примечание. Первый ряд — изолированное действие кофеина, адреналина; второй ряд — на фоне ПМП; в каждой серии число записанных нейронов = 25–30; выделены наиболее реактивные структуры на фоне действия ПМП.

Fig. 3. Reactivity of brain regions on CMF 46 mT against the background of caffeine or adrenaline according to the analysis of the impulse activity of neurons.

в виде усиления процессов торможения в ЦНС соответствовало увеличение числа веретенообразных колебаний в α -диапазоне ЭЭГ [4]. Такие изменения в суммарной биоэлектрической активности мозга описаны в литературе как адапционные ответы на слабые раздражители [6] и как реакции на неосознаваемые стимулы [7, 8]. Детальные исследования подобных реакций на экспозицию и сразу после выключения ЭМП показали их больший процент проявления в последнем случае, что отмечали в экспериментах на кроликах и исследованиях с участием испытуемых-добровольцев (рис. 4). В 11 сериях с участием 39 испытуемых-добровольцев (практически здоровые мужчины в возрасте 25–40 лет) изучали биоэффекты ЭМП с различными режимами, параметрами и экспозициями [3, 4]. Это разнообразие СВЧ ЭМП создавали, используя промышленный генератор Г4–121 или абонентские терминалы трех стандартов сотовой связи (GSM-900, DCS-1800, NMT с ППЭ на уровне головы — 5.17, 61.25, 78.93 мкВт/см² соответственно). Ответы после

выключения представляли собой самостоятельную реакцию, которая не являлась последствием или откликом на выключение. Это — сумма изменений, возникающих на появление и исчезновение слабого стимула, что проявлялось с латентным периодом, соответствующим данной величине ответа при экспозиции (рис. 5). Сходство реакций на одни и те же ЭМВ у кроликов и испытуемых еще раз подчеркивает определяющую роль биологической значимости воздействия, которая в обоих случаях соответствовала слабому раздражителю для ЦНС. Анализ ЭЭГ с большей вероятностью определяет значимость применяемого ЭМВ как слабого раздражителя ЦНС.

Более сложная суммарная биоэлектрическая активность (в отличие от нейрона) определяла и более сложную зависимость от исходных (фоновых) значений. Важную роль играл не только конкретный ЭЭГ-спектр той или иной структуры, но и пространственная организация биопотенциалов. О ней можно было судить по корреляционным отношениям (КК) между ЭЭГ

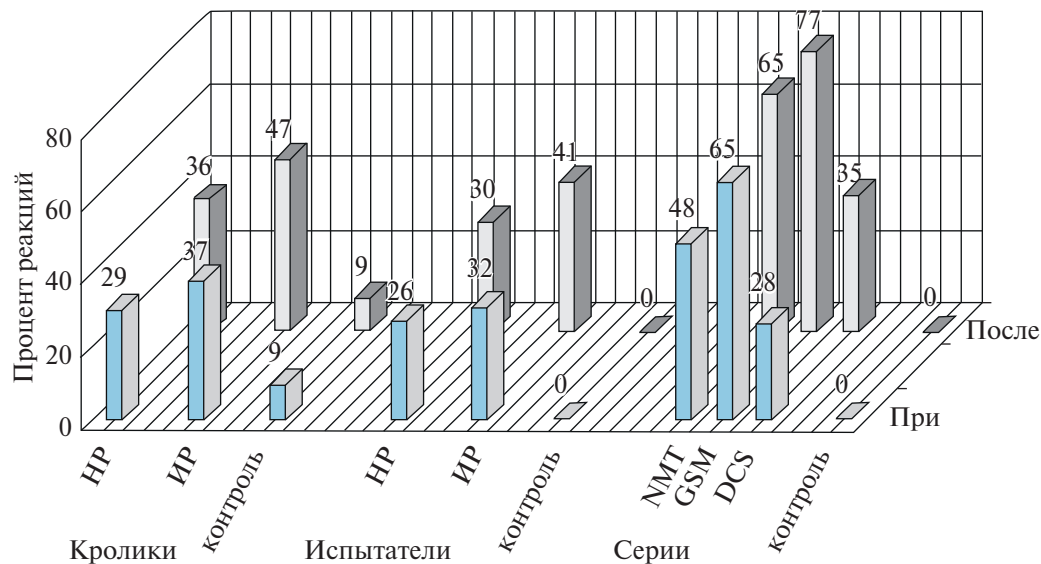


Рис. 4. Преобладание реакций в первую минуту после выключения поля по сравнению с периодом экспозиции по ЭЭГ показателю у кроликов и испытуемых.

Примечание. HR, ИР — непрерывный режим, импульсный режим ЭМП, характеристики приведены в примечании к рис. 2; NMT, GSM, DCS — стандарты сотовой связи (описание в тексте).

Fig. 4. The predominance of reactions in the first minute after turning off the field compared to the exposure period according to the EEG index in rabbits and testers.

дистанционных областей мозга. Специально проведенный управляемый эксперимент на кроликах с включением ЭМП (по сигналу от ЭВМ) на фоне только эффективных значений КК показало существенное усиление реакции [3, 4].

Представляла интерес и детальная фоновая характеристика α -диапазона, как основной феноменологии реакции на изучаемое воздействие. Детальная характеристика α -диапазона позволила разделить испытуемых по их реактивности на ЭМП, излучаемые телефонами различных стандартов сотовой связи [3, 4]. У групп испытуемых с различными особенностями этого диапазона (от max. до min. выраженности при открытых и закрытых глазах) наблюдали различные эффекты. У лиц одной группы особенностей α -диапазона ЭЭГ при сопоставимых условиях воздействия неоднократно воспроизводились одинаковые результаты.

Изучение реакций мозга по показателю ЭЭГ позволило получить дополнительную информацию и о зависимости от параметров воздействия. В частности, показано, что частоту, соответствующую повторению СВЧ-импульсов, можно усилить в ЭЭГ (навязать), аналогично вспышкам света или щелчкам звука, используя

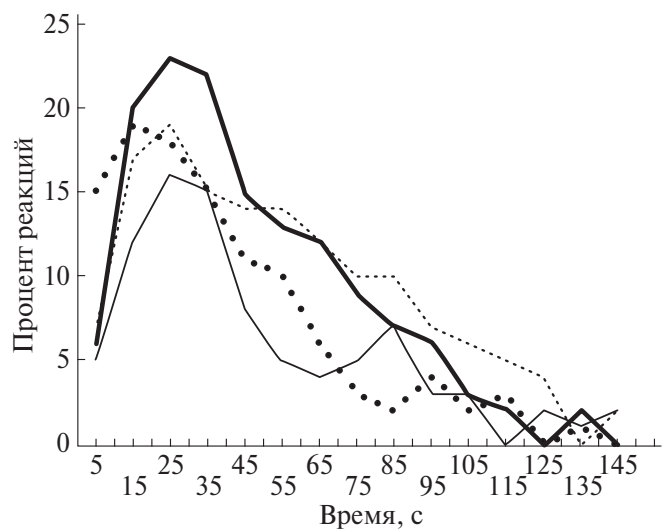


Рис. 5. Сходство латентных периодов реакций, при экспозиции и сразу после выключения ЭМП в исследованиях на кроликах и с участием испытуемых.

Примечание. Сплошные линии — при экспозиции; пунктир — после выключения; жирные линии — испытуемые, тонкие линии — кролики.

Fig. 5. Similarity of latent reaction periods during exposure and immediately after EMF shutdown in studies on rabbits and with the participation of testers.

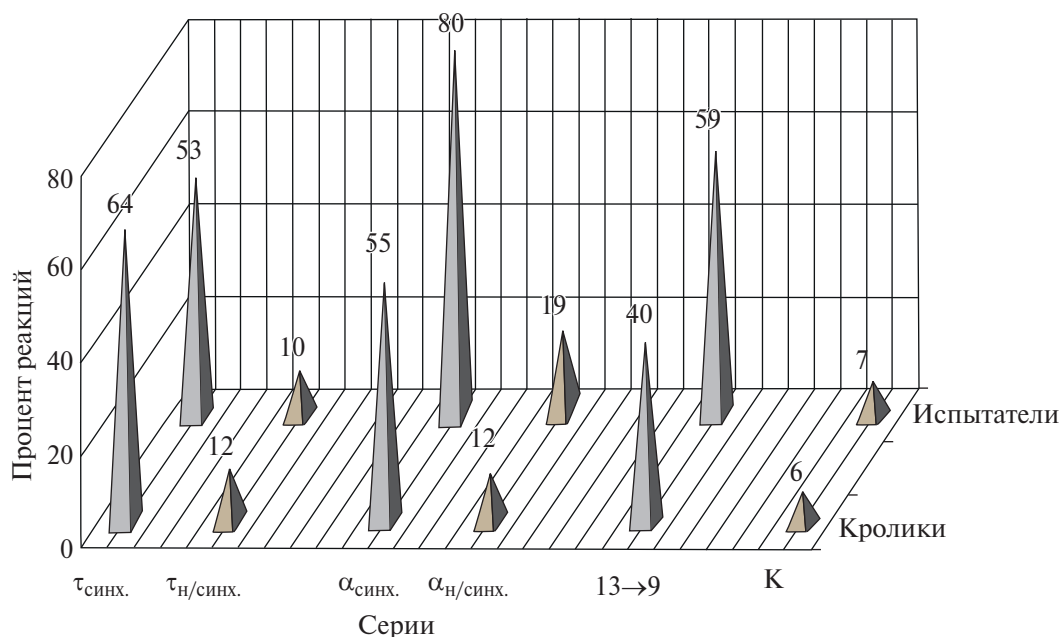


Рис. 6. Сравнительная характеристика процента реакций, соответствующих частоте модуляции ЭМП в исследованиях на кроликах и с участием испытуемых-добровольцев.

Примечание. Более интенсивным цветом выделены статистически значимые отличия по группе исследований ($p < 0.05$ по χ^2) от контроля и несинхронных (н/синх) воздействий в сериях с режимом обратной связи от волн тэта (τ) и альфа (α , 13→9) диапазонов ЭЭГ.

Fig. 6. Comparative characteristics of the percentage of reactions corresponding to the frequency of modulation of EMF in studies on rabbits and with the participation of volunteer testers.

режим обратной связи [4]. В данных экспериментах источником СВЧ ЭМП 1 ГГц служил отечественный генератор Г4-121, ППЭ на уровне головы не превышала 200 мкВт/см^2 в импульсе (табл. 4). Изменения можно было наблюдать и при модуляции в виде плавного изменения частот СВЧ импульсов в пределах избранного диапазона частот ЭЭГ. Эти данные были получены в экспериментах на кроликах и исследованиях с участием испытуемых-добровольцев (рис. 6).

Повторение соответствующих процедур приводило к усилению реакции, которая переходила от отдела мозга, на уровень ЦНС и организма (табл. 4).

В условиях соответствующей модуляции использование одновременно двух, трех несущих частот СВЧ-диапазона могло еще в большей степени усилить реакцию (рис. 7), что находило отражение в откликах других систем организма [4]. Важно отметить, что это усложнение реакций не сопровождалось повышением ППЭ, она сохранялась $\leq 300 \text{ мкВт/см}^2$ в суммарном импульсе. Анализируя возможный нейрофизиологический механизм формирования наблюдаемых

изменений, можно увидеть важную роль усиления синхронизации биоэлектрических процессов при формировании ответов нейронов, отделов мозга и ЦНС как системы, что показал специально проведенный анализ собственных данных и соответствующей литературы [9]. О специфике (в данном случае) может “говорить” только первичное физико-химическое взаимодействие факторов магнитной природы и нервной ткани. В литературе неоднократно описана возможность взаимодействия ЭМП нетепловой интенсивности с биологической тканью. Важная роль отводится главным образом заряженным частицам, которые в большом количестве находятся в примембранной области (гликокалекс). Изменение их конформации, движения, может повлиять на проницаемость мембраны и течение местных химических реакций. Н. Frehlich [10] полагает, что физической основой взаимодействия ЭМП с биологической тканью являются системы, несущие на себе дипольные заряды или последовательности зарядов, которые под влиянием поля приобретают способность к упорядоченному (кооперативному) взаимодействию. К таким системам носителей заряда относятся

Таблица 4. Сравнительная характеристика показателей различных систем организма в экспериментах на кроликах с ЭМП воздействием в режиме синхронной обратной связи от волн ЭЭГ
Table 4. Comparative characteristics of indicators of various body systems in experiments on rabbits with EMF exposure in the mode of synchronous feedback from EEG waves

Серия условное обозначение	% случаев статистически значимых изменений относительно фона						
	ЭМГ усиление	ЧП замедление	ЧД замедление	коэффициент кросс корреляции между ЭЭГ :			
				Or - Ol	Or - Fr	Or - Fl	Ol - Fl
δ синх.	63.63	45.45	45.45	54.54 ↓	63.63 ↓	54.54 ↓	63.63 ↓
τ синх.	72.72	36.36	36.36	72.72 ↑	63.63 ↑	63.63 ↑	54.54 ↑
δ н/синх.	9.09	18.18	9.09	0	9.09 ↑	18.18 ↓	9.09 ↑
К 1	9.09	0	0	9.09 ↑	9.09 ↓	9.09 ↓	9.09 ↓

Примечание. Полужирным выделены статистически значимые изменения относительно контроля; ↓, ↑ – снижение, повышение показателя соответственно. Приведено условное обозначение серий с синхронной (синх.) и несинхронной (н/синх.) обратной связью от волн частотных диапазонов ЭЭГ – дельта (δ), тэта (τ).

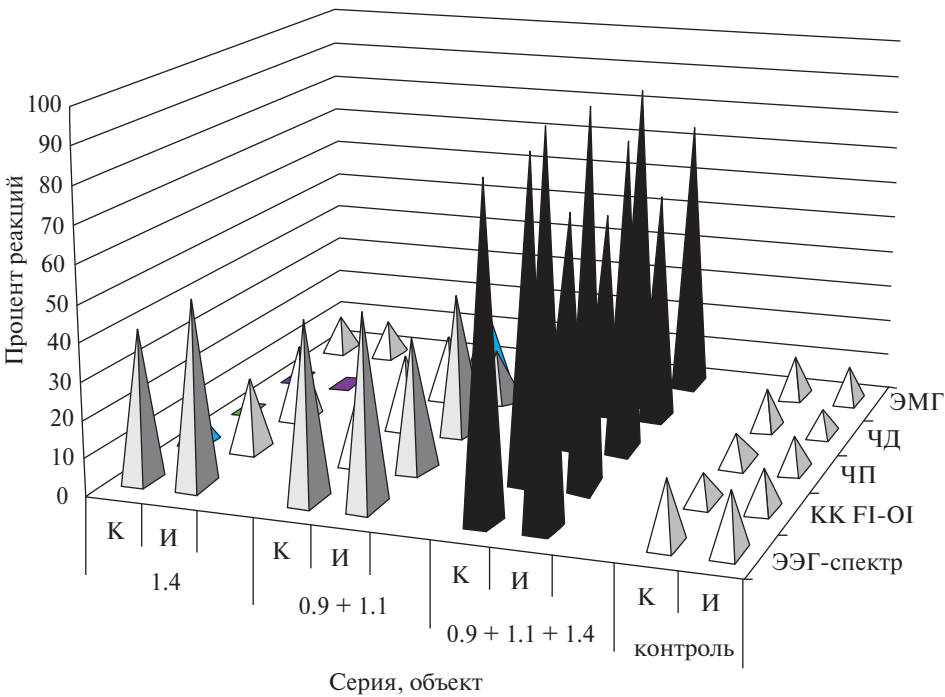


Рис. 7. Повышение эффективности ЭМВ в условиях увеличения количества действующих одновременно несущих частот.

Примечание. К – кролики, И – испытуемые; приведены: ЭМП-частоты, ГГц; показатели реакции: ЭЭГ, ККFI-OI – коэффициент кросс-корреляции между ЭЭГ лобной и затылочной областей, ЧП – частота пульса, ЧД – частота дыхания, ЭМГ – электромиограмма.

Fig. 7. Improving the efficiency of EMV in the face of an increase in the number of simultaneously operating carrier frequencies.

Таблица 5. Влияние ЭМП на функциональное состояние испытуемого в условиях операторской деятельности
Table 5. Effect of EMF on the functional state of the tester under conditions of operator activity

Серия	Число испытуемых	% испытуемых с достоверными изменениями показателей					
		ЭЭГ	ККЭЭГ Fr-Or	Частота пульса	РЭГ	АД	t° кожных покровов
“К”	19	26.3↑α	15.7	21.1	15.7	5.3	15.7
“МР”	19	36.8↑α	36.8*	15.7	21.1	15.7	26.3
“МР + ЭМП”	19	68.4 ↑α**	68.4**	52.9**	52.9**	47.4**	68.4**
“АР”	10	70↑θ*	50	40	30	10	30
“АР + ЭМП”	10	60	30	40	30	0	30

Примечание. “К” — 1,5-часовое пребывание в экспериментальной обстановке без выполнения работы; “МР” — монотонная работа; “МР + ЭМП” — монотонная работа на фоне облучения ЭМП РЧ в режиме модуляции меандром (“ИР1”); “АР” — активная работа; “АР + ЭМП” — “АР” на фоне облучения ЭМП РЧ в режиме модуляции меандром (“ИР1”); КК — коэффициент кросскорреляции; *, ** — $p < 0.05$ по χ^2 относительно серий “К” и “МР” соответственно. Полужирным выделен наиболее значимый вариант изменений по комплексу показателей.

молекулы воды, макромолекулы РНК и ДНК, мембранные комплексы и т.д. Леднев В.И. подчеркивает, что мишенями для ЭМП могут быть магнитные моменты [11]. Совокупность этих данных несомненно свидетельствует о вероятности существования механизмов, способных вызвать раздражение биологической ткани путем воздействия ЭМП. При этом определенная роль отводится ионам Ca^{2+} и эфаптическому взаимодействию нервных элементов, которые обеспечивают кооперативный синхронный ответ [12], подчеркивая неспецифическое синхронизирующее влияние слабого ЭМВ.

Самостоятельный огромный раздел исследований показывает, что к ЭМП как слабому раздражителю ЦНС применимы неспецифические законы физиологии о повышении биологической значимости. Известные неспецифические пути: повторение коротких экспозиций; их применение на фоне неполноценного функционирования организма; усложнение режима облучения, комбинирование с воздействиями других модальностей — способны повысить биологическую значимость и слабых ЭМВ [3]. Используя данные законы физиологии и при короткой экспозиции ЭМП, сохраняя нетепловую энергию в импульсе, можно наблюдать изменения в жизнедеятельности организма, что важно учитывать при разностороннем практическом использовании слабых ЭМВ. Например, при 1.5 ч монотонной работе на фоне слабого ЭМВ может

иметь место реакция организма, соответствующая развитию монотонии (табл. 5). При этом увеличивается и количество ошибок в работе. Используя режим плавного перебора частот модуляции ЭМП в диапазоне альфа-ритмов ЭЭГ можно усилить их содержание в спектре, снизив тем самым энергию стресс-ритмов т-диапазона. В наших исследованиях такой физиотерапевтический прием в течение одной-двух недель вызывал нормализацию функций организма кролика, находящегося в состоянии экспериментального невроза [3, 13]. В практике использования слабых ЭМВ в областях гигиены и физиотерапии важно учитывать описанные особенности их действия, на что обращают внимание и авторы соответствующего направления работ [6, 14–19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные материалы не оставляют сомнения, что слабые ПМП и ЭМП можно рассматривать как обычные раздражители ЦНС, которые могут иметь различную биологическую значимость, что зависит от комплекса показателей: ЭМП, функционального состояния биологического объекта, сопутствующих воздействий. Разносторонние исследования показали, что к этим факторам полноправно применимы законы физиологии о биологической значимости ответной реакции, путях ее модификации и адаптационных механизмах. Это заключение является очень важным, так как снимает с изучаемых

факторов некоторую “таинственность” и ставит в один ряд с хорошо изученными раздражителями ЦНС. Такой подход дает возможность объяснить наблюдаемые реакции и прогнозировать новые варианты воздействий, используя фундаментальную область знаний о феноменологии и механизмах формирования эффектов слабых раздражителей. Несомненным является и вывод, что в любых вариантах практического использования слабых ЭМВ необходима комплексная оценка показателей состояния организма, параметров воздействующего фактора и возможных побочных влияний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холодов Ю.А. Реакции нервной системы на ЭМП. М.: Наука, 1975. 284 с. [Kholodov Y.A. Reactions of the nervous system to EMF. M.: Science, 1975. 284 p. (In Russ.)]
2. Холодов Ю.А., Шишло М.А. Электромагнитные поля в нейрофизиологии. М.: Наука, 1979. 166 с. [Kholodov Yu.A., Shishlo M.A. Electromagnetic fields in neurophysiology. M.: Science, 1979. 166 p. (In Russ.)]
3. Лукьянова С.Н. ЭМП СВЧ диапазона нетепловой интенсивности как раздражитель для ЦНС М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, 2015. 200 с. [Lukyanova S.N. EMF of the microwave range of non-thermal intensity as an irritant for the central nervous system. Moscow: FSBI SSC FMBC named after A.I. Burnazyan, 2015. 200 p. (In Russ.)]
4. Лукьянова С.Н. Фундаментальная характеристика нейроэффектов слабых электромагнитных воздействий (от нейрона к отделу мозга, ЦНС, организму). М.: Изд-во ГНЦ им. А.И. Бурназяна. 2023. 138 с. [Lukyanova S.N. Fundamental characteristics of neuroeffects of weak electromagnetic influences (from neuron to brain, central nervous system, body). M.: FSBI SSC FMBC named after A.I. Burnazyan, 223. 138 p. (In Russ.)]
5. Ливанов М.Н. Избранные труды. М.: Наука, 1989. 400 с. [Livanov M.N. Selected works. M.: Science, 1989. 400 p. (In Russ.)]
6. Гаркави Л.Х. Квакина Е.В., Уколова М.А. Адаптационные реакции и резистентность организма. Ростов: изд-во Ростовск. Ун-та, 1979. 223 с. [Harkavy L.Kh., Kvakina E.V., Ukolova M.A. Adaptive reactions and resistance of the organism. Rostov: Rostovsk Publ. House. Un-ta, 1979. 223 p. (in Russ.)]
7. Кастандов Э.А. Нейрофизиологические механизмы неосознаваемых явлений. *Успехи физиол. наук.* 1981;12(4):3–27. [Kastandov E.A. Neurophysiological mechanisms of unconscious phenomena. *Successes of Physiol Sciences.* 1981;12(4):3–27. (In Russ.)]
8. Кастандов Э.А., Курова Н.С., Черемушкин Е.А., Лаковенко И.А. Роль неосознаваемых стимулов в сознательной познавательной деятельности. *Высш. нервн. деят.* 1998;48(3):438–448. [Kastandov E.A., Kurova N.S., Cheryomushkin E.A., Lakovenko I.A. The role of unconscious stimuli in conscious cognitive activity. *Nervous. Ac.* 1998;48(3):438–448. (In Russ.)]
9. Лукьянова С.Н. Феноменология и генез изменений в суммарной биоэлектрической активности головного мозга на неионизирующее излучение. *Радиаци. биология. Радиоэкология.* 2002;42(3):308–314. [Lukyanova S.N. Phenomenology and genesis of changes in the total bioelectric activity of the brain on non-ionizing radiation. *Radiation Biology. Radioecology.* 2002;42(3):308–314. (In Russ.)]
10. Frochlich H. What are non-thermal electric biological effects? *J. Bioelectromagnetics.* 1982;3(1):45–47.
11. Леднев В.И. Магнитные моменты – мишени для ЭМП. *Биофизика.* 2010;55(4):23–48. [Lednev V.I. Magnetic moments – targets for EMF. *Biophysics.* 2010;55(4):23–48. (In Russ.)]
12. Петше Г.К. вопросу о природе элементарных генераторов синхронизированной активности при эпилептическом припадке. Сб.: Функциональное значение электрических процессов головного мозга. М.: Наука, 1977. С. 347–357 [Petsche G. On the question of the nature of elementary generators of synchronized activity in an epileptic seizure. Collection: Functional significance of electrical processes of the brain. M.: Science, 1977 P. 347–357 (In Russ.)]
13. Лукьянова С.Н., Уйба В.В. Терапия экспериментального невроза у кроликов с помощью ЭМП в сравнении с факторами электрической и химической природы. *Мед. радиология и радиаци. безопасность.* 2017;62(3): 5–12; 96. [Lukyanova S.N., Uyba V.V. Therapy of experimental neurosis in rabbits using EMF in comparison with factors of electrical and chemical nature. *Medical Radiology and Radiation Safety.* 2017;62(3): 5–12; 96. (In Russ.)]
14. Франциянц Е.М., Шейко Е.А. Противоопухолевое действие ЭМП и их влияние на боль в экспериментальной и клинической онкологии. *Исследования и практика в медицине.* 2019;6(2):86–99. [Franzants E.M., Sheiko E.A. Antitumor effect of EMF and their influence on pain in experimental and clinical oncology. *Research and Practice in Medicine.* 2019; 6(2):86–99 (In Russ.)]
15. Лобкаева Е.П., Девяткова Н.С., Комиссаров В.И. Обоснование подбора параметров импульсного МП для получения заданного биологического эффекта. Сб. докл. 1-й междунар. конф. “Человек и ЭМП”. Саров, 2003. С. 8–19 [Lobkaeva E.P., Devyatкова N.S., Komissarov V.I. Justification of the selection of parameters of pulsed MP for obtaining a given biological effect. Dokl. 1st International. Conf. “Man and EMF”. Sarov, 2003. P. 8–19 (In Russ.)]

16. Походзей Л.В., Пальцев Ю.П., Руднева Е.А. Гигиеническая оценка электромагнитной обстановки на компьютеризированных рабочих местах: история и современное состояние. *Гигиена и санитария*. 2019;98(11):1196–1200 [Pokhodzey L.V., Paltsev Yu.P., Rudneva E.A. Hygienic assessment of the electromagnetic environment at computerized workplaces: history and current state. *Hygiene and Sanitation*. 2019;98(11):1196–1200 (In Russ.)]
17. Пальцев Ю.П., Походзей Л.В., Рубцова Н.Б., Перов С.Ю. Белая О.В. Современные принципы и средства защиты работников от неблагоприятного воздействия электромагнитных полей радиочастот. *Гигиена и санитария*. 2017;5:451–516. [Paltsev Yu.P., Pokhodzey L.V., Rubtsova N.B., Perov S.Yu., Belaya O.V. Modern principles and means of protecting workers from the adverse effects of electromagnetic fields of radio frequencies. *Hygiene and Sanitation*. 2017;5:451–516. (In Russ.)]
18. Никитина В.Н., Калинина Н.И., Ляшко Г., Дубровская Е.Н., Плеханов В.П. Особенности архитектуры сетей 5G. Вероятностное прогнозирование воздействия ЭМП радиочастот на население. *Гигиена и санитария*. 2021; 100(8):792–796. [Nikitina V.N., Kalinina N.I., Lyashko G., Dubrovskaya E.N., Plekhanov V.P. Features of the architecture of 5G networks. Probabilistic prediction of the impact of EMF radio frequencies on the population. *Hygiene and Sanitation*. 2021;100(8):792–796. (In Russ.)]
19. Рудой А.С. и др. Современные подходы к диагностике, терапии, профилактике поражений электромагнитными излучениями СВЧ диапазона. Минск: БГМУ, 2018. 38 с. [Rudoy A.S. et al. Modern approaches to diagnosis, therapy, prevention of lesions by electromagnetic radiation of the microwave range. Minsk: BSMU, 2018. 38 s. (In Russ.)]

Neuroeffects of Microwave EMF Range of Non-Thermal Intensity and Short Exposure

© 2024 S. N. Lukyanova^{1,*}

¹State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center
of Federal Medical and Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

*E-mail: lukyanovasn@yandex.ru

The article presents a generalization and analysis of the results of many years of research by the author of the neuroeffects of weak electromagnetic effects in order to answer the questions: do they exist, what are their phenomenology, neurophysiological mechanism, ways of modification? Using electrophysiological and behavioral research methods, the line of effects of weak EMF from the neuron to the brain, the central nervous system (as a system) and the body is shown. In animal experiments and studies with the participation of volunteer testers, their phenomenology, dependence on parameters, modulation mode, and EMF organization are statistically substantiated. As a result, it is concluded that this is a common stimulus of the central nervous system, which in its influence on the body obeys the laws of physiology about the biological significance of the response, ways of its modification and adaptation mechanisms, which is advisable to take into account.

Keywords: microwaves, low impact, rabbits, testers, reaction, neuron, part of the brain, CNS, organism, polyparametric dependence

НЕИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

УДК 591.18:599.323.4:636.7:57.084.1:537.86

НЕЙРОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ОСТРОГО И ХРОНИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

© 2024 г. И. Б. Ушаков¹, В. П. Федоров², Б. И. Давыдов³

¹Государственный научный центр — Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва, Россия

²Воронежская государственная академия спорта, Воронеж, Россия

³Государственный научный исследовательский испытательный институт авиационной и космической медицины, Москва, Россия

*E-mail: fedor.vp@mail.ru

Поступила в редакцию 03.10.2023 г.

После доработки 20.03.2024 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

В модельных экспериментах на трех видах лабораторных животных (мыши, крысы, собаки), подвергшихся как острому, так и хроническому электромагнитному облучению, исследованы морфологические изменения в лобной коре больших полушарий головного мозга. Установлено, что нейроны отличаются высокой реактивностью и в тоже время пластичностью к электромагнитному фактору. Изменения нейронов больше выражены при общем, чем при облучении головы. Наибольший отклик установлен со стороны белоксинтезирующей системы нейронов, а также их межнейронных контактов. Через 3 сут после облучения изменения выявлялись лишь на ультраструктурном уровне в виде остатков распавшихся органелл, скопления лизосом и локальных очагов отека мозга. При хроническом воздействии микроволн с экспозицией на уровне “нулевого эффекта” чувствительность нейронов к электромагнитному облучению характеризовалась видовыми отличиями и находилась в обратной зависимости от массы тела животного: наиболее чувствительны нейроны мышей, более резистентны структуры нервной системы крыс и наименьшей чувствительностью обладали нервные структуры собак.

Ключевые слова: электромагнитные излучения, головной мозг, нейроны, синапсы, гематоэнцефалический барьер, радиочувствительность

DOI: 10.31857/S0869803124030034, EDN: MBPWSP

В последние годы значительно расширился объем вмешательства в природу, грозящий стать глобальной опасностью для всего человечества. Среди множества возникающих при этом проблем значительное место занимают электромагнитные излучения [1–6]. Количество их источников, параметры и режимы воздействия на живые объекты практически не поддаются учету и классификации. Для разработки концепций по обеспечению комплексного решения проблемы защиты от неионизирующих излучений человека и окружающей среды, выработки рекомендаций по уменьшению экономического и социального ущерба и охране здоровья населения 28 января 1997 г. образован Российский национальный комитет по защите от неионизирующих излучений. По данным его председателя, “электромагнитные излучения действуют практически круглосуточно, постоянно облучая население.

Идет стремительный рост электромагнитного загрязнения среды с реальным отрицательным прогнозом” [7, 8]. Однако, несмотря на малоизученные аспекты влияния электромагнитных излучений на организм, они уже применяются в клинике, в частности, при сосудистых заболеваниях головного мозга, глаз и т.д. [9]. В последние годы электромагнитные излучения стали использовать и в спортивной практике для повышения физической работоспособности, увеличения мышечной силы и выносливости, а также для “изменения координационной структуры локомоторных движений” и др. [10, 11]. Сторонники такого подхода к практическому использованию микроволн не учитывают научные данные о последствиях влияния микроволн на организм человека и, в частности, на головной мозг [13–18]. Видимо, не знакомы они и с материалами регулярно проводимых Международных

конференций “Человек и электромагнитные поля”, а также с фундаментальными работами отечественных классиков электромагнитобиологии (Прессман, Григорьев, Холодов, Давыдов и др.). Между тем при воздействии электромагнитных излучений даже объектов сотовой связи у человека отмечаются нарушения когнитивных функций, нестабильность поведения в процессе обучения, отклонения со стороны краткосрочной и долгосрочной памяти [6, 7, 19, 20–22]. В ряде исследований подтвержден рост заболеваемости по прогнозным группам болезней в популяции подростков 15–17 лет (злокачественные опухоли, болезни нервной системы, нарушение иммунного статуса, болезни органа слуха и зрения). Последние работы этого направления свидетельствуют о том, что рост заболеваемости, обусловленной вредным влиянием электромагнитного поля, скорее достоверно существует, чем является случайным совпадением [19, 23–25]. Недооценка опасности электромагнитного излучения окружающей среды не способствует принятию государственных мер по изучению патологии, защите, профилактике и контролю загрязнения экосистемы [6–8]. В то же время многочисленные экспериментальные исследования демонстрируют достаточно высокий отклик органов и систем организма на микроволновое воздействие. Особой реактивностью к данному фактору отличается центральная нервная система, но морфологические эквиваленты выявляемых нарушений остаются малоизученными [26–32].

Цель исследования – в модельных экспериментах на лабораторных животных (мыши, крысы, собаки) выявить изменения в коре большого головного мозга после острого и хронического электромагнитного воздействия и определить морфофункциональные структуры, ответственные за реакцию ЦНС на микроволновое воздействие

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Эксперименты проведены в Государственном научно-исследовательском испытательном институте авиационной и космической медицины (ГНИИИАиКМ) с соблюдением национальных и международных требований по содержанию и гуманному обращению с животными (Хельсинкская декларация 2000 г. “О гуманном отношении к животным”; Приказ Минздрава-соцразвития России № 199н от 01.04.2016 г.

“Об утверждении правил лабораторной практики”. Протокол исследования одобрен комиссией по биоэтике ГНИИИАиКМ (протокол № 9 от 12 ноября 2021 г.).

В первой серии экспериментов белых беспородных крыс-самцов массой 250 ± 10 г подвергали в безэховой камере однократному электромагнитному облучению (общее равномерное или только голова) частотой 2.4 ГГц с ППЭ 300 мВт/см² в течение 2, 4 и 6 мин. Облучение было односторонним (латеральным), при этом продольная ось животного была параллельна магнитному вектору электромагнитной волны. При облучении головы экраном для других участков тела служила алюминиевая фольга, что обеспечивало парциальность микроволнового воздействия [9, 27]. Лобную кору (поле FPP) больших полушарий головного мозга экспериментальных ($n = 72$) и контрольных ($n = 18$) животных забирали через 0.1; 2.0 и 72 ч после начала эксперимента.

Во второй серии экспериментов исследовали влияние на головной мозг мышей, крыс и собак хронического воздействия микроволн непрерывной генерации частотой 2.4 ГГц с ППЭ 300 мВт/см² и длиной волны 12.6 см. Экспозиция, с учетом функциональной зависимости между плотностью потока энергии и длительностью микроволнового излучения на уровне “нулевого эффекта”, составляла 52 с для мышей, 2 мин для крыс и 3 мин для собак [2]. Для морфологических исследований забирали лобную кору (поле FPP) через 3 сут от последнего 30-, 60- и 90-разового (мыши, $n = 48$ и крысы, $n = 48$) и 90-разового (собаки, $n = 12$) облучения. Каждому сроку наблюдения соответствовал контроль с ложным облучением ($n = 6$). При всех режимах электромагнитного воздействия ректальная температура экспериментальных животных не изменялась.

После стандартных гистологических процедур обзорные срезы лобной коры окрашивали гематоксилин-эозином. На этих препаратах изучали общую картину cito- и ангиоархитектоники. Оценку тинкториальных свойства и морфометрических показателей состояния нервных и глиальных клеток проводили на препаратах, окрашенных крезилвиолетом по методу Ниссля. Общий белок в нейронах выявляли на парафиновых срезах, окрашенных методом сулема-бромфеноловый синий по Бонхеу, а цитоплазматическую РНК – по методу Shea. Состояние ферментативных систем нейронов (дегидрогеназы –

СДГ и ЛДГ, гидролазы — ЩФ и КФ) выявляли на криостатных срезах с использованием стандартных гистохимических методик.

Для электронно-микроскопического исследования участки лобной коры фиксировали методом инфильтрации в 2.5%-ном растворе глутаральдегида на 0.2 моль/л коллидиновом буфере и постфиксировали в 1%-ном растворе осмиевой кислоты. Обезвоживание проводили в этаноле восходящей концентрации с последующей заливкой в эпон-812. Структуру исследуемого объекта предварительно оценивали на полутонких срезах толщиной в 1 мкм окрашенных 1%-ным раствором толуидинового синего на 0.1 моль/л фосфатном буфере (pH 8.6) с последующей заточкой пирамиды. Ультратонкие срезы получали на ультратоме (LKB-III, Швеция), контрастировали по Reynolds и исследовали в электронном микроскопе JEM-100 CX-2 (Япония).

При анализе полученных результатов использовали параметрические методы статистики с вычислением средних и доверительных интервалов с помощью пакетов программ Statistica 6.1, MS Excel. Нулевая гипотеза отвергалась при $p < 0.05$ (t -критерий Стьюдента для парного сравнения независимых выборок между группами). Более подробно алгоритм проведения экспериментов, обработки и анализа материала описан нами в монографии [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование животных с ложным воздействием показало, что возрастная перестройка нейронов коры больших полушарий головного мозга заключалась в изменении на отдельных этапах эксперимента соотношения нейронов находящихся в состоянии покоя (нормохромные), повышения (гипохромные) или торможения (гиперхромные) функциональной активности. С возрастом изменялись размеры тела, цитоплазмы, ядра и ядрышка нейронов, а также прослеживалась тенденция к увеличению их количества с признаками альтерации. Также отмечалась флюктуация содержания в нейронах общего белка, нуклеиновых кислот и энергетического обмена. Эти возрастные изменения необходимо учитывать при оценке морфологических проявлений при пролонгированных электромагнитных воздействиях.

Сразу после общего однократного облучения крыс с ППЭ 300 мВт/см² и экспозицией 2 мин в лобной коре головного мозга уменьшалось

количество неизмененных нейронов и составляло по отношению к контролю всего 31% ($p < 0.05$). Это связано с увеличением количества нейронов, как с альтерацией, так и с измененной функциональной активностью. При парциальном облучении головы в данном режиме количество неизмененных нейронов составило 79.4% от всей нейронной популяции. На этом фоне заметно увеличилось количество нервных клеток с признаками альтерации ($p < 0.05$). Количество нейронов, находящихся в повышенном или сниженном функциональном состоянии, практически соответствовало таковому у животных с ложным воздействием. Примечательно, что при общем облучении количество нейронов с альтеративными изменениями не отличалось от такового при облучении головы, но было больше нейронов с повышенной функциональной активностью. При рассмотренных вариантах микроволнового воздействия, количество нейронов на площади коры статистически значимо не изменялось. Вместе с тем при общем облучении отмечалось значимое снижение показателя нервно-клеточного индекса ($p < 0.05$), что свидетельствовало о более выраженных изменениях в нейронах по сравнению с парциальным облучением головы. Кариометрические исследования выявили разнонаправленные отклики ядер нервных клеток на общее и парциальное микроволновое воздействие — повышение функциональной активности ядер при облучении головы и торможение их функциональной активности при общем воздействии. При этом существенно изменялся характер вариационной кривой распределения объемов ядер по классам логарифмов: смещение влево при общем и вправо при парциальном воздействии (табл. 1).

При импрегнации азотнокислым серебром у части отростков нервных клеток наблюдались участки гипо- и гипераргентофилии, а также неравномерное окрашивание миелиновых оболочек по Вейгерту—Палю, но осмирование препарата по Марки не выявило дегенерацию миелина.

Гистохимические исследования не выявили в нейронах существенных изменений содержания белка и РНК. Активность дегидрогеназ при общем воздействии имела тенденцию к повышению: СДГ на 9% и ЛДГ на 12%, а при облучении головы не изменялась. Более заметным было изменение активности гидролаз. Так, при облучении головы активность ЩФ значимо снижалась на 20%, а при общем облучении — повышалась на 45% ($p < 0.05$). При этом продукт реакции

Таблица 1. Характеристика изменений нейронов в лобной коре после однократного электромагнитного облучения ППЭ 300 мВт/см² с экспозицией 2, 4, 6 мин в процентах к контролю

Table 1. Characteristics of changes in neurons in the frontal cortex after a single electromagnetic irradiation of 300 MW/cm² with an exposure of 2, 4, 6 minutes as a percentage of control

Показатели состояния нейронов	2 мин		4 мин		6 мин	
	голова	общее	голова	общее	голова	общее
Нормохромные	40*	31*	42*	29*	28*	19*
Г ипохромные	103	123*	81	91	95	107
Г гиперхромные	102	109	95	104	112	136*
Деструктивные	158*	146*	223*	286*	250*	348*
Нервно-клеточный индекс	91	86*	90	51*	82*	52*
Объем ядер нейронов	121*	70*	111	105	102	89
Активность СДГ	101	109	120	109	98	107
Активность ЛДГ	103	112	106	119	109	108
Активность ЩФ	80	145	133*	63*	82*	52*
Активность КФ	106	117	112	120	121*	119*

неравномерно откладывался в эндотелии микрососудов, а в ряде случаев наблюдалась диффузия его гранул в периваскулярное пространство, что свидетельствовало об изменении трансэндотелиального транспорта. Активность кислой фосфатазы при парциальном облучении практически не изменялась, а при общем — повышалась, но без статистической значимости, на 17% (табл. 1).

Проведенные электронно-микроскопические исследования выявили достаточно гетероморфную картину состояния нервных и глиальных клеток, синапсов и структур гематоэнцефалического барьера. Хотя основная масса нервных клеток не имела функционально значимых ультраструктурных изменений, повсеместно встречались как светлые, так и темные нейроны. В ряде нервных клеток наблюдались очаги дегенерации в виде скопления лизосом и распавшихся органоидов. Цитоплазматическая сеть неравномерно набухала, лишалась рибосом и, распадаясь, образовывала вакуоли и мембранные миелоноподобные комплексы. Часть митохондрий была набухшей, с просветленным матриксом, содержащим продукты распада крист. Постоянно встречались осмиофильные нейроны с неразличимыми границами ядра и массовым набуханием органоидов. Вокруг таких нейронов обычно располагались микроглиоциты, распадающиеся

астроциты и формировались локальные очаги отека мозга (рис. 1).

При облучении головы ядра нейронов были увеличены в размере, светлые с равномерно расположенным хроматином. При общем облучении встречались мелкие темные ядра с конденсированным в глыбки хроматином и извитыми контурами кариолеммы. Со стороны специализированных элементов нейронов наблюдался распад нейротрубочек, набухание и различные стадии дегенерации межнейрональных контактов (рис. 2).

Микроциркуляторное русло было неравномерно расширено и переполнено форменными элементами крови. Цитоплазма эндотелия выглядела набухшей, содержала небольшое количество пиноцитозных везикул и распадающихся ультраструктур. Прилежащие отростки астроцитов набухали и распадались с формированием локальных очагов периваскулярного отека. В целом при общем и парциальном облучении ультраструктурные изменения в лобной коре были однонаправленными, но при общем воздействии они были более выраженными и гетероморфными.

Через 2 ч после парциального облучения головы увеличивалось количество нервных клеток с альтерацией. Показатель нервно-клеточного индекса снижался ($p < 0.05$), что

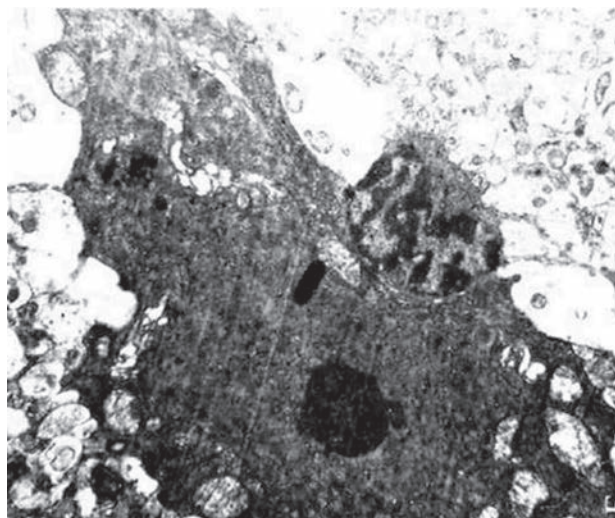


Рис. 1. Лобная кора после электромагнитного облучения головы (ППЭ 300 мВт/см², экспозиция 2 мин). Осмиофильный нейрон с неразличимыми контурами ядра, набуханием и распадом ультраструктур. Нейрон контактирует с микроглиоцитом и вокруг них формируется перичеселлюлярный отек. Электронограмма, $\times 10\,000$.

Fig. 1. Frontal cortex after electromagnetic irradiation of the head (PPE 300 MW/cm², exposure 2 min). An osmiophilic neuron with indistinguishable core contours, swelling and disintegration of ultrastructures. The neuron contacts the microglial cell and pericellular edema forms around them. Electronogram, $\times 10\,000$.

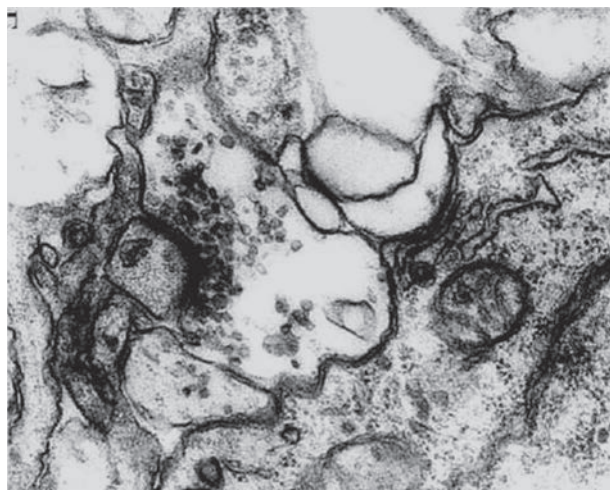


Рис. 2. Лобная кора после электромагнитного облучения головы (ППЭ 300 мВт/см², экспозиция 2 мин). Дегенерация синапсов по светловому типу. В центре аксодендритический синапс в состоянии функционального напряжения. Справа от него — фрагмент темного нейрона с набухшими ультраструктурами. Электронограмма, $\times 40\,000$.

Fig. 2. Frontal cortex after electromagnetic irradiation of the head (PPE 300 MW/cm², exposure 2 min). Degeneration of synapses according to the light type. In the center, the axodendritic synapse is in a state of functional tension. To his right is a fragment of a dark neuron with swollen ultrastructures. Electronogram, $\times 40\,000$.

свидетельствовало о гибели части нейронов, но без значимого обеднения всей нейронной популяции. Среди измененных нейронов встречались пикноморфные клетки и клеточные тени. При общем облучении уменьшалось количество нейронов с обычной структурной организацией и увеличивалось количество нервных клеток с измененной функциональной активностью. Особенно увеличивалось количество нейронов, находящихся в состоянии торможения функциональной активности и, в меньшей степени, с необратимыми изменениями (рис. 3).

Размер ядер нейронов при облучении головы соответствовал таковому в необлученном контроле, а при общем облучении — в предшествующем сроке наблюдения. Содержание белка и активность изученных ферментов не имели различий с таковыми сразу после электромагнитного воздействия. При импрегнации азотнокислым серебром существенные изменения со стороны осевых цилиндров отростков нервных клеток после облучения головы не выявлялись. При общем облучении, наряду с участками гипо- и гипераргентофилии, выявлялись нервные волокна

с неровными контурами и наплывами нейроплазмы, но без распада осевых цилиндров. Миелиновые оболочки неравномерно окрашивались по Вейгерт—Палю, но реакция Марки не выявляла дегенерацию миелина.

Электронно-микроскопические исследования выявили более выраженные и полиморфные изменения состояния нейронов, синапсов, нейроглии, а также структур гематоэнцефалического барьера. Изменения при парциальном облучении в большинстве случаев имели характер функционального напряжения. При общем облучении довольно большое количество нервных клеток имело повышенную осмиофилию ядра и цитоплазмы, встречались также пикноморфные нейроны. Ядра таких клеток были осмиофильными, уменьшенными в размере и с плохо различимыми контурами кариолеммы. Перикарион также имел повышенную осмиофилию с массовым набуханием и распадом органоидов, которые придавали цитоплазме “пенистый” вид. Наибольший отклик на воздействующий фактор отмечен со стороны цитоплазматической сети. Ее цистерны

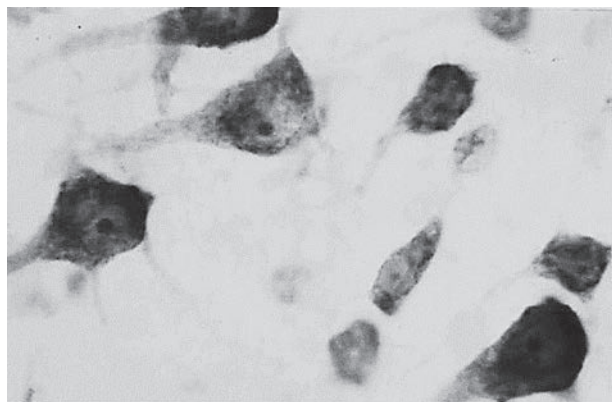


Рис. 3. Лобная кора через 2 ч после общего облучения с ППЭ 300 мВт/см² в течении 2 мин. Преобладают нервные клетки со сниженной функциональной активностью (гиперхромные). Окраска крезилвиолетом по Нисслю, об. 100, ок. 5.

Fig. 3. Frontal cortex 2 hours after total irradiation with 300 MW/cm² PPE for 2 min. Nerve cells with reduced functional activity (hyperchromic) predominate. Cresylviolet painting by Nissl, vol. 100, approx. 5.

неравномерно набухали, она теряла ориентацию и лишалась рибосом. Встречались участки распада цистерн с формированием гетероморфных вакуолей и мембранных комплексов. На этом фоне наблюдались и признаки ее репарации из наружной мембраны кариолеммы в виде выпячиваний с последующим отделением в цитоплазму. Постоянно встречались темные нейроны с лизосомами различной степени зрелости. Прослеживалась также тенденция к сближению глии с нейронами. Большинство межнейрональных контактов не изменялись, но среди их популяции встречались синапсы с альтерацией по светлому, а при общем облучении — еще и по темному типу. Встречались межнейрональные контакты с набухшим претерминальным отделом и гетероморфным состоянием синаптических везикул. Последние могли быть “склеены” и располагаться как на пресинаптической мембране, так и в центре претерминали. Наблюдались также синапсы с признаками альтерации в постсинаптическом отделе и шипиковом аппарате. При этом их аксональная часть выглядела расширенной и была переполнена везикулами. При общем облучении, кроме альтерации по светлому типу, встречались синапсы с дегенерацией по темному типу. В ряде случаев претерминали были набухшими, местами утрачивали целостность как пресинаптической, так и постсинаптической мембраны. Синаптическая щель нередко

была заполнена осмиофильным материалом, а активные зоны мембран имели сниженную информативность.

Состояние микроциркуляторного русла в целом соответствовало таковому в предшествующем сроке наблюдения. Микрососуды были неравномерно расширены и местами переполнены форменными элементами крови. При общем облучении встречались участки стаза форменных элементов, а также суженные капилляры — как за счет набухания цитоплазмы, так и ядер эндотелия. Постоянно встречались локальные очаги периваскулярного отека за счет набухания и распада отростков астроцитов. При облучении головы значимые изменения эндотелия и базальной мембраны капилляров не выявлялись. Периваскулярная астроцитарная муфта местами выглядела набухшей с признаками формирующихся локальных отеков.

Через 72 ч после электромагнитного облучения в лобной коре функционально значимых нейроморфологических изменений практически не выявлялось. В основном наблюдались нервные клетки с просветленной цитоплазмой, бледно окрашенным ядром, складчатой кариолеммой и смещенным на периферию ядрышком. В цитоплазме выявлялась мелкочаеистая вакуолизация, а иногда и крупные вакуоли. Встречались гипохромные нейроны, в перикарионе которых наблюдались лишь частично сохраненные глыбки базофильного вещества. Изредка встречались пикноморфные нервные клетки и клетки-тени. Содержание в нейронах белка, РНК и активность изученных ферментов соответствовали таковым в контроле. Объем ядер малых пирамидных нейронов III слоя лобной коры не отличался от исходного уровня, а у больших пирамидных нейронов V слоя он оставался сниженным, что свидетельствовало об их функциональной недостаточности.

Ультраструктурное исследование выявило в цитоплазме нервных клеток неравномерно расширенные цистерны цитоплазматической сети и митохондрии с просветленным матриксом, а также большое количество лизосом в зоне аппарата Гольджи. В последнем наблюдалась трансформация ламеллярных структур в везикулярные, что при световой микроскопии имело вид мелкочаеистой вакуолизации цитоплазмы. Большинство межнейрональных контактов сохраняли обычную структурную организацию, но встречались синапсы с различными альтеративными изменениями. В периваскулярной

и перичеселлюлярной зонах сохранялись остатки распавшихся астроцитов и очагов локального отека мозга.

Увеличение энергетической экспозиции до 4 и 6 мин при общем воздействии приводило к гибели животных “под лучом” или сразу после окончания облучения. При парциальном облучении головы не наблюдалось изменений количества нервных клеток с функциональными изменениями, а статистически значимо увеличивалось количество нейронов с альтерацией по типу коагуляционного некроза (пикноморфные нейроны). Особенно заметно изменялись аргентофильные свойства отростков нейронов. Наряду с участками гипо- и гипераргентофилии выявлялись участки осевых цилиндров с неровными контурами, наплывами нейроплазмы и зернистым распадом. Миелиновые оболочки неравномерно окрашивались по Вейгерт–Палю и имели неровные контуры, но очагов дегенерации миелина не встречалось. Наблюдалось усиление реакции при выявлении в нейронах общего белка, а нередко продукты реакции образовывали в цитоплазме грубые гетерогенные гранулы и их конгломераты, делая неразличимыми границы ядра и перикариона. Примечательно, что при данных режимах электромагнитного облучения ядра нервных клеток утратили способность реагировать на микроволновое воздействие изменением своего функционального состояния.

На ультраструктурном уровне изменения были более выраженными, чем при экспозиции 2 мин. Значительное количество нейронов имело повышенную осмиофилию ядра и цитоплазмы с дегенерирующими органеллами. Выявлялись нейроны с кариопикнозом и гомогенизированной цитоплазмой. Среди органоидов наибольшие изменения отмечались со стороны цитоплазматической сети. Она набухала, утрачивала рибосомы и фрагментировалась с образованием различных вакуолей или закручивалась в миелиноподобные мембранные комплексы. Митохондрии еще не успевали, видимо, среагировать на воздействующий фактор, так как большинство их имели обычное строение. Наиболее существенные изменения, способные нарушать интегративную деятельность нервных клеток, выявлялись со стороны синапсов. Их изменения происходили, как правило, по светлomu типу. При этом наблюдалось набухание с просветлением аксональной части синапсов, уменьшение в них количества везикул и гипертрофия прилежащей астроцитарной нейроглии. Нередко

наблюдалось снижение информативности и нарушение целостности активных зон мембран пресинаптических отделов. В отдельных участках средних слоев коры наблюдалась массовая дегенерация синапсов. Гипертрофия астроцитов встречалась не только вокруг распадающихся синапсов, но и вокруг нервных клеток и структур микроциркуляторного русла с формированием локальных очагов периваскулярных и перичеселлюлярных отеков. Микроциркуляторное русло было неравномерно расширено и переполнено форменными элементами крови. Эндотелий капилляров выглядел набухшим, содержал распадающиеся ультраструктуры и умеренное количество пиноцитозных везикул. Плотные контакты эндотелиоцитов сохраняли обычную ультраструктурную организацию. Наблюдалось достаточно выраженное набухание и распад астроцитов с формированием очагов перичеселлюлярного и периваскулярного отека, распространяющихся на нейропил (рис. 4).

Таким образом, нейроны лобной коры головного мозга отличались как высокой реактивностью, так и пластичностью к электромагнитному фактору. Наибольший отклик выявлен со стороны структур белоксинтезирующей системы, а также межнейрональных контактов. Через 72 ч после воздействия изменения выявлялись лишь на ультраструктурном уровне в виде фрагментов распавшихся органелл, скопления лизосом различной степени зрелости, а также локальных очагов периваскулярного и перичеселлюлярного отека. Увеличение энергетической экспозиции при общем облучении приводило к гибели животных практически “под лучом”, а при парциальном воздействии вызывало выраженную альтерацию нейронов, нейроглии, синапсов и структур гематоэнцефалического барьера с формированием обширных периваскулярных и перичеселлюлярных отеков мозга и неблагоприятным прогнозом для жизни.

При хроническом электромагнитном облучении (ППЭ = 300 мВт/см², длина волны 12.6 см и экспозицией на уровне “нулевого эффекта”, т.е. 52 с для мышей, 2 мин для крыс и 3 мин для собак) существенных отклонений функциональных и лабораторных показателей от аналогичных у контрольной группы животных не установлено. При морфологическом исследовании мышей подвергшихся 30-разовому воздействию микроволнами большинство нейронов лобной коры (76%) сохраняли обычную структурно-функциональную организацию. На

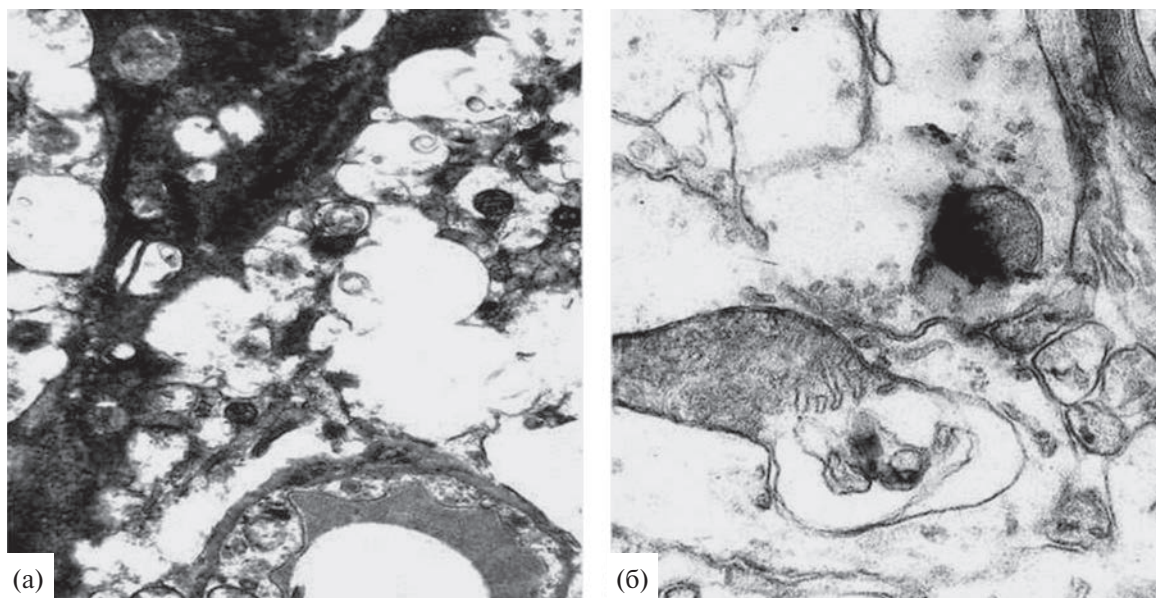


Рис. 4. Лобная кора крысы после облучения головы с ППЭ 300 м/Вт/см² в течение 6 мин. (а) — фрагментация пикноморфного нейрона. Неравномерное набухание эндотелия капилляра с распадом ультраструктур. Набухание и распад отростков астроцитов с формированием отека мозга. Электронограмма, $\times 16\ 000$; (б) — нейропил. Дегенерация синапсов по светлomu типу. Электронограмма, $\times 40\ 000$.

Fig. 4. The frontal cortex of a rat after irradiation of the head with a PPE of 300 m/W/cm² for 6 min. (a) — fragmentation of the pycnomorphic neuron. Uneven swelling of capillary endothelium with disintegration of ultrastructures. Swelling and decay of astrocyte processes with the formation of cerebral edema. Electronogram, $\times 16\ 000$; (b) — neuropile. Degeneration of synapses according to the light type. Electronogram, $\times 40\ 000$.

этом фоне встречались нервные клетки с различными видами хроматолиза и вакуолизацией цитоплазмы, а также гиперхромные и пикноморфные нейроны. Отростки нервных клеток и их миелиновые оболочки были не изменены. Наблюдалось статистически значимое снижение объема ядер в нейронах ($p < 0.01$) со смещением вариационной кривой их распределения по классам логарифмов влево, что свидетельствовало о снижении их функциональной активности. Нервно-клеточный индекс по отношению к контролю был статистически значимо снижен, что свидетельствовало о гибели части нейронов, но без статистически значимого снижения их количества на площади коры.

Электронно-микроскопические исследования выявили признаки нарушения ультраструктурной организации у достаточно большого количества нервных клеток. Изменения затрагивали практически все компоненты нейронов, но больше они были выражены со стороны белоксинтезирующей и энергетической систем. В ряде нейронов гранулярная цитоплазматическая сеть была расширена и местами лишена рибосом. Ядра были уменьшены в объеме,

имели складчатый контур кариолеммы с конденсированным на внутренней поверхности хроматином. Митохондрии имели просветленный матрикс, а нередко и распавшиеся кристы. Встречались и мелкие с уплотненным матриксом, а также практически не измененные митохондрии. Наблюдалась очаги внутриклеточной альтерации, представляющие собой продукты распада органоидов: митохондрий, цитоплазматической сети и пластинчатого комплекса Гольджи. Как правило, рядом с такими очагами находились лизосомы различной степени зрелости (рис. 5).

При 60-разовом электромагнитном облучении мышей состояние нейронов лобной коры по сравнению с 30-разовым воздействием практически не изменялось. Отмечалось лишь статистически значимое увеличение объема ядер нейронов, что свидетельствовало о повышении их функциональной активности. При ультраструктурном исследовании большинство нейронов имели ядра со слабо выраженной складчатостью кариолеммы, а иногда с выпячиванием наружной мембраны и отделением в цитоплазму цистерн цитоплазматической сети. В перикарионе выявлялось

достаточно большое количество органоидов, особенно рибосом, как свободных, так и связанных с цитоплазматической сетью. Значительное число митохондрий имели плотно упакованные кристы, но иногда встречались митохондрии с просветленным матриксом и разрушенной внутренней мембраной. В отдельных нейронах выявлялись скопления лизосом и фагосом. Наряду с деструктивными изменениями в нейронах наблюдались признаки приспособительно-компенсаторного характера в виде увеличения объема ядер и количества органоидов, особенно белоксинтезирующего профилля.

После 90-разового микроволнового облучения мышей морфология большинства (70.7%) нейронов лобной коры не была изменена. Однако было увеличено количество нервных клеток с повышенной функциональной активностью (гипохромные). Хроматолиз нейронов имел диффузный характер и сочетался с гетероморфной вакуолизацией перикариона. Набухшие отростки таких нейронов прослеживались на значительном расстоянии. Несмотря на то что количество пикноморфных клеток и клеток-теней при данном воздействии было статистически незначимым, величина нервно-клеточного индекса была снижена как по отношению к контролю, так и предшествующим экспериментальным группам (табл. 2).

Ультраструктура большинства нейронов характеризовалась умеренной электронной плотностью ядра и цитоплазмы. Встречались и осмиофильные нервные клетки, ядра которых имели извитые контуры кариолеммы с конденсированными на ее внутренней поверхности глыбками хроматина. В перикарионе располагались многочисленные рибосомы и полисомы, а также митохондрии с плотным или просветленным

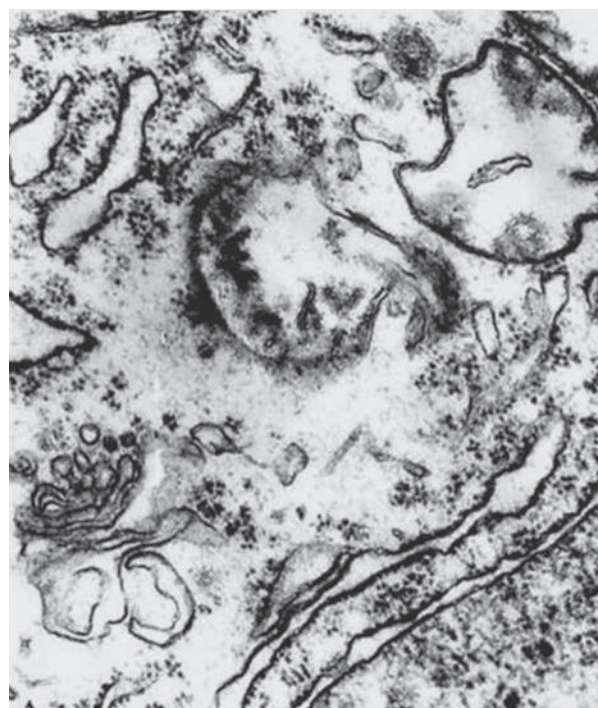


Рис. 5. Лобная кора мыши после 30-разового микроволнового облучения. Фрагмент нейрона коры с набуханием и распадом ультраструктур. Электроннограмма, $\times 31\,000$.

Fig. 5. Mouse frontal cortex after 30-time microwave irradiation. A fragment of a cortical neuron with swelling and disintegration of ultrastructures. Electronogram, $\times 31\,000$.

матриксом. Выявлялись клетки с аутофагическими вакуолями и скоплением лизосом.

Таким образом, с возрастанием экспозиции электромагнитного воздействия у мышей наблюдалась тенденция к снижению функциональной активности ядер нервных клеток, увеличению количества нейронов с альтерацией и обеднению нейронной популяции лобной коры.

Таблица 2. Структурно-функциональное состояние нейронов лобной коры животных после 90-разового электромагнитного облучения, % к контролю

Table 2. Structural and functional state of neurons of the frontal cortex of animals after 90-time electromagnetic irradiation as a percentage of control

Экспериментальные животные	Объем ядер нейронов	Типы нейронов				Нервно-клеточный индекс
		нормохромные	гипохромные	гиперхромные	деструктивные	
мыши	70.5*	86.9*	155.9*	109.4	270.4*	66.9*
крысы	91.6	97.4	100.8	121.6*	140.3*	91.7
собаки	86.9*	95.3	111.2	119.5*	128.6*	92.3

После 30-разового электромагнитного облучения крыс большинство нейронов сохраняли обычную структурную организацию, но достаточно большое их количество имели различные изменения. В цитоплазме таких нейронов выявлялись различные виды хроматолиза и вакуолей, ядра были смещены на периферию, имели неровные контуры и эксцентрично расположенное ядрышко. Реже встречались гиперхромные и пикноморфные нейроны. Нервно-клеточный индекс имел тенденцию к снижению. Кариометрические показатели практически соответствовали контролю. При ультраструктурном исследовании большинство нейронов имели повышенную электронную плотность как цитоплазмы, так и ядра. В перикарионе таких клеток отмечалось увеличение числа рибосом и полисом, как свободных, так и связанных с мембранами цитоплазматической сети. Ядра содержали достаточно большое количество хроматина, уплотненные глыбки которого конденсировались на внутренней поверхности кариолеммы. В ряде случаев митохондрии имели просветленный матрикс и частично разрушенные кристы. Встречались различной степени зрелости лизосомы, а также их очаговые скопления. У некоторых клеток плотность цитоплазматического матрикса была снижена за счет обеднения ультраструктурами. Иногда встречались пикноморфные нейроны, в перикарионе которых наблюдалось набухание митохондрий и цистерн цитоплазматической сети. В целом после 30-разового воздействия микроволнами в нейронах выявлены незначительные морфологические изменения в основном функционального характера.

После 60-разового электромагнитного воздействия в лобной коре крыс выявлялись различные по характеру и степени выраженности изменения нейронов. В цитоплазме ряда нервных клеток наблюдался хроматолиз базофильного вещества и реже — гетероморфные вакуоли. Ядра в гиперхромных нейронах были бледно окрашены, смещены на периферию, а их границы имели неровные контуры. Отростки таких клеток имели извилистый ход и выявлялись на значительном расстоянии. Реже встречались гипохромные нервные клетки, для которых характерно наличие периферического хроматолиза в сочетании с вакуолизацией. Количество нейронов с альтерацией имело тенденцию к увеличению. Выявлено также значимое снижение объема ядер и нервно-клеточного индекса. Это

свидетельствовало о снижении функциональной активности и гибели части нервных клеток.

При электронно-микроскопическом исследовании на фоне обычных нейронов встречались клетки с массовым распадом ультраструктур, пикноморфные клетки, а также формирующиеся очаги периваскулярного отека. Аксональные отделы ряда синапсов были набухшими и содержали небольшое количество везикул в области активной зоны мембран или в центре синаптической претерминали.

После 90-разового облучения на фоне основной массы неизмененных нервных клеток выявлялись нейроны с неравномерным распределением базофильного вещества в перикарионе, а также гиперхромные и пикноморфные нейроны. Объем ядер нейронов и нервно-клеточный индекс по сравнению с 60-разовым облучением увеличивались и практически соответствовали контролю. Электронно-микроскопическое исследование выявило в перикарионе увеличение содержания свободных рибосом и полисом, умеренное расширение цистерн цитоплазматической сети и просветление матрикса у части митохондрий. Наблюдалась достаточно выраженная складчатость ядерной оболочки. Осмиофильное ядрышко часто располагалось у внутренней поверхности кариолеммы и наблюдался выход из него гранул рибонуклеопротеидов. В некоторых нейронах, обедненных ультраструктурами, в цитоплазме наблюдались очаги локальной дегенерации ультраструктур и скопление формирующихся лизосом (рис. 6).

Большинство синапсов сохраняли обычное строение, но достаточно большое их количество имели признаки функционального напряжения. В целом после 90-разового воздействия микроволнами отмечалось уменьшение количества измененных структур нейронов и признаки компенсаторного характера. Ультраструктурные исследования свидетельствовали об увеличении числа рибосом и полисом, просветлении матрикса части митохондрий, умеренном расширении цистерн цитоплазматической сети.

Морфологическая картина большинства нейронов лобной коры собак после 90-разового микроволнового воздействия не имела функционально значимых изменений. На этом фоне встречались нейроны с очагами хроматолиза базофильного вещества, вакуолизацией и набуханием цитоплазмы, а также отростков. Ядра нейронов были смещены на периферию и имели неровные

контуры. Встречались также гиперхромные и пикномофные нервные клетки. Содержание в нейронах общего белка и цитоплазматической РНК соответствовало таковому у контрольных животных. Объем ядер нейронов и нервно-клеточный индекс имели тенденцию к снижению.

Электронно-микроскопические исследования показали, что структурная организация клеточных элементов и нейропиля лобной коры собак не имела значимых морфологических изменений. Вместе с тем типичной реакцией нейронов на длительное микроволновое облучение являлось увеличение количества осмиофильных нейронов, которые при светооптическом исследовании выглядели гиперхромными за счет повышенного содержания рибонуклеопротеидов. В цитоплазме таких нейронов постоянно наблюдалась мелкоячеистая вакуолизация, а отходящие отростки имели повышенную электронную плотность и прослеживались на значительном расстоянии. В осмиофильных нейронах наблюдалось расширение перинуклеарного пространства, элементов цитоплазматической сети, набухание митохондрий и гетероморфная мелкоячеистая вакуолизация. Заметно было увеличено количество глиальных клеток, контактирующих с нейронами, причем в зоне контакта каких-либо морфологических изменений не выявлялось. Следует отметить и лизосомальную реакцию, которая выявлялась как в нервных клетках, так и в нейропиле.

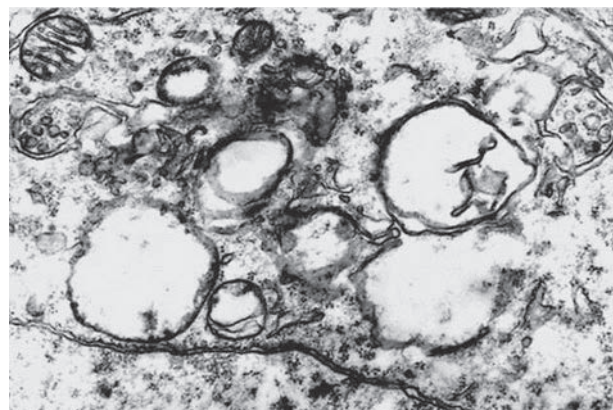


Рис. 6. Лобная кора крысы после 90-разового микроволнового облучения. Набухание и распад ультраструктур и формирование лизосом в светлом нейроне. Электронограмма, $\times 24\ 000$.

Fig. 6. The frontal cortex of a rat after 90-time microwave irradiation. Swelling and disintegration of ultrastructures and the formation of lysosomes in a light neuron. Electronogram, $\times 24\ 000$.

В отдельных нейронах наблюдалось увеличение количества лизосом, которые, сливаясь с разрушенными митохондриями, образовывали аутофагосомы. В нейропиле лизосомы обычно локализовались в периваскулярной зоне (рис. 7).

У специализированных элементов нейронов (нейротрубочки, нейрофиламенты, синапсы)

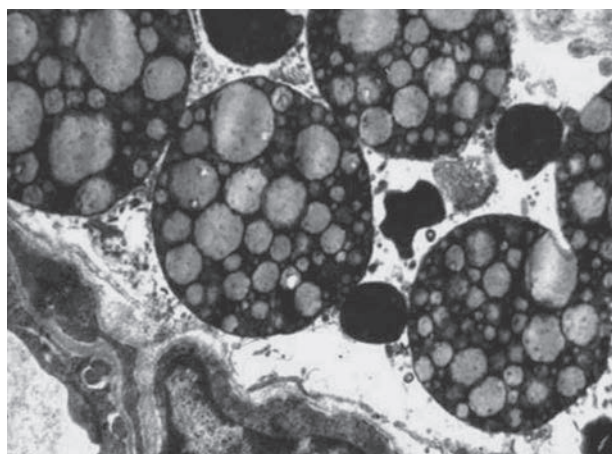


Рис. 7. Лобная кора собак после 90-разового микроволнового воздействия. Дегенерация стенки капилляра, скопление лизосом и фагосом в периваскулярной зоне. Электронограмма $\times 17\ 000$.

Fig. 7. Frontal cortex of dogs after 90-time microwave exposure. Degeneration of the capillary wall, accumulation of lysosomes and phagosomes in the perivascular zone. Electronogram $\times 17\ 000$.

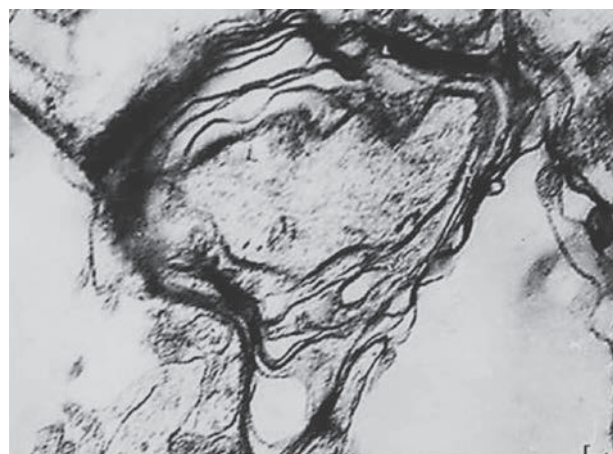


Рис. 8. Лобная кора собаки после 90-разового микроволнового воздействия. Поперечный срез нервного волокна. Отек и расслоение миелиновой оболочки. Электронограмма, $\times 27\ 000$.

Fig. 8. Frontal cortex of dogs after 90-time microwave exposure. A cross section of a nerve fiber. Swelling and dissection of the myelin sheath. Electronogram, $\times 27\ 000$.

функционально значимые изменения практически не выявлялись. Однако у некоторых отростков нервных клеток отмечалось набухание и дезорганизация миелиновой оболочки (рис. 8).

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования подтвердили более ранние данные о высокой морфофункциональной реактивности, а также компенсаторных возможностях у нейронов коры больших полушарий головного мозга при воздействии различных режимов электромагнитного излучения [9, 33–37]. При остром облучении выраженность изменений возрастала с увеличением интенсивности электромагнитного воздействия и площади облучаемой поверхности тела. Наибольшую чувствительность к рассматриваемому фактору демонстрировали структуры нейронов, связанные с экспрессией белка (ядра, ядрышки и цитоплазматическая сеть). Значительное место в патоморфологической картине занимало также изменение структур межнейрональной интеграции, что подтверждает данные ряда исследователей о патологических изменениях синапсов при микроволновом воздействии [9, 30–32, 38]. Одним из критериев функционального состояния нейронов при электромагнитном облучении, поддающихся математическому анализу, являлся объем ядер нервных клеток. Установлено, что при парциальном облучении головы ядра нейронов набухали, а с увеличением времени воздействия становились однородными по объему. При общем равномерном облучении объем ядер значительно снижался. При увеличении энергетической экспозиции ядра нервных клеток утрачивали способность реагировать на воздействующий фактор изменением своего объема.

Гистохимические исследования показали, что изученные ферментные системы нервных клеток не играют значимой роли в их реакции на микроволновое излучение. При больших энергетических экспозициях наблюдался распад мембранных структур нервных клеток, денатурация белка, расстройство микроциркуляции и отек мозга, которые нарастали с увеличением облучаемой массы тела и при общем облучении приводили к гибели животных практически “под лучом”.

При хроническом микроволновом воздействии в лобной коре мышей, крыс и собак, наряду с неспецифическими функциональными и альтеративными изменениями, абсолютное

большинство нервных клеток сохраняли свою структурно-функциональную организацию. Встречающиеся изменения были, как правило, обратимыми, имели волнообразный характер и были более выражены у мышей после 30- и 90-, а у крыс — после 60-разового воздействия. Отклик нейронов на микроволновое воздействие имел видовые особенности и находился в обратной зависимости от массы тела животного. Наиболее чувствительными оказались нейроны лобной коры мышей, более резистентными они были у крыс и наименьшей чувствительностью к рассматриваемому фактору отличались нейроны собак. При этом функциональная активность ядер нейронов во всех случаях была снижена.

В ряде случаев, независимо от режима воздействия микроволн, нейроморфологические изменения имели пограничный характер, когда они уже не являлись нормой и в тоже время еще и не являлись патологией. Хотя уровень значимости таких изменений колебался по отношению к контролю в функционально незначимых пределах, их наличие свидетельствовало о нестабильности структурно-функциональной организации нервных клеток и напряженности их функционирования. С течением времени изменения нервных клеток репарировались, но какая-то их часть оставалась нерепарируемой и, накапливаясь, приводила к отдельным экстремумам в восстановительном периоде. Такие волнообразные изменения показателей состояния нейронов, особенно на фоне других вредных и опасных факторов среды, могут служить материальным субстратом для развития более выраженных нарушений деятельности нервной системы.

В свете последних данных о способности микроволнового излучения вызывать в головном мозге различные новообразования [5, 7, 19, 24, 26] привлекает внимание рост новых тончайших нервных волокон из наплывов нейроплазмы по ходу осевых цилиндров отростков нейронов при хроническом электромагнитном облучении. Раньше это явление, особенно в периферических нервных образованиях, отмечали и другие исследователи [9, 29, 31].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали высокую чувствительность, а также хорошие компенсаторные возможности нейронов коры головного мозга как при остром, так и хроническом электромагнитном облучении. В восстановительном

периоде большинство морфологических изменений репарировались, а оставшиеся свидетельствовали о функциональном напряжении нейронов, синапсов и микроциркуляторного русла. При высоких энергетических экспозициях изменения становились более выраженными и нарастали с увеличением площади облучаемой поверхности. А при общем облучении (ППЭ 300 мВт/см², экспозиция 4 и 6 мин) наблюдалась гибель животных практически “под лучом”. Гистопатологические исследования выявили распад мембранных структур и денатурацию белковых молекул нервных клеток, синапсов, выраженное нарушение кровообращения с нарастающим отеком мозга и неблагоприятным прогнозом для жизни. При пролонгированном микроволновом воздействии у мышей, крыс и собак, наряду с неспецифическими функциональными и деструктивными изменениями, большинство нейронов не изменялись. Встречающиеся изменения были, как правило, обратимыми, имели волнообразный характер и были более выражены у мышей после 30- и 90-, а у крыс — после 60-разового воздействия. У собак длительное микроволновое облучение не вызывало значимых изменений в структурно-функциональной организации лобной коры.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена без целевого финансирования

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ушаков Игорь Борисович, ORCID 0000-0002-0270-8622, доктор медицинских наук, профессор, академик РАН и РАМН, главный научный сотрудник ГНЦ РФ — Федерального медицинского биофизического центра им. А.И. Бурназяна ФМБА России.

123098, г. Москва, ул. Живописная, д. 46.

Электронная почта: Fmbc@fmbamail.ru

Ushakov Igor Borisovich, ORCID 0000-0002-0270-8622, Doctor of Medical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences and the Russian Academy of Medical Sciences, Chief Researcher of the Scientific Research Center of the Russian Federation — A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center of the FMBA of Russia.

46 Zhivopisnaya Street, Moscow, 123098.

E-mail: Fmbc@fmbamail.ru

Федоров Владимир Петрович, ORCID iD 0000-0001-6136-5861, доктор медицинских наук, профессор Воронежской государственной академии спорта.

394000, г. Воронеж, ул. Карла Маркса 59.

Электронная почта: vgifk@vmail.ru.

Fedorov Vladimir Petrovich, ORCID iD 0000-0001-6136-5861, Doctor of Medical Sciences, Professor Voronezh State Academy of Sports.

59 Karl Marx Street, Voronezh, 394000.

E-mail: vgifk@vmail.ru .

Давыдов Борис Ильич, доктор медицинских наук, профессор Государственный научный исследовательский испытательный институт авиационной и космической медицины.

Умер

Davydov Boris Ilyich, Doctor of Medical Sciences, Professor State Scientific Research and Testing Institute of Aviation and Space Medicine.

Died.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеева В.А., Григорьев О.А., Прокофьева А.С., Гошин М.Е. История научных конференций по электромагнитной биологии, радиобиологии и гигиене неионизирующих излучений в России. В кн.: Актуальные вопросы радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений: Доклады Всероссийской научной конференции. Москва, 2019. М.: РНКЗНИ, 2019. С. 178–182. [Grigoriev O.A., Prokofiev A.S., Goshin M.E. Istoriya nauchnyh konferencij po elektromagnitnoj biologii, radiobiologii i gigiene neioniziruyushchih izluchenij v Rossii = History of scientific conferences on electromagnetic biology, radiobiology and hygiene of non-ionizing radiation in Russia. In: Topical issues of radiobiology and hygiene of non-ionizing radiation: Reports of the All-Russian Scientific Conference. Moscow, 2019. M: RNKZNI, 2019. P. 178–182. (In Russ.)]
2. Антипов В.В., Давыдов Б.И., Тихончук В.С. Биологическое действие электромагнитных излучений микроволнового диапазона. М.: Наука, 1980.

- 221 с. [Antipov V.V., Davydov B.I., Tikhonchuk V.S. Biologicheskoe dejstvie elektromagnitnyh izluchenij mikrovolnovogo diapazona = Biological effect of electromagnetic radiation in the microwave range. M.: Nauka, 1980. V. 40. 221 p. (In Russ.)]
3. Воронцова З.А., Ушаков И.Б., Хадарцев А.А., Есауленко И.Э., Гонтарев С.Н. Морфофункциональные соотношения при воздействии импульсных электромагнитных полей. Тула: ТулГУ, 2012. 368 с. [Vorontsova Z.A., Ushakov I.B., Khadartsev A.A., Esaulenko I.E., Gontarev S.N. Morfofunkcional'nye sootnosheniya pri vozdeystvii impul'snyh elektromagnitnyh polej = Morphofunctional relations under the influence of pulsed electromagnetic fields. Tula: TulSU, 2012. 368 p. (In Russ.)]
 4. Григорьев О.А., Меркулов А.В., Григорьев К.А. Электромагнитные поля базовых станций подвижной радиосвязи и экология. Характеристика и оценка электромагнитной обстановки вокруг базовых станций подвижной радиосвязи. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2005;45(6):722–725. [Grigoriev O.A., Merkulov A.V., Grigoriev K.A. Electromagnetic fields of mobile radio base stations and ecology. Characterization and evaluation of the electromagnetic environment around mobile radio base stations. *Radiation biology. Radioecology*. 2005; 45(6):722–725. (In Russ.)]
 5. Григорьев Ю.Г. Человек в электромагнитном поле (существующая ситуация, ожидаемые биоэффекты и оценка опасности). *Радиационная биология. Радиоэкология*. 1997;37(4):690–702. [Grigoriev Yu.G. A man in an electromagnetic field (the current situation, expected bioeffects and hazard assessment). *Radiation Biology. Radioecology*. 1997;37(4):690–702. (In Russ.)]
 6. Григорьев О.А. Актуальные вопросы радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений в связи с развитием новых технологий. В кн.: Актуальные вопросы радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений: Докл. Всерос. науч. конф., Москва, 2019. М.: РНКЗНИ, 2019. С. 104–109. [Grigoriev O.A. Aktual'nye voprosy radiobiologii i gigieny neoiniziruyushchih izluchenij v svyazi s razvitiem novyh tekhnologij = Topical issues of radiobiology and hygiene of non-ionizing radiation in connection with the development of new technologies. In: Topical issues of radiobiology and hygiene of non-ionizing radiation: Reports of the All-Russian Scientific Conference. Moscow, 2019. M: RNKZNI, 2019. P. 104–109. (In Russ.)]
 7. Григорьев Ю.Г., Григорьев О.А. Сотовая связь и здоровье: электромагнитная обстановка, радиобиологические и гигиенические проблемы, прогноз опасности. М.: Экономика, 2016. 574 с. [Grigoriev Yu.G., Grigoriev O.A. Sotovaya svyaz' i zdorov'e: elektromagnitnaya obstanovka, radiobiologicheskie i gigienicheskie problemy, prognoz opasnosti = Cellular communication and health: electromagnetic environment, radiobiological and hygienic problems, hazard forecast. Moscow: Ekonomika, 2016. 574 p. (In Russ.)]
 8. Григорьев Ю.Г. Значимость адекватной информации об опасности ЭМП сотовой связи для здоровья населения в 21 веке. В кн.: Актуальные вопросы радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений: Докл. Всерос. науч. конф. Москва, 2019. М.: РНКЗНИ, 2019. С. 22–25. [Grigoriev Yu.G. Znachimost' adekvatnoj informacii ob opasnosti EMP sotovoj svyazi dlya zdorov'ya naseleniya v 21 veke = The importance of adequate information about the dangers of cellular EMF for public health in the 21st century. In: Topical issues of radiobiology and hygiene of non-ionizing radiation: Reports of the All-Russian Scientific Conference. Moscow, 2019. M: RNKZNI, 2019. P. 22–25. (In Russ.)]
 9. Ушаков И.Б., Федоров В.П., Зуев В.Г. Нейроморфологические эффекты электромагнитных излучений. Воронеж: Центрально-Черноземное книжное изд-во, 2007. 287 с. [Ushakov I.B., Fedorov V.P., Zuev V.G. Nejromorfologicheskie efekty elektromagnitnyh izluchenij = Neuromorphological effects of electromagnetic radiation. Voronezh: Central Chernozem Book Publishing House, 2007. 287 p. (In Russ.)]
 10. Городничев Р.М., Петров Д.А., Фомин Р.Н. Магнитная стимуляция головного мозга как новый метод диагностики функционального состояния двигательной системы спортсменов. *Теория и практика физической культуры*. 2006;(1):2–5. [Gorodnichev R.M., Petrov D.A., Fomin R.N. Magnitnaya stimulyaciya golovnogogo mozga kak novyj metod diagnostiki funkcional'nogo sostoyaniya dvigatel'noj sistemy sportsmenov = Magnetic stimulation of the brain as a new method of diagnosing the functional state of the motor system of athletes. *Theory and Practice of Physical Culture*. 2006;(1):2–5. (In Russ.)]
 11. Городничев Р.М. Стимуляционные воздействия на ЦНС как средство изменения координационной структуры локомоторных движений. В кн.: Ценности, традиции и новации современного спорта: Мат. V Всерос. конф. М.: Малаховка, 2017. С. 23–29. [Gorodnichev R.M. Stimulyacionnye vozdeystviya na CNS kak sredstvo izmeneniya koordinacionnoj struktury lokomotornyh dvizhenij = Stimulating effects on the central nervous system as a means of changing the coordination structure of locomotor movements. In: Values, traditions and innovations of modern sports: materials of the V All-Russian Conference. M.: Malakhovka, 2017. P. 23–29. (In Russ.)]
 12. Холодов Ю.А. Реакции нервной системы на электромагнитные поля. М.: Наука, 1975. 284 с. [Kholodov Yu.A. Reakcii nervnoj sistemy na elektromagnitnye polya = Reactions of the nervous system to electromagnetic fields. M.: Nauka, 1975. 284 p. (In Russ.)]

13. Давыдов Б.И., Тихончук В.С., Антипов В.В. Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений. М.: Энергоатомиздат, 1984. 176 с. [Davydov B.I., Tikhonchuk V.S., Antipov V.V. Biologicheskoe dejstvie, normirovanie i zashchita ot elektromagnitnyh izluchenij=Biological action, rationing and protection from electromagnetic radiation. M.: Energoatomizdat, 1984. 176 p. (In Russ.)]
14. Жаворонков Л.П., Дубовик Б.В., Павлова Л.Н. Влияние модулированного ЭМП низкой интенсивности на общую возбудимость ЦНС. *Радиация и риск*. 2011;20(2):64–74. [Zhavoronkov L.P., Dubovik B.V., Pavlova L.N. Vliyanie modulirovannogo EMP nizkoj intensivnosti na obshchuyu vozбудimost' CNS=The effect of modulated low-intensity EMF on the general excitability of the central nervous system. *Radiation and Risk*. 2011; 20(2): 64–74. (In Russ.)]
15. Лукьянова С.Н. Фундаментальная характеристика реакции нейронов головного мозга на ЭМП нетепловой интенсивности. *Радиация, биология. Радиоэкология*. 2019;59(4):414–429. [Lukyanova S.N. Fundamental'naya harakteristika reakcii nejronov golovnogogo mozga na EMP neteplovoj intensivnosti=Fundamental characteristic of the reaction of brain neurons to EMF of non-thermal intensity. *Radiation Biology. Radioecology*. 2019;59(4):414–429. (In Russ.)]
16. Чиженкова Р.А. Перестройки в деятельности нейронных популяций коры при СВЧ. *Неврол. вестник им. В.М. Бехтерева*. 2007;39(4): 43–47. [Chizhenkova R.A. Perestrojki v deyatel'nosti nejronnyh populyacij kory pri SVCh =Perestroika in the activity of neural populations of the cortex in microwave. *Neurological Bulletin named after V.M. Bekhterev*. 2007; 39(4):43–47. (In Russ.)]
17. Calabro E. Effects of Electromagnetic Fields on Cells and Proteins' Structure. Lambert Academic Publishing, 2012. 300 p.
18. Kim J.H., Sohn U.D., Kim H.G., Kim H.R. Exposure to 835 MHz RF-EMF decreases the expression of calcium channels, inhibits apoptosis, but induces autophagy in the mouse hippocampus. *Korean J. Physiol. Pharmacol*. 2018;22(3):277–289.
19. Григорьев О.А., Зубарев Ю. Б. Действие электромагнитной энергии беспроводной связи на человека: прогнозы роста обусловленной заболеваемости, их реализация и проблемы оценки. *Концепции*. 2022;41(1):3–17. [Grigoriev O.A., Zubarev Yu.B. Dejstvie elektromagnitnoj energii besprovodnoj svyazi na cheloveka: prognozy rosta obuslovlennoj zabolevaemosti, ih realizaciya i problemy ocenki=The effect of electromagnetic energy of wireless communication on a person: forecasts of the growth of conditioned morbidity, their implementation and evaluation problems. *Conceptions*. 2022;41(1):3–17. (In Russ.)]
20. Жаворонков Л.П., Петин В.Г. Количественные критерии микроволнового поражения. М.: ГЕОС, 2018. 232 с. [Zhavoronkov L.P., Petin V.G. Kolichestvennye kriterii mikrovolnovogo porazheniya=Quantitative criteria of microwave damage. M.: GEOS, 2018. 232 p. (In Russ.)]
21. Лукьянова С.Н. Нейроэффекты слабых электромагнитных воздействий (от нейрона к образованиям мозга, ЦНС, организму. В кн.: Актуальные вопросы радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений: Докл. Всерос. науч. конф. Москва, 2019. М.: РНКЗНИ, 2019. С. 26–28. [Lukyanova S.N. Nejroeffekty slabyh elektromagnitnyh vozdeystvij (ot nejrona k obrazovaniyam mozga, CNS, organizmu=Neuroeffects of weak electromagnetic influences (from neuron to brain formations, central nervous system, body. In: Topical issues of radiobiology and hygiene of non-ionizing radiation: Reports of the All-Russian Scientific Conference. Moscow, 2019. M.: RNKZNI, 2019. P. 26–28. (In Russ.)]
22. Bernal-Mondragon C., Arriaga-Avila V., Martinez-Abundis E. et al. Effects of repeated 9 and 30-day exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields on social recognition behavior and estrogen receptors expression in olfactory bulb of Wistar female rats. *Neurol. Res*. 2017;39(2):165–175.
23. Hinrikus H., Bachmann M., Karai D., Lass J. Mechanism of low-level microwave radiation effect on nervous system. *Electromagn. Biol. Med*. 2017; 36(2):202–212.
24. Barthelemy A., Mouchard A., Bouji M. et al. Glial markers and emotional memory in rats following acute cerebral EMF exposures. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int*. 2016;23(24):25343–25355.
25. Hardell L., Carlberg M. Lost opportunities for cancer prevention: historical evidence on early warnings with emphasis on radiofrequency radiation. *Rev. Environ. Health*. 2021; <https://doi.org/10.1515/reveh-2020-0168>. published online February 15, 2021.
26. Carlberg M. and Hardell L. Review Article Evaluation of Mobile Phone and Cordless Phone Use and Glioma Risk Using the Bradford Hill Viewpoints from 1965 on Association or Causation. *Hindawi BioMed Res. Int. Vol*. 2017. Article ID 9218486, 17 pages.
27. Баркин В.В., Буянов Л.С., Лопаткина Н.В. Влияние на моторную функцию крыс низкоинтенсивного импульсно-моделированного электромагнитного излучения при различных схемах воздействия. В кн.: Человек и электромагнитные поля: Сб. докл. V Междунар. конф. Саров: ФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ”, 2017. С. 75–84. [Barkin V.V., Buyanov L.S., Lopatkina N.V. Vliyanie na motornuyu funkciyu krys nizkointensivnogo impul'sno-modelirovannogo elektromagnitnogo izlucheniya pri razlichnyh skemah vozdeystviya=Influence of low-intensity pulse-modulated electromagnetic radiation on the motor function of rats under various exposure schemes. In: Man and electromagnetic fields: Collection of reports of the V International

- Conference. Sarov: FSUE "RFNC-VNIIEF", 2017. P. 75–84. (In Russ.)]
28. Зуев В.Г., Ушаков И.Б. Экспериментальное изучение эффектов острого неравномерного микроволнового облучения. *Мед. радиология*. 1984;29(12): 46–49. [Zuev V.G., Ushakov I.B. Eksperimental'noe izuchenie effektivov ostrogo neravnomernogo mikrovolnovogo oblucheniya=Experimental study of the effects of acute uneven microwave irradiation. *Medical Radiology*. 1984;29(12):46–49. (In Russ.)]
 29. Лукьянова С.Н. ЭМП СВЧ диапазона нетепловой интенсивности как раздражитель для ЦНС. М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна, 2015. 200 с. [Lukyanova S.N. EMP SVCh diapazona neteplovoj intensivnosti kak razdrazhitel' dlya CNS =EMF of the microwave range of non-thermal intensity as an irritant for the Central Nervous System M.: A. I. Burnazyan Federal State Budgetary Research Center, 2015. 200 p. (In Russ.)]
 30. Пахунова Л.В. Влияние СВЧ-поля на некоторые отделы центральной и периферической нервной системы экспериментальных животных: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1987. [Pakhunova L.V. Vliyanie SVCh-polya na nekotorye otdely central'noj i perifericheskoy nervnoj sistemy eksperimental'nyh zhivotnyh =The effect of the microwave field on some parts of the central and peripheral nervous system of experimental animals: Avtoref. dis cand. biol. nauk = Abstract of the dissertation ... cand. Biol. Sci. M., 1987. (In Russ.)]
 31. Трухачев А.Н., Зуев В.Г., Федоров В.П. Морфофункциональное состояние коры головного мозга в условиях неравномерного электромагнитного излучения. В кн.: Актуальные вопросы функциональной межполушарной асимметрии и нейропластичности: Мат. Всерос. науч. конф. М.: Научный мир, 2008. С. 537–542. [Trukhachev A.N., Zuev V.G., Fedorov V.P. Morfofunkcional'noe sostoyanie kory golovnogo mozga v usloviyah neravnomernogo elektromagnitnogo izlucheniya=Morpho-functional state of the cerebral cortex in conditions of uneven electromagnetic radiation. In: Topical issues of functional hemispheric asymmetry and neuroplasticity: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference. Moscow: Scientific World, 2008. P. 537–542. (In Russ.)]
 32. Ушаков И.Б., Федоров В.П. Церебральные эффекты хронических электромагнитных излучений. В кн.: Человек и электромагнитные поля: Сб. докл. V Междунар. конф. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2017. С. 37–47. [Ushakov I.B., Fedorov V.P. Cerebral'nye efekty hronicheskikh elektromagnitnyh izlucheniij=Cerebral effects of chronic electromagnetic radiation. In: Man and electromagnetic fields: Collection of reports of the V International Conference. Sarov: FSUE "RFNC-VNIIEF", 2017. P. 37–47. (In Russ.)]
 33. Федоров В.П., Ушаков И.Б., Гундарова О.П. Изменения нейронов коры головного мозга при остром неравномерном электромагнитном облучении. В кн.: Актуальные вопросы радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений: Сб. докл. Всерос. науч. конф. Москва, 2019. М.: РНКЗНИ, 2019. С. 91–94. [Fedorov V.P., Ushakov I.B., Gundarova O.P. Izmeneniya nejronov kory golovnogo mozga pri ostrom neravnomernom elektromagnitnom oblucheniij=Changes in neurons of the cerebral cortex during acute uneven electromagnetic irradiation. In: Topical issues of radiobiology and hygiene of non-ionizing radiation: collection of reports of the All-Russian Scientific Conference. Moscow, 2019. M.: RNKZNI, 2019. P. 91–94. (In Russ.)]
 34. Ушаков И.Б., Федоров В.П., Астахова А.Н. Экспериментальная оценка состояния нервной системы при хроническом воздействии неионизирующего излучения. В кн.: Актуальные вопросы радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений: Сб. докл. Всерос. науч. конф. Москва, 2019. М.: РНКЗНИ, 2019. С. 29–31. [Ushakov I.B., Fedorov V.P., Astashova A.N. Eksperimental'naya ocenka sostoyaniya nervnoj sistemy pri hronicheskom vozbeystvii neioniziruyushchego izlucheniya=Experimental assessment of the state of the nervous system under chronic exposure to non-ionizing radiation. In: Topical issues of radiobiology and hygiene of non-ionizing radiation: collection of reports of the All-Russian Scientific Conference. Moscow, 2019. M.: RNKZNI, 2019. P. 29–31. (In Russ.)]
 35. Федоров В.П. Влияние электромагнитных излучений на двигательные центры головного мозга. В кн.: Физическая культура, спорт и здоровье в современном обществе: сборник статей Всероссийской конференции. Воронеж: Научная книга, 2018. С. 345–353. [Fedorov V.P. Vliyanie elektromagnitnyh izlucheniij na dvigatel'nye centry golovnogo mozga=The influence of electromagnetic radiation on the motor centers of the brain. In: Physical culture, sport and health in modern society: collection of articles of the All-Russian Conference. Voronezh: Scientific Book, 2018. P. 345–353. (In Russ.)]
 36. Федоров В.П., Гундарова О.П. Экспериментальная оценка стимуляции физической работоспособности электромагнитным излучением. В кн.: Современное состояние и тенденции развития физической культуры и спорта: Сб. науч. статей по итогам VI Всерос. науч.-практ. конф. Белгород, 2019. Белгород: НИУ "БелГУ", 2019. С. 519–525. [Fedorov V.P., Gundarova O.P. Eksperimental'naya ocenka stimulirovaniya fizicheskoy rabotosposobnosti elektromagnitnym izlucheniem=Experimental evaluation of stimulation of physical performance by electromagnetic radiation. In: The current state and trends in the development of physical culture and sports: A collection of scientific articles on the results of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference. Belgorod, 2019. Belgorod: NRU "BelSU", 2019. P. 519–525. (In Russ.)]

37. Eghlidospour M., Ghanbari A., Azari H. Effects of radiofrequency exposure emitted from a GSM mobile phone on proliferation, differentiation, and apoptosis of neural stem cells. *Anat. Cell Biol.* 2017; 50(2): 115–123.
38. Kim J.H., Kim H.J., Yu D.H., Kweon H.S., Huh Y.H. Changes in numbers and size of synaptic vesicles of cortical neurons induced by exposure to 835 MHz radiofrequency-electromagnetic field. *Anat. Cell Biol.* 2017;50(8): 246.

Neuromorphological Effects of Acute and Chronic Electromagnetic Irradiation

I.B. Ushakov¹, V.P. Fedorov^{2, *}, B.I. Davydov³

¹State Scientific Center – A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center of the FMBA of Russia, Moscow

² Voronezh State Academy of Sports, Voronezh, Russia

³State Scientific Research Testing Institute of Aviation and Space Medicine, Moscow, Russia

*E-mail: fedor.vp@mail.ru

Morphological changes in the cerebral cortex were studied in model experiments on three types of laboratory animals (mice, rats, dogs) exposed to both acute and chronic electromagnetic radiation. It has been established that neurons are highly reactive and at the same time plasticity to the electromagnetic factor. Changes in neurons are more pronounced with general than with partial irradiation. The greatest response was found from the structures of the protein-synthesizing system of neurons, as well as their interneuronal contacts. After 3 days of the recovery period, changes were detected only at the ultrastructural level in the form of residues, decayed organelles, clusters of lysosomes and local foci of brain edema. With chronic exposure to microwaves with exposure at the “zero effect” level, the sensitivity of neurons to electromagnetic radiation was characterized by species differences and was inversely dependent on the animal's body weight: mice were the most sensitive, the structures of the rat nervous system were more resistant, and the nervous structures of dogs had the least sensitivity.

Keywords: electromagnetic radiation, brain, neurons, synapses, blood-brain barrier, changes in various modes of electromagnetic exposure

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРЕССОРНЫХ РЕАКЦИЙ, ИНДУЦИРОВАННЫХ НИЗКОИНТЕНСИВНЫМ МИКРОВОЛНОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

© 2024 г. О. С. Измestьева*, О. И. Колганова, О. Ф. Чибисова, Л. П. Жаворонков

Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия

*E-mail: olgaizmestieva@mail.ru

Поступила в редакцию 27.09.2023 г.

После доработки 01.02.2024 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

Проведено изучение выраженности и динамики изменений показателей, отражающих состояние системы крови (числа миелокариоцитов в бедренной кости, уровня КОЕ-С в экзо- и эндотесте, гемолитической устойчивости эритроцитов, а также массы и клеточности тимуса) у мышей, подвергшихся воздействию монохроматических импульсных электромагнитных полей частотного диапазона 2.27–2.78 ГГц со средней плотностью потока энергии 60 мкВт/см² в дозах от 0.086 до 0.86 Дж/г. Показано, что при повторяемых воздействиях электромагнитных полей происходит кумуляция биоэффекта, приводящая к развитию у животных стрессоподобной адаптационной реакции.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, атермальные воздействия, иммунный статус, кумуляция биоэффекта, стресс-реакция

DOI: 10.31857/S0869803124030049, **EDN:** MBPWLP

Ранее нами [1] была продемонстрирована высокая вариабельность реакции тимуса мышей, оцениваемая по массе и клеточности, в ответ на низкоинтенсивное (атермальное) электромагнитное излучение (ЭМИ) сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона. Полученные результаты свидетельствовали, что исходное состояние иммунного статуса экспонированных животных может определять не только величину одинаковых по направленности эффектов, но и саму направленность изменений у СВЧ-облученных животных. Такого рода эффекты могут быть результатом ответной реакции целостного организма, проявляющейся набором стандартных неспецифических реакций, как на любой стрессорный раздражитель. Поскольку в природе не существует стрессоров, вызывающих одинаковые ответные реакции организма одного вида (как по интенсивности, так и по временным характеристикам развития стресс-ответа и постстрессорного восстановления) [2–4], то ответная реакция на атермальное электромагнитное поле (ЭМП) как предполагаемый стрессор должна подчиняться лишь стохастическим закономерностям

и иметь фазовый характер. Ранее было предположено, что адаптационный синдром может развиваться при действии на целостный организм ЭМИ крайне высоких частот [5]. При общем сверхвысокочастотном облучении также возможно стрессирование животных, но при этом считается, что стрессорные проявления наступают, когда дополнительная тепловая нагрузка ЭМП приближается к интенсивности основного обмена (для мышей примерно 10 мВт/г) [2]. Увеличение тепловой нагрузки вдвое по сравнению с основным обменом и достаточная длительность облучения могут привести к серьезным физиологическим сдвигам [6].

Целью настоящего исследования являлось экспериментальное обоснование концепции, в соответствии с которой низкоинтенсивные техногенные факторы среды, такие как слабые ЭМП СВЧ-диапазона, являются значимыми экологическими факторами, вызывающими у млекопитающих однотипную реакцию в виде адаптационного синдрома.

Оценку адаптационного синдрома проводили по степени выраженности и динамики

изменений показателей, отражающих состояние системы крови у экспериментальных животных после экспонирования в ЭМП нетермогенной интенсивности. Выбор указанного объекта исследования объясняется тем, что комплекс неспецифических изменений, возникающих в организме при стрессе и объединенных в понятие “общий адаптационный синдром”, включает в себя в качестве обязательного компонента фазовые изменения в лимфомиелоидном комплексе. Реактивность организма во многом определяется состоянием системы крови, находящейся под контролирующим нейрогуморальным влиянием, т.е. в организме существует единая система защиты, эффекторами которой являются главные органы иммуногенеза и кроветворения — тимус и костный мозг [3, 4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Эксперименты проведены на полученных из питомника “Столбовая” мышах-самках линии C57Bl/6 и самцах-гибридах (CBA × C57Bl/6)F₁ возрастом 1.5–6.0 мес. и массой 14–27 г. Для каждого эксперимента животные контрольной и опытной групп подбирались одинаковой массы (± 0.5 г) и возраста. Животных подвергали воздействию монохроматических ЭМП частотой 2.27; 2.62 и 2.78 ГГц (λ , соответственно, 13.22; 11.45 и 10.61 см), амплитудой 600 мкВт/см² импульсным полем при частоте посылок импульсов 4 Гц и длительности 25 мс, что соответствовало средней ППЭ 60 мкВт/см². Во время облучения мыши находились в ячейках решетчатого контейнера из оргстекла, обеспечивающего свободный теплообмен с окружающей средой, а размеры ячеек (7.5×4.5×4.0 см) не ограничивали подвижность мышей. В безэховой камере во время воздействия ЭМП поддерживались комфортные климатические условия; нормальная освещенность, температура 22.0 ± 0.5 °C, относительная влажность воздуха $55 \pm 5\%$, конвекционный поток воздуха около 5 м/с. Контейнер с животными находился в зоне сформированной волны (3 м от апертуры излучающей антенны) в изодозовом поле ($\pm 10\%$) при вертикальной ориентации Е-вектора. Плотность потока энергии (ППЭ) в зоне сформированной волны измеряли с помощью термисторного моста Я2М-64. Мышей всех контрольных групп подвергали ложному облучению. После облучения подопытных и контрольных животных содержали в разных клетках в условиях вивария, так же, как и до воздействия ЭМП.

В качестве стрессирующего воздействия использовали длительное (24 ч) содержание мышей без воды и пищи в условиях ограниченной подвижности в узких индивидуальных ячейках из оргстекла со сплошными стенками размером 3.5×5.0×3.0 см. γ -Облучение мышей для селезеночного экзо- и эндотеста проводили на радиотерапевтической установке “Луч-1” (⁶⁰Co) при мощности дозы 1.0 Гр/мин.

При анализе состояния тимуса после взвешивания органа готовили клеточную суспензию в стеклянном гомогенизаторе тефлоновым пестиком на среде 199. Клетки костного мозга из бедренной кости вымывали этой же средой. Кровь брали из хвостовой вены. Концентрацию клеток в суспензиях тимуса и костного мозга, а также содержание лейкоцитов в крови определяли путем подсчета в камере Горяева методом световой микроскопии.

Для определения устойчивости эритроцитов к гемолитическому действию кислоты использовали метод И. А. Терского и И. И. Гительзона [7]. При этом 40 мкл крови разводили в 4.5 мл физиологического раствора, затем разведенную кровь смешивали с равным объемом 0.004 н HCl на физиологическом растворе, помещали смесь в термостатируемую при 25 °C кювету спектрофотометра и каждые 30 с регистрировали экстинкцию смеси при 670 нм, определяя таким образом ход гемолиза эритроцитов под действием 0.002 н HCl. На основании полученных данных рассчитывали кинетику гемолиза и строили дифференциальные эритрограммы, показывающие, какой процент эритроцитов распадается за каждую полумину, а также рассчитывали интегральные показатели эритрограмм — суммарную стойкость эритроцитов (Р) [8, 9].

Способность стволовых кроветворных клеток образовывать колонии на селезенке определяли как экзоколониальным [10], так и эндоколониальным [11] тестами, при этом мышей опытной и контрольной групп облучали в одном контейнере в дозе 6 Гр.

Влияние на нейроэндокринную регуляцию, в частности, на те ее звенья, которые ответственны за физический и биоэнергетический статус организма, и представляющих интерес в качестве мишеней микроволнового воздействия, оказывает и система тиреоидного контроля, включающая нейроэндокринную цепь гипоталамус-гипофиз-щитовидная железа, механизмы

Таблица 1. Влияние импульсного ЭМП частотой 2.27 ГГц и средней ППЭ 60 мкВт/см² на количество клеток в тимусе облученных мышей
Table 1. Effect of pulsed EMF with a frequency of 2.27 GHz and an average power flux density of 60 μW/cm² on the number of cells in the thymus of irradiated mice

Длительность облучения, мин	Количество клеток в тимусе (× 10 ⁸)		Значение <i>p</i>
	контроль	опыт	
60	0.81 ± 0.07 (6)	1.36 ± 0.21 (6)	0.05
60	1.22 ± 0.12 (6)	1.67 ± 0.16 (6)	0.05
120	1.46 ± 0.06 (6)	1.39 ± 0.2 (6)	0.8
120	2.20 ± 0.28 (6)	2.20 ± 0.19 (6)	1.0
120	2.51 ± 0.2 (6)	1.94 ± 0.3 (6)	0.18

Примечание. В скобках указано число животных.

транспорта, рецепции, связывания и метаболизма тиреоидных гормонов.

В разные сроки после окончания СВЧ воздействия у крыс под нембуталовым наркозом (55 мг/кг внутривентрально) из брюшной аорты производился забор крови. Содержание гормонов щитовидной железы и продуктов их метаболизма определяли методом радиоиммунологического анализа с использованием РИА-наборов отечественного и импортного (фирма “Mallinckrodt Diagnostica”, Германия), производства.

Все работы с лабораторными животными выполнены на основе стандартных операционных процедур, которые соответствуют правилам Европейской конвенции ETS 123. Выводили животных из опыта путем цервикальной дислокации под эфирным наркозом. В рамках внутреннего регламента проведение исследования разрешено Комитетом по биоэтике МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ “НМИЦ радиологии” Минздрава РФ.

Статистическую обработку результатов исследования при всех использованных тестах проводили с применением программы Statistika 10.0. После проверки нормальности распределения вариационных рядов подсчитывали средний показатель и стандартную ошибку среднего ($M \pm SEM$). Групповые сравнения количественных показателей результатов оценивали с помощью *t*-критерия Стьюдента и при необходимости использовали метод регрессионного анализа. Достоверными считали различия, имеющие 95%-ный уровень значимости.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Как свидетельствуют результаты, представленные в табл. 1, при однократной

часовой экспозиции мышей в импульсном ЭМП с частотой 2.27 ГГц и средней ППЭ 60 мкВт/см² (удельная поглощенная мощность составляла 0.024 Вт/кг [12], а поглощенная доза – 0.086 Дж/г) через сутки после облучения у мышей опытных групп регистрировали достоверное увеличение количества тимоцитов на 37–67% по сравнению с содержанием клеток в тимусе животных групп сравнения. Однако при увеличении поглощенной дозы вдвое (т.е. при двухчасовой экспозиции) СВЧ-эффект отсутствовал.

На основании этих данных можно бы сделать вывод, что импульсное ЭМП частотой 2.27 ГГц вызывает у мышей гиперплазию тимуса при поглощенной дозе 0.086 Дж/г, но не 0.172 Дж/г. Однако полученные результаты были проанализированы с позиции возрастной инволюции тимуса мышей: в период с 1.5 до 9 мес. постнатального онтогенеза клеточность органа претерпевает более чем двукратное снижение и достигает всего лишь $(0.8 \pm 0.15) \times 10^8$ клеток [4, 13, 14]. В табл. 1 каждая строчка “контроль–опыт” представляет результаты одного эксперимента, а поскольку в отдельном эксперименте животные контрольной и опытной групп имели одинаковую массу (± 0.5 г) и были одного возраста, постольку различие контрольных величин в разных строках “контроль–опыт” отражает отличие возрастных характеристик мышей в каждом из опытов. Соотнеся (в процентном выражении) клеточность тимуса облученных животных к количеству тимоцитов в органе у контрольных мышей в каждом опыте, мы провели анализ корреляционной зависимости между этими показателями без учета поглощенной дозы. При этом было установлено, что связь между указанными параметрами описывается уравнением линейной регрессии

Таблица 2. Сопоставление содержания клеток в тимусе животных групп сравнения и мышей, подвергнутых воздействию импульсных ЭМП частотой 2.62 ГГц и 2.78 ГГц при средней дозе 0.172 Дж/г**Table 2.** Comparison of the content of cells in the thymus of animals of the comparison groups and mice exposed to pulsed EMF with a frequency of 2.62 GHz and 2.78 GHz at an average dose of 0.172 J/g

Частота ЭМП, ГГц	Количество клеток в тимусе ($\times 10^8$)		Величина p
	контроль	опыт	
2.62	1.76 ± 0.15	2.41 ± 0.12	0.024
2.62	2.43 ± 0.19	2.81 ± 0.14	0.15
2.62	3.31 ± 0.26	4.09 ± 0.14	0.03
2.78	1.22 ± 0.12	0.83 ± 0.10	0.048
2.78	1.98 ± 0.11	1.55 ± 0.11	0.04
2.78	2.62 ± 0.19	2.02 ± 0.12	0.02

Примечание. В каждую контроль или опытную группу входило 6 мышей.

$$-y_x = (190.8 \pm 24.3) - (46.0 \pm 13.8) \times x,$$

где $-y_x$ — выраженная в процентах (по отношению к усредненным величинам клеточности тимуса животных контрольных групп) клеточность тимуса СВЧ-облученных мышей, а x — число клеток в тимусе мышей групп сравнения, уменьшенное в 10^8 . Коэффициент корреляции равен 0.89; $p = 0.045$. Из уравнения следует, что тимус, содержащий 1.97×10^8 клеток, ареактивен при СВЧ-воздействии на мышь. При меньшем исходном числе тимоцитов ЭМП увеличивает, а при большем, напротив, снижает количество клеток в органе. Полученные результаты хорошо коррелируют с ранее опубликованными нами данными, когда животных подвергали облучению ЭМП с частотой 2.39 ГГц [1]. Таким образом, внешнее ЭМП частотой 2.27 и 2.39 ГГц при интенсивности, меньшей уровня “теплового шума” животных, и при поглощенной дозе, не превышающей 0.172 Дж/г, оказывает регуляторное влияние на физиологические процессы, определяющие состояние тимуса, и приближает клеточность и массу органа к величинам, характерным для мышей примерно трехмесячного возраста.

В экспериментах с воздействием на мышей импульсными ЭМП с более высокой несущей частотой 2.62 и 2.78 ГГц, результаты которых приведены в табл. 2, зависимости СВЧ-эффекта от возрастных характеристик облучаемых мышей выявлено не было. В этих опытах направленность изменений в тимусе определялась частотой действующего поля: микроволны частотой 2.62 ГГц вызвали увеличение, а частотой 2.78 ГГц — напротив, снижение клеточности тимуса у мышей опытных групп в среднем на 25%.

Выявленные зависимости СВЧ-эффекта при поглощенной дозе 0.086–0.172 Дж/г от

возрастных характеристик мышей и от частоты внешнего поля привели нас к заключению, что примененный в описанных экспериментах уровень воздействия (поглощенная доза не превышала 0.172 Дж/г) позволяет установить лишь сам факт наличия ответной, причем очень вариабельной, реакции животных на СВЧ-облучение; но этот уровень недостаточен для индукции однонаправленных изменений в тимусе. В этой связи было проведено изучение изменений в тимусе мышей при повторяемых воздействиях импульсных ЭМП частотой 2.27 и 2.62 ГГц. В данной серии экспериментов мышей облучали микроволнами три или пять дней подряд по 120 мин ежедневно, что при средней ППЭ поля 60 мкВт/см² обеспечило поглощенную дозу 0.516 и 0.86 Дж/г соответственно. Результаты, представленные в табл. 3, показывают, что независимо от частоты поля через одни или двое суток после последнего облучения во всех сериях опыта была выявлена однонаправленная реакция тимуса — его клеточность снижалась на 22–50%; причем различия определяемого параметра у опытных и контрольных групп животных были статистически значимы в 10 из 11 опытов.

Сопоставление СВЧ-эффектов, вызванных однократной экспозицией длительностью 120 мин в ЭМП частотами 2.27; 2.39; 2.62 и 2.78 ГГц, а также последствий повторяемых облучений мышей (табл. 3) позволяет заключить, что возрастание поглощенной дозы с 0.172 Дж/г до 0.516 Дж/г и выше при частоте поля 2.27 ГГц отменяет зависимость обусловленных действием поля изменений в тимусе от исходной клеточности органа; а при частоте поля 2.62 ГГц приводит к изменению знака эффекта, т.е. гиперплазия органа сменяется гипоплазией.

Таблица 3. Сопоставление содержания клеток в тимусе животных групп сравнения и мышей, подвергнутых 3–5 раз 120-минутному воздействию импульсных ЭМП частотой 2.27 и 2.62 ГГц и средней ППЭ 60 мкВт/см²
Table 3. Comparison of the content of cells in the thymus of animals of the comparison groups and mice subjected to 3–5 times 120-minute exposure to pulsed EMF with a frequency of 2.27 and 2.62 GHz and an average power flux density of 60 μW/cm²

Частота ЭМП, ГГц	Поглощенная доза, Дж/г	Время после облучения, сут	Содержание клеток в тимусе (×10 ⁸)		Величина <i>p</i>
			контроль	опыт	
2.27	0.516	1	1.81 ± 0.30 (3)	1.20 ± 0.07 (6)	0.05
2.27	0.86	1	1.00 ± 0.09 (6)	0.57 ± 0.09 (6)	0.01
2.27	0.86	1	1.40 ± 0.10 (6)	0.70 ± 0.07 (6)	0.005
2.62	0.516	1	1.50 ± 0.10 (6)	1.10 ± 0.10 (6)	0.046
2.62	0.516	2	0.77 ± 0.08 (8)	0.60 ± 0.05 (8)	0.07
2.62	0.516	2	1.30 ± 0.06 (8)	1.02 ± 0.06 (8)	0.04
2.62	0.516	2	1.51 ± 0.12 (9)	1.00 ± 0.02 (9)	0.017
2.62	0.516	2	2.10 ± 0.20 (6)	1.50 ± 0.03 (6)	0.01
2.62	0.516	6	1.25 ± 0.10 (6)	1.85 ± 0.23 (6)	0.04
2.62	0.86	1	0.91 ± 0.09 (6)	0.55 ± 0.04 (6)	0.01
2.62	0.86	1	1.02 ± 0.10 (6)	0.50 ± 0.09 (6)	0.01
2.62	0.86	1	1.40 ± 0.10 (6)	0.76 ± 0.07 (6)	0.003

Примечание. В скобках указано число мышей в группе.

Установлено, что наблюдаемая через 1–2 сут после последнего облучения гипоплазия была обратима и через 6 сут после воздействия поля содержание клеток в тимусе троекратно облученных животных не просто возвращалось к норме, но и превышало ее в полтора раза (табл. 3). Такие же закономерности в динамике изменения состояния тимуса у мышей, троекратно облученных ЭМП частотой 2.62 ГГц, регистрировались при определении другого “макропоказателя” – массы органа. Сниженная до 79.7 ± 3.6% (*p* = 0.00045) ко вторым суткам, через 6 сут после облучения масса тимуса у мышей опытных групп достигала уже 132 ± 10% (*p* = 0.01) по сравнению с контролем.

Полученные нами результаты согласуются с ранее опубликованными работами, в которых отражены закономерности развития стресс-реакций при воздействии на организм других раздражителей [15, 16].

С целью получения дополнительных доказательств справедливости предположения, что повторные воздействия слабого СВЧ-поля вызывают у мышей адаптивный ответ с выраженной стадией тревоги, был проведен анализ устойчивости эритроцитов облученных мышей к действию гемолитика (соляной кислоты) по методу И. А. Терского и И. И. Гительсона [7]. При этом была сопоставлена гемолитическая устойчивость эритроцитов СВЧ-облученных мышей и эритроцитов животных, которых с целью стрессирования сутки содержали без воды и пищи в условиях

ограниченной подвижности. При такой модели стресса, как было определено нами, количество клеток в тимусе мышей снижалось очень значительно – почти на 60%, составляя $(1.82 \pm 0.13) \times 10^8$ в контроле и $(0.75 \pm 0.1) \times 10^8$ после стрессирования, *p* = 0,003.

Дифференциальные эритрограммы стрессированных животных (рис. 1, а) показывают, что гемолитическая устойчивость их эритроцитов падает: уменьшается время гемолиза, эритрограммы смещаются влево, растет высота пика за счет уменьшения в крови объема фракции устойчивых к действию гемолитика эритроцитов (правое крыло эритрограмм опускается).

Величина показателя суммарной устойчивости эритроцитов *P* уменьшалась с 581 ± 35 до 476 ± 20 (*p* = 0.003). Эти данные хорошо согласуются с имеющимися в литературе сведениями о характере изменений свойств и состава эритроцитов периферической крови во время развития стадии тревоги стресс-реакции [8, 17].

Однократное микроволновое воздействие (средняя ППЭ 60 мкВт/см², 120 мин, доза 0.172 Дж/г), как показывают результаты, приводимые на рис. 1, б, вызывало сходные качественные изменения дифференциальных эритрограмм крови облученных мышей, но количественное выражение сдвигов гемолитической устойчивости эритроцитов животных опытных групп по отношению к контролю, оцениваемое по эритрограммам, было недостоверно. Так же незначимо

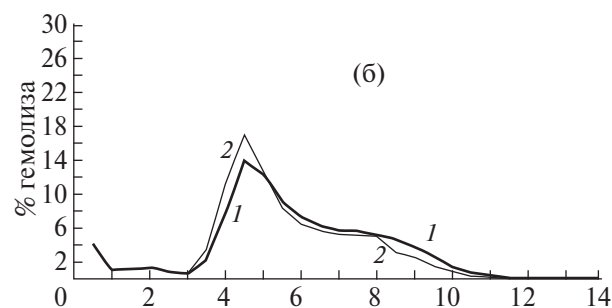
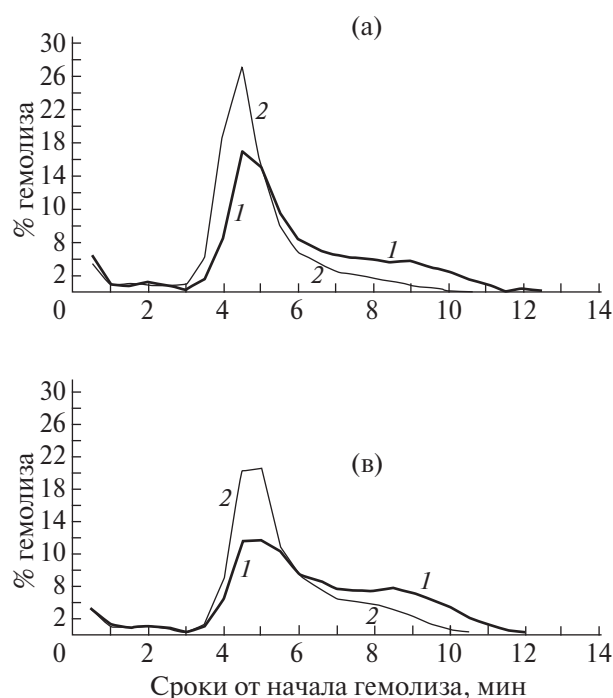


Рис. 1. Эритрограммы мышей при разных вариантах стрессирования: (а) – стрессирование иммобилизацией; (б) – один сеанс, (в) – три сеанса СВЧ-воздействия частотой 2.62 ГГц. ППЭ ср. – 60 мкВт/см², сеанс 120 мин; 1 – контроль, 2 – опыт.

Fig. 1. Erythrograms of mice under different stress conditions: (a) – immobilization stress; (b) – one session, (c) – three sessions of microwave exposure with a frequency of 2.62 GHz. PFD – 60 μ W/cm², session 120 min; 1 – control, 2 – experience.

снижалась и величина P : с 570 ± 22 в контроле до 533 ± 20 ($p = 0.29$) у облученных животных.

Однако трехкратная экспозиция мышей (с интервалом в сутки) в ЭМП с указанными выше характеристиками (поглощенная доза 0.516 Дж/г), как свидетельствуют результаты, приводимые на рис. 1, в, обуславливала практически такое же снижение устойчивости их эритроцитов к действию гемолитика, как и стрессирование животных. Время гемолиза снижалось с 12 до 10.5 мин, величина пика дифференциальных эритрограмм возрастала вдвое, а объем фракции высокоустойчивых эритроцитов, гемолиз которых происходил после

6.5 мин инкубации с HCl, падал почти вдвое (с 46 до 25%). Величина P при этом статистически значимо снижалась у мышей опытных групп на 15% по сравнению с контролем (535 ± 17 в опыте и 626 ± 28 в контроле, $p = 0.02$). Уровень изменения величины P , вызываемый трехкратным действием поля, сопоставим с уровнем снижения P при стрессировании (18%) в наших опытах или при ожоговой травме животных (16%) [18].

Как показывают результаты, представленные в табл. 4, при ежедневном СВЧ-облучении трехкратное воздействие поля, однозначно снижающее массу тимуса и количество клеток в нем, не приводило к изменению числа

Таблица 4. Влияние повторяющихся воздействий ЭМП частотой 2.62 ГГц на клеточность костного мозга и общее число лейкоцитов в периферической крови мышей

Table 4. Effect of repeated exposure to 2.62 GHz EMF on bone marrow cellularity and the total number of leukocytes in the peripheral blood of mice

Показатель	Контроль	Число сеансов облучения		
		3		5
		Время после окончания облучения, сут		
		1	2	1
Лейкоциты ($\times 10^9$ /л)	19.6 ± 1.5 (16)	–	19.9 ± 1.5 (6)	17.0 ± 1.5 (12)
Количество клеток в бедренной кости $\times 10^6$	19.8 ± 0.8 (20)	21.0 ± 4.9 (12)	19.5 ± 0.7 (12)	24.5 ± 1.1 (12)
$p < 0.01$				

Примечание. В скобках указано число животных в группах.

Таблица 5. Количество КОЕ-С в костном мозге мышей, подвергнутых повторяемым воздействиям ЭМП частотой 2.62 ГГц

Table 5. The number of CFU-S in the bone marrow of mice subjected to repeated exposure to 2.62 GHz EMF

Показатель	Контроль	Число сеансов облучения	
		3	5
		Время после окончания облучения, ч	
		24	0
Количество КОЕ-С на 10 ⁵ клеток костного мозга (экзотест)	10.4 ± 0.7 (30)	16.4 ± 1.2 (30) <i>p</i> < 0.001	19.8 ± 1.0 (30) <i>p</i> < 0.001
Количество КОЕ-С (эндотест)	6.9 ± 0.7 (27)		12.7 ± 1.1 (27) <i>p</i> < 0.001

Примечание. По всем использованным тестам представлены усредненные результаты трех опытов. В скобках указано общее число мышей.

миелокариоцитов в бедренной кости мышей ни через сутки, ни через двое суток после последнего сеанса облучения.

В отличие от этого, пятикратное воздействие поля вызывало выраженную гиперплазию костного мозга — количество клеток в бедренной кости облученных мышей было выше, чем у контрольных мышей, на 24%; при этом общее число лейкоцитов в периферической крови не изменялось. Эти данные можно рассматривать как свидетельство становления на 4–5-е сутки в ходе продолжающегося облучения периода адаптации животных к стрессирующему действию поля. Такое явление характерно и для других моделей стресса, вызываемого многократным действием раздражителя. Например, при ежедневном дозированном раздражении током крыс период адаптации наступает на 5–13-е сутки, несмотря на продолжение стрессирования животных. Количество миелокариоцитов в костном мозге при этом возрастает на 19% [4].

Еще одной особенностью стадии резистентности стресс-реакции, вызываемой как однократным, так и многократным действием разнообразных экстремальных факторов на мышей, является активация кроветворения, о чем свидетельствует увеличение числа ранних потомков стволовых кроветворных клеток, способных образовывать колонии на селезенке (КОЕ-С) [19–21].

В наших экспериментах, результаты которых представлены в табл. 5, увеличение определяемой экзотестом колониеобразующей активности костного мозга у СВЧ-облученных мышей после трехкратного воздействия поля составило

57%; а после пятого сеанса облучения — уже 90%, т.е. динамика активизации кроветворения внешним полем не противоречит развиваемым в работе представлениям о стадийности развития СВЧ-индуцируемых адаптивных реакций.

Сходные результаты были получены и в эндотесте. Сразу после пятого воздействия поля у животных опытных групп выявлялось в среднем на 84% больше эндогенных КОЕ-С, чем у контрольных мышей (табл. 5). Метод эндогенных селезеночных колоний, характеризуя состояние кроветворения у мышей после СВЧ-воздействия, в то же время отражает чувствительность животных к действию ионизирующей радиации [21]. Поэтому полученные в работе данные о том, что слабое ЭМП при определенных условиях увеличивает количество КОЕ-С в эндотесте, являются, по сути, свидетельством протективного действия ЭМП по отношению к ионизирующему излучению и объясняют известные данные о защитном эффекте многократного повторенного атермогенного микроволнового облучения на течение лучевой болезни [22].

В проявлении адаптационного неспецифического синдрома стимуляция рецепторов вегетативной нервной системы сопровождается активацией выработки ряда рилизинг-факторов в гипоталамусе и сопряжена с последующей секрецией гормонов передней доли гипофиза — аденогипофиза, повышенный синтез которых неизбежно приводит к усилению энергетического обмена. Уровень энергетического обмена контролируется преимущественно гормонами щитовидной железы, а метаболизм тироксина осуществляется ферментативными системами,

Таблица 6. Содержание метаболитов тиреоидных гормонов сыворотки крови ($M \pm SE_m$) в разные сроки после воздействия в диапазоне частот 2–4 ГГц и продолжительностью 180 мин**Table 6.** The content of metabolites of thyroid hormones in blood serum ($M \pm SE_m$) at different times after microwave exposure in the frequency range of 2–4 GHz and duration of 180 min

Сроки после облучения	Группа	<i>n</i>	T ₄ нмоль/л	T ₃ нмоль/л	rT ₃ , нмоль/л ($\times 10^{-2}$)
1 ч	Контроль ЭМИ	10	88 $\pm$ 4	51 $\pm$ 7	5.6 $\pm$ 0.7
		9	88 $\pm$ 8	66 $\pm$ 11	5.1 $\pm$ 0.5
1 сут	Контроль ЭМИ	9	98 $\pm$ 7	83 $\pm$ 11	5.7 $\pm$ 0.6
		9	76 $\pm$ 9*	54 $\pm$ 7**	5.5 $\pm$ 0.5
3 сут	Контроль ЭМИ	9	84 $\pm$ 3	93 $\pm$ 11	6.8 $\pm$ 0.8
		8	84 $\pm$ 4	73 $\pm$ 5	5.9 $\pm$ 0.8

Примечание. T₄ – тироксин; T₃ – трийодтиронин; rT₃ – трийодтиронин реверсивный; *n* – число животных в группе.
 * $p < 0.1$, ** $p < 0.05$.

имеющими специфическое тканевое распределение. В связи с этим биотропность микроволнового излучения в атермальных режимах воздействия оценивали и по направленности изменения соотношения метаболитов гормона щитовидной железы: тироксина (T₄), трийодтиронина (T₃) и трийодтиронина реверсивного (rT₃) согласно схеме, предложенной T.J. Visser, W. Croteau [23, 24]. Ранее описанные в литературе реакции на стресс демонстрируют высокую физиологическую роль тиреоидных гормонов в тканях, содержащих 5'-йодтиронин-дейодиназу II типа, таких как мозг и гипофиз [25]. Полученные нами результаты приведены в табл. 6.

Выявленное нами транзитное, но статистически значимое синхронное снижение концентраций T₄ и T₃ в сыворотке крови животных через 24 ч после 3-часовой экспозиции в ЭМП в диапазоне частот 2–4 ГГц, по всей вероятности, связано с изменением регуляции метаболизма тироксина на тканевом уровне. Данный эффект, по-видимому, является проявлением стресс-реакции организма на воздействие фактора.

ОБСУЖДЕНИЕ

Тимус является одним из основных органов-мишеней неспецифических реакций, развивающихся в организме при состоянии стресса [2–4], сморщивание тимуса – характерный признак первой фазы адаптационного синдрома. Поэтому в экспериментах на животных проходящее снижение массы тимуса и содержания клеток в нем в ответ на действие какого-либо раздражителя рассматривается и как свидетельство развития стадии тревоги адаптационного

синдрома, и как доказательство стрессирующей природы использованного раздражителя [14–16].

В этой связи полученным в наших экспериментах результатам можно дать следующее объяснение. Интактный организм реагирует на внешние СВЧ-поля как на стрессирующий раздражитель слабой или средней силы [3]. При этом эффект облучения может кумулировать, т.е. в организме существуют определенные механизмы хранения информации об СВЧ-воздействиях.

По этой причине “субадаптационные” реакции (или реакции ориентировки), наблюдаемые у животных после однократной экспозиции в ЭМП, при повторных микроволновых воздействиях сменяются однонаправленным адаптивным ответом, при этом в тимусе развиваются изменения, характерные для стадии тревоги стресс-реакции.

В пользу справедливости предположения, что при повторных воздействиях слабого ЭМП на мышей происходит кумуляция эффекта излучения, приводящая к развитию типичного адаптивного ответа с выраженной стадией тревоги, свидетельствует не только гипоплазия тимуса, но и снижение гемолитической устойчивости эритроцитов, наблюдаемое уже после трех сеансов облучения животных.

Совокупность процессов, происходящих в организме на стадии тревоги стресс-реакции, направлена на адаптацию к новым факторам внешней среды, на повышение резистентности организма [18]. Так, снижение гемолитической устойчивости эритроцитов, обуславливающее эритродиализ в начальную фазу стресса, представляет собой неотъемлемую часть процесса

регенерации крови, который переходит в эритроцитоз на стадии резистентности адаптационного синдрома Селье [17,18]. То же самое можно сказать и о реакциях, развивающихся при стрессе в лимфомиелоидном комплексе. Уменьшение численности лимфоцитов в лимфоидных тканях и циркулирующей крови в ранний постстрессорный период обусловлено мобилизацией лимфоидных клеток и перераспределением их в пределах лимфомиелоидной системы с приходом в костный мозг [19]. Физиологическое значение перераспределения лимфоцитов, обеспечивающего увеличение иммунной компетентности костного мозга, заключается в повышении сопротивляемости организма к альтерирующему агенту и является основой развития второй стадии адаптационного синдрома — резистентности. Поэтому динамика изменений такого показателя кроветворной системы, как клеточность костного мозга, хорошо отражает смену стадий адаптивных реакций, в то время как для фазовых изменений массы и клеточности тимуса характерна большая инертность, поскольку миграция клеток из тимуса продолжается и при становлении стадии резистентности [20].

Полученные нами результаты коррелируют с данными других авторов, показавших при воздействии микроволн структурные повреждения лимфоидных тканей и функциональные нарушения со стороны иммунной системы: гиперемия и фрагментация ядер лимфоцитов, снижение концентраций цитокинов в сыворотке крови [26]. Следует отметить, что альтерирующий эффект микроволн регистрировали при относительно интенсивном, но непродолжительном (6 мин) однократном воздействии поля с частотой 2.8 ГГц и средней плотности потока энергии 30 мВт/см².

ВЫВОДЫ

Представленный в работе анализ состояния системы крови у мышей после экспонирования в ЭМП нетермогенной интенсивности позволяет сделать следующие выводы:

1. При воздействии на мышей монохроматических ЭМП частотного диапазона 2.27–2.78 ГГц со средней ППЭ 60 мкВт/см² при поглощенной дозе от 0.086 до 0.86 Дж/г достоверные изменения числа клеток в тимусе и его массы происходят уже при минимальной дозе и в очень ранние сроки после облучения.

2. При однократном воздействии слабого ЭМП характер СВЧ-эффекта (гиперплазия, гипоплазия или отсутствие эффекта) зависит от частоты поля и исходного состояния тимуса, определяемого, в частности, возрастом животных. Однако при повторных воздействиях (3–5 раз с суточным интервалом) реакция тимуса приобретает однонаправленность — его клеточность достоверно снижается независимо от частоты действующего ЭМП.

3. Кумуляция эффекта СВЧ-излучения, приводящая к гипоплазии тимуса облученных мышей, вызывает, помимо этого, такое же снижение гемолитической устойчивости эритроцитов, как и стрессирование животных обездвиживанием в течение суток.

4. Пятикратное повторение воздействия слабого ЭМП на мышей приводит к увеличению содержания миелокарицитов в костном мозге, параллельно этому количество КОЕ_С возрастает почти вдвое.

5. Результаты экспериментов позволяют сделать обоснованное заключение, что слабые ЭМП даже при интенсивности, меньшей теплового шума животных, являются значимым раздражителем. При повторяемых воздействиях ЭМП происходит кумуляция биоэффекта, что приводит к развитию у животных стрессоподобной адаптационной реакции.

6. Полученные данные важны не только для анализа фундаментальных механизмов реакций организма на слабые ЭМП, но и для оценки нормативно-гигиенической значимости таких воздействий.

БЛАГОДАРНОСТИ

Статья посвящена памяти доктора биологических наук Юрия Алексеевича Семина (1945–2022) [Acknowledgments: the article is dedicated to the memory of Doctor of Biological Sciences Yuri Alekseevich Semin (1945–2022)].

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ и администрации Калужской области (проект № 05-04-96712). [The work was carried out with partial financial support from the Russian Foundation for Basic Research and the administration of the Kaluga Region (project № 05-04-96712)].

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией статьи [The authors declare no conflicts of interests].

ВКЛАД АВТОРОВ

Измestьева Ольга Семеновна, сбор и анализ материала, написание статьи.

Izmestieva Olga Semenovna, collection and analysis of material, writing an article.

Колганова Ольга Ивановна, сбор и анализ материала, написание статьи.

Kolganova Olga Ivanovna, collection and analysis of material, writing an article.

Чибисова Ольга Федоровна, сбор и анализ материала, написание статьи.

Chibisova Olga Fedorovna, collection and analysis of material, writing an article.

Жаворонков Леонид Петрович, общее руководство, редактирование статьи.

Zhavoronkov Leonid Petrovich, general guidance, article editing.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Измestьева Ольга Семеновна, старший научный сотрудник, канд. биол. наук, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба — филиал ФГБУ “Национальный медицинский исследовательский центр радиологии” Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия

<https://orcid.org/0000-0002-2572-6145>
olgaizmestieva@mail.ru

Izmestieva Olga Semenovna, A. Tsyb Medical Radiological Research Centre branch of the National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

<https://orcid.org/0000-0002-2572-6145>
olgaizmestieva@mail.ru

Колганова Ольга Ивановна, старший научный сотрудник, канд. биол. наук, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба — филиал ФГБУ “Национальный медицинский исследовательский центр радиологии” Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия

<https://orcid.org/0009-0004-7951-8570>
o.kolgan.obn@mail.ru

Kolganova Olga Ivanovna, A. Tsyb Medical Radiological Research Centre branch of the National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

<https://orcid.org/0009-0004-7951-8570>
o.kolgan.obn@mail.ru

Чибисова Ольга Федоровна, научный сотрудник, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба — филиал ФГБУ “Национальный медицинский исследовательский центр радиологии” Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия

<https://orcid.org/0009-0001-4639-5840>
Trocha.olga@yandex.ru

Chibisova Olga Fedorovna, A. Tsyb Medical Radiological Research Centre branch of the National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

<https://orcid.org/0009-0001-4639-5840>
Trocha.olga@yandex.ru

Жаворонков Леонид Петрович, проф. научно-образовательного отдела, д-р мед. наук, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба — филиал ФГБУ “Национальный медицинский исследовательский центр радиологии” Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия

<https://orcid.org/0000-0001-5100-9118>
Leonid.petrovich@inbox.ru

Zhavoronkov Leonid Petrovich, A. Tsyb Medical Radiological Research Centre branch of the National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

<https://orcid.org/0000-0001-5100-9118>
Leonid.petrovich@inbox.ru

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семин Ю.А., Жаворонков Л.П., Воронько Я.В., Рожкова О.М. Исходное состояние тимуса определяет характер изменений в организме у мышей под воздействием слабых электромагнитных волн. Радиационная биология. Радиоэкология. 2003;43(5): 524–527. [Siomin Yu.A., Zhavoronkov L.P., Voronko Ya.V., Shwarzburg L.K., Rozhkova O.M. The efficiency and direction of thymus changes after

- whole-body exposure of mice to weak electromagnetic field are determined by the initial status of thymus. *Radiation Biology. Radioecology*. 2003;43(5):524–527. (In Russ.)]
2. Давыдов Б.И., Тихончук В.С., Антипов В.В. Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений. М.: Энергоатомиздат, 1984. 177 с. [Davydov B.I., Tikhonchuk V.S., Antipov V.V. *Biologicheskoe deistvie, normirovanie i zashchita ot ehlektromagnitnykh izluchenii*. Moscow: Ehnergoatomizdat, 1984. 177 p. (In Russ.)]
 3. Гаркави Л.Х., Квакуина Е.Б., Уколова М.А. Адаптационные реакции и резистентность организма. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 1990. 223 с. [Garkavi L.Kh., Kvakina E.B., Ukolova M.A. *Adaptatsionnye reaksii i rezistentnost' organizma*. Rostov-na-Donu: Izd-vo Rostovskogo universiteta, 1990. 223 p. (In Russ.)]
 4. Горизонтов П.Д., Белоусова О.И., Федотова М.И. Стресс и система крови. М.: Медицина, 1983. 240 с. [Gorizontov P.D., Belousova O.I., Fedotova M.I. *Stress i sistema krovi*. Moscow: Meditsina, 1983. 240 p. (In Russ.)]
 5. Лушников К.В., Гапеев А.Б., Чемерис Н.К. Влияние электромагнитного излучения крайне высоких частот на иммунную систему и системная регуляция гомеостаза. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2002;42(5): 533–545. [Lushnikov K.V., Gapeev A.B., Chemeris N.K. Effects of extremely high-frequency electromagnetic radiation on the immune system and system regulation of the homeostasis. *Radiation Biology. Radioecology*. 2002;42(5):533–545. (In Russ.)]
 6. Колганова О.И., Дрозд А.И., Жаворонков Л.П. и др. Экспериментальная оценка термогенных уровней острого микроволнового облучения для животных разных видов. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2000;40(6): 696–701. [Kolganova O.I., Drozd A.I., Zhavoronkov L.P. et al. Experimental estimation of thermogenic levels of acute microwave exposure for different animal species. *Radiation Biology. Radioecology*. 2000;40(6):696–701. (In Russ.)]
 7. Терсков И.А., Гительзон И.И. Метод химических (кислотных) эритрограмм. *Биофизика*. 1957;2(2):259–263. [Terskov I.A., Gitel'zon I.I. *Metod khimicheskikh (kislotnykh) ehritrogramm*. *Biofizika*. 1957;2(2):259–263. (In Russ.)]
 8. Вопросы биофизики, биохимии и патологии эритроцитов. М.: Наука, 1967. 348 с. [Voprosy biofiziki, biokhimii i patologii ehritrotsitov. Moscow: Nauka, 1967. 348 p. (In Russ.)]
 9. Измest'ева О.С., Лузянина А.А., Ершова И.Л., Жаворонков Л.П. Изучение влияния низкодозового γ -облучения на функциональное состояние эритроцитов периферической крови крыс. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2014;54(5): 493–499 [Izme'st'eva O.S., Luzyanina A.A., Ershova I.L., Zhavoronkov L.P. Study of the Influence of Low-Dose γ -Irradiation on the Functional State of Peripheral Blood Erythrocytes of Rat. *Radiation Biology. Radioecology*. 2014;54(5):493–499. (In Russ.)] <https://doi.org/10.7868/S0869803114050063>
 10. Till J.E. McCulloch. A direct measurement of the radiation sensitivity of normal mouse bone marrow cells. *Radiat. Res*. 1961;14:213–222.
 11. Jenkins V.K., Upton A.C. Odell T.T. Differences between exogenous and endogenous hemopoietic spleen colonies. *J. Cell. Physiol*. 1969;73(2):141–148. <https://doi.org/10.1002/jcp.1040730208>
 12. Петин В.Г., Дубовик Б.В., Рожков М.Ф., Комаров В.П. Использование дозовых характеристик СВЧ-воздействий при интерпретации летальных эффектов у лабораторных животных. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 1996;36(2):310–316. [Petin V.G., Dubovik B.V., Rozhkov M.F., Komarov V.P. Application of dose parameters of UHF-irradiation for interpretation of lethal effects in laboratory animals. *Radiation Biology. Radioecology*. 1996;36(2):310–316. (In Russ.)]
 13. Хирокова К. Тимус и старение. В кн.: Макинодана Т., Юниса Э. М. Тимус и старение. М.: Мир, 1998. С. 75–101. [Khirokova K. Timus i starenie. V kn.: Makinodana T., Yunisa E.H. M. Timus i starenie. Moscow: Mir, 1998. P. 75–101. (In Russ.)]
 14. Мороз Б.Б., Дешевой Ю.Б., Лебедев В.Г., Лырщикова А.В., Воротникова Т.В. Реакция кроветворной системы при длительном эмоциональном стрессе на фоне действия γ -излучения в низких дозах. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 1997;37(4):581–589. [Moroz B.B., Deshevoi I.B., Lebedev V.G. Reaction of the hematopoietic system under long-term emotional stress developed after preliminary gamma-irradiation with low doses. *Radiation Biology. Radioecology*. 1997;37(4):581–589. (In Russ.)]
 15. Суринов Б.П., Исаева В.Г., Токарев О.Ю. Аллелопатическая активность летучих выделений облученных животных. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2001;41(6):645–649. [Surinov B.P., Isaeva V.G., Tokarev O.Yu. Allelopathic activity of volatile secretion in irradiated animals. *Radiation Biology. Radioecology*. 2001;41(6):645–649. (In Russ.)]
 16. Мутускина Е.А., Багдасарова Л.А., Трубина И.А., Заржецкий Ю.В. Некоторые показатели стресс-реакции организма на разных этапах постреанимационного периода. *Бюл. эксперим. биол. мед.* 2002;133(1):38–41. [Mutuskina E.A., Bagdasarova L.A., Trubina I.A., Zarzhetskii Yu.V. Parameters of stress response at various stages of postresuscitation period. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2002;133(1):30–32.]
 17. Ужанский Я.Г. Стресс и гемолиз. Пробл. гематологии и переливания крови. 1973;18(11): 13–15. [Uzhansky Ya.G. Stress and hemolysis.

- Problemy Gematologii i Perelivaniya Krovi.* 1973;18(11):13–15. (In Russ.)]
18. Давыдовский И.В. Общая патология человека. М.: Медицина, 1969. 610 с. [Davydovskii I.V. Obshchaya patologiya cheloveka. Moscow: Meditsina, 1969. 610 p. (In Russ.)]
 19. Зимин Ю.И., Хаитов Р.М. Миграция Т-лимфоцитов в костный мозг в начальный период стресс-реакции. *Бюлл. эксперим. биол. мед.* 1975;80(12): 68–70. [Zimin Yu.I., Khaitov R.M. Migratsiya T-limfotsitov v kostnyi mozg v nachal'nyi period stress-reaktsii. *Bulleten' Eksperimental'noi Biologii i Meditsiny.* 1975;80(12):68–70. (In Russ.)]
 20. Гольдберг Е.Д., Дыгай А.М., Захарова О.Ю. Роль опиоидных пептидов в регуляции гемопоза. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1990. 136 с. [Gol'dberg E.D., Dygai A.M., Zakharova O.Yu. Rol' opioidnykh peptidov v regulatsii gemopoezha. Tomsk.: Izd-vo Tomsk. Un-ta, 1990. 136 p. (In Russ.)]
 21. Переверзев А.Е. Кроветворные колониеобразующие клетки и физические стресс-факторы. Ленинград: Наука, 1986. 172 с. [Pereverzev A.E. Krovetvornye kolonieobrazuyushchie kletki i fizicheskie stress-factory. Leningrad: Nauka, 1986. 172 p. (In Russ.)]
 22. Григорьев Ю.Г., Степанов В.С., Батанов Г.В., Ватутин В.Д. Комбинированное действие ионизирующего и микроволнового излучений на крыс. *Радиобиология.* 1981;21(2):289–293. [Grigor'ev Yu.G., Stepanov V.S., Batanov G.V., Vatutin V.D. Kombinirovannoe deistvie ioniziruyushchego i mikrovolnovogo izlucheniya na krysy. *Radiobiologiya.* 1981;21(2):289–293. (In Russ.)]
 23. Visser Th.J. Metabolism of thyroid hormone. In book: B.A. Cooke, R.J.B. King and H.J. van der Molen. Book Hormones and their Actions. Part I. Charter 6: Elsevier Science Publishers BV (Biomedical Division); 1988. P. 81–103
 24. Croteau W., Galton V.A., Germain D.L.St. Cloning of the mammalian type II iodothyronine deiodinase. A selenoprotein differentially expressed and regulated in human and rat brain and other tissues. *J. Clin. Investig.* 1996;98(2):405–417
<https://doi.org/10.1172/JCI118806>
 25. Baumgartner A., Hiedra L., Pinna G. et al. Rat brain type II 5'-iodothyronine deiodinase activity is extremely sensitive to stress. *J. Neurochem.* 1998;71(2):817–826.
<https://doi.org/10.1046/j.1471-4159.1998.71020817.x>
 26. Yao C., Dong J., Ren K. et al. Accumulative effects of multifrequency microwave exposure with 1.5 GHz and 2.8 GHz on the structures and functions of the immune system. *Int. J. Environ. Res. Publ. Health.* 2023;20(6):4988.
<https://doi.org/10.3390/ijerph20064988>

Experimental Study of Stress Reactions Induced by Low-Intensity Microwave Radiation

O. S. Izmetstieva*, O. I. Kolganova, O. F. Chibisova, L. P. Zhavoronkov

A. Tsyb Medical Radiological Research Centre – branch of the National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

*E-mail: olgaizmetstieva@mail.ru

A study was made of the severity and dynamics of changes in indicators reflecting the state of the blood system (the number of myelokaryocytes in the femur, the level of CFU-S in the exo and endotest, hemolytic resistance of erythrocytes, as well as the mass and cellularity of the thymus) in mice exposed to monochromatic pulsed electromagnetic fields of the frequency range 2.27–2.78 GHz with an average power flux density of 60 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ at doses from 0.086 to 0.86 J/g. It is shown that under repeated exposure to electromagnetic fields, the bioeffect cumulates, leading to the development of a stress-like adaptive reaction in animals.

Keywords: electromagnetic radiation, athermal effects, immune status, cumulation of bioeffect, stress reaction

ВЛИЯНИЕ МНОГОКРАТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СЛОЖНООРГАНИЗОВАННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОВЕДЕНИЕ КРЫС В ТЕСТЕ “ОТКРЫТОЕ ПОЛЕ”

© 2024 г. О. И. Колганова, В. В. Панфилова*, О. С. Измestьева, Г. П. Жураковская,
О. Ф. Чибисова, Л. П. Жаворонков

*Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал
Национального медицинского исследовательского центра радиологии
Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия*

**E-mail: whiskas04@yandex.ru*

Поступила в редакцию 27.09.2023 г.

После доработки 20.03.2024 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

В опытах на крысах Вистар, самцах и самках, изучено действие 3-кратного (1 ч в день с интервалом 3 дня) и многократного (8 недель, 5 дней в неделю, по 2 ч в день) импульсно-модулированного электромагнитного излучения на ориентировочно-исследовательскую реакцию, тестируемую методом “открытое поле”. Облучение животных осуществляли в безэховой камере в зоне сформированной волны источника СВЧ излучения (блок из десяти генераторов, несущие частоты от 1 до 4 ГГц, суммарная средняя плотность потока энергии в импульсе 300 мкВт/см², длительность импульса 25 мс, циклы свипирования 1–6 Гц, время оборота цикла 30 с). Показано, что воздействие с такими параметрами может вызывать стрессовую реакцию и нарушение долговременной памяти у части облученных животных, причем самки крыс были более чувствительны к действию микроволн, чем самцы. Эта реакция была транзиторной, и через 1.5–2 мес. после прекращения облучения поведение животных восстанавливалось. Однако существует опасность, что при постоянном воздействии микроволн, что, например, имеет место у пользователей мобильной связью, подобные отклонения в поведении могут закрепиться и стать клинически значимыми.

Ключевые слова: крысы, микроволны, ориентировочно-исследовательская реакция, тест “открытое поле”

DOI: 10.31857/S0869803124030057, **EDN:** MBNNYD

В условиях современного мира организм человека подвергается сложноорганизованному электромагнитному излучению (ЭМИ) в связи с внедрением во все сферы деятельности новых источников разных мощностей, диапазонов частот и режимов модуляции, что вызывает серьезную озабоченность научной общественности [1–5]. Весьма чувствительной системой к воздействию ЭМИ является ЦНС [6], состояние которой оценивают по целому ряду тестов.

Один из таких тестов – изучение ориентировочно-исследовательской реакции (ОИР) животных в “открытом поле”. Этот метод, несмотря на его кажущуюся простоту, довольно информативен и достаточно часто используется как отечественными, так и зарубежными исследователями при изучении эффектов неионизирующего излучения. Исследованиями 1970–1990-х гг. было показано, что при облучении микроволнами

в дозах, вызывающих повышение температуры тела животных на 1 градус, у них нарушается ОИР [7], при меньших интенсивностях воздействующего фактора результаты не столь однозначны. Так, в работах [8] и [9] не выявлены негативные последствия хронического воздействия ЭМИ на поведение крыс в открытом поле. В то же время большинство исследователей отмечали наличие отрицательных эффектов [10–18].

Ранее мы изучили эффекты низкоинтенсивного многократного импульсно-модулированного ЭМИ (в диапазонах мобильной связи) в разных вариантах воздействия на ассоциативное обучение, определяемое по тесту выработки и воспроизведения условного рефлекса активного избегания (УРАИ) у крыс. Обнаружили, что такое воздействие “может вызывать аномальные для столь низких энергий функциональные проявления со стороны ЦНС в виде нестабиль-

ности психофизиологического статуса и поведения” [19]. Цель данной работы — анализ влияния на неассоциативное обучение животных тех же режимов ЭМИ по методу “открытое поле”.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Опыты проведены на самцах и самках крыс Вистар, в начале эксперимента возраст животных составлял 2.5 мес. В виварии животных содержали по шесть животных в пластиковых клетках, на стандартном пищевом рационе из брикетированного корма и распаренного зерна со свободным доступом к воде и еде. Все манипуляции проводили в соответствии с нормативно-правовыми актами о гуманном отношении к лабораторным животным [20].

Важным показателем состояния психофизиологической сферы является ОИР, тестируемая методом “открытого поля”. Метод позволяет оценить уровень эмоциональности (страх, тревога, беспокойство или заторможенность и т.д.), проявление исследовательского рефлекса, двигательную и ориентировочную активность. При неоднократном тестировании можно зафиксировать изменения в долговременной памяти и развитие реакции привыкания.

“Открытое поле” в наших экспериментах представляло собой квадратный (1.0×1.0 м), равномерно освещенный манеж, ограниченный непрозрачными бортиками высотой 30 см и расчерченный на 16 равных квадратов (25×25 см). Регистрацию поведенческих реакций начинали с момента посадки животного в манеж (в центральную зону, представленную четырьмя срединными квадратами). Поскольку в природе грызунам, оказавшимся на открытом пространстве, свойственно поспешить в укрытие (в угол манежа), то длительное пребывание их в центральной зоне (критерий “лаг-фаза”) расценивалось как проявление заторможенности и стресса. Из других критериев оценки поведения животных в тесте “открытое поле” регистрировались следующие: число пересечений квадратов в центре и по периферии манежа, вертикальная активность (вставание на задние лапы), число заходов в углы, стереотипные движения (груминг), количество актов дефекации (число болюсов). Длительность тестирования составляла 10 мин и результаты оценивались отдельно по двум пятиминуткам. Это обусловлено разным психофизиологическим статусом в процессе 10-минутного тестирования, поскольку в норме освоение пространства

у крыс происходит преимущественно в первые 5 мин, после чего исследовательская реакция, беспокойство и двигательная активность снижаются. Излишняя активность на протяжении всего цикла тестирования свидетельствует о возбужденности животного. Повторное тестирование через несколько суток дает возможность судить о наличии памятного следа. В случае нарушения процессов запоминания (долгосрочная память) у крысы при повторном тестировании показатели двигательной активности и длительность лаг-фазы не отличаются от таковых в предыдущем тесте. Крыса не узнает обстановку и исследует ее, как в первый раз.

Воздействовали на животных микроволнами в безэховой камере в зоне сформированной волны (около 3 м) от источника СВЧ излучения (блок из десяти генераторов с несущими частотами, равномерно распределенными по диапазону 1–4 ГГц при близких значениях мощности от каждого генератора). Во время облучения крысы находились в решетчатых контейнерах из оргстекла, ограничивающих свободное движение животных, но не нарушающих их теплообмен, и продольной осью тела были ориентированы параллельно вектору E поля. В безэховой камере поддерживались следующие условия микроклимата: температура воздуха 22.0 ± 0.5 °C, влажность воздуха $50 \pm 5\%$, конвекционный поток воздуха около 0.5 м/с.

Для исследований были выбраны два разных варианта воздействия. Первый вариант: животных подвергали облучению 3 раза с интервалом 3 дня, по 1 ч в день. Второй вариант — 40 сеансов облучения, 5 дней в неделю по рабочим дням, ежедневная экспозиция составляла 2 ч, таким образом, период хронического воздействия длился около 2 мес. В обоих случаях использовали импульсный режим: суммарная ППЭ в импульсе 300 мкВт/см^2 , длительность импульса 25 мс, с возвратными циклами свипирования (изменения частоты) импульсной модуляции ЭМИ в диапазоне частот, близком к ритмам ЭЭГ (от 6 до 1 Гц), время оборота цикла 30 с. Животные контрольных групп подвергались таким же манипуляциям, как и подопытные животные, но при выключенном источнике.

Животных тестировали за сутки до начала облучения (фоновые показатели) и составляли равноценные по исходной активности контрольные и подопытные группы, при этом из дальнейшей работы исключали животных, которые аномально долго не выходили из центральной зоны.

Таблица 1. Показатели ОИР самцов крыс, облученных в течение 3 сеансов ЭМИ за 10 мин наблюдений (сумма показателей за первую и вторую пятиминутки)
Table 1. Indicators of the tentative research activity of male rats irradiated during three sessions of EMR, in total for 10 minutes of observations ($M \pm m$)

Показатели Группа	Лag-фаза (с)	Количество встаний	Груминг	Дефекации	Заход в углы	Количество пересечений квадратов в центре	Количество пересечений квадратов по периферии
Исходные показатели (до воздействия)							
К ($n = 19$)	3.4 ± 0.9	13.5 ± 1.8	9.4 ± 1.0	1.5 ± 0.3	12.2 ± 1.6	1.9 ± 0.4	32.7 ± 4.8
О ($n = 18$)	2.3 ± 0.3	10.9 ± 1.7	9.1 ± 1.0	1.4 ± 0.4	11.9 ± 1.7	1.8 ± 0.3	31.4 ± 4.9
Первый тест (через 1 сут после воздействия)							
К ($n = 19$)	2.5 ± 0.4	7.4 ± 1.1	8.7 ± 1.1	0.7 ± 0.2	9.3 ± 1.4	1.8 ± 0.2	25.2 ± 4.3
О ($n = 18$)	2.7 ± 0.7	5.4 ± 1.0	6.4 ± 0.9	0.3 ± 0.1	8.3 ± 1.4	1.6 ± 0.3	22.1 ± 4.4
Второй тест (через 11 сут после воздействия)							
К ($n = 19$)	1.3 ± 0.1	9.1 ± 1.4	7.3 ± 0.7	1.2 ± 0.3	10.6 ± 1.6	1.8 ± 0.5	28.5 ± 4.6
О ($n = 18$)	1.3 ± 0.1	12.4 ± 1.6	5.9 ± 0.9	1.9 ± 0.4	13.0 ± 1.8	2.4 ± 0.6	35.9 ± 5.4
Третий тест (через 26 сут после воздействия)							
К ($n = 19$)	2.4 ± 0.5	7.0 ± 1.0	6.5 ± 0.7	0.9 ± 0.3	9.7 ± 1.4	1.3 ± 0.1	25.8 ± 3.8
О ($n = 18$)	1.9 ± 0.2	9.5 ± 1.3	5.9 ± 0.7	0.7 ± 0.3	12.4 ± 1.6	1.3 ± 0.2	34.9 ± 4.8
Четвертый тест (через 45 сут после воздействия)							
К ($n = 19$)	1.7 ± 0.2	9.0 ± 1.4	6.6 ± 0.7	2.5 ± 0.6	10.3 ± 1.4	1.8 ± 0.5	28.1 ± 4.2
О ($n = 18$)	1.9 ± 0.1	9.8 ± 1.3	4.5 ± 0.8	0.7 ± 0.3	14.2 ± 1.9	2.0 ± 0.4	40.1 ± 5.5

Примечание. К – контрольная группа, О – опытная группа.

Все количественные показатели сравнивали по *t*-критерию Стьюдента и *U*-критерию Вилкоксона–Манна–Уитни.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Серия 1. Оценка ОИР животных после трехкратного СВЧ-облучения

В этом варианте работы воздействию подвергались как самцы (табл. 1), так и самки крыс (табл. 2). Животных тестировали через 1, 11, 26 и 45 сут после окончания воздействия.

При изучении поведения самцов после облучения в процессе тестирования никаких нарушений в поведении крыс не выявлено: ОИР подопытной группы не отличалась от ОИР контрольной группы.

В процессе тестирования самок было замечено, что животные подопытной группы позднее,

чем животные контрольной группы, выходят из центральной зоны в начале опыта (показатель “лаг-фаза”). На 1-е и 11-е сутки эти различия не являются достоверными, но на 26-е сутки становятся статистически значимыми. Подопытная группа по этому признаку распалась на две подгруппы: 8 животных из 22 заметно позднее выходили из центральной зоны. Длительность их лаг-фазы составляла в среднем 30.9 ± 15.7 с, тогда как у остальных 14 крыс – 1.6 ± 0.2 с, различия между этими подгруппами опытной группы статистически значимы. Можно заключить, что у части животных подопытной группы возникло состояние частичного ступора, замирания, тревожности. Однако через 1.5 мес. после окончания облучения поведение крыс подопытной группы восстановилось. Следует отметить, что у контрольных крыс-самок во все сроки тестирования наблюдался очень маленький разброс показателя “лаг-фаза”. По остальным изученным показателям статистических различий между

Таблица 2. Показатели ориентировочно-исследовательской активности самок крыс, облученных в течение трех сеансов ЭМИ, суммарно за 10 мин наблюдений**Table 2.** Indicators of the tentative research activity of **female** rats irradiated during three sessions of EMR, in total for 10 minutes of observations ($M \pm m$)

Показатели Группа	Лag-фаза (с)	Количество вставаний	Груминг	Дефекации	Заход в углы	Количество пересечений квадратов в центре	Количество пересечений квадратов по периферии
Исходные показатели (до воздействия)							
К ($n = 22$)	2.4 ± 0.4	17.5 ± 1.9	5.3 ± 0.6	0.9 ± 0.3	26.9 ± 1.7	8.4 ± 1.3	76.9 ± 4.4
О ($n = 22$)	2.5 ± 0.4	15.8 ± 1.5	5.8 ± 0.5	0.9 ± 0.2	30.0 ± 1.8	9.3 ± 1.1	77.3 ± 5.1
Первый тест (через 1 сут после воздействия)							
К ($n = 22$)	2.0 ± 0.8	22.8 ± 3.0	6.8 ± 1.0	1.3 ± 0.2	22.0 ± 2.4	5.8 ± 1.2	59.1 ± 7.1
О ($n = 22$)	8.9 ± 4.8	20.8 ± 2.5	6.3 ± 0.8	1.4 ± 0.4	23.8 ± 2.2	7.0 ± 1.1	65.2 ± 6.4
Второй тест (через 11 сут после воздействия)							
К ($n = 22$)	2.2 ± 0.3	8.0 ± 1.1	8.9 ± 1.1	1.2 ± 0.3	8.9 ± 1.2	2.9 ± 0.4	23.0 ± 3.3
О ($n = 22$)	11.0 ± 5.7	5.9 ± 1.1	8.2 ± 0.7	0.8 ± 0.2	8.0 ± 1.2	2.6 ± 0.3	20.3 ± 3.5
Третий тест (через 26 сут после воздействия)							
К ($n = 22$)	1.5 ± 0.1	9.3 ± 2.0	8.1 ± 1.3	1.4 ± 0.4	10.7 ± 1.9	3.4 ± 1.1	28.4 ± 5.4
О ($n = 22$)	$12.3 \pm 6.3^*$	4.9 ± 0.8	5.4 ± 0.9	0.5 ± 0.2	7.1 ± 1.0	1.5 ± 0.2	17.9 ± 2.9
Четвертый тест (через 45 сут после воздействия)							
К ($n = 22$)	2.0 ± 0.2	6.2 ± 1.6	3.3 ± 0.4	0.5 ± 0.2	8.5 ± 1.4	2.6 ± 0.7	21.9 ± 4.1
О ($n = 22$)	2.3 ± 0.1	5.8 ± 1.5	4.3 ± 0.5	1.0 ± 0.3	9.6 ± 1.5	2.0 ± 0.4	26.0 ± 4.5

Примечание. К – контрольная группа, О – опытная группа.

* Статистически значимые различия с контрольной группой при $p \geq 0.05$.

контрольной и подопытной группами зафиксировано не было. И у контрольной, и у подопытной группы по мере тестирования развивалась реакция привыкания: уменьшалось количество вставаний и снижалась общая двигательная активность.

Серия 2. Многократное облучение в течение 40 сеансов

В этом варианте работы воздействию подвергались только самцы. При тестировании ОИР крыс-самцов контрольной и подопытной группы во все сроки испытаний, как во время хронического облучения, так и после окончания воздействия, статистически значимые различия были выявлены только в длительности лаг-фазы (табл. 3) после окончания облучения (на следующие сутки после 40-го сеанса облучения).

Имелась также тенденция (на уровне $p = 0.1$) к различию между опытной и контрольной группами при тестировании животных после 40-го сеанса облучения в первые пять минут наблюдения по таким показателям, как количество вставаний, заход в углы, двигательная активность по периферии манежа.

Во все остальные сроки тестирования как во время облучения, так и через два месяца после окончания облучения, статистически значимых различий между подопытной и контрольной группами выявлено не было. Однако можно отметить, что у контрольной группы по мере тестирования происходит укорочение времени выхода из центральной зоны и сужение разброса показателя “лаг-фаза”, что свидетельствует о длительном запоминании контрольными животными знакомой обстановки манежа. В то же время у подопытных животных как во время облучения, так и после

Таблица 3. Показатели ориентировочно-исследовательской активности самцов крыс, облученных в течение 40 сеансов ЭМИ, за 10 мин наблюдений
Table 3. Indicators of the tentative research activity of male rats irradiated during forty sessions of EMR, in total for 10 minutes of observations ($M \pm m$)

Показатели Группа	Лаг-фаза (с)	Количе- ство вста- ваний	Груминг	Дефека- ции	Заход в углы	Количество пе- ресечений ква- дратов в центре	Количество пере- сечений квадра- тов по периферии
Исходные показатели (до воздействия)							
К ($n = 19$)	3.9 ± 1.7	17.0 ± 3.3	6.7 ± 0.6	1.1 ± 0.3	23.3 ± 3.9	8.6 ± 1.5	66.8 ± 11.7
О ($n = 20$)	4.3 ± 1.1	15.3 ± 2.3	8.8 ± 1.1	1.6 ± 0.4	21.0 ± 3.3	8.0 ± 1.5	59.2 ± 10.0
Первый тест (через 11 сеансов воздействия)							
К ($n = 19$)	3.2 ± 0.4	8.7 ± 1.4	7.8 ± 0.7	1.4 ± 0.3	14.4 ± 2.1	4.4 ± 0.7	39.8 ± 6.3
О ($n = 20$)	19.1 ± 14.8	9.6 ± 1.5	6.7 ± 0.9	1.6 ± 0.6	15.7 ± 2.7	6.1 ± 1.1	43.9 ± 7.7
Второй тест (через 31 сеанс воздействия)							
К ($n = 19$)	3.0 ± 0.6	7.5 ± 1.4	4.4 ± 6.9	0.6 ± 0.3	13.4 ± 2.1	3.7 ± 0.8	36.6 ± 6.1
О ($n = 20$)	10.7 ± 0.7	7.6 ± 1.1	5.2 ± 6.8	0.9 ± 0.3	13.8 ± 2.0	4.4 ± 0.7	39.0 ± 6.3
Третий тест (через 40 сеансов воздействия)							
К ($n = 19$)	2.3 ± 0.5	6.4 ± 1.6	5.2 ± 0.7	1.2 ± 0.4	12.0 ± 2.2	4.2 ± 0.9	33.4 ± 6.8
О ($n = 20$)	$6.7 \pm 2.1^*$	7.8 ± 1.2	5.3 ± 0.6	0.6 ± 0.2	16.1 ± 2.4	5.2 ± 1.1	45.1 ± 7.3
Четвертый тест (через два месяца после окончания воздействия)							
К ($n = 19$)	1.9 ± 0.2	9.5 ± 2.1	5.2 ± 0.7	0.3 ± 0.1	16.1 ± 2.7	4.5 ± 0.9	45.0 ± 8.0
О ($n = 20$)	21.2 ± 14.4	8.9 ± 1.6	5.8 ± 0.6	0.7 ± 0.3	14.8 ± 2.5	3.6 ± 0.8	40.1 ± 7.4

Примечание. К – контрольная группа, О – опытная группа.
* Статистически значимые различия с контрольной группой при $p \geq 0.05$.

его окончания сохраняется длительная лаг-фаза, причем наблюдается расслоение подопытной группы на животных с короткой лаг-фазой и животных с длительной лаг-фазой, что говорит о том, что у части подопытных крыс возникли нарушения долговременной памяти.

ОБСУЖДЕНИЕ

В современном мире остро встал вопрос влияния на когнитивные функции и в целом на здоровье относительно слабых, но сложно организованных электромагнитных полей (ЭМП), формирующихся от одновременно работающих нескольких источников ЭМИ с разными несущими частотами. В своей работе мы постарались смоделировать такую ситуацию. Мы выяснили, что при использовании нескольких несущих и режимах модуляции, близких к ритмам ЭЭГ, воздействие ЭМИ данных режимов не вызывало

грубых нарушений ОИР животных, однако оно все же сказалось на процессе запоминания животными окружающей обстановки (территории манежа). Эти изменения не сохранялись длительно. Тем не менее данная наша работа вместе с предыдущей [19] показывает, что сложноорганизованные ЭМП могут вызывать функциональные нарушения в формировании процессов ассоциативного и неассоциативного обучения.

Наши результаты согласуются с исследованием влияния на когнитивные функции одной, двух или трех несущих частот импульсно-модулированного ЭМИ при одинаковой средней ППЭ [21]. Установлено, что реакция от каждой частоты находилась в пределах физиологической нормы, но при увеличении количества частот эффекты нарастали. Анализ показал, что различная степень синхронизации биоэлектрической активности мозга может рассматриваться как один из нейрофизиологических механизмов

формирования аномальных реакций мозга, имеющих свое отражение в поведении животных.

Другим возможным механизмом эффектов сложных ЭМИ может быть прямое повреждающее действие на мозг. Так, [18] исследовали эффекты длительного влияния ЭМИ в режимах мобильной связи на структуры мозга и антиоксидантный статус мозга и, параллельно, на поведение животных в открытом поле и лабиринтах. После воздействия ЭМИ гистологическое исследование показало наличие нейродегенеративных изменений в клетках гиппокампа и коры головного мозга, а также значительное изменение уровня антиоксидантных ферментов. Одновременно наблюдалось статистически значимое ухудшение обучаемости животных и повышение уровня их тревожности. Данная работа позволяет сделать заключение о наличии прямой связи между повреждающим действием ЭМИ на мозг и поведением.

В нашей работе выявились также гендерные различия в реакции животных на 3-кратное воздействие ЭМИ: самки крыс оказались более чувствительны к облучению электромагнитными волнами. Рядом авторов, при использовании ЭМИ в других режимах, также выявлено более негативное действие ЭМИ на самок [14, 22, 23]. Данное обстоятельство может иметь значение при санитарно-гигиенической оценке последствий воздействия ЭМИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учетом наших предыдущих исследований таких же режимов ЭМИ по критерию выработки и воспроизведению УРАИ, подтверждается наш вывод о том, что многократное воздействие сложноорганизованного ЭМИ, близкого к параметрам мобильной связи, может вызывать функциональные нарушения в поведении животных, однако эти нарушения не достигают выраженной клинической значимости. Однако существует опасность, что при постоянном воздействии ЭМИ, что, например, имеет место у пользователей мобильной связью, подобные отклонения в поведении могут закрепиться и стать клинически значимыми.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при частичном финансировании РФФИ и администрации Калужской области (The work was carried out with partial financial support from the Russian Foundation

for Basic Research and the administration of the Kaluga Region).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией статьи (The authors declare that there are no obvious or potential conflicts of interest related to the publication of the article).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Колганова Ольга Ивановна, канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения “Национальный медицинский исследовательский центр радиологии” Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия (Tsyb Medical Radiological Research Centre — branch of the National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia).

Сбор и анализ материала, написание статьи (Collection and analysis of material, writing an article).

o.kolgan.obn@mail.ru

Панфилова Виктория Викторовна, канд. биол. наук, старший научный сотрудник, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения “Национальный медицинский исследовательский центр радиологии” Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия (A. Tsyb Medical Radiological Research Centre — branch of the National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia).

Сбор и анализ материала, написание статьи (Collection and analysis of material, writing an article).

whiskas04@yandex.ru

Жураковская Галина Петровна, канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения “Национальный медицинский исследовательский центр радиологии” Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия (A. Tsyb Medical Radiological Research Centre — branch of the National Medical Research Radiological Centre

of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia).

Сбор и анализ экспериментальных данных (Collection and analysis of experimental data).

zhgalina@mail.ru

Изместьева Ольга Семеновна, канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения “Национальный медицинский исследовательский центр радиологии” Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия (A. Tsyb Medical Radiological Research Centre – branch of the National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia).

Сбор и анализ экспериментальных данных (Collection and analysis of experimental data).

olgaizmestieva@mail.ru

Чибисова Ольга Федоровна, научный сотрудник, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения “Национальный медицинский исследовательский центр радиологии” Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия (A. Tsyb Medical Radiological Research Centre – branch of the National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia).

Сбор и анализ экспериментальных данных (Collection and analysis of experimental data).

trocha.olga@yandex.ru

Жаворонков Леонид Петрович, д-р мед. наук, профессор научно-образовательного отдела Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения “Национальный медицинский исследовательский центр радиологии” Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия

(A. Tsyb Medical Radiological Research Centre – branch of the National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia).

Общее руководство, редактирование статьи (General guidance, article editing).

leonid.petrovich@inbox.ru

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хорсева Н.И., Григорьев Ю.Г., Горбунова Н.В. Психофизиологические показатели детей-пользователей мобильной связью. Сообщение 2. Результаты четырехлетнего мониторинга. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2011;51 (5):617–623. [Khorseva N.I., Grigoriev Yu.G., Gorbunova N.V. Psychophysiological indicators of children-users of mobile communication. Message 2. Results of four-year monitoring. *Radiation biology. Radioecology*. 2011;51(5):617–623. (In Russ.)].
2. Lerchl A., Klose M., Grote K. et al. Tumor promotion by exposure to radiofrequency electromagnetic fields below exposure limits for humans. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 2015;459(4):585–590. <http://doi.org/10.1016/j.bbrc.2015.02.151>
3. Григорьев О.А., Никитина В.Н., Носов В.Н. и соавт. Электромагнитная безопасность населения. Национальные и международные нормативы электромагнитных полей радиочастотного диапазона. *Здоровье населения и среда обитания – ЗНЕСО*. 2020;(10):28–33. [Grigoriev O.A., Nikitina V.N., Nosov V.N. et al. Electromagnetic radiation safety russian national and international regulatory frameworks for radiofrequency electromagnetic fields. *Public health and life environment – PH&LE*. 2020;10:28–33. (In Russ.)]. <http://doi.org/10.35627/2219-5238/2020-331-10-28-33>
4. Григорьев О.А., Зубарев Ю.Б. Действие электромагнитной энергии беспроводной связи на человека: прогнозы роста обусловленной заболеваемости, их реализация и проблемы ошибки. *Концепции*. 2022;(1):3–17. [Grigoriev O.A., Zubarev Yu.B. The effects of wireless communication electromagnetic energy influence on persons: predictions of the growth for conditioned morbidity. Their implementation and problems of evaluation. *Concepts*. 2022;1:3–17. (In Russ.)]. <http://doi.org/10.34705/КО.2022.68.54.001>
5. Никитина В.Н., Калинина Н.И., Ляшко Г.Г. и соавт. Особенности архитектуры сетей 5G. Вероятностное прогнозирование воздействия электромагнитных полей радиочастот на население (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2021;100(8):792–796. [Nikitina V.N., Kalinina N.I., Lyashko G.G. et al. Special features of the architecture of 5G networks. Probabilistic forecasting of the impact of electromagnetic fields of radio frequencies on the population (literature review). *Hygiene and Sanitation*. 2021;100(8):792–796. (In Russ.)]. <http://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-8-792-796>
6. Лукьянова С.Н. Фундаментальная характеристика нейроэффектов слабых электромагнитных воздействий (от нейрона к отделу мозга, ЦНС, организму). М.: Изд-во ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, 2023. 140 с. [Luk'yanova S.N. Fundamental'naya kharakteristika nejroeffektov slaby'h e'lectromagnitny'h vozdejstvij (ot nejrona k otdely mozga, CNS,

- organizmu). M.: Izdatel'stvo Federal'nogo medicinskogo biofizicheskogo centra imeni A.I. Burnazyana, 2023. 140 p. (In Russ.).
7. D'Andrea J.A., Chou C.K., Johnston Sh.A., Adair E.R. Microwave effect on the nervous system. *Bioelectromagnetics*. 2003. Suppl. 6: S107–S147. <http://doi.org/10.1002/bem10179>
 8. Klose M., Grote K., Spathmann O., Streckert J. et al. Effects of early-onset radiofrequency electromagnetic field exposure (GSM 900 MHz) on behavior and memory in rats. *Radiat. Res.* 2014; 182 (4):435–447. <http://doi.org/10.1667/RR13695.1>
 9. Shirai T., Wang J., Kawabe M., Wake K. et al. No adverse effects detected for simultaneous whole-body exposure to multiple-frequency electromagnetic fields for rats in the intrauterine and pre- and post-weaning period. *J. Radiat. Res.* 2017; 58(1):48–8. <http://doi.org/10.1093/jrr/rw085>
 10. Денисенко С.А. Изучение ориентировочной активности крыс, испытавших воздействие низкочастотного электромагнитного излучения сантиметрового диапазона. *Мир медицины и биологии (Світ медицини та біології)*. 2009; 5(2):99–104. [Denisenko S.A. Izuchenie orientirovochnoy aktivnosti kry's, ispy'tavshix vozejstvie nizkointensivnogo e'lectromagnitnogo izlucheniya santimetrovogo diapazona (Study on orientative activity of rats, which were prenatally exposed to low intensity centimetric range electro-magnetic radiation). *Mir mediciny' i biologii (World of medicine and biology)*. 2009; 5(2): 99–104. (In Russ.)].
 11. Зибарев Е.В., Афанасьев А.С., Слюсарева О.В., Булавина И.Д. Исследования влияния Wi-Fi оборудования на организм лабораторных животных. *Гигиена и санитария*. 2017; 96(7):661–664. [Zibarev E.V., Afanas'ev A.S., Slysareva O.V., Bulavinova I.D. Exploratory studies of the influence of wireless equipment on the body of the laboratory animals. *Hygiene and Sanitation*. 2017; 96(7):661–664. (In Russ.)]. <http://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-7-661-664>
 12. Кадукова Е.М., Сташкевич Д.Г., Наумов А.Д. Влияние ионизирующего и неионизирующего излучений на поведение крыс-самок в тесте “Открытое поле”. *Проблемы здоровья и экологии*. 2015; 2(44): 55–59. [Kadukova E.M., Stashkevich D.G., Naumov A.D. The influence of ionizing and non-ionizing radiation on the behavior of female rats in the “open field” test. *Health and ecology issues. Problems of health and ecology*. 2015; 2 (44): 55–59. (In Russ.)]. <http://doi.org/10.51523/2708-6011.2015-12-2-11>
 13. Навакатикян М.А. Изменения активности и условнорефлекторной деятельности белых крыс в период хронического микроволнового облучения и после него. *Радиобиология*. 1988; 28(1): 120–125. [Navakatikyan M.A. Changes in the activity and conditioned reflex activity of white rats during chronic microwave irradiation. *Radiobiology*. 1988; 28 (1): 120-125. (In Russ.)].
 14. Хиразова Е.Э., Байжуманов А.А., Трофимова Л.К. и др. Влияние электромагнитного излучения GSM-диапазона на некоторые физиологические и биохимические характеристики крыс. *Бюлл. эксперим. биологии и медицины*. 2012; 153(6): 791–794. [Khirazova E.E., Bayzhumanov A.A., Trofimova L.K. et al. Effects of GSM-frequency electromagnetic radiation on some physiological and biochemical parameters in rats. *Bulletin of experimental biology and medicine*. 2012; 153(6): 791–794. (In Russ.)].
 15. Ширяева Н.В., Вайдо А.И., Павлова М.В. и др. Влияние электромагнитных излучений на ориентировочно-исследовательскую активность и когнитивные функции крыс с контрастной возбудимостью нервной системы. *Интегративная физиология*. 2020; 1 (2): 123–132. [Shiryaeva N.V., Vaido A.I., Pavlova M.V. et al. Electromagnetic radiation impact on the orienting-exploratory activity and cognitive functions of rat strains with contrasting excitability of the nervous system. *Integrative physiology*. 2020; 1 (2): 123–132. (In Russ.)]. <http://doi.org/10.33910/2687-1270-2020-1-2-123-132>
 16. De Sere R., Poutriquet C., Games Ch. et al. Repeated exposure to nanosecond high power pulsed microwaves increases cancer incidence in rat. *Plos One*. 2020. 15(4): e0226858. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0226858>. eCollection 2020.
 17. Dondoladze Kh., Nikolaishvili M., Museliani T. et al. Impact of hosenhold microwave oven non-ionizing radiation on blood plasma cortizol levels in rats and their behavior. *Georg. Med. News*. 2020; 306: 132–137.
 18. Saikhedkar N., Bhatnagar M., Jain A. et al. Effect of mobile phone radiation (900 MHz radiofrequency) on structure and functions of rat brain. *Neurol. Res.* 2014; 36 (12): 1072–1079. <http://doi.org/10.1179/1743132814Y.0000000392>
 19. Павлова Л.Н., Колганова О.И., Измestьева О.С. и др. Влияние многократного и хронического воздействия электромагнитного излучения диапазона частот мобильной связи на поведение и когнитивные функции мозга крыс. *Радиаци. биология. Радиоэкология*. 2019; 59 (6): 619–626. [Pavlova L.N., Kolganova O.I., Izmestieva O.S. et al. Influence of multiple and chronic exposure to electromagnetic radiation of the mobile communication frequency range on the behavior and cognitive functions of the rat brain. *Radiation biology. Radioecology*. 2019; 59 (6): 619–626. (In Russ.)]. <http://doi.org/10.1134/S08698033119060080>
 20. FELASA Euroguide on the accommodation and care of animals used for experimental and other scientific purposes. London: The Royal Society of Medicine Press Ltd., 2007. 73 p.

21. Лукьянова С.Н., Степанов В.С., Торубаров Ф.С. Изучение биоэффектов сложноорганизованных электромагнитных воздействий низкой интенсивности. *Гигиена и санитария*. 2022; 101 (5): 515–521. [Lukyanova S.N., Stepanov V.S., Torubarov F.S. Studying the bioeffects of complexly organized electromagnetic impacts of low intensity. *Hygiene and Sanitation*. 2022; 101 (5): 515–521. (In Russ.)].
<http://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-5-515-521>
22. Измestьева О.С., Павлова Л.Н., Жаворонков Л.П. Экспериментальная оценка последствий хронического воздействия электромагнитного излучения диапазона мобильной связи в антенатальном периоде развития крыс. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2020; 60 (1): 63–70. [Izmestieva O.S., Pavlova L.N., Zhavoronkov L.P. Experimental evaluation of the consequences of the chronic influence of electromagnetic radiation of the mobile communication range in antenatal rat development period. *Radiation biology. Radioecology*. 2020; 60 (1): 63–70. (In Russ.)].
<http://doi.org/10.31857/S0869803120010099>
23. Панфилова В.В., Колганова О.И., Чибисова О.Ф. Анализ результатов длительного воздействия ЭМИ на когнитивные функции потомства облученных крыс. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2021; 61 (2): 174–179. [Panfilova V.V., Kolganova O.I., Chibisova O.F. Analysis of the results of the prolonged influence of EMP on the cognitive functions of the progeny of irradiated rats. *Radiation biology. Radioecology*. 2021; 61 (2): 174–179. (In Russ.)].
<http://doi.org/10.31857/S0869803121010094>

The Effect of Repeated Exposure to Complexly Organized Electromagnetic Radiation on the Rats Behavior in the “Open Field” Test

O. I. Kolganova, V. V. Panfilova*, O. S. Izmestyeva, G. P. Zhurakovskaya, O. F. Chibisova, L. P. Zhavoronkov

A. Tsyb Medical Radiological Research Centre – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

*E-mail: whiskas04@yandex.ru

In experiments on Wistar rats, males and females, the effect of 3-fold (1 hour a day with an interval of three days) and multiple (8 weeks, 5 days a week, 2 hours a day) pulsed-modulated electromagnetic radiation on the tentative research reactions was studied, tested by the “open field” method. The animals were irradiated in an anechoic chamber in the zone of the formed wave of the microwave source (a block of 10 generators carrying frequencies from 1 to 4 GHz, the total pulse power density 300 microW/cm², pulse duration 25 ms, sweep cycles 1–6 Hz, cycle turn-around time 30s). It has been showed that exposure to such parameters can cause a stress reaction and an impairment of long-term memory in some irradiated animals, and female rats were more sensitive to the action of microwaves, than males. This reaction was transient and 1.5–2 months after cessation of irradiation, the behavior of the animals was restored. However, there is a danger that with constant exposure to microwaves, which, for example, occurs in mobile users, such behavior deviations may become fixed and clinically significant.

Key words: rats, microwaves, orienting-exploratory response, open-field test

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЖИВОТНЫХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ СТАНДАРТА МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ 5G

© 2024 г. В. Н. Никитина*, Н. И. Калинина, Е. Н. Дубровская, В. П. Плеханов, А. А. Ковшов

Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья Роспотребнадзора, Санкт-Петербург, Россия

**E-mail: v.nikitina@s-znc.ru*

Поступила в редакцию 25.12.2023 г.

После доработки 15.02.2024 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

Выполнено пилотное экспериментальное исследование по оценке влияния на центральную нервную систему животных немодулированного и модулированного электромагнитного поля стандарта мобильной связи 5G. Половозрелые крысы – самцы линии Вистар в течение 15 дней по 2 ч в день подвергались воздействию электромагнитных полей частотой 4.9 ГГц, интенсивностью 250 мкВт/см². Животные двух облучаемых групп и контрольной группы находились в идентичных условиях в полубезэховой экранированной камере. Влияние электромагнитного поля на функциональное состояние центральной нервной системы оценивалось путем комплексного анализа паттернов поведения в тесте “открытое поле” до и после облучения. В исследовании не выявлено четких отличий в поведении животных при облучении немодулированным и модулированным электромагнитным полем 5G. В динамике эксперимента зарегистрированы статистически значимые изменения поведения животных в двух облучаемых и контрольной группах, что, возможно, связано с изменением естественного электромагнитного фона в полубезэховой экранированной камере.

Ключевые слова: электромагнитные поля, экспериментальные исследования, поведенческие реакции животных, биологические эффекты

DOI: 10.31857/S0869803124030061, **EDN:** MBIFEL

Сети 5G являются новым этапом развития телекоммуникационных систем и рассматриваются как революция в области мобильной связи. По сравнению с современными стандартами мобильной связи 3G и 4G, 5G дает решающие преимущества, особенно в разработке новых технологий. Мобильная связь 5G открывает широкие возможности применения, особенно в Интернете вещей (IoT), межмашинной связи (M2M), приложениях сверхширокополосного доступа, автомобилях с автоматическим управлением, позволяет существенно увеличить объем и скорость передаваемой информации. Исследования показывают, что объем данных, которые передаются по мобильной сети, ежегодно удваивается. Внедрение третьего поколения сотовой связи (3G, UMTS) и четвертого поколения (4G, LTE) с 2012 г. позволило удовлетворить потребности в их передаче на сегодняшний день. Однако сейчас эти технологии достигли своего предела [1, 2].

Технические характеристики, области применения и нововведения нового стандарта мобильной связи 5G анализируются во многих публикациях. Рассмотрение с гигиенических позиций сети 5G свидетельствует о существенном отличии их от сетей мобильной связи предыдущих поколений с точки зрения влияния электромагнитного поля (ЭМП) на здоровье населения. Сети 5G существенно изменяют электромагнитную обстановку в среде обитания человека. Особенностью мобильной связи пятого поколения является расширение верхней границы радиочастот (использование миллиметровых волн), многочисленность излучающих устройств, сверхплотность радиосетей, использование активных антенных систем ММО, новых сценариев размещения базовых станций (БС), обеспечение прямой связи между абонентскими терминалами, применение сигналов с большей шириной спектра и новыми типами

модуляции, биологическое действие которых не изучено [3]. На сегодня можно констатировать наличие ограниченного числа исследования такой направленности. В то же время усложнение электромагнитной обстановки в среде обитания человека требует совершенствования системы обеспечения электромагнитной безопасности, в том числе в области регламентирования уровней ЭМП радиочастотного диапазона. Все вышеизложенное послужило предпосылкой к постановке настоящего пилотного экспериментального исследования. Цель работы: оценка влияния ЭМП мобильной связи 5G частотой 4.9 ГГц на поведение животных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

На основании изучения современных требований к постановке экспериментов на животных были разработаны программы исследований и протокол проведения лабораторных экспериментов по изучению биоэффектов ЭМП РЧ-диапазона. В работе изучали влияние электромагнитных полей на функциональное состояние центральной нервной системы (ЦНС) на основе комплексного анализа поведения животных. Исследование поведенческих реакций и вегетативных функций животных широко используется при изучении состояния ЦНС, как наиболее чувствительной к воздействию электромагнитных излучений (ЭМИ). При изучении поведенческих реакций широко применяется метод “открытое поле”, который заключается в исследовании двигательного компонента ориентировочной реакции и эмоциональной реактивности животных. Этот метод используется при изучении поведенческих реакций в физиологии, медицине, фармакологии, является одним из старейших классических методов для оценки общей активности, а также исследовательского поведения животных [4–6]. Результаты изучения влияния электромагнитного излучения на когнитивные функции мозга животных с регистрацией изменения показателей поведенческой и исследовательской активности крыс при воздействии ЭМП РЧ диапазона представлены в ряде исследований [7–10].

В настоящем исследовании в сравнительном аспекте изучалось влияние на поведение животных широкополосных модулированных ЭМП мобильной связи 5G и немодулированных электромагнитных полей частотой 4.9 ГГц.

Эксперименты проводили на самцах беспородных белых крыс линии Вистар, которые

были распределены на опытные и контрольную группы. Животные содержались в виварии в стандартных условиях при свободном доступе к воде и корму. До начала исследований лабораторные животные находились в виварии 14 дней на карантине. При выполнении работы соблюдены этические принципы экспериментов на животных и основные положения Хельсинской декларации. Исследовательская работа выполнена с соблюдением требований Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях (ETS N 123) и межгосударственного стандарта ГОСТ 33216-2014 “Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила содержания и ухода за лабораторными грызунами и кроликами”.

До начала эксперимента была проведена регистрация веса животных и ориентировочно-исследовательских реакций по тесту “открытое поле”. По результатам этих исследований был проведен отбор и формирование трех экспериментальных групп по 12 животных в каждой серии эксперимента (две группы опытные, одна группа контрольная). Сформированные группы экспериментальных животных однородны по индивидуальным значениям веса тела (отклонения не более $\pm 10\%$) и показателям энтропии.

Для постановки эксперимента изучались базовые технические характеристики сотовой связи пятого поколения. В Российской Федерации Решением Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ) от 17.03.2020 №20-54-20 определено, что перспективными для построения сетей связи стандарта 5G/IMT-2020 являются следующие диапазоны радиочастот: 694–790 МГц, 2300–2440 МГц, 2570–2620 МГц, 4400–4990 МГц и 24.25–27.5 ГГц. Тестовые испытания сети 5G в РФ проходят на частоте 4800–4990 МГц (сантиметровый диапазон) и 24.25–27.5 ГГц (миллиметровый диапазон). Согласно Концепции создания и развития сетей 5G/IMT-2020 Российской Федерации (утверждена Приказом Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ № 923 от 29.12.2019 г.), ширина спектра на частотах до 6000 МГц составляет до 100 МГц.

Стандовое оборудование экспериментального исследования включало векторный генератор сигналов типа SMCV100B 1432.7000.02, широкополосный усилитель SAM100, антенну рупорную экспоненциальную HF907. В задачу исследований входила сравнительная оценка реакций

организма животных на воздействие модулированных широкополосных ЭМП 5G и немодулированных ЭМП частотой 4.9 ГГц. Проведены 2 серии исследований, в первой серии крысы подвергались воздействию ЭМП с несущей частотой 4.9 ГГц, во второй серии — ЭМП частотой 4.9 ГГц со следующими характеристиками радиочастотного сигнала стандарта 5G: модуляция сигнала 64 QAM (квадратурная амплитудная модуляция с ортогональным частотным разделением (OFDM)), ширина полосы модуляции 100 МГц. Уровень плотности потока энергии (ППЭ) ЭМП в первой и второй сериях был одинаковым и составлял 250 мкВт/см^2 .

Модулированные широкополосные ЭМП частотой 4.9 ГГц используются в тестовых испытаниях стандарта 5G в России. Таким образом, отличия между сериями экспериментов заключались в характеристиках радиочастотного сигнала: во второй серии воспроизводились параметры модуляции и ширина спектра сигнала, используемого в 5G. Крысы подвергались воздействию ЭМП РЧ в течение 15 дней по 2 ч ежедневно.

Для проведения измерений ППЭ ЭМП использовался измеритель уровней электромагнитных излучений ПЗ-42, напряженности постоянного магнитного поля (МП) — магнитометр МТМ-01, температуры и влажности воздуха — термогигрометр ТКА-ПКМ, уровней освещенности — люксметр ТКА. Приборы внесены в государственный реестр средств измерения и имели действующие свидетельства о поверке.

Экспериментальный стенд, установленный в полубезэховой (полуэкранированной) камере, покрытой поглотителем электромагнитных волн “ТОРА” — широкополосный радиопоглощающий материал пирамидального типа в виде панелей из эластичного пенополиуретана с углеродистым наполнителем, представлен на рисунке.

Клетки с животными устанавливали на деревянном стеллаже на расстоянии 0.82 м от антенны (в промежуточной зоне излучения) на высотах от 1.0 до 1.3 м. Животных размещали в вентилируемых клетках из органического стекла, состоящих из четырех ячеек для индивидуального продольного расположения животных, для исключения затеняющего и теплового влияния их друг на друга. Общая площадь размещения клеток составляла 0.12 м^2 . Управление стендом автоматизировано и было вынесено за пределы камеры. Измерение уровней ППЭ проводили ежедневно до начала эксперимента в девяти точках



Рис. 1. Стендовая база экспериментального исследования.

Fig. 1. The poster base of the experimental research.

зоны размещения животных. Неравномерность ППЭ ЭМП в зоне размещения животных не превышала 10%. Во время воздействия ЭМП на животных проводились дистанционные измерения уровней ЭМП, что позволяло контролировать стабильность интенсивности излучения. Эксперимент проводился в одно и то же время суток. Животные контрольной группы размещались также в полуэкранированной безэховой камере. Животные, подвергавшиеся воздействию ЭМП, и контрольной группы находились в идентичных условиях по параметрам освещенности, температуры и влажности воздуха, индукции геомагнитного поля. Коэффициент ослабления геомагнитного поля ($K_{\text{гмп}}$) в камере был равен 2.7.

Экспериментальные исследования поведенческих реакций крыс изучались в тесте “открытое поле” с использованием стандартной установки, представляющей собой круглую арену диаметром 97 см, с высотой стенок 42 см, разделенную на 12 периферических и 7 центральных квадратов. Диаметр отверстий, моделирующих норки, составил 2 см. Эксперимент проводился при освещенности в камере 170 лк. Тестирование на установке “открытое поле” осуществлялось до и после проведения эксперимента, в первой половине дня с 10:00 ч. Крысу в начале исследования помещали в центральный квадрат установки и вели наблюдение за ее поведением в течение 3 мин. После тестирования каждого животного арену установки тщательно

Таблица 1. Ориентировочно-исследовательская активность крыс первой опытной группы при воздействии немодулированного ЭМП частотой 4.9 ГГц**Table 1.** Approximate research activity of rats of the first experimental group when exposed to unmodulated EMF with a frequency of 4.9 GHz

Показатели	До воздействия				После воздействия			
	среднее значение	стандартная отклонения	медиана	процентили (25–75%)	среднее значение	стандартная отклонения	медиана	процентили (25–75%)
Пересечение периферических секторов	26.2	10.8	26.0	17.5–32.5	14.2	12.0	15.0	2.25–23.0
Пересечение центральных секторов	5.0	4.9	3.0	2.0–9.5	3.5	3.3	2.5	1.0–6.5
Вертикальные стойки в периферических секторах	11.6	4.3	11.0	8.5–15.0	2.3	1.7	2.0	1.0–3.75
Вертикальные стойки в центральных секторах	4.8	2.4	5.0	2.3–6.0	4.5	3.2	5.0	2.0–6.75
Груминг	13.5	4.6	13.5	9.0–16.0	3.4	3.5	2.5	0.25–4.75
Замирание	1.7	1.5	1.5	0–3.0	3.8	1.3	4.0	3.0–5.0
Обнюхивание краев	1.3	0.9	1.0	1.0–2.0	1.7	1.8	1.0	0.25–3.0
Заглядывание в норку	4.0	3.7	3.5	1.5–5.0	3.2	4.1	1.5	1.0–4.75
Уринация	0.9	0.5	1.0	1.0–1.0	1.1	0.2	1.0	1.0–1.0
Дефекация	1.7	1.1	2.0	0.25–2.8	1.6	0.9	2.0	1.0–2.0

обрабатывали салфеткой, смоченной перекисью водорода. Регистрировали следующие показатели: пересечение периферических секторов; пересечение центральных секторов; вертикальные стойки в периферических секторах; вертикальные стойки в центральных секторах; груминг; замирание; обнюхивание краев; заглядывание в норку; уринация; дефекация.

Статистическая обработка данных проводилась с использованием программного продукта IBM SPSS Statistics v.22. Рассчитывались меры центральной тенденции (среднее арифметическое, медиана) и меры рассеивания (стандартное отклонение, 25-й и 75-й процентили). Нормальность распределения в выборках ($n = 12$) определяли с помощью критерия Шапиро–Уилка – W -критерий. В случае нормального распределения анализировались средние арифметические значения и стандартные отклонения, при распределении, отличающемся от нормального – медианы и межквартильный диапазон (25-й и 75-й процентили). Сравнение центральных тенденций парных выборок проводилось с помощью t -критерия для парных выборок (при нормальном распределении в обеих выборках) или критерия Уилкоксона (при распределении, отличающемся

от нормального, хотя бы в одной выборке). Сравнение центральных тенденций независимых выборок проводилось с помощью t -критерия для независимых выборок с поправкой на критерий Ливеня (при нормальном распределении в обеих выборках) или критерия Манна–Уитни – U -критерий (при распределении, отличающемся от нормального, хотя бы в одной выборке). В качестве критического уровня значимости нулевой гипотезы принята величина 0.05.

Таким образом, при постановке эксперимента были учтены общие и специальные требования, которые необходимо соблюдать при изучении биологического действия ЭМП. Проведение лабораторных экспериментальных исследований на животных было одобрено Локальным этическим комитетом ФБУН “СЗНЦ гигиены и общественного здоровья”, протокол заседания от 06.04.2022 г. № 2022/47.1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 1–3 представлены результаты изучения ориентировочно-исследовательской активности в тесте “открытое поле” в трех группах

Таблица 2. Ориентировочно-исследовательская активность крыс второй опытной группы при воздействии ЭМП частотой 4.9 ГГц, стандарт 5G**Table 2.** Approximate research activity of rats of the second experimental group when exposed to EMF with a frequency of 4.9 GHz, standard 5G

Показатели	До воздействия				После воздействия			
	Среднее значение	стандартная отклонения	медиана	процентили (25–75%)	среднее значение	стандартная отклонения	медиана	процентили (25–75%)
Пересечение периферических секторов	24.9	11.5	24.5	17.3–33.8	10.2	7.4	10.5	2.25–16.8
Пересечение центральных секторов	3.2	3.1	2.0	1.0–5.8	2.8	1.5	2.5	2.0–4.0
Вертикальные стойки в периферических секторах	9.0	4.4	8.5	6.0–11.8	1.9	1.6	2.0	1.0–2.0
Вертикальные стойки в центральных секторах	4.9	3.8	4.5	1.3–8.5	3.2	2.4	3.0	1.0–5.8
Груминг	14.5	7.9	13.0	7.3–21.5	4.3	4.2	3.5	0.25–7.75
Замирание	2.4	2.2	2.0	1.0–3.0	4.4	1.5	5.0	3.3–5.8
Обнюхивание краев	1.8	1.0	2.0	1.0–2.0	1.9	2.6	1.5	0.0–2.8
Заглядывание в норку	2.8	2.3	2.0	1.3–4.8	2.7	2.7	2.0	1.0–5.0
Уринация	1.3	0.5	1.0	1.0–1.8	0.8	0.5	1.0	0.3–1.0
Дефекация	1.9	1.1	2.0	1.3–3.0	1.9	0.8	2.0	1.0–2.8

Таблица 3. Ориентировочно-исследовательская активность крыс контрольной группы**Table 3.** Approximate research activity of rats in the control group

Показатели	До начала эксперимента				После окончания эксперимента			
	среднее значение	стандартная отклонения	медиана	процентили (25–75%)	среднее значение	стандартная отклонения	медиана	процентили (25–75%)
Пересечение периферических секторов	25.2	9.3	25.0	20.5–33.5	9.8	9.2	6.0	2.0–16.8
Пересечение центральных секторов	3.7	3.3	3.5	1.0–6.0	3.7	2.8	2.5	1.0–6.0
Вертикальные стойки в периферических секторах	8.8	3.7	8.5	5.3–12.0	4.1	5.6	1.0	0.3–7.0
Вертикальные стойки в центральных секторах	5.3	3.5	4.5	3.0–7.5	3.3	3.3	2.5	0.5–4.0
Груминг	10.0	4.9	8.5	6.3–14.0	2.4	2.3	2.5	0.0–4.0
Замирание	2.8	2.1	2.5	1.0–4.0	5.2	2.9	4.0	3.0–8.5
Обнюхивание краев	1.7	1.9	1.0	0.0–2.8	0.5	0.5	0.5	0.0–1.0
Заглядывание в норку	2.9	1.7	2.5	2.0–4.0	2.7	3.2	1.5	0.0–6.0
Уринация	1.3	0.6	1.0	1.0–2.0	1.0	0.0	1.0	1.0–1.0
Дефекация	2.3	0.8	2.0	2.0–3.0	1.8	0.6	2.0	1.0–2.0

животных до и после воздействия ЭМП ППЭ 250 мкВт/см².

Анализ результатов тестирования крыс на установке “открытое поле” показал, что в динамике эксперимента во всех трех группах были однонаправленные статистически значимые изменения таких показателей, как пересечение периферических секторов, вертикальные стойки в периферических секторах, груминг и замирание. Динамика двигательной активности характеризовалась значительным снижением количества пересечения периферических секторов опытными и контрольными крысами. В первой опытной группе отмечалось снижение показателя в 1.8 раза ($T = 2.890$, $p = 0.015$), во второй – в 2.4 раза ($T = 4.664$, $p = 0.001$), в контрольной – в 2.6 раза ($T = 4.945$, $p < 0.001$).

Количество вертикальных стоек в периферических секторах также существенно снизилось, по сравнению с исходными значениями (до начала эксперимента). По данному параметру после облучения установлено снижение количества стоек у опытных групп на 80% (1-я группа) и на 79% (2-я группа) от исходного уровня ($T = 6.260$, $p < 0.001$ и $W = -2.950$, $p = 0.001$ соответственно), в то время как у контрольной группы – на 53% от исходного значения ($W = -2.451$, $p = 0.014$).

По показателю груминг изменения в сторону снижения (на 70–76%) прослеживаются у всех трех групп на одинаковом уровне (первая опытная группа: $W = -3.066$, $p < 0.001$; вторая опытная группа: $T = 4.590$, $p = 0.001$; контрольная группа: $T = 5.091$, $p < 0.001$). Такой показатель как замирание, изменился в сторону увеличения (в 1.8–2.2 раза) также у всех трех групп (первая опытная группа: $W = -2.699$, $p = 0.004$; вторая опытная группа: $T = -2.449$, $p = 0.032$; контрольная группа: $T = -2.427$, $p = 0.034$).

У группы животных, подвергшихся воздействию модулированного электромагнитного излучения стандарта 5G, по сравнению с исходным значением, отмечалась тенденция к снижению такого показателя вегетативной деятельности, как уринация (снижение на 40%, $W = -1.857$, $p = 0.063$). В первой опытной группе и в контроле изменения по данному показателю были статистически не значимы ($p > 0.1$).

Близка к критическому уровню нулевой значимости, но не достигает его, значимость отличий между контрольной и первой группой после облучения по показателю обнюхивания краев ($U = 42.000$, $p = 0.085$), где наблюдается снижение

медианного значения данного показателя в 2 раза. По всем остальным критериям теста “открытое поле” вероятность ошибки при принятии нулевой гипотезы значительно превышает 10% ($p > 0.1$); иными словами, при попарном сравнении выборок до и после облучения не выявлено статистически значимых отличий средних арифметических или медиан между контрольной и опытными группами.

ОБСУЖДЕНИЕ

Настоящее пилотное исследование посвящено изучению влияния ЭМИ РЧ стандарта сотовой связи 5G на центральную нервную систему животных. В нашем исследовании моделировались частота излучения, модуляция и широкополосность радиочастотного сигнала. Известно, что биологические эффекты, связанные с воздействием излучения мобильной связи, зависят от интенсивности и ряда других характеристик ЭМП. В имеющихся зарубежных исследованиях по биоэффектам ЭМП указываются данные по несущим частотам, однако не приводятся сведения о характеристиках модуляции ЭМП 5G. Не учитывались и другие особенности функционирования технологии 5G [11, 12]. На ограниченность данных по влиянию 5G обращают внимание и другие авторы, отмечая, что имеющиеся исследования сосредоточены только на частотах ЭМП, используемых 5G, но не на конкретных характеристиках технологии мобильной связи пятого поколения [13, 14].

Российскими учеными выполнены многочисленные исследования влияния ЭМП РЧ на ЦНС животных. Так, выявлены нарушения когнитивных функций, нестабильность поведения в процессе обучения, отклонения со стороны краткосрочной и долгосрочной памяти при воздействии электромагнитных полей частот мобильной связи от 1 до 4 ГГц, при суммарной ППЭ в импульсе 300 мкВт/см², в течение 40 сеансов облучения явления не достигали уровня высокой клинической значимости [15]. В другом исследовании авторы сделали вывод о том, что длительное воздействие (4 мес., 2 ч в день) немодулированного ЭМИ (несущая частота 1800 МГц, зона сформированной волны, ППЭ 85 мкВт/см²), близкого по несущей частоте к параметрам мобильной связи, может негативно сказываться на функциональном состоянии ЦНС потомства облученных животных, выявлены нарушения условно-реф-

лекторной деятельности памяти у животных [16]. Подострые воздействия низкоинтенсивного электромагнитного поля частотой 2.4 ГГц (ППЭ 13 Вт/м² и удельная поглощенная мощность 0.22 Вт/кг) после 5-го дня облучения выявили нарастание суммарной ориентировочно-исследовательской активности животных за счет, как полагают авторы исследования, снижения функциональных возможностей когнитивных процессов и долговременной памяти животных [17]. В другом эксперименте животные находились в зоне сформированной волны источника электромагнитного излучения, при двух режимах СВЧ-облучения — 1–2 ГГц с шагом несущей частоты 0.1 ГГц (режим 1) и 2–4 ГГц с шагом 0.2 ГГц (режим 2). Длительность импульса составила 25 мс, суммарная пиковая мощность — до 1000 мкВт/см². Изучалось хроническое воздействие низкоинтенсивного ЭМИ диапазона 1–4 ГГц в сочетании с многочастотным импульсно-модулированным электромагнитным “шумом” на модели эмбриотоксических эффектов и постнатального развития облученного потомства. Интегральная оценка психофизиологического статуса подопытных крыс свидетельствовала о формировании в постнатальном периоде эмоциональной неустойчивости, снижении двигательной компоненты ориентировочно-исследовательской реакции и, как следствие — снижения когнитивных функций [18]. Изучалось воздействие немодулированного ЭМП частотой 1 ГГц (среднее значение ППЭ 19.0 мкВт/см²). Было установлено, что у животных, находившихся на большем удалении от антенн (5.8 и 15.0 м), при меньшем уровне интенсивности 19.0 и 2.8 мкВт/см² соответственно, в структуре поведения обнаруживались более выраженные изменения по сравнению с особями, располагавшимися на небольшом удалении (2.5 м) и при более высоком уровне ППЭ (85.0 мкВт/см²). Сделан вывод о том, что влияние модуляции ЭМП РЧ более выражено при более низких уровнях интенсивности [19].

Таким образом, по имеющимся в научной литературе данным, однозначным выводом является то, что поведенческие реакции животных нарушаются от воздействия электромагнитных полей. Наблюдаемые реакции не выявляют одинаковой направленности изменений функционального состояния ЦНС животных, а полученные показатели часто носят противоречивый характер. Вместе с тем, несомненна актуальность изучения биологического действия

радиочастотных сигналов ЭМП, характерных для сетевых технологий стандарта 5G, и, соответственно, изучение нарушения поведения животных под воздействием фактора.

Результаты выполненного пилотного исследования могут быть рассмотрены с нескольких позиций. В условиях кратковременного экспериментального исследования с заданными параметрами облучения и продолжительностью воздействия ЭМП не выявлено четких отличий в поведенческих реакциях животных при облучении ЭМП стандарта 5G и немодулированным ЭМП. Возможно, что большая продолжительность эксперимента позволила бы выявить особенности воздействия ЭМП с различными характеристиками радиосигналов. В динамике эксперимента зарегистрированы статистически значимые изменения поведения животных контрольной группы.

При проведении экспериментов по изучению биоэффектов ЭМП рекомендуется использование безэховых экранированных камер, что позволяет исключить влияние на животных внешних ЭМП, создать условия для равномерного воздействия ЭМП на животных, исключить создание помех в работе оборудования за пределами безэховой камеры. Вместе с тем, в безэховой камере животные в дополнение к радиочастотным излучениям подвергаются воздействию гипогеомагнитного поля. Мы склонны предполагать, что наблюдаемые существенные изменения поведения животных контрольной группы в динамике эксперимента могут быть обусловлены влиянием гипогеомагнитного поля. Чувствительность животных к гипогеомагнитному полю доказана экспериментальными исследованиями [20].

Данные, полученные при выполнении пилотного эксперимента, позволили обратить внимание на некоторые методические аспекты, которые следует учитывать при научном обосновании гигиенических нормативов ЭМП радиочастотного диапазона.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование не имело спонсорской поддержки (The study had no sponsorship).

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией статьи (Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interests).

Все процедуры, выполненные в исследованиях с участием животных, соответствовали этическим стандартам. Все применимые международные, национальные принципы ухода и использования животных были соблюдены. Проведение исследований разрешено Локально этическим комитетом ФБУН “СЗНЦ гигиены и общественного здоровья”, протокол № 2022/47.1 от 06.04.2022 г.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Никитина Валентина Николаевна (Nikitina Valentina Nikolaevna) <https://orcid.org/0000-0001-8314-2044>, ФБУН “Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья” Роспотребнадзора, Санкт-Петербург, Россия (Northwest Public Health Research Center, Saint Petersburg, Russia), v.nikitina@s-znc.ru

Калинина Нина Ивановна (Kalinina Nina Ivanovna) <https://orcid.org/0000-0001-9475-0176>, ФБУН “Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья” Роспотребнадзора, Санкт-Петербург, Россия (Northwest Public Health Research Center, Saint Petersburg, Russia), n.kalinina@s-znc.ru

Дубровская Екатерина Николаевна (Dubrovskaya Ekaterina Nikolaevna) <https://orcid.org/0000-0003-4235-378X>, ФБУН “Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья” Роспотребнадзора, Санкт-Петербург, Россия (Northwest Public Health Research Center, Saint Petersburg, Russia), nikanorushka@mail.ru

Плекханов Владимир Павлович (Plekhanov Vladimir Pavlovich), <https://orcid.org/0000-0002-8141-7179>, ФБУН “Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья” Роспотребнадзора, Санкт-Петербург, Россия (Northwest Public Health Research Center, Saint Petersburg, Russia), v.plehanov@s-znc.ru

Ковшов Александр Александрович (Kovshov Aleksandr Aleksandrovich), <https://orcid.org/0000-0001-9453-8431>, ФБУН “Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья” Роспотребнадзора, Санкт-Петербург, Россия (Northwest Public Health Research Center, Saint Petersburg, Russia), a.kovshov@s-znc.ru

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маслов М.Ю., Сподобаев Ю.М., Сподобаев М.Ю. Электромагнитная безопасность: критические характеристики 5 G. *Электросвязь*. 2019; 4:53–58.

[Maslov M.Yu., Spodobayev Yu.M., Spodobayev M.Yu. Electromagnetic safety: critical features of 5G networks. *Electrosvyaz*. 2019; 4:53–58. (In Russ.)]

2. Mobile Kommunikation: Auf dem Weg zu 5G. *Faktenblatt_5G*. Available at: www.bakom.admin.ch. Accessed September 6, 2023.
3. Никитина В.Н., Калинина Н.И., Ляшко Г.Г. и др. Особенности архитектуры сетей 5G. Вероятностное прогнозирование воздействия электромагнитных полей радиочастот на население. *Гигиена и санитария*. 2021;100(8):792–796. [Nikitina V.N., Kalinina N.I., Lyashko G.G., Dubrovskaya E.N., Plekhanov V.P. Special features of the architecture of 5G networks. Probabilistic forecasting of the impact of electromagnetic fields of radio frequencies on the population (literature review). *Hygiene and Sanitation*. 2021;100(8):792–796. (In Russ.)] <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-8-792-796>
4. Чудова А.С., Алехина Н.А., Гладышева А.О. и др. Определение индивидуально-типологических особенностей поведения у крыс линии Wistar в тесте “открытое поле”. *Тенденции развития науки и образования*. 2021;100(8): 792–796. [Hudova A.S., Alekhina N.A., Gladysheva A.O., Koverzneva Yu.A., et al. Opredelenie individual'no-tipologicheskikh osobennostey povedeniya u krys linii wistar v teste “otkrytoe pole”. *Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2021;100(8):792–796. (In Russ.)] <https://doi.org/10.18411/trnio-08-2022-38>.
5. Шубина О.С., Дуденкова Н.А., Божайкина С.Ю., Егорова М.В. Исследование двигательной, ориентировочно-исследовательской и психоэмоциональной активности и белых крыс. Междунар. науч.-практ. конф. “Инновационные технологии современной научной деятельности: стратегия, задачи, внедрение”. Пенза, 2020. С. 16–20. [Shubina O.S., Dudenkova N.A., Bozhajkina S.Yu., Egorova M.V. Issledovanie dvigatel'noj, orientirovochno-issledovatel'skoj i psihoemocional'noj aktivnosti i belyh krys. Mezhdunar. nauchno-prakt. konf. “Innovatsionnye Tekhnologii sovremennoj nauchnoj deyatelnosti: Strategiya, Zadachi, Vnedrenie”. (Conference proceedings). Penza, 2020. P. 16–20. (In Russ.)]
6. Череповская Н.А., Жунусов Н.С., Миллер Э.С. Изучение поведенческой активности в тесте “открытое поле”. *Научный электронный журнал Меридиан*. 2020; 4(38):75–77. [Cherepovskaya N.A., Zhunusov N.S., Miller E.S. Izuchenie povedencheskoj aktivnosti v teste “otkrytoe pole”. *Nauchnyj elektronnyj zhurnal Meridian*. 2020; 4(38):75–77. (In Russ.)]
7. Лопаткина Н.В., Буянов Л.С., Сметанина М.В. Влияние низкоинтенсивного электромагнитного поля с различным направлением вращения плоскости поляризации на поведение крыс. V Междунар. конф. “Человек и электромагнитные поля”. Саров, 2016. С. 303–304. [Lopatkina N.V., Buyanov L.S., Smetanina M.V. Vliyanie nizkointensivnogo elektromagnitnogo polya s razlichnym napravleniem vrashcheniya ploskosti polyarizatsii na povedeniye krys. V Mezhdunar. konf. “Chelovek i elektromagnitnye polya”. Sarov, 2016. S. 303–304.]

- polyarizacii na povedenie kryss. V Mezhdunar. konf. "Chelovek i elektromagnitnye polya". (Conference proceedings). Sarov, 2016. P.303–304. (In Russ.)]
8. Павлова Л.Н., Дубовик Б.В., Жаворонков Л.П., Глушакова В.С. Экспериментальное обоснование возможных механизмов влияния электромагнитных полей на поведение животных. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2012;52(4):388–393. [Pavlova L.N., Dubrovik B.V., Zhavoronkov L.P., Glushakova V.S. Experimental justification of possible mechanisms of action of low intensity electromagnetic radiation on animals' behavior. *Radiation Biology. Radioecology*. 2012;52(4):388–393. (In Russ.)]
 9. Лопаткина Н.В., Баркин В.В., Лобкаева Е.П. Изменение моторной координации лабораторных животных при воздействии низкоинтенсивного электромагнитного поля радиочастотного диапазона. VIII Междунар. конгресс "Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине". СПб., 2018. С. 133–134. [Lopatkina N.V., Barkin V.V., Lobkaeva E.P. Izmenenie motornoj koordinacii laboratornyh zhivotnyh pri vozdeystvii nizkointensivnogo elektromagnitnogo polya radiochastotnogo diapazona. VIII Mezhdunar. kongress "Slabye i sverhslabye polya i izlucheniya v biologii i medicine". (Conference proceedings). Sankt Peterburg, 2018. P. 133–134. (In Russ.)]
 10. Ширяева Н.В., Вайдо А.И., Павлова М.Б., Сурма С.В. и др. Влияние электромагнитных излучений на ориентировочно-исследовательскую активность и когнитивные функции крыс с контрастной возбудимостью нервной системы. *Интегративная физиология*. 2020;1(2):123–132. [Shiryayeva NV, Vaido AI, Pavlova MB, Surma SV et al. Electromagnetic radiation impact on the orienting-exploratory activity and cognitive functions of rat strains with contrasting excitability of the nervous system. *Integrative Physiology*. 2020;1(2):123–132. (In Russ.)] <https://doi.org/10.33910/2687-1270-2020-1-2-123-132>.
 11. Moskowitz J.M. 5G Wireless Technology: Is 5G Harmful to Our Health? Доступно по: <https://www.saferemr.com/2017/09/5g-wireless-technology-is-5g-harmful-to.html>. Ссылка активна на 12.08.2023 г.
 12. Kostoff R.N., Heroux P., Aschner M. et al. Adverse health effects of 5G mobile networking technology under real-life conditions. *Toxicol. Lett.* 2020;1(323):35–40. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2020.01.020>.
 13. Di Ciaula A. Towards 5G communication systems: Are there health implications? *Int. J. Hyg. Environ. Health*. 2018;221(3):367–375. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2018.01.011>.
 14. Hinrikus H., Koppel T., Lass J., et al. Possible health effects on the human brain by various generations of mobile telecommunication: a review based estimation of 5G impact. *Int. J. Radiat. Biol.* 2022;98(7):1210–1221. <https://doi.org/10.1080/09553002.2022.2026516>.
 15. Павлова Л.Н., Колганова О.И., Измestьева О.С. и др. Влияние многократного и хронического воздействия электромагнитного излучения диапазона частот мобильной связи на поведение и когнитивные функции мозга крыс. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2019;59(6):619–626. [Pavlova L.N., Kolganova O.I., Izmest'yeva O.S. et al. Influence of multiple and chronic exposure to electromagnetic radiation of the mobile communication frequency range on the behavior and cognitive functions of the rat brain. *Radiation Biology. Radioecology*. 2019;59(6):619–626. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.1134/S0869803119060080>.
 16. Панфилова В.В., Колганова О.И., Чибисова О.Ф. Анализ результатов длительного воздействия ЭМИ на когнитивные функции потомства облученных крыс. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2021;61(2):174–179. [Panfilova V.V., Kolganova O.I., Chibisova O.F. Analysis of the results of the prolonged influence of emp on the cognitive functions of the progeny of irradiated rats. *Radiation Biology. Radioecology*. 2021;61(2):174–179. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31857/S0869803121010094>.
 17. Рубцова Н.Б., Перов С.Ю., Белая О.В., Гребенюк А.Н. Влияние электромагнитного поля радиочастотного диапазона малой интенсивности на ориентировочно-исследовательскую активность крыс. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2019;59(3):300–304. [Rubtsova N.B., Perov S.Yu., Belaya O.V., Grebenyuk A.N. Effects of exposure to low intensity radiofrequency electromagnetic field on exploratory behavior of rats. *Radiation Biology. Radioecology*. 2019;59(3):300–304. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.1134/S0869803119010090>.
 18. Измestьева О.С., Павлова Л.Н., Жаворонков Л.П. Экспериментальная оценка последствий хронического воздействия электромагнитного излучения диапазона мобильной связи в антенатальном периоде развития крыс. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2020;60(1):63–70. [Izmest'yeva O.S., Pavlova L.N., Zhavoronkov L.P. Experimental evaluation of the consequences of the chronic influence of electromagnetic radiation of the mobile communication range in antenatal rat development period. *Radiation Biology. Radioecology*. 2020;60(1):63–70. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.31857/S0869803120010099>.
 19. Лопаткина Н.В., Баркин В.В., Лобкаева Е.П. Оценка поведенческих реакций лабораторных животных, находящихся на различном удалении от излучателя низкоинтенсивного электромагнитного поля радиочастотного диапазона. 71-я Всерос. с междунар. участием школа-конф. молодых ученых "Биосистемы: организация, поведение, управление". Нижний Новгород, 2018. С. 138. [Lopatkina N.V., Barkin V.V., Lobkaeva E.P. Ocenka povedencheskih reakcij laboratornyh zhivotnyh, nahodyashchihsya na razlichnom udalenii ot izluchatelya nizkointensivnogo-ehlektromagnitnogo

- polya radiochastotnogo diapazona. 71-ya Vseross. s mezhdunar. uchastiem shkola-konf. molodyh uchenykh "Biosistemy: organizaciya, povedenie, upravlenie". (Conference proceedings). Nizhnij-Novgorod, 2018. P.138. (In Russ.)].
20. Чайка А.В., Шейхаметова Н.Н., Никитина Ю.О. и др. Влияние умеренного электромагнитного экранирования на исследовательское поведение и межвидовую агрессию у крыс. *Ученые записки*. 2017;3(69)-3: 183–191. [Chajka A.V., Sheikhametova N.N., Nikitina Yu.O. et al. Influence of moderate electromagnetic shielding on intermale rats aggression in resident-intruder test. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*. 2017;3(69)-3: 183–191. (In Russ.)]

Experimental Study of Animal's Behavior under the Influence of an Electromagnetic Field of the 5G Mobile Communication Standard

V. N. Nikitina*, E. N. Dubrovskaya, N. I. Kalinina, V. P. Plekhanov, A. A. Kovshov

Northwest Public Health Research Center, Saint Petersburg, Russia

**E-mail: v.nikitina@s-znc.ru*

A pilot experimental study was carried out to assess the effect of an unmodulated and modulated electromagnetic field of the 5G mobile communication standard on the central nervous system of animals. Mature male Wistar rats were exposed to electromagnetic fields with a frequency of 4.9 GHz and an intensity of 250 MW/cm² for 15 days for 2 hours a day. The animals of the two irradiated groups and the control group were in identical conditions in a semi-anechoic shielded chamber. The effect of the electromagnetic field on the functional state of the central nervous system was assessed by a comprehensive analysis of behavior patterns in the "open field" test before and after irradiation. The study did not reveal clear differences in animal behavior when exposed to an unmodulated and modulated 5G electromagnetic field. Statistically significant changes in animal behavior were recorded in the dynamics of the experiment in two irradiated and control groups, which may be due to a change in the natural electromagnetic background in a semi-anechoic shielded chamber.

Keywords: electromagnetic fields, experimental studies, behavioral reactions of animals, biological effects

РАДИОЧАСТОТНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ФОН, СОЗДАВАЕМЫЙ СИСТЕМАМИ МОБИЛЬНОЙ (СОТОВОЙ) СВЯЗИ

© 2024 г. В. И. Мордачев*

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники Минск, Беларусь

**E-mail: mordachev@bsuir.by*

Поступила в редакцию 25.12.2023 г.

После доработки 02.02.2024 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

Излагается методика интегральной оценки интенсивности радиочастотного электромагнитного фона (ЭМФ), создаваемого беспроводными информационными службами, на основе прогноза средней электромагнитной нагрузки на территорию, создаваемой излучениями пространственно-распределенных базовых станций и оконечных устройств мобильной связи. Эта нагрузка может быть определена как на основе прямой оценки средней суммарной мощности облучения земной поверхности базовыми станциями либо средней суммарной мощности излучений оконечных устройств, приходящейся на единицу ее площади, так и на основе оценки средней территориальной плотности мобильного трафика и известных параметров оборудования и топологии сетей мобильной связи. Приводятся уравнения для оценки условных средних уровней ЭМФ, создаваемого стационарными и мобильными компонентами систем мобильной связи, и результаты расчетов, иллюстрирующие процессы его формирования этими системами в различных диапазонах частот при различной средней территориальной плотности мобильного трафика и различных размерах зон обслуживания базовых станций. Эти расчеты подтверждают реальную опасность недопустимого снижения уровня электромагнитной безопасности населения и ухудшения экологии среды обитания без введения научно обоснованных ограничений на характеристики систем и услуг мобильной связи.

Ключевые слова: мобильная связь, 4G, 5G, 6G, электромагнитный фон, электромагнитная безопасность, электромагнитная экология, электромагнитная нагрузка на территорию, территориальная плотность трафика

DOI: 10.31857/S0869803124030074, **EDN:** MBCFNX

Радиочастотные электромагнитные поля (ЭМП РЧ), создаваемые многочисленными системами беспроводного информационного обслуживания современного общества (радиосвязи, эфирного вещания и телевидения, радиолокации, радионавигации и т.п.), являются главным фактором, определяющим антропогенное электромагнитное (ЭМ) загрязнение среды обитания, особенно заметное в местах с высокой плотностью и деловой активностью населения. Очень интенсивное развитие систем и экспансия услуг мобильной связи (МС), их все более глубокое проникновение во все сферы человеческой деятельности превратили ЭМП МС в главный фактор, определяющий обострение проблемы ЭМ безопасности населения.

Результаты [1–12 и др.] многочисленных экспериментальных исследований ЭМ фона (ЭМФ), создаваемого преимущественно системами МС второго и третьего поколений (2G/3G)

в десятках стран, свидетельствуют о том, что его уровни даже до начала активного внедрения технологий и систем МС четвертого (4G) и пятого (5G) поколений приблизились к предельно допустимым (ПДУ) 2.5...10 мкВт/см², принятым во многих странах в качестве гигиенических нормативов с учетом опасности отдаленных последствий “нетепловых” эффектов воздействия ЭМП РЧ на здоровье населения.

Отсутствие во многих странах столь жесткого гигиенического нормирования ПДУ ЭМП РЧ определяется не недооценкой опасности ЭМФ РЧ для населения, а различными подходами к его защите [13, 14]: ориентация на “тепловые” нормативы [15], фактически определяющие границу интенсивности ЭМП РЧ, превышение которой способно вызвать необратимое физическое разрушение биоткани, предполагает наличие эффективной судебной защиты населения от ЭМП РЧ, создаваемых системами МС. Эффективность

подобной “пассивной” защиты населения от воздействия ЭМФ РЧ в условиях интенсивного развития систем и внедрения услуг МС 4G/5G поставлена под сомнение на правительственном и высшем судебном уровне ряда стран [16–19], а также многими ведущими специалистами [20, 21 и др.].

Эволюция МС 4G→5G→6G, сопровождающаяся увеличением на несколько порядков средней пространственной плотности источников ЭМП (с 10^3 – 10^4 до 10^6 – 10^7 ед/км²), значительным расширением верхней границы диапазона частот МС (с 2–3 до 50–100 ГГц и выше) и ростом средней территориальной плотности мобильного (беспроводного) трафика (с 10^3 – 10^4 до 10^7 – 10^9 бит/с/м²) [22–29], безусловно, чревата представляющим большую опасность недопустимым ЭМ загрязнением среды обитания. Единственный способ избежать этой опасности состоит в эффективном научно обоснованном управлении процессами развития и внедрения МС 4G/5G/6G, обеспечивающем ее безопасность для населения при сохранении ее высокой эффективности и привлекательности. Такое управление невозможно без практической методики объективной количественной оценки интенсивности ЭМФ, сопутствующего реализации всего множества сценариев и беспроводных услуг 4G/5G/6G.

Прямой расчет интенсивности ЭМФ, создаваемого множеством ЭМ излучений стационарных базовых станций (БС) и подвижных/стационарных периферийных устройств (ПУ) МС, невозможен в силу огромного числа источников ЭМП РЧ и априорной неопределенности исходных данных. Автором предложена альтернативная методика [30–43] ее интегральной оценки у земной поверхности на основе анализа системных характеристик сетей МС – средней ЭМ нагрузки на территорию (ЭМНТ), создаваемой множеством БС и ПУ на рассматриваемой территории.

Цель данной работы – систематическое изложение основных положений данной методики в интересах преодоления существующего крайне опасного пробела в методах и средствах оценки ожидаемого уровня ЭМ загрязнения среды обитания в условиях экспансии 4G/5G/6G.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

1. Базовая модель пространственного размещения БС и ПУ систем МС приведена на рис. 1. В этой модели

– ПУ представляют собой абонентские устройства МС, располагаемые у головы либо у верхней части тела человека, однако в качестве ПУ могут рассматриваться любые периферийные устройства, высота которых H_{UE} над земной поверхностью соответствует высоте точки наблюдения (ТН), располагаемой на высоте $H_{OP} = 1$ –2 м (в пределах человеческого роста);

– высоты H_{BS} антенн БС над земной поверхностью существенно превышают высоты размещения над поверхностью ПУ и ТН: $H_{BS} \gg H_{OP} \approx H_{UE}$. При сотовой структуре радиосети радиус $R_{max} \gg H_{BS}$ зоны обслуживания БС соответствует размерам соты (зоны обслуживания БС);

– координаты ТН, в которой анализируется ЭМФ, выбираются случайно, так что распределение БС и ПУ по территории относительно ТН можно считать случайным равномерным со средними плотностями ρ_{BS} [БС/м²] и ρ_{UE} [ПУ/м²].

2. Интенсивность Z_S [Вт/м²] ЭМФ в ТН определяется в виде скалярной суммы значений плотности потока мощности (ППМ) ЭМП РЧ, создаваемых множеством N их источников, расположенных в зоне радиовидимости из ТН:

$$Z_{\Sigma} = \sum_{n=1}^N Z_n, \quad Z_n \geq Z_0, \quad (1)$$

где Z_0 – порог радиовидимости, соответствующий, например, порогу чувствительности радиоприема в системах радиомониторинга ЭМ обстановки (ЭМО). Поскольку в силу известных свойств ЭМО, создаваемой пространственно распределенными источниками, ЭМП РЧ, величина Z_S определяется лишь небольшим числом преобладающих слагаемых в (1), выбор значения Z_0 слабо влияет на оценки (1) при $N > 10$ [30–32].

3. Под средней ЭМНТ B_{BS} [Вт/м²], создаваемой множеством N БС МС на некоторой территории площадью S , понимается средняя территориальная плотность суммарной мощности их ЭМП РЧ, достигающей земной поверхности [33, 35, 42]. Поскольку главные лепестки диаграмм направленности антенн БС, на которые приходится основная часть энергии их ЭМП, как правило, направлены вниз для обеспечения радиосвязи с распределенными по территории ПУ, в качестве ЭМНТ, создаваемой БС, может быть

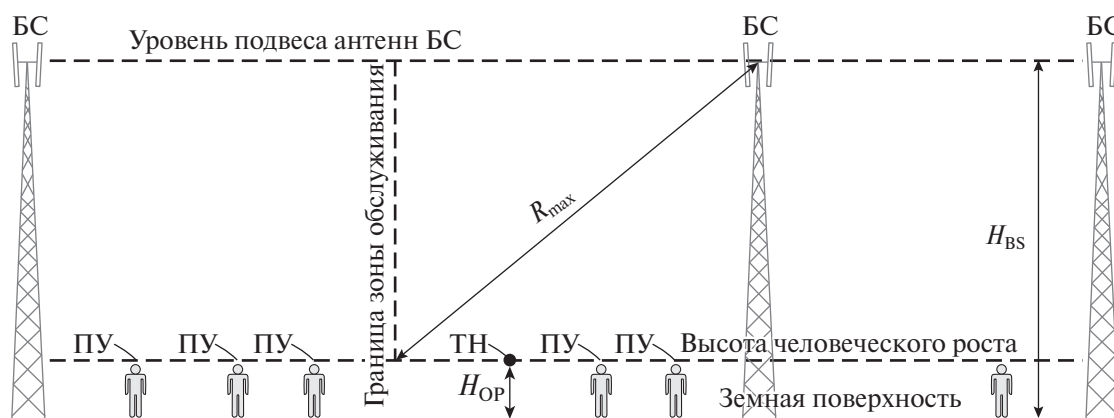


Рис. 1. Пространственное размещение периферийных устройств (ПУ) и антенн базовых станций (БС) мобильной связи относительно ТН.

H_{OP} – высота точки наблюдения (ТН) и ПУ над земной поверхностью, H_{BS} – высота фазовых центров антенн БС над земной поверхностью, R_{max} – радиус зоны обслуживания БС (максимальная дальность связи).

Fig. 1. Spatial placement of base stations (BS) and users equipment (ПУ) of mobile communications relative to the observation point (ТН).

H_{OP} – height of ТН and ПУ above the earth's surface, H_{BS} – height of phase centers of BS antennas above the earth's surface, R_{max} – radius of the BS service area (maximum communication range).

принята средняя суммарная мощность излучений N БС (значений P_{TRPn} “Total radiated power” (TRP) БС, определенного в [45]), приходящаяся на 1 м^2 территории:

$$B_{BS} = \frac{\sum_{n=1}^N P_{en}}{S} \approx \frac{\sum_{n=1}^N P_{TRPn}}{S}, \quad n \in [1, N], \quad (2)$$

где $P_{en} \approx P_{TRPn}$ – часть мощности n -й БС, излучаемой ее антенной в телесном угле $\Omega \leq 2\pi$, охватывающем облучаемую поверхность S , за вычетом антенно-фидерных потерь. Прямая связь между (1) и (2) носит фундаментальный характер хотя бы в силу совпадения их единиц измерений.

4. ЭМ излучения ПУ принято считать ненаправленными; создаваемая ими средняя ЭМНТ B_{UE} [Вт/м²] соответствует средней территориальной плотности суммарной мощности их излучений:

$$B_{UE} = \rho_{UE} P_{UE}, \quad (3)$$

где P_{UE} [Вт] – средняя мощность излучения ПУ, для режима мобильной (сотовой) телефонной связи в среднем составляющая примерно 30–50% от максимальной [31, 34, 46, 47 и др.]

но достигающая максимума в режиме передачи данных (мобильный интернет) для обеспечения максимальной скорости (спектральной эффективности) передачи данных.

5. Модель распространения радиоволн (РРВ). При оценке интенсивности ЭМФ, создаваемого в ТН излучениями территориально распределенных БС, целесообразно использовать верхнюю ветвь широко используемой модели РРВ ([48], формула (2)), отражающую пессимистический (с точки зрения ЭМ загрязнения среды обитания) характер затухания радиоволн при их РРВ в ТН от ближайших БС в условиях городской застройки:

$$Z = \begin{cases} \frac{P_e}{4 R^2} & R \leq R_{BP}; \\ \frac{R_{BP}^2 P_e}{4 R^4} & R > R_{BP}; \end{cases} \quad R_{BP} = \frac{4 H_{OP} H_{BS}}{\lambda}, \quad (4)$$

где Z [Вт/м²] – ППМ ЭМП, создаваемая в ТН излучением БС с эквивалентной изотропно излучаемой мощностью (ЭИИМ) P_e [Вт], удаленной от ТН на расстояние R [м]; λ [м] – длина волны ЭМ излучения БС; R_{BP} – расстояние “брейк-пойнт”, по мере удаления на которое от ТН происходит изменение характера РРВ между БС и ТН. Для $R \leq R_{BP}$ характерны условия

РРВ в свободном пространстве, при $R > R_{BP}$) условия РРВ определяются интерференцией прямого и отраженного от поверхности лучей. Модель (4) адекватна и для РРВ между ТН и ПУ, в этом случае $R_{BP} = 4H_{OP}H_{UE}/\lambda$.

6. Для функционирования систем МС 4G/5G выделено несколько десятков полос частот в диапазонах УВЧ, СВЧ и КВЧ [23–27]. В связи с тем, что ширина каждой из них не превышает 5–10% от ее центральной частоты (2.7% для GSM-900, 4.2% для GSM-1800, 2.8% для UMTS, менее 5% для каждой из полос частот LTE), анализ закономерностей, касающихся формирования ЭМФ РЧ излучениями систем МС, может выполняться для некоторых фиксированных длин волн, соответствующих этим полосам частот.

7. Методика определения средней интенсивности ЭМФ, создаваемого БС в отдельно взятой полосе частот МС ($\lambda \approx const$) предполагает ее оценку в форме произведения среднего значения ППМ ЭМП БС и их числа в ТН [31, 33, 36].

Использование модели случайного равномерного распределения БС по территории всей области радиовидимости со средней плотностью ρ_{BS} и модели РРВ (4) позволяет, используя подход [31], получить ряд соотношений, приведенных ниже.

А. Плотность распределения вероятностей (п.р.в.) расстояния R от ТН до БС, находящихся в области свободного РРВ в ТН:

$$w(R) = \frac{2R}{R_{BP}^2},$$

$$H_{BS} - H_{OP} \leq R \leq R_{BP},$$

$$H_{OP} \geq \frac{\lambda}{4}.$$

Б. П.р.в. значений ППМ ЭМП БС из области свободного РРВ в ТН в рассматриваемой полосе частот МС и их математическое ожидание $m_{11}(Z)$:

$$w(Z) = \frac{Z_{BP}Z_{max}}{(Z_{max} - Z_{BP})Z^2} \approx \frac{Z_{BP}}{Z^2},$$

$$Z_{BP} \leq Z \leq Z_{max}, \quad Z_{BP} \ll Z_{max};$$

$$Z_{BP} = \frac{P_e}{4 R_{BP}^2},$$

$$Z_{max} = \frac{P_e}{4\pi(H_{BS} - H_{OP})^2} \approx \frac{P_e}{4\pi H_{BS}^2};$$

$$m_{11}(Z) \approx \frac{P_e \lambda^2}{32 H_{BS}^2 H_{OP}^2} \ln\left(\frac{4H_{OP}}{\lambda}\right), \quad H_{OP} \geq \frac{\lambda}{4}.$$

В. Среднее число N_{1AVBS} БС в области свободного РРВ и средняя интенсивность $Z_{\Sigma 1BS}$ ЭМФ РЧ, создаваемого ими в ТН при изотропности их излучений и равенстве их ЭИИМ:

$$N_{1AVBS} = \rho_{BS} R_{BP}^2 = \frac{16 \rho_{BS} H_{OP}^2 H_{BS}^2}{\lambda^2};$$

$$Z_{\Sigma 1BS} = N_{1AVBS} m_{11}(Z_1) = \frac{B_{BS}}{2} \ln\left(\frac{4H_{OP}}{\lambda}\right),$$

$$B_{BS} = \rho_{BS} P_e, \quad H_{OP} \geq \frac{\lambda}{4},$$

где B_{BS} — средняя удельная ЭМНТ, создаваемая излучениями БС в брейкпойнт-окрестности ТН радиуса R_{BP} со свободным РРВ между БС и ТН. Принципиально важным обстоятельством является зависимость $Z_{\Sigma 1BS}$ не от значений ЭИИМ отдельных БС, а от интегрального параметра — создаваемой ими средней ЭМНТ B_{BS} , что существенно упрощает дальнейший анализ интенсивности ЭМФ, поскольку при равномерном территориальном распределении множества БС с различной ЭИИМ в окрестности ТН средняя интенсивность создаваемого ими ЭМФ определяется суммарной средней ЭМНТ, создаваемой всем этим множеством БС.

Г. П.р.в. расстояния R от ТН до БС, для которых $R > R_{BP}$:

$$w(R) = \frac{2R}{(R_{RV}^2 - R_{BP}^2)},$$

$$R_{BP} \leq R \leq R_{RV} = \left(\frac{R_{BP}^2 P_e}{4\pi Z_0}\right)^{\frac{1}{4}} = a R_{BP}, \quad a \gg 1.$$

Д. П.р.в. значений ППМ ЭМП БС из области интерференционного РРВ в ТН и их математическое ожидание $m_{12}(Z)$ в ТН при изотропности их излучений и равенстве их ЭИИМ:

$$w(Z) = \frac{\sqrt{Z_{BP}Z_0}}{2Z^{3/2}(\sqrt{Z_{BP}} - \sqrt{Z_0})} \approx \frac{\sqrt{Z_0}}{2Z^{3/2}},$$

$$Z_0 \leq Z \leq Z_{BP}, \quad Z_0 \ll Z_{BP};$$

$$m_{12}(Z) \approx \sqrt{Z_{BP}Z_0} = \frac{P_e}{4a^2\pi R_{BP}^2}.$$

Е. Среднее число N_{2AVBS} БС в области интерференционного РРВ ($R > R_{BP}$) и средняя интенсивность $Z_{\Sigma 2BS}$ ЭМФ, создаваемого ими в ТН:

$$N_{2AVBS} = \rho_{BS} (R_{RV}^2 - R_{BP}^2) = \rho_{BS} R_{BP}^2 (a^2 - 1) = \\ = \frac{16\pi\rho_{BS}(a^2 - 1)H_{OP}^2 H_{BS}^2}{\lambda^2};$$

$$Z_{\Sigma 2BS} = \lim_{a \rightarrow \infty} (N_{2AVBS} m_{12}(Z)) = \frac{B_{BS}}{4};$$

здесь также следует отметить зависимость $Z_{\Sigma 2BS}$ лишь от средней ЭМНТ, создаваемой множеством БС, расположенных в области интерференционного РРВ между БС и ТН, а также независимость $Z_{\Sigma 2BS}$ от λ и H_{OP} .

Ж. Средняя интенсивность $Z_{\Sigma BS}$ ЭМФ в рассматриваемой полосе частот МС ($\lambda \approx const$), создаваемого в ТН множеством БС, расположенных равномерно случайно по отношению к ТН во всей области радиовидимости БС из ТН:

$$Z_{\Sigma BS} = Z_{\Sigma 1BS} + Z_{\Sigma 2BS} \approx \frac{B_{BS}}{2} \ln \left(\frac{4\sqrt{e}H_{OP}}{\lambda} \right) \approx \\ \approx \frac{B_{BS}}{2} \ln \left(\frac{6.6 \cdot H_{OP}}{\lambda} \right), \quad H_{OP} \geq \frac{\lambda}{4}. \quad (5)$$

В последнем соотношении средняя суммарная ЭМНТ B_{TBS} , создаваемая излучениями всего множества БС с различными ЭИИМ, имеет смысл средней территориальной плотности суммарной мощности их ЭМП РЧ, достигающей земной поверхности. Эта характеристика является интегральной, соответствующей определению (2) и обеспечивающей адекватность соотношений (5)–(7) применительно к анализу реальных сценариев присутствия БС

с произвольными мощностью и направленностью их излучений.

8. Средняя интенсивность ЭМФ, создаваемого в ТН излучениями ПУ в отдельно взятой полосе частот МС ($\lambda = const$), также определяемая в форме произведения средних значений ППМ ЭМП ПУ и их числа в ТН.

Развитие [34, 36, 38] методики, изложенной выше в п. 7, применительно к анализу ЭМ загрязнения среды обитания излучениями ПУ МС, позволило получить следующие соотношения для оценки средней интенсивности $Z_{\Sigma UE}$ ЭМФ, создаваемого в ТН в отдельно взятой полосе частот МС множеством ПУ, распределенных по территории случайно равномерно и создающих ЭМНТ (3):

$$Z_{\Sigma UE} = Z_{\Sigma 1UE} + Z_{\Sigma 2UE} \approx \frac{B_{UE}}{2} \ln \left(\frac{8\pi\sqrt{e}h^2}{\lambda^2} \right) \approx \\ \approx \frac{B_{UE}}{2} \ln \left(\frac{13.2 \cdot \pi h^2}{\lambda^2} \right), \quad h \geq \frac{\lambda}{2\sqrt{2}\pi}; \quad (6)$$

$$Z_{\Sigma 1UE} = \frac{B_{UE}}{2} \ln \left(\frac{8 h^2}{\lambda^2} \right), \quad Z_{\Sigma 2UE} = \frac{B_{UE}}{4};$$

$$H_{OP} \approx H_{UE} \approx h.$$

Выражение (6) получено в предположении, что ближняя зона ЭМ излучения ПУ, в которой модель (4) теряет неадекватность, определяется окрестностью ПУ радиусом $\lambda/2$ (что соответствует известному ограничению $2D^2/\lambda$ для полуволнового вибратора длиной $D = \lambda/2$), и попадание ТН в эту окрестность исключается. Граница этой окрестности может рассматриваться в качестве своеобразной условной пространственной границы, разделяющей добровольные и вынужденные риски здоровью от воздействия ЭМП ПУ, располагаемых соответственно ближе либо дальше, чем $\lambda/2$, от тела человека.

Как и составляющая ЭМФ, образуемая излучениями БС и описываемая соотношением (5), компонента ЭМФ, образуемая в ТН излучениями ПУ, имеет 2 составляющих: частотнозависимую $Z_{\Sigma 1UE}$, образуемую излучениями ПУ из брейкпойнт-окрестности ТН радиуса $R_{BP} = 4h^2/\lambda$ со свободным РРВ между ПУ и ТН, и частотнонезависимую с интенсивностью $Z_{\Sigma 2UE}$, образуемую излучениями ПУ из области

интерференционного РРВ между ПУ и ТН. Знаки “ $\approx$ ” в (5), (6) отражают то обстоятельство, что использованная при их выводе модель РРВ (4) является моделью “наихудшего случая”, отражая лишь основные закономерности процессов РРВ в зонах радиовидимости источников ЭМП (БС и ПУ) из ТН вблизи земной поверхности, и ее точность ограничена.

Оценки (5), (6) не являются оценками средних значений в строго математическом смысле хотя бы в силу пессимистического характера модели (4) РРВ и некоторого произвола в определении границ ближней (реактивной) и дальней зон излучения при выводе (6), потому далее оценки (5), (6) будем называть условными средними значениями, что не снижает их адекватности, доказанной на практике.

9. Средняя ЭМНТ, создаваемая системами МС, определяемая на основе анализа средней территориальной плотности мобильного трафика (параметра ATC – “Area traffic capacity” сетей МС в [22, 23]).

9.1. Определение средней ЭМНТ, образуемой излучениями БС.

Выполнение оценок интенсивности ЭМФ, создаваемого системами МС, с использованием (5), (6) требует предварительных оценок (прогноза) ЭМНТ B_{BS} и B_{UE} , создаваемой на рассматриваемой территории множеством БС и ПУ. Эти оценки могут быть выполнены как на основе (2), (3) в результате анализа характеристик излучения и территориального распределения БС и ПУ, так и на основе оценок ATC – интегральной системной характеристики беспроводного информационного обслуживания территории – средней территориальной плотности S_{tr} [бит/с/м²] мобильного трафика. Последнее предпочтительнее при анализе ЭМФ, создаваемого системами МС новых поколений в связи со значительным разнообразием беспроводных услуг и сценариев их реализации, затрудняющих прямые оценки с использованием (2), (3).

Развитая в [39, 40, 42] методика подобной оценки средней ЭМНТ основана на использовании известной теоремы Шеннона–Хартли [49], связывающей потенциальную спектральную эффективность передачи информации с отношением мощностей сигнала и шума в канале передачи. При регулярной сотовой структуре сети и равномерном случайном распределении ПУ по территории со средней плотностью ρ_{UE} в отдельно

взятой полосе частот ($\lambda = const$), если каждая ПУ принимает поток со скоростью V [бит/с], средняя ATC на земной поверхности, создаваемая излучениями БС, будет равна $S_{tr} = \rho_{UE} \times V$ [бит/с/м²], и средняя ЭМНТ составит:

$$B_{BS} \approx \frac{8\pi^2 k T_0 m K_N K_S L_P SNIR (K_{CC} + 1) R_{max}^2 S_{tr}}{\lambda^2 G_{0BS} \log_2(1 + SNIR)}, \quad (7)$$

$$CNIR = (2^{mS_{ER}} - 1).$$

В этом соотношении, полученном при условии, что на входе радиоприемников ПУ присутствуют передаваемые БС сигналы не ниже минимально необходимого уровня, соответствующего требуемому значению $SNIR$ (отношения мощности полезного сигнала к суммарной мощности помех и собственного шума приемника), присутствуют следующие параметры:

G_{0BS} – системный параметр направленности излучения БС, примерно равный коэффициенту направленного действия (КНД) антенны БС [44]; R_{max} – радиус зоны обслуживания (соты) БС, составляющий десятки метров для хот-спотов (фемто- и пикосот), сотни метров для городских БС и километры для сельских БС [22, 23]);

k – постоянная Больцмана, 1.38×10^{-23} Дж/К; K_N – коэффициент шума радиоприемников ПУ (типичные значения: 5...10 [22, 23]); T_0 – температура окружающей среды, град. ($T_0 = 290$ К);

K_S – коэффициент, характеризующий необходимый запас по уровню принимаемого сигнала ПУ (от 1–2 в фемто- и пикосотах до 10 – 10^2 в микро- и макросотах) для реализации системобразующих функций (хендовера и т.п.);

L_P – необходимый запас (до 10^3 – 10^4) на преодоление дополнительных по отношению к свободному пространству потерь при РРВ от БС к ПУ, связанных с затуханием радиоволн при входе в здания, их замираниями в “каньонах” городской застройки и другими факторами [50, 51];

K_{CC} – коэффициент, равный отношению уровней внутрисетевой помехи и уровня собственного теплового шума радиоприемника ПУ на его входе;

S_{ER} [бит/с/Гц] – реальная спектральная эффективность передачи информации

в радиоканалах БС, $m \geq 1$ — коэффициент, характеризующий, во сколько раз реальная спектральная эффективность радиоканала ниже потенциальной (либо выше ее при использовании технологии ММО, в этом случае m может быть меньше 1).

Соотношение (7) соответствует упрощенной модели функционирования МС, отражающей основные закономерности формирования средней ЭМНТ излучениями множества БС отдельно взятой полосы частот МС и отдельно взятого иерархического уровня системы МС, пространственная топология которого определяется размером R_{max} зоны обслуживания БС. При сложной многоуровневой пространственной топологии сетей МС создаваемая ими суммарная средняя ЭМНТ определяется суммированием оценок (7) для каждого из уровней, использующих данную полосу частот.

9.2. Определение средней ЭМНТ, образуемой излучениями ПУ.

При решении этой задачи необходимо учитывать следующее:

А. Трассы РРВ от БС к ПУ и обратно совпадают, и $K_{нд}$ антенн на передачу и на прием и у БС, и у ПУ можно считать одинаковыми при малых различиях в частотах приема/передачи в режиме частотного дуплекса (FDD) и отсутствии этих различий в режиме временного дуплекса (TDD). Поэтому рабочие частоты и потери передачи для этих трасс, включая дополнительные потери по отношению к свободному пространству, определяющие необходимость присутствия L_p в (7), также могут считаться одинаковыми.

Б. Максимальные средние мощности ЭМ излучения ПУ (21–24 дБм) и БС вне помещений (41–49 дБм) отличаются на 2 порядка и более [22, 23]. Это связано с несколько худшей чувствительностью радиоприема ПУ по сравнению с БС, асимметрией нисходящего и восходящего трафика и с необходимостью обеспечения радиовидимости БС за пределами ее зоны обслуживания для реализации хендвера (что учитывается в (7) коэффициентом K_S).

Фактическое отношение средних мощностей излучения БС и ПУ может быть еще большим при наличии регулировки мощности излучения ПУ в некоторых режимах. Средняя мощность излучения БС по отдельному радиоканалу может расходоваться на обеспечение связи с несколькими ПУ (например, в одном радиоканале

БС GSM происходит передача данных с временным разделением для 8 ПУ), при этом мощность передачи 1 бита информации “вниз” выше, чем при передаче “вверх”. Для БС в помещениях (Indoor Hotspot в [22, 23]), где хендвер не требуется, отличие мощностей излучений БС и ПУ не превышает 3 дБ (2 раз).

В. ПУ могут распределяться по территории неравномерно, в местах концентрации ПУ их территориальная плотность может превышать средний уровень на величину $K_G = 10 \dots 100$. Отношение $K_T = K_{TD}/K_{TU}$ интенсивности нисходящего и восходящего трафика, характеризующее его асимметрию, различно для различных сервисов МС и принимает различные значения, равные 1 для мобильной телефонии и достигающие 10–100 для мобильного интернета [53]. В результате средняя ЭМНТ, создаваемая излучениями ПУ в рассматриваемой полосе частот в окрестности некоторой ТН у земной поверхности, может быть оценена следующим образом

$$B_{UE} \approx \frac{B_{BS} K_G}{K_S K_T}. \quad (8)$$

Это соотношение справедливо для традиционной сотовой структуры сетей МС с использованием обычных антенн со статическими секторными диаграммами направленности, при которых локальное увеличение территориальной плотности ПУ и восходящего трафика не приводит к заметному изменению пространственной структуры ЭМФ (5), создаваемого излучениями БС. Иное имеет место в сетях МС, использующих в БС активные фазированные антенные решетки (АФАР) с динамическим адаптивным формированием узких лучей в направлении на каждую обслуживаемую ПУ (Massive ММО, режим “Beamforming”). В этих сетях территориальная концентрация ПУ и средней АТС сопровождается соответствующим адаптивным ростом интенсивности ЭМФ (5), создаваемого излучениями этих БС, что может рассматриваться как эквивалентное локальное увеличение территориальной плотности БС для информационного обслуживания большего количества ПУ в местах их группирования. В результате $K_G \rightarrow 1$, что делает вклад (6) излучений ПУ в местах их концентрации в суммарный уровень ЭМФ незначительным.

10. Определение полной средней интенсивности ЭМФ, создаваемого системами МС, на основе оценок ЭМНТ в каждой из полос частот МС.

10.1. Средняя интенсивность ЭМФ, образуемого излучениями и БС, и ПУ в отдельной j -й полосе частот, может быть определена с использованием (5)–(8):

$$Z_{\Sigma j} = Z_{\Sigma BSj} + Z_{\Sigma UEj} = \quad (9)$$

$$= \frac{B_{BSj}}{2} \left[\ln \left(\frac{4\sqrt{e}h}{\lambda_j} \right) + \frac{K_{Gj}}{K_{Sj}K_{Tj}} \ln \left(\frac{8\sqrt{e}h^2}{\lambda_j^2} \right) \right].$$

10.2. Полная средняя интенсивность ЭМФ РЧ $Z_{\Sigma J}$, создаваемая системами МС во всех J полосах частот, определяться суммированием вкладов $Z_{\Sigma j}$ излучений БС и ПУ каждой из них

$$Z_{\Sigma J} = \sum_{j=1}^J Z_{\Sigma j}; \quad (10)$$

вклад каждой полосы частот будет связан с соответствующими вкладами ЭМНТ B_{BSj} и B_{UEj} в суммарную ЭМНТ (7)/(8), создаваемую всеми БС и ПУ на рассматриваемой территории, и определяться соответствующими этой полосе частот и уровню иерархии в структуре системы МС значениями параметров λ_j , S_{Tj} , R_{maxj} , m_j , S_{ERj} , $SNIR_j$, K_{Gj} , K_{Sj} , K_{Tj} , L_{pj} , K_{CCj} , G_{0BSj} .

РЕЗУЛЬТАТЫ

Приведенные выше соотношения оперируют с доступными исходными данными о характеристиках оборудования и систем МС, обеспечивая практическую возможность оценок уровней ЭМФ, создаваемого радиосетями МС на обслуживаемой территории. Адекватность данной методики применительно к МС 2G/3G (GSM/UMTS) подтверждена ее верификацией [41] с использованием опубликованных результатов многочисленных измерений ЭМФ во многих странах, а также опытом использования ее элементов в [54] при экспертизе ЭМ безопасности на социально значимых объектах.

Ниже приведены результаты расчетов с использованием (5)–(9) интенсивности ЭМФ, создаваемого системами МС. При их выполнении принято во внимание следующее:

1. Полосы частот для систем 5G выделяются в двух диапазонах: в диапазоне FR1 (0.41–7.125 ГГц), охватывающем полосы частот предыдущих поколений МС и полосы частот систем Wi-Fi, и в диапазоне FR2 (24.25–52.6 ГГц). с дальнейшим его расширением до 70 ГГц [23] и выше. Диапазон FR2 еще не получил широкого распространения для коммерческой эксплуатации систем 5G, но в будущем планируется его широкое использование на нижних иерархических уровнях радиосетей 5G/6G.

2. В сетях МС типовые значения максимальной дальности связи (радиуса зоны обслуживания БС) R_{max} составляют 60 м (FR1) и 20 м (FR2) для пико- и фемтосот (точек доступа внутри зданий), 200–250 м для городских микросот, 500–750 м для городских макросот, 1000–1300 м для пригородных макросот и 1500–1800 м для макросот в сельской местности [22, 23 и др.]).

3. Разные иерархические уровни топологии сетей МС требуют различного запаса по уровню сигнала БС: от $K_S = 2$ –10 в фемто- и пикосотах до $K_S = 10$ –100 в микро- и макросотах.

4. Необходимый запас L_p по мощности излучения для преодоления дополнительных потерь при распространении радиоволн по отношению к свободному пространству достигает 10^3 – 10^4 в микро- и макросотах с внешними БС [50, 51] и составляет 5–10 дБ (3–10 раз) в фемто- и пикосотах.

5. Превышение уровнем внутрисистемных помех уровня внутренних шумов приемника (коэффициент K_{CC}) определяется качеством частотно-территориального планирования радиосети МС и может принимать значения в широких пределах от 0 (отсутствие внутрисистемных помех) до 100...1000 и даже более (при низком качестве частотно-территориального планирования; при функционировании МС с завышенными уровнями полезного сигнала, что при регулярной кластерной пространственной топологии сетей МС является причиной завышенных уровней внутрисетевой помехи). В современных сетях МС уровень соканальных помех уменьшается прежде всего за счет значительного увеличения объема используемого радиочастотного спектра, а также за счет адаптивного частотно-территориального планирования и оптимизации сетей, использования АФАР в режиме “Beamforming” и т.п. вплоть до отказа от сотового принципа частотного планирования.

Автор при расчете демонстрационных примеров (рис. 2–6) ограничился относительно умеренным уровнем соканальных помех ($K_{CC} = 10$).

6. В радиоканалах МС без использования технологии ММО $m \approx 2...10$ [52]. Таким образом, планируемое увеличение спектральной эффективности радиоканалов 4G/5G за счет технологии ММО в 2–8 раз [22, 24] фактически лишь компенсирует неидеальность процессов модуляции/демодуляции и кодирования-декодирования. Поэтому оценки интенсивности ЭМФ, создаваемого системами МС, с использованием (7) целесообразно выполнять для $m = 1$ в предположении, что скорость передачи данных в радиоканалах этих систем близка к потенциальной в определении [49].

7. Практический интерес с точки зрения ЭМ безопасности населения представляют оценки ЭМФ для всего множества сценариев реализации 4G/5G/6G при средней территориальной плотности мобильного трафика (АТС), достигающей декларируемых уровней 10^5 бит/с/м² для систем МС 4G, 10^7 бит/с/м² для 5G и 10^9 бит/с/м² для 6G [25, 28].

8. Значения $SNIR$ и связанной с этим параметром спектральной эффективности S_{ER} (см. правую часть выражения (7)) передачи данных по радиоканалу “БС–ПУ” вблизи БС и на краю зоны обслуживания МС отличаются на 2–3 порядка [52], например, в пределах от 12–15 до 40–50 дБ. Приведенные ниже результаты оценивания интенсивности ЭМФ выполнены для типовых значений $SNIR$, обеспечивающих нормальное функционирование радиоканалов МС и равных 20–30 дБ (10^2 – 10^3) при коэффициенте K_N шума приемников ПУ 5–10 [22, 23].

Графики на рис. 2, 3, отражающие результаты [43], позволяют оценить степень реалистичности оценок с использованием (5), (6), (9). Они иллюстрируют результаты анализа уровней ЭМФ, создаваемых хорошо изученными системами GSM-1800 ($\lambda = 0.167$ м). На рис. 2 представлены расчетные зависимости (5) условных средних значений интенсивности ЭМФ РЧ, создаваемого излучениями БС этих систем, от уровня АТС при различных значениях R_{max} . Горизонтальная линия 0.1 Вт/м² (10 мкВт/см²) на этом и следующем рисунках соответствует ПДУ ЭМП РЧ, принятым во многих странах [13, 14].

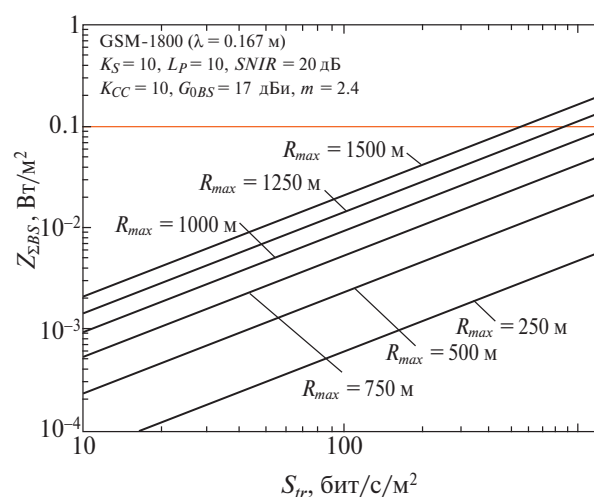


Рис. 2. Зависимости уровня $Z_{\Sigma BS}$ ЭМФ, создаваемого излучениями БС GSM-1800 (2G, режим телефонной связи, симметрия нисходящего и восходящего трафика) от уровня S_{tr} АТС для различных радиусов R_{max} зоны обслуживания БС.

Символы, представленные на рис. 2–6: λ – длина волны, K_S – запас по уровню принимаемого сигнала ПУ для реализации системообразующих функций, L_P – запас на преодоление дополнительных потерь по отношению к свободному пространству потерь при РРВ от БС к ПУ, $SNIR$ – отношение мощности полезного сигнала к суммарной мощности помех и собственного шума приемника, K_{CC} – отношение уровней внутрисетевой помехи и уровня собственного теплового шума радиоприемника ПУ, G_{0BS} – КНД антенны БС, m – отношение потенциальной и реальной спектральной эффективности радиоканала “БС–ПУ”. S_{tr} – средняя территориальная плотность трафика (параметр АТС), R_{max} – радиус зоны обслуживания БС.

Fig. 2. Dependences of the EMB intensity $Z_{\Sigma BS}$ created by radiations of the GSM-1800 БС set (2G, voice communication mode, symmetry of downlink and uplink traffic) for different radii R_{max} of БС service area, on the АТС level S_{tr} .

Symbols shown in Figures 2–6: λ – wavelength, K_S – margin in the level of the received signal of the ПУ for the implementation of the system-forming functions, L_P – margin for overcoming additional losses in relation to the free space propagation from БС to ПУ, $SNIR$ – ratio of the useful signal power to the total power of interference and receiver self-noise, K_{CC} – ratio of levels of the intranetwork interference and of the own ПУ receiver thermal noise, G_{0BS} – БС antenna gain, m – ratio of the potential and actual spectral efficiency of the “БС–ПУ” radio channel, S_{tr} – average area traffic capacity (АТС), R_{max} – radius of the БС service area.

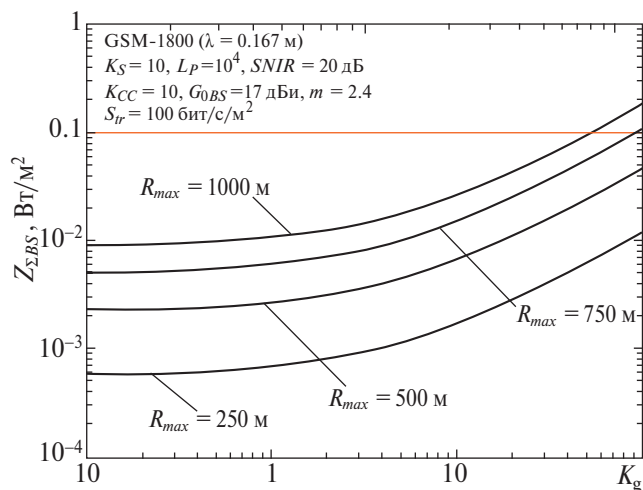


Рис. 3. Зависимости суммарного уровня ЭМФ, создаваемого излучениями БС ($Z_{\Sigma BS}$) и ПУ ($Z_{\Sigma UE}$) GSM-1800 (2G, режим телефонии, симметричность нисходящего и восходящего трафика, условия города) для различных радиусов R_{max} зоны обслуживания БС, от степени K_g наземного группирования ПУ.

Fig. 3. Dependences of the total EMB intensity generated by radiations of БС ($Z_{\Sigma BS}$) and user's equipment ($Z_{\Sigma UE}$) in GSM-1800 network (2G, voice communication mode, symmetry of downlink and uplink traffic, urban area) for different radii of БС service area, on the degree K_g of UEs terrestrial concentration.

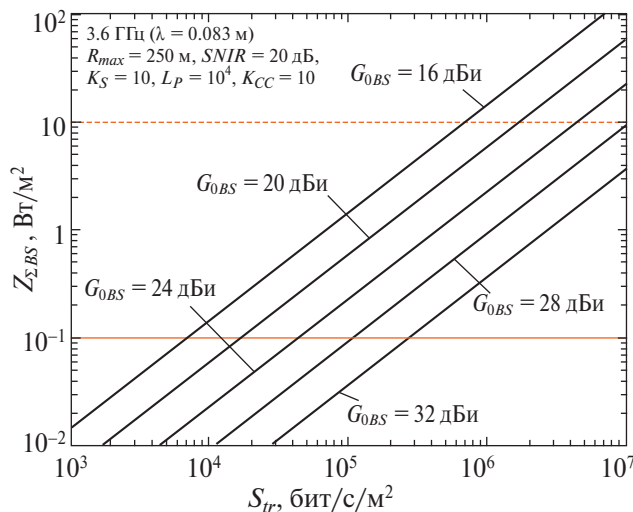


Рис. 4. Зависимости интенсивности $Z_{\Sigma BS}$ ЭМФ, создаваемого излучениями БС городских микросот 5G, от уровня S_{tr} АТС при $m = 1$ и различных коэффициентах усиления G_{0BS} антенн БС.

Fig. 4. Dependences of the EMB intensity $Z_{\Sigma BS}$ created by БС radiations of 5G urban micro-cells, on the ATC level S_{tr} , at $m = 1$ and different БС antenna gains G_{0BS} .

При оценке степени адекватности представленных на рис. 2 данных следует иметь в виду, что АТС, создаваемая системами GSM-1800, относительно мала. Так, при территориальной плотности 10^4 ПУ/км², удельной интенсивности трафика 0.05–0.08 Эрл. (относительное число ПУ в активном режиме) и скорости передачи данных в канале GSM 2^{15} бит/с АТС оказывается равной всего $S_{tr} = 16...26$ бит/с/м². Уровни АТС, создаваемые системами GSM в местах с высокой плотностью населения, не превышали 10^2 бит/с/м² и приближались к 10^3 бит/с/м² только в местах массового скопления людей и интенсивного использования мобильной телефонной связи (бизнес- и торговые центры, стадионы и т.п.). При ухудшении качества частотно-территориального планирования сети (увеличении K_{CC} до 30–50 и более, что в сетях GSM не редкость) зависимости рис. 2 перемещаются вверх, в области $S_{tr} \leq 10^2$ бит/с/м² оставаясь ниже уровня 0.1 Вт/м², что в целом согласуется с данными [1–12].

На рис. 3 для тех же исходных данных и $S_{tr} = 10^2$ бит/с/м² приведены расчетные зависимости (9) средней интенсивности ЭМФ, создаваемого и БС, и ПУ GSM-1800, от коэффициента группирования ПУ для различных R_{max} . Их анализ свидетельствует о том, что локальное группирование ПУ может быть причиной существенного увеличения интенсивности ЭМФ, создаваемого системами МС, вплоть до опасного уровня, что согласуется с результатами [55] и является существенным фактором, влияющим на уровень вынужденных рисков здоровью населения (что в настоящее время существующими системами защиты населения не учитывается).

Зависимости на рис. 2, 3 наглядно иллюстрируют влияние уровней инвестиций в развитие инфраструктуры систем МС на их безопасность для населения. При одинаковом уровне АТС в сетях МС с малым количеством крупных сот уровни ЭМФ существенно выше, чем в сетях МС с большим количеством мелких сот, что обусловлено квадратичной зависимостью ЭМНТ (7) от радиуса соты R_{max} в сети МС.

Расчетные зависимости на рис. 4–6 характеризуют ожидаемые уровни ЭМФ при различных сценариях реализации систем и услуг 4G/5G. Они отражают особенности эволюции МС 2G→3G→4G→5G, характеризуемой значительным увеличением объемов радиочастотного ресурса,

выделяемого системам МС, и возрастанием АТС на несколько порядков.

На рис. 4 приведены зависимости (5) интенсивности ЭМФ, создаваемого излучениями БС городских микросот с радиусом зоны обслуживания $R_{max} = 250$ м, от территориальной плотности нисходящего трафика в нижней части диапазона СВЧ, активно используемой системами 5G, при различных коэффициентах усиления антенн БС. Два верхних графика соответствуют традиционным секторным антеннам БС и активным антенным решеткам с реализацией статической многолучевой секторной структуры (2D MIMO); три нижние кривые соответствуют использованию многоэлементных антенных решеток в режиме “Beamforming” (3D Massive MIMO). Эти зависимости свидетельствуют о потенциальном преимуществе использования в системах МС антенных решеток с большим коэффициентом усиления в узких лучах, обеспечивающих меньшие размеры “пятен” облучения земной поверхности и, следовательно, при равных уровнях АТС, обеспечивающих значительно меньшие средние уровни ЭМФ. Горизонтальная пунктирная линия 10 Вт/м^2 (1000 мкВт/см^2) на этом и следующем рисунках соответствует корпоративным рекомендациям [15].

На рис. 5 представлены зависимости (5) интенсивности ЭМФ, создаваемого излучениями БС городских макросот ($R_{max} = 500$ м), от АТС при использовании различных полос частот FR1, рассчитанные для типовых значений параметров, содержащихся в (7). Данные зависимости свидетельствуют о том, что реализация заявленных высокоскоростных услуг 4G/5G в городских макросотах сетей МС с использованием любых полос частот этого диапазона представляет опасность для населения; приемлемые уровни ЭМФ для АТС, соответствующей сетям 4G, могут быть обеспечены только в малых сотах (как за счет уменьшения предельной дальности связи R_{max} , так и за счет уменьшения необходимого запаса L_p мощности излучения БС).

На рис. 6 представлены зависимости (5) интенсивности ЭМФ, создаваемого слабонаправленными излучениями системы БС при реализации сценария (“indoor hotspot” (помещение с системой точек доступа) с параметрами пространственного размещения БС, рекомендуемыми в [22, 23]): $R_{max} = 60$ м (4G) при использовании частотного диапазона FR1 и $R_{max} = 20$ м (5G) при использовании частотного диапазона FR2); расчеты

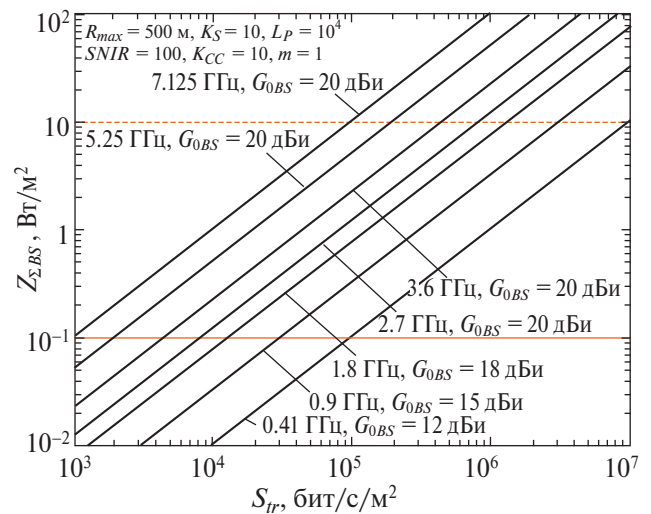


Рис. 5. Зависимости интенсивности $Z_{\Sigma BS}$ ЭМП, создаваемого излучениями БС городских макросот 5G, от уровня S_{tr} АТС для различных частот диапазона FR1.

Fig. 5. Dependences of the EMB intensity $Z_{\Sigma BS}$ created by BC radiations of 5G urban macro-cells, on the ATC level S_{tr} , for various frequencies of FR1 range.

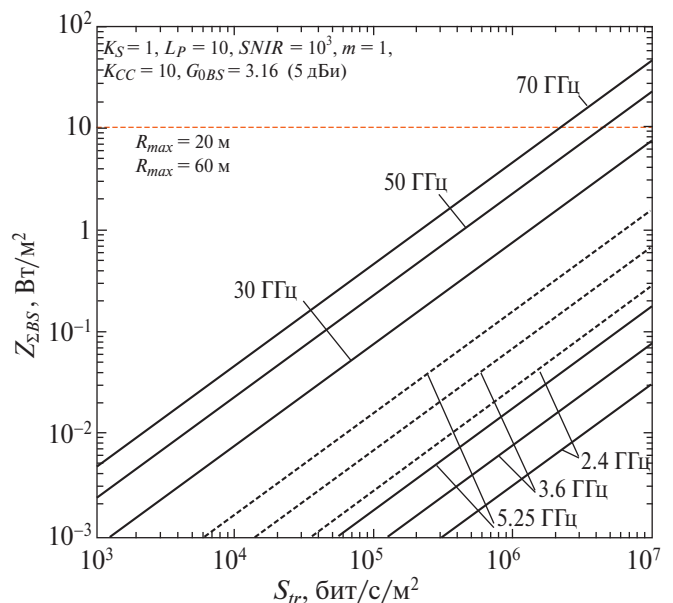


Рис. 6. Зависимости интенсивности $Z_{\Sigma BS}$ ЭМФ, образуемого излучениями БС хотспотов 5G на различных частотах диапазона FR2 и излучениями БС хотспотов 4G (или точек доступа Wi-Fi) на различных частотах диапазона FR1, от уровня S_{tr} АТС ($R_{max} = 60$ м – пунктирные линии, $R_{max} = 20$ м – сплошные линии).

Fig. 6. Dependences of the EMB intensity $Z_{\Sigma BS}$ created by BC radiations of 5G hotspots at various frequencies (30, 50 and 70 GHz) of FR2 range and by BC radiations of 4G hotspots (or Wi-Fi access points) at various frequencies of FR1 range, on the ATC level S_{tr} ($R_{max} = 60$ м – dotted lines, $R_{max} = 20$ м – solid lines).

выполнены для типовых значений параметров, входящих в (7). Нетрудно заметить, что уровни ЭМФ, создаваемые при реализации высокоскоростных услуг 5G в диапазоне FR2 при $S_{tr} \rightarrow 10^7$ бит/с/м² с использованием слабонаправленных антенн, превышают не только “нетепловые” ПДУ ЭМП, принятые с учетом опасности отдаленных последствий их воздействия на здоровье населения, но и “тепловой” ПДУ [15]. В то же время реализация таких сценариев 5G в нижней части диапазона FR1 обеспечивает уровни ЭМФ не выше 10 мкВт/см², а также существенно более низкие уровни ЭМФ при реализации этих сценариев в рамках 4G при $S_{tr} \rightarrow 10^5$ бит/с/м².

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ приведенных соотношений и расчетных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

1. Хотя соотношения (5)–(10) основаны на использовании упрощенной модели функционирования МС, идеализированных моделей излучения и пространственного размещения БС и ПУ, а также эмпирической модели РРВ наихудшего случая [48], отражающих лишь основные закономерности формирования ЭМФ в присутствии множества пространственно распределенных источников ЭМП, получаемые с их помощью оценки близки к реальности, что подтверждается зависимостями на рис. 2, 3 и результатами [41] частичной верификации изложенной методики.

2. Графические расчетные зависимости на рис. 3, согласующиеся с результатами [55], свидетельствуют о том, что при традиционной сотовой структуре сетей МС с использованием антенн БС со статичными секторными диаграммами направленности вклад излучений ПУ в совокупную интенсивность ЭМФ при их пространственном группировании может быть соизмерим со вкладом излучений БС и даже превышать его, что требует учета при анализе вынужденных рисков для здоровья населения в этих условиях.

3. Зависимости на рис. 4 свидетельствуют о том, что повышение пространственной избирательности излучений БС, сопровождающееся сужением лучей АФАР и ростом КНД, является положительным фактором, способствующим существенному уменьшению их вклада в уровень суммарного ЭМФ как за счет уменьшения доли излучаемой мощности БС, расходуемой на

сопутствующее облучение подстилающей поверхности, так и за счет уменьшения уровня внутрисетевых помех, обеспечивающего улучшение чувствительности радиоприема и соответствующего снижения необходимой мощности излучений БС.

4. Зависимости на рис. 5, 6 характеризуют ожидаемые средние уровни ЭМФ при реализации типовых вариантов и сценариев 5G, их анализ свидетельствует о следующем:

4.1. Безопасные уровни ЭМФ в сетях МС при радиусах сот в сотни метров и $S_{tr} = 10^4$ – 10^5 бит/с/м² (уровни АТС в сетях 4G) возможны только с использованием полос частот в нижней части диапазона FR1, менее всего подходящей для этого из-за относительной узкополосности радиоканалов диапазона УВЧ. Использование же полос частот нижней части диапазона СВЧ для безопасной генерации мобильного трафика этой плотности требует как существенного уменьшения дальности связи (R_{max}), так и значительного увеличения пространственной избирательности излучений БС (увеличением G_{0BS} за счет применения многоэлементных АФАР).

4.2. Расширение объема выделяемого системам МС радиочастотного спектра в верхнюю часть диапазона СВЧ и в нижнюю часть диапазона КВЧ значительно снижает остроту проблемы внутрисистемных помех, ухудшающих чувствительность радиоприема; обеспечивает возможность расширения полос частот и увеличения пропускной способности радиоканалов, а также реализации компактных многоэлементных адаптивных многолучевых АФАР с большими КНД. Однако

а) в связи с пропорциональным ростом затухания радиоволн с уменьшением их длины волны реализация сценариев 5G “Indoor Hotspot-eMBB” [23] (сверхширокополосная мобильная связь в помещениях) в диапазоне FR2 со слабонаправленными антеннами ($G_{0BS} = 5\text{dBi}$) оказывается опасной для населения уже при $S_{tr} > 10^4$, и даже применение многоэлементных АФАР в режиме “beamforming” позволяет сдвинуть эту границу всего на порядок, хотя реализация этих сценариев в полосах частот диапазона FR1, используемых современными сетями Wi-Fi оказывается безопасной практически при любых уровнях АТС, декларируемых для 5G;

б) распространение технологий и услуг 5G на диапазон миллиметровых радиоволн лишь

на основе заверений [15] об их безопасности без глубоких и независимых исследований их воздействия на человеческое здоровье крайне опасно как в силу возрастания интенсивности ЭМФ по мере продвижения рабочих частот БС пикосот к верхней границе диапазона FR2 (верхние графики на рис. 6), так и в связи с существованием известных резонансных эффектов [56, 57] при воздействии ЭМП диапазона FR2 на человеческий организм.

5. Зависимости на рис. 4–6 позволяют обоснованно комментировать существующее мнение о том, что АФАР БС 4G/5G представляют опасность для населения. Рост АТС на много порядков сопровождается увеличением ЭИИМ в главных лучах диаграмм направленности АФАР БС до 50–100 кВт, т.е. примерно на 2 порядка по сравнению с ЭИИМ БС 2G/3G, и значительным увеличением пространственной плотности БС (не менее чем на 1–2 порядка для достижения $S_{lr} \rightarrow 10^7$ бит/с/м²). Применение антенных решеток со статической секторной многолучевой диаграммой направленности (2D MIMO), коэффициенты усиления в лучах которых мало отличаются от коэффициентов усиления традиционных секторных антенн БС, не в состоянии компенсировать влияние этого увеличения ЭИИМ и пространственной плотности БС на увеличение интенсивности ЭМФ, даже несмотря на использование импульсного режима TDD, обеспечивающего существенное снижение уровней внутрисетевых помех (параметра K_{CC} в (7)). Использование в радиосетях 5G многоэлементных адаптивных АФАР “Massive MIMO” с узкими лучами в направлении на каждое обслуживаемое ПУ с КНД лучей до 24–30 дБ (250–1000 раз) в сочетании с режимом TDD, обеспечивающим увеличение реальной чувствительности радиоприема МС за счет снижения уровней внутрисетевых помех, способно практически компенсировать влияние роста ЭИИМ БС на увеличение средней интенсивности сопутствующего ЭМФ. Однако безопасная эксплуатация систем 5G для населения со средними уровнями сопутствующего ЭМФ не выше нескольких мкВт/см² при АТС $S_{lr} \rightarrow 10^7$ бит/с/м² возможна только при условии, что в макросотах с АФАР “Massive MIMO” АТС не превысит уровень 10^5 бит/с/м², заявленный для систем 4G (см. рис. 5), а основная масса мобильного трафика сетей 5G в часы наибольшей нагрузки будет проходить через хотспоты с использованием традиционных точек доступа

диапазона FR1 со слабонаправленными антеннами или многоэлементных адаптивных АФАР “Massive MIMO” миллиметрового диапазона (см. рис. 6).

6. Прогноз уровня безопасности населения в условиях ЭМ загрязнения окружающей среды системами МС предполагает сопоставление прогнозируемых уровней ЭМФ, создаваемого этими системами, с научно обоснованными ПДУ ЭМП РЧ, гарантирующими отсутствие отдаленных последствий этого антропогенного воздействия (сохранение здоровья настоящего и будущих поколений). Поэтому его достоверность определяется как точностью оценок уровней ЭМФ, так и обоснованностью принятых гигиенических нормативов. К сожалению, ранее принятые во многих странах значения ПДУ ЭМП РЧ, распространяемые на воздействие ЭМП в диапазонах УВЧ, СВЧ и КВЧ, не в полной мере адекватны ЭМ воздействию систем 4G/5G и, по-видимому, требуют уточнений.

В частности, потенциальная опасность неконтролируемой экспансии 5G определяется не только ожидаемым значительным ростом интенсивности ЭМФ (рис. 4–6), но и существенным усложнением спектрально-временной структуры сигналов МС. В системах 4G/5G все чаще используются обеспечивающие ряд преимуществ импульсные режимы передачи данных (TDD), которые в полосах каналов шириной 10–100 МГц и более обеспечивают очень короткую длительность фронта импульса. Восприимчивость организма человека к таким сигналам значительно выше, чем к сигналам МС предыдущих поколений [58, 59]. С этой точки зрения они аналогичны сигналам импульсных радиолокационных станций (РЛС), для которых в ряде стран по результатам многолетнего анализа здоровья населения на территориях, прилегающих к мощным радиотехническим объектам с РЛС, установлены ПДУ облучения главным лепестком в режиме кругового сканирования 25–100 мкВт/см². Средняя ППМ этого воздействия за период кругового сканирования в 10–100 раз ниже ПДУ, ранее принятых для непрерывных и квазинепрерывных ЭМП других радиосистем [60, 61 и др.]. Согласно [62, 63], импульсное ЭМ облучение биологически в 25–100 раз активнее непрерывного при одинаковой средней мощности облучения. По-видимому, ЭМП с существенно различающимися частотами, типами модуляции и шириной спектра также обладают разной степенью биологической

активности. К сожалению, результаты глубоких, объективных и независимых научных исследований, направленных на анализ адекватности и, при необходимости, на уточнение ПДУ ЭМП систем МС новых поколений, использующих ЭМП сложной спектрально-временной структуры в различных частотных диапазонах, практически отсутствуют. Это ограничивает объективность анализа безопасности этих систем МС для населения.

Следует принимать во внимание, что существенное различие в ПДУ ЭМП, определяемых различного рода нормативными актами и рекомендациями, определяется не только различиями статуса (норматив, рекомендация) и методического характера (диапазоны частот, виды ЭМП РЧ, значения понижающего фактора, виды учитываемых эффектов воздействия ЭМП РЧ на организм и др.), но и их различным назначением. Так, ПДУ [15] в десятки Вт/м² фактически определяют верхние границы безопасности ЭМП РЧ с точки зрения теплового поражения биоткани при сравнительно непродолжительном воздействии ЭМП РЧ большой интенсивности, ПДУ в единицы-десятки мкВт/см² определяют эти границы для продолжительного нетеплового воздействия ЭМП РЧ, не приводящего к отдаленным последствиям для здоровья населения [13, 14], а категории строительной биологии в части проблемности воздействия на человеческий организм ЭМП РЧ [64, 65] привязаны к уровню естественного ЭМФ, и даже уровни ЭМП РЧ 1–100 нВт/см² определены как неприемлемые в силу существенных изменений физических характеристик среды обитания, способных быть причиной будущих нарушений здоровья. Столь значительный разброс в критериях оценки интенсивности антропогенного ЭМФ не может не быть причиной возможной существенно различной интерпретации результатов оценок условной средней интенсивности ЭМФ с использованием приведенных выше соотношений.

7. Выражения (7), (8), а также результаты расчетов, представленные на рис. 4–6, несколько идеализированы, так как в системах 4G/5G спектральная эффективность нисходящего канала в 1.5–2 раза выше спектральной эффективности восходящего канала (что может быть учтено соответствующим поправочным коэффициентом в (8)), и спектральная эффективность радиоканалов МС зависит от расстояний между БС и ПУ, определяющих уровни полезного сигнала

в этих радиоканалах [52]. Поскольку п.р.в. и математические ожидания значений ППМ БС в ТН были получены при выводе выражения (5), учет этой зависимости в (7), (8) также не вызывает затруднений.

Следует отметить, что оценки ЭМНТ с использованием (7) определяются значениями средних уровней АТС и инвариантны к методам реализации мобильного трафика в системах МС, в частности, к его реализации

а) с максимальной скоростью передачи данных или с существенно меньшей, однако эта скорость связана со спектральной эффективностью S_{ER} и параметром m , описывающим отличие фактической спектральной эффективности радиоканалов от потенциальной, определяемой [49];

б) с высокой территориальной плотностью малоканальных и маломощных БС фемто- и пикосот или с малой территориальной плотностью мощных БС макросот, однако первый вариант с точки зрения безопасности населения предпочтительнее, поскольку параметр R_{max} в выражении (7) находится в числителе и во второй степени.

8. Представленная методика также применима для анализа интегральных уровней ЭМФ внутри помещений при реализации сценариев М2М/мМТС/IoT (массовая межмашинная связь / интернет вещей) в многоэтажной городской застройке с 3D-распределением множества излучающих ПУ внутри зданий [66, 67]. Кроме того, средняя ЭМНТ, определяемая исключительно через энергетические характеристики ЭМП, облучающих рассматриваемую территорию, инвариантна к виду излучающей аппаратуры, что позволяет использовать представленную методику для оценки уровней техногенного ЭМ загрязнения среды обитания излучениями систем всех радиослужб.

9. Приведенные выше соотношения и расчетные примеры убеждают в том, что в условиях масштабной экспансии технологий, систем и услуг беспроводного информационного обслуживания современного общества, существенно изменяющей физические характеристики среды обитания, понятие о проблеме ЭМ совместимости (ЭМС) в узком смысле лишь как о проблеме ЭМС объектов технической природы (радиоэлектронного оборудования) теряет адекватность, и требует очевидного расширения на такие области, как ЭМ безопасность

населения и ЭМ экология среды обитания (ЭМС систем МС и населения, ЭМС технических и биологических объектов, ЭМС различных элементов биосферы и т.п.) в силу единства причин возникновения этих проблем и идентичности энергетических критериев принятия решения об их опасности, а также общности методик их анализа и решения [68].

10. Представленная методика анализа ЭМФ, создаваемого системами МС, основанная на анализе создаваемых этими системами АТС и ЭМНТ, позволяет анализировать процессы формирования ЭМФ при реализации практически всех сценариев и сервисов МС и прогнозировать уровни ЭМФ для эффективного управления процессами развития и внедрения технологий и услуг 4G/5G/6G в интересах обеспечения их экологичности и безопасности для населения.

Принимая во внимание актуальность проблемы оценки антропогенного ЭМ загрязнения среды обитания при интенсивном развитии систем и сервисов 4G/5G/6G, автор убежден в важности дальнейшего развития и верификации представленной методики с целью расширения возможностей ее практического использования.

Представленные в статье расчетные данные позволяют сделать вывод, что реализация сценариев 5G при декларируемых уровнях АТС 10^6 – 10^7 бит/с/м² может сопровождаться образованием ЭМФ с уровнями, близкими к “тепловым” ограничениям [15] и даже их превышающими, а также в десятки и сотни раз превышающими гигиенические нормативы многих стран, принятые с учетом опасности отдаленных последствий “нетеплового” воздействия ЭМП РЧ на здоровье населения. В первую очередь это касается реализации сценариев и сервисов 5G с использованием внешних БС с радиусами зон обслуживания от 200 м в местах с высокой плотностью населения и деловой активностью, а также функционирования фемто- и пикосот в диапазоне FR2 с использованием традиционных слабонаправленных антенн БС.

Вклад излучений ПУ в суммарную интенсивность ЭМФ при их локальной пространственной концентрации также может быть значительным, сопоставимым со вкладом излучений БС, что в настоящее время при анализе вынужденных рисков для здоровья населения не учитывается. Все это свидетельствует о необходимости объективного и независимого анализа возможных

уровней ЭМ загрязнения среды обитания при полномасштабной реализации всей совокупности предлагаемых сценариев и сервисов 4G/5G/6G с целью обоснования соответствующих условий и ограничений, гарантирующих безопасность населения и отсутствие вреда окружающей среде.

Автор выражает надежду, что изложенная методика анализа ЭМФ, создаваемого системами МС, позволит перейти от эмоционального качественного к объективному количественному анализу соответствующих вынужденных рисков для здоровья населения, определить условия, при соблюдении которых современные и перспективные системы и услуги беспроводного информационного обслуживания общества будут и эффективны, и выгодны, и безопасны, и на этой основе обеспечить необходимое управление процессами реализации систем и услуг МС 4G/5G/6G.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность д-ру биол. наук О.А. Григорьеву и д-ру мед. наук В.Н. Никитиной за поддержку и ценные замечания и предложения при выполнении исследований по тематике статьи.

Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией статьи.

The author declares no conflicts of interests.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Мордачев Владимир Иванович (Mordachev Vladimir Ivanovich), <https://orcid.org/0000-0002-2036-3066>, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь (Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus), mordachev@bsuir.by

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ozdemir A.R., Alkan M., Gulsen M. Time Dependence of Environmental Electric Field Measurements and Analysis of Cellular Base Stations. *IEEE EMC Magazine*. 2014;3: 43–48.
2. Burgi A., Theis G., Siegenthaler A., Roosli M. Exposure modeling of high-frequency electromagnetic fields. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 2008;18: 183–191.

3. Gajsek P., Ravazzani P., Wiart J., Grellier J. et al. Electromagnetic field exposure assessment in Europe radiofrequency fields (10 MHz–6 GHz). *J. Expo Sci. Environ. Epidemiol.* 2015;25:37–44.
4. Ibrani M., Hamiti E., Ahma L., Halili R., Dragusha B. Comparative Analysis of Downlink Signal Levels Emitted by GSM 900, GSM 1800, UMTS, and LTE Base Stations. 16th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop, June 28–30, 2017, Budva, Montenegro, 5 p.
5. Joseph W., Verloock L., Goeminne F., Vermeeren G., Martens L. Assessment of RF exposures from emerging wireless communication technologies in different environments. *Health Phys.* 2012;102(2):161–172.
6. Rowley J.T., Joyner K.H. Comparative international analysis of radiofrequency exposure surveys of mobile communication radio base stations. *J. Expo Sci. Environ. Epidemiol.* 2012;22: 304–315.
7. Gotsis A., Papanikolaou N., Komnakos D. et al. Non-ionizing electromagnetic radiation monitoring in Greece. *Ann. Telecommun.* 2008;63:109–123.
8. Troisi F., Boumis M., Grazioso P. The Italian national electromagnetic field monitoring network. *Ann. Telecommun.* 2008; 63:97–108.
9. Tomitsch J., Dechant E., Frank W. Survey of Electromagnetic Field Exposure in Bedrooms of Residences in Lower Austria. *Bioelectromagn.* 2010;31:200–208, Wiley InterScience, www.interscience.wiley.com.
10. Rufo M., Paniagua J., Jimenez A., Antolín A. Exposure to high-frequency electromagnetic fields (100 KHz–2 GHz) in Extremadura (Spain). *Health Phys.* 2011; 6(101):739–745, www.health-physics.com.
11. Karpowicz J., Miguel-Bilbao S., Ramos V. et al. The evaluation of Stationary and Mobile Components of Radiofrequency Electromagnetic Exposure in the Public Accessible Environment. Proc. of the Int. Symp. “EMC Europe 2017”, Angers, France, 2017, 4 p.
12. Стаценко Л.Г., Бахвалова А.А., Жмакина И.Д. Электромагнитный фон на территории кампуса ДВФУ на о. Русский: инструментальные измерения. *Вестн. инженерной школы Дальневост. федерального ун-та.* 2021;3(48): 124–132 [Statsenko L., Bakhvalova A., Zhmakina I. Electromagnetic background on the FEFU campus on the Russky Island: instrumental measurements. *Fefu: School of Engineering Bulletin.* 2021;3(48):124–132 (In Russ.)] <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-3-14>.
13. Григорьев О.А., Гошин М.Е., Прокофьева А.В., Алексеева В.А. Особенности национальной политики, определяющей подходы к гигиеническому нормированию электромагнитного поля радиочастот в различных странах. *Гигиена и санитария.* 2019;98(11):1184–1190 [Grigoriev O., Goshin M., Prokofyeva A., Alekseeva V. Features of national policy in approaches to electromagnetic field safety of radio frequencies radiation in different countries. *Gigiena i Sanitari.* 2019;98(11):1184–1190 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-11->
14. Григорьев О.А., Никитина В.Н., Носов В.Н. и др. Электромагнитная безопасность населения. Национальные и международные нормативы электромагнитных полей радиочастотного диапазона. *Здоровье населения и среда обитания,* 2020;10(331):28–33 [Grigoriev O.A., Nikitina V.N., Nosov V.N. et al. Electromagnetic safety of the population. National and international standards for electromagnetic fields of the radio frequency range. *Public Health and Habitat.* 2020;10(331):28–33 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2020-331-10-28-33>
15. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Phys.* 2020;118:483–524.
16. Confédération suisse. Initiative populaire fédérale “Pour une téléphonie mobile respectueuse de la santé et économe en énergie”. <https://www.admin.ch/opc/fr/federal-gazette/2019/6525.pdf>.
17. Effets sanitaires éventuels liés aux valeurs élevées de débit d’absorption spécifique de téléphones mobiles portés près du corps. Anses Rapport d’expertise collective. Téléphones mobiles portés près du corps et santé. Édition scientifique. Juillet 2019, p.128.
18. Le Gouvernement agit pour limiter l’exposition aux émissions de certains téléphones mobiles et mieux informer le public. Communiqué de Presse Paris, le 25 octobre, https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/191025-_cp_anses.pdf.
19. On Petitions for Review of an Order of the Federal Communications Commission. United States Court of Appeals, Decision; 2021 Aug 13 No. 20–1025. Consolidated with 20–1138.
20. EMF scientist: International Appeal: Scientists call for Protection from Non-ionizing Electromagnetic Field Exposure. <https://www.emfscientist.org/index.php/emf-scientist-appeal>. Accessed Oct 11, 2022.
21. Hardell L., Carlberg M. Health risks from radiofrequency radiation, including 5G, should be assessed by experts with no conflicts of interest. *Oncol. Lett.* 2020; 20(15):1–11. <https://doi.org/10.3892/ol.2020.11876>.
22. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced. Report ITU-R M.2135-1, 2009.
23. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020. Report ITU-R M.2412-0, 2017.
24. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception. 3GPP TS 36.104 V12.10.0 (2016-01).
25. IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Rec. ITU-R M.2083, 2015.
26. Тихвинский В.О., Бочечка Г.С. Концептуальные аспекты создания 5G. *Электросвязь.* 2013;10: 29–33 [Tikhvinsky V.O., Bochechka G.S. Conceptual aspects of 5G. *Electrosvyaz.* 2013;10:29–33 (in Russ.)]

27. Dahlman E., Parkvall S., Skold J. 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. Academic Press, 2018, 441 p.
28. Zhang Z., Xiao Y., Ma Z. et al. 6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies. *IEEE VT Magazine*. 2019;3(14):28–41.
29. Calvanese E., Strinati E.C., Barbarossa S. et al. 6G: The Next Frontier: From Holographic Messaging to Artificial Intelligence Using Subterahertz and Visible Light Communication. *IEEE VT Magazine*. 2019;3(14):42–50.
30. Mordachev V. Mathematical Models for Radiosignals Dynamic Range Prediction in Space-Scattered Mobile Radiocommunication Networks. The IEEE Semi Annual VTC Fall, 2000; 8 p.
31. Мордачев В.И. Системная экология сотовой радиосвязи. Минск, Изд. центр БГУ, 2009, 319 с. [Mordachev V. System ecology of cellular communications. Belarus State University Publishers, 2009, 319 p. (In Russ.)].
32. Mordachev V., Loyka S. On Node Density – Outage Probability Tradeoff in Wireless Networks. *IEEE JSAC*. 2009;7(27):11201131.
33. Mordachev V. Worst-Case Models of Electromagnetic Background Created by Cellular Base Stations. Proc. of the 9th Int. Wireless Communications & Mobile Computing Conf. (IWCMC 2013). Cagliari, Italy, 2013. P. 590–595.
34. Mordachev V. Worst-Case Estimation of Electromagnetic Background Created by Cellular Mobile Stations Near Ground Surface. Proc. of the Int. Symp. “EMC Europe 2014”. Gothenburg, Sweden, 2014. P. 1275–1280.
35. Mordachev V. Worst-Case Estimation of Electromagnetic Background Near Ground Surface Created by Heterogeneous Radioelectronic Environment. Proc. of the Joint IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility and EMC EUROPE. Dresden, Germany, 2015. P. 1147–1152.
36. Mordachev V. Electromagnetic Background Created by Base and Mobile Radio Equipment of Cellular Communications. Proc. of the Int. Symp. “EMC Europe 2016”. Wroclaw, Poland, 2016. P. 590–595.
37. Mordachev V., Svistunov A. Required Levels of Radiation Power of GSM Base Stations on Urban Area Taking Into Account Attenuation in Buildings and Intra-system EMC. Proc. of the Int. Symp. “EMC Europe 2016”. Wroclaw, Poland, 2016. P. 596–601.
38. Mordachev V. System-Level Estimation of Prevailing Levels of EM Fields of Mobile Phones Considering Near-Field Zone Limitations of Their Antennas. Proc. of the Int. Symp. “EMC Europe 2017”. Angers, France, 2017. 6 p. (No. 64).
39. Mordachev V. Restrictions on Wideband Systems of Mobile Communications of New Generations at Declared Expansion of Data Transfer Rates. Proc. of the Int. Symp. “EMC Europe 2018”. Amsterdam, The Netherlands, 2018. P. 202–207.
40. Mordachev V. Estimation of Electromagnetic Background Intensity Created by Wireless Systems in Terms of the Prediction of Area Traffic Capacity. Proc. of the Int. Symp. “EMC Europe 2019”. Barcelona, Spain, 2019. P. 82–87.
41. Mordachev V. Verification of Worst-Case Analytical Model for Estimation of Electromagnetic Background Created by Mobile (Cellular) Communications, Proc. of the Int. Virtual Conf. “EMC Europe 2020”. Rome, Italy, 2020. 6 p.
42. Mordachev V. Electromagnetic Background Generated by Mobile (Cellular) Communications. Proc. of the Asia Pacific Int. Symp. on EMC “APEMC-2021”. Bali-Indonesia, 2021. P. 37–40.
43. Мордачев В.И. Оценка вклада излучений пользовательского оборудования в антропогенный электромагнитный фон, создаваемый системами мобильной (сотовой) связи. Докл. БГУ-ИР, 2023;21(5):50–58 [Mordachev V.I. Assessment of the Contribution of Radiations of User Equipment to the Anthropogenic Electromagnetic Background Created by Mobile (Cellular) Communications. *Doklady BGUIR*. 2023;21(5):50–58 (In Russ.)] <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-50-58>.
44. Мордачев В.И., Ционенко Д.А. Влияние пространственной избирательности излучения базовых станций мобильной связи на уровень создаваемого ими электромагнитного фона. Докл. БГУИР. 2022;20(7):56–64 [Mordachev V.I., Tsyonenko D.A. Influence of spatial selectivity of radiation of base stations on the level of electromagnetic background created by mobile communications. *Doklady BGUIR*. 2022;20(7):56–64 (In Russ.)] <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-7-56-64>.
45. Review of the harmonised technical conditions applicable to the 3.4–3.8 GHz (‘3.6 GHz’) frequency band. CEPT Report 67, 2018. P.17.
46. Hillert L., Ahlbom A., Neasham D. et al. Call-related factors influencing output power from mobile phones. *J. Expo Sci. Environ. Epidemiol*. 2006;16:507–514.
47. Kelsh M.A., Shum M., Sheppard A.R. et al. Measured radiofrequency exposure during various mobile-phone use scenarios. *J. Expo Sci. Environ. Epidemiol*. 2011;21:343–354.
48. Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz. Rec. ITU-R P.1411-11.
49. Shannon C.E. Communication in the presence of noise. *Proc. IRE*. 1949;1(37):10–21.
50. Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 450 GHz. Rec. ITU-R P.1238-10.
51. Prediction of building entry loss. Rec. ITU-R P.2109-1.

52. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Высочин В.П. Сети мобильной связи LTE/LTE Advanced: технологии 4G, приложения и архитектура. М.: Медиа Паблишер, 2014. 384 с. [Tikhvinskiy V., Terentiev S., Visochin V. LTE/LTE Advanced Mobile Networks: 4G technologies, applications architecture. Moscow: Media Publisher, 2014. 384 p. (In Russ.)].
53. Ericsson Mobility Reports. 2011-2022. <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports>. Accessed July 09, 2024.
54. Оценка риска для здоровья населения от воздействия электромагнитных полей, создаваемых базовыми станциями сотовой подвижной электросвязи и широкополосного беспроводного доступа. Инструкция по применению. Утв. Министерством здравоохранения Респ. Беларусь 28.10.2010, Рег. № 093-0610 [Estimation of risk for population health from electromagnetic fields created by base stations of cellular mobile communications and broadband wireless access. Application instructions. Belarus Ministry of Health, No.093-0610, 2010 (In Russ.)].
55. Svistunov A. Estimation of Electromagnetic Background Created by Equipment of Cellular Radio Networks in Urban Areas with High Spatial Density of Subscribers. Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2018". Amsterdam, The Netherlands, 2018. P. 184–189.
56. Девятков, Н.Д., Голант М.Б., Бецкий О.В. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности. М.: Радио и связь, 1991, 168 с. [Devyatkov N.D., Golant M.B., Betsky O.V. Millimeter waves and their role in life processes. Moscow: Radio & Sviaz., 1991. 168 p. (In Russ.)].
57. Кураев А.А. Особенности распространения электромагнитных волн КВЧ в живых биологических объектах. *Вестни Нац. Акад. Наук Беларусі, сер. физ.-техн. наук.* 2004;4:71–74 [Kuraev A.A. The peculiarities of EHF electromagnetic waves propagation in alive biological objects. *News of the National Academy of Sciences of Belarus, series of physical and technical sciences.* 2004;4:71–74 (In Russ.)].
58. Григорьев О.А., Зубарев Ю.Б. Управление электромагнитной обстановкой: баланс между здоровьем и технологиями. *Вестник связи.* 2020;12:20–27 [Grigoriev O.A., Zubarev Yu.B. Electromagnetic Environment Management: Balance between Public Health and New Communication Technology. *Vestnik Sviasy.* 2020;12:20–27 (In Russ.)].
59. Лукьянова С.Н. Электромагнитное поле СВЧ диапазона нетепловой интенсивности как раздражитель для центральной нервной системы. М.: ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2015. 200 с. [Lukyanova S.N. The microwave range electromagnetic field of non-thermal intensity as a stimulus to the central nervous system. Moscow: FMBC Burnazyan FMBA Russia, 2015. 200 p. (In Russ.)].
60. Предельно допустимые уровни (ПДУ) плотности потока энергии (ППЭ), создаваемой радиолокационными станциями в прерывистом режиме воздействия на население. Гигиенические нормативы 2.1.8. 11-34-2005, Утв. Постановлением Гл. гос. сан. врача Респ. Беларусь № 197 28.11.2005 [Maximum permissible levels (MPL) of energy flux density (EFD) created by radar stations in intermittent mode of exposure to the population. Hygienic standards 2.1.8.11-34-2005. Minsk: Belarus, 2005. (In Russ.)].
61. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и(или) безвредности для человека факторов среды обитания. СанПиН 1.2.3685-21, Рос. Федерация, 2021. 469 с. [Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and/or harmlessness of environmental factors for population. SanPiN 1.2.3685-21. Moscow, Russia, 2021. 469 p. (In Russ.)].
62. Жаворонков Л.П., Петин В.Г. Количественные критерии микроволнового поражения. М.: ГЕОС, 2018, 232 с. [Zhavoronkov L.P., Petin V.G. Quantitative criteria of microwave damage. Moscow: GEOS Publ. 2018, 232 p. (In Russ.)].
63. Григорьев О.А., Зубарев Ю.Б. Действие электромагнитной энергии беспроводной связи на человека: прогнозы роста обусловленной заболеваемости, их реализация и проблемы оценки. *КОНЦЕПЦИИ.* 2022;1 (41): 3–17 [Grigoriev O.A., Zubarev Yu.B. The effects of wireless communication electromagnetic energy influence on persons: predictions of the growth for conditioned morbidity, their implementation and problems of evaluation. *CONCEPCII.* 2022;1(41):3–17 (In Russ.)].
64. Maes B. Standard of building biology testing methods. Inst. Building Biol. + Sustainability IBN, Rosenheim, Germany, Tech. Rep. SBM-2008, 2008.
65. Guideline of the Austrian Medical Association for the Diagnosis and Treatment of EMF-Related Health Problems and Illnesses (EMF Syndrome), Standard, 2012. P. 1–17. [Online]. Available: <https://www.magdahavas.com/wp-content/uploads/2012/06/Austrian-EMF-Guidelines-2012.pdf>.
66. Mordachev V. System analysis of electromagnetic environment created by radiating 4G/5G user equipment inside buildings. Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2022". Gothenburg, Sweden, 2022. P.525–530.
67. Mordachev V. Influence of the Radiating UE Distribution Irregularity in Building Internal Space on the Level of Indoor Electromagnetic Background. Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2023". Krakow, Poland. 2023. 6 p.
68. Мордачев В.И., Свистунов А.С., Синькевич Е.В. Электромагнитная безопасность систем мобильной связи 4G/5G. *Докл. БГУИР.* 2024;2(22):80–91 [Mordachev V., Svistunov A., Sinkevich E. Electromagnetic Safety of 4G/5G Mobile Communications. *Doklady BGUIR.* 2024;2(22):80–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-80-91>.

Radio-Frequency Electromagnetic Background Created by Mobile (Cellular) Communications

V. I. Mordachev*

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics Minsk, Belarus

**E-mail: mordachev@bsuir.by*

The technique of integral assessment of the radio frequency electromagnetic background (EMB) intensity created by wireless information services is presented, based on the forecast of the average electromagnetic loading on area created by radiations of spatially distributed base stations and mobile terminal devices. This loading can be determined both on the basis of a direct estimate of the average total irradiation power of the Earth's surface by base stations or the average total radiation power of terminal devices per unit of its area, and on the basis of an estimate of the average area traffic capacity and known parameters of equipment and topology of mobile communication networks. Expressions to estimate the conditional average levels of EMB generated by stationary and mobile components of mobile communication systems, and the results of calculations illustrating the processes of its generation by these systems in different frequency ranges with different average area traffic capacity and different sizes of service areas of base stations are given. These calculations confirm the real danger of an unacceptable decrease in the level of electromagnetic safety of the population and deterioration of the ecology of the habitat without the implementation of scientifically based restrictions on the characteristics of mobile communication systems and services.

Keywords: mobile communications, 4G, 5G, 6G, electromagnetic background, electromagnetic safety, electromagnetic ecology, electromagnetic loading on area, area traffic capacity

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОГО И РАДИОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНОВ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОЙ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ ВЫСОКОЙ ЭТАЖНОСТИ

© 2024 г. В. И. Стурман¹*, А. Д. Пищугина¹, В. А. Черкасов²

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: st@izh.com

Поступила в редакцию 07.08.2023 г.

После доработки 26.12.2023 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

Выполнено инструментальное исследование электромагнитных полей промышленной частоты и радиочастотного диапазона в г. Мурино Ленинградской области. Выявлены устойчивые превышения допустимого уровня напряженности на границы санитарного разрыва высоковольтной линии 330 кВ. Не обнаружено превышений допустимых уровней магнитной индукции и в радиочастотном диапазоне — плотности потока энергии. Установлено, что разница значений напряженности электрического поля в 1.8 м от поверхности и на высоте 72 м достигает 1–2 порядков, что может быть объяснено только заземляющей ролью поверхности земли. Выявлены значительные расхождения расчетных и измеренных значений напряженности и магнитной индукции, что означает недостаточно корректный учет при расчетах электрофизических свойств воздуха. Созданы детальные карты плотности потока энергии, показывающие сложную, но устойчивую картину распределения значений. Выявлены некоторые элементы территориальной структуры электромагнитных полей радиочастотного диапазона: фрагменты колец вокруг базовых станций сотовой связи, и ореолы, приуроченные к отдельным домам.

Ключевые слова: электромагнитные поля, промышленная частота, радиочастотный диапазон, напряженность электрического поля, магнитная индукция, плотность потока энергии, инструментальное исследование, мониторинг, картографирование, Мурино

DOI: 10.31857/S0869803124030086, EDN: MBVBPIN

Геоэкологические аспекты проблемы электромагнитных полей (ЭМП), т.е. особенности пространственной изменчивости и временной динамики фактических уровней их проявления, зависимости их от техногенных и природных факторов, привлекают меньше внимания, чем аспекты медико-биологические и физико-технические. Однако на стадии принятия решений об установлении нормативов и вытекающих из них ограничений именно масштабы проявления проблем и, соответственно, стоимость тех или иных вариантов их решения становится, как минимум, одним из важнейших факторов.

Расчетные методы, преобладающие в области нормирования и мониторинга электромагнитных полей, основываются на предельно упрощенном учете электрофизических свойств

воздуха, подстилающей поверхности и окружающей объектов урбанизированной среды. По мере научно-технического прогресса изменяются как свойства источников ЭМП, так и характеристики среды их распространения. Поэтому измеренные значения могут существенным образом отличаться от расчетных, и систематическое выполнение измерений (картографирование и мониторинг ЭМП) необходимо в т.ч. для совершенствования расчетных методов и контроля их результатов. Число геоэкологических исследований ЭМП в последние годы постепенно растет, и в отношении ЭМП промышленной частоты (ПЧ) измеряется десятками, что позволяет обобщать и систематизировать методы и результаты картографирования [1], тогда как для высокочастотных ЭМП речь пока идет о первых опытах [2, 3, 4].

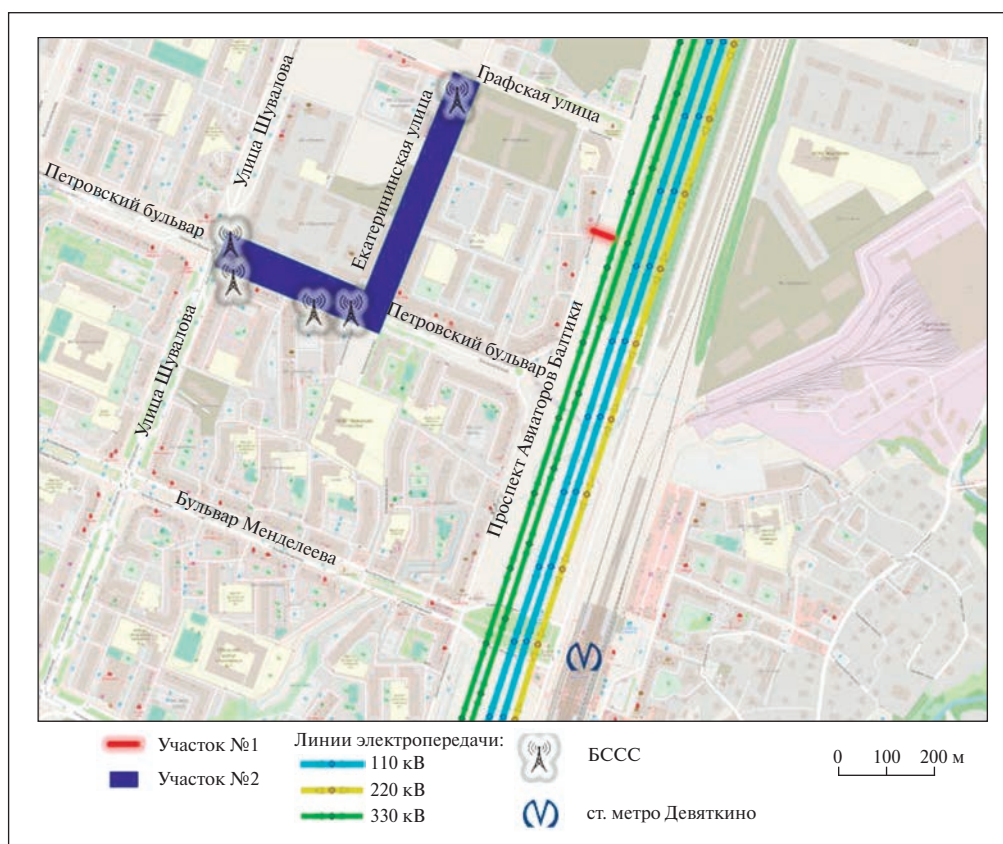


Рис. 1. Расположение участков мониторинга и картографирования ЭМП в г. Мурино.

Fig. 1. Location of sites of monitoring and mapping of electromagnetic fields in Murino.

Статья содержит результаты локального исследования, выполненного в г. Мурино Ленинградской области — пригороде Санкт-Петербурга, стремительно выросшем за последние годы, застроенном жилыми комплексами высокой этажности (преимущественно 24–25 этажей), пересекаемого созданной ранее системой из 5 высоковольтных линий (ВЛ), и населенного более чем 100 тысячами жителей — преимущественно молодых, экономически активных пользователей мобильных телефонов и других радиотехнических устройств. Сочетание указанных обстоятельств формирует в городе специфическую электромагнитную обстановку, ставшую объектом данного исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Для мониторинга электромагнитного фона в г. Мурино было выбрано два участка, соответственно для исследования ЭМП ПЧ и ЭМП радиочастотного диапазона (РЧ). Расположение участков показано на рис. 1.

Первый участок расположен между ВЛ-330 кВ “Восточная-Выборгская I цепь” и домом по адресу: проспект Авиаторов Балтики 17, включая квартиру на 24-м этаже (высота 72 м) с окнами, выходящими в сторону данной ВЛ-330 кВ. Параллельно последней проходят еще одна ВЛ-330 кВ, две ВЛ-110 кВ и одна ВЛ-220 кВ (рис. 1). На этом участке измерения проводились на высоте 1.8 м вдоль поперечника, длина которого составляет около 40 м, в девяти точках с расстоянием между ними по 5 м. Также выполнялись замеры в квартире на 24-м этаже, где было выбрано две точки: непосредственно около окна и на расстоянии 2.0 м от оконного проема. Измерения проводились на высоте 1.8 м от поверхности пола, с открытыми и закрытыми окнами, выходящими на ВЛ-330 кВ. В каждой точке измерения проводились 3 раза, после чего записывалось среднее арифметическое значение. Мониторинг ЭМП ПЧ за пределами квартиры проводили с сентября 2022 г. по май 2023 г., всего было выполнено по 792 измерения напряженности электрического поля и магнитной индукции.

Мониторинг электромагнитного фона в квартире проводился с октября 2022 г. по май 2023 г., всего было выполнено по 64 измерения напряженности электрического поля и магнитной индукции.

Для измерения эффективных значений индукции магнитного поля и напряженности электрического поля промышленной частоты использовали индикатор электромагнитных полей ВЕ-50И (ООО “НТМ-Защита”, Россия). Верхний предел измеряемых эффективных значений индукции магнитного поля составляет 5000 мкТл, напряженности электрического поля – 50 кВ/м.

При обработке результатов измерений ЭМП ПЧ все данные были занесены в программу Microsoft Excel, после чего с помощью встроенных инструментов проведен статистический анализ, подсчитаны средние значения, построены графики и определены особенности изменений показателей. Кроме этого, была проведена статистическая оценка тесноты связи показателей ЭМП с метеорологическими характеристиками методом ранговой корреляции Спирмена [5]. Метеорологические характеристики были взяты из источника [7]. Полученные результаты оценивались на достоверность по табличному критическому значению коэффициента корреляции при уровне значимости $p = 0.01$, это означает, что вероятность получения результата случайно, не в связи с исследуемым фактором, составляет менее 1%. Далее, для прошедших проверку значений, была проведена оценка силы связи по шкале Чеддока [5].

Второй участок включает расположенные западнее смежные отрезки улиц Петровский бульвар и Екатерининская, протяженностью 365 и 470 м, шириной 70 и 55 м соответственно (рис. 1). В пределах участка и в непосредственной близости от него располагаются пять базовых станций сотовой связи (БССС), установленных на крышах зданий и мачтах. На этом участке замеры проводились согласно методике [6] в апреле–мае 2023 г. на частотах 2000 МГц (стандарт 3G IMT-2000) и 1800 МГц (стандарт 4G LTE1800), на высоте 1.8 м от поверхности земли, в 183 точках с интервалом 10 м при удалении до 100 м от излучающей антенны и с интервалом 20 м при удалении от 100 до 300 м от излучающей антенны. Всего было выполнено 1098 измерений.

Для измерения показателей ЭМП РЧ использовался измеритель уровня электромагнитного излучения МЕГЕОН 07300 (ООО “МЕГЕОН”,

Россия), предназначенный для изотропных измерений и измерения по осям X, Y, Z уровня электромагнитного излучения в диапазоне от 50 МГц до 3.5 ГГц. Пределы измерения напряженности электрического поля 108 В/м, напряженности магнитного поля – 286.4 мА/м, плотности потока энергии – 30.93 Вт/м².

Обработка результатов измерений ЭМП РЧ проводилась в программе QGIS 3.16.11. Была выбрана географическая система координат WGS 84, в качестве базовой карты использовалась Open StreetMap (OSM) к которой в дальнейшем привязывали фрагмент карты из портала Яндекс.Карты в проекции системы координат EPSG:3857 – WGS 84/Pseudo-Mercator. Каждой точке были присвоены координаты, импортированы значения показателей ЭМП, нанесены границы исследуемых участков и отображены БССС. Далее с помощью внутренних инструментов программы была выполнена интерполяция методом TIN (Triangular Irregular Network), визуализация значений, благодаря чему появилась возможность провести оценку и изучить особенности формирования ЭМП в городской среде.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты мониторинга ЭМП ПЧ показывают простую картину убывания значений напряженности и магнитной индукции по мере удаления от проводов (рис. 2). При этом значения магнитной индукции убывают более плавно. Среднее значение напряженности на границе зоны санитарного разрыва (20 м) составило 1229.6 В/м, что превышает установленный ПДУ; в зоне инженерной и транспортной инфраструктуры значения существенно выше, до 22.5 тыс. В/м под проводами. На границе жилой территории средние значения ЭМП составляют 431.5 В/м и 0.506 мкТл, что находится в пределах допустимого.

Изменчивость среднемесячных значений напряженности электрического поля и магнитной индукции представлена на рис. 3. Как видно из него, значения напряженности в течение периода наблюдений довольно устойчиво превышали допустимый уровень.

Измерения в квартире на 24-м этаже показали, что наибольшие значения напряженности электрического поля и магнитной индукции формируются на расстоянии 0.5 м от открытого окна и составляют 325.5 В/м и 453 нТл соответственно, что не превышает допустимых уровней.

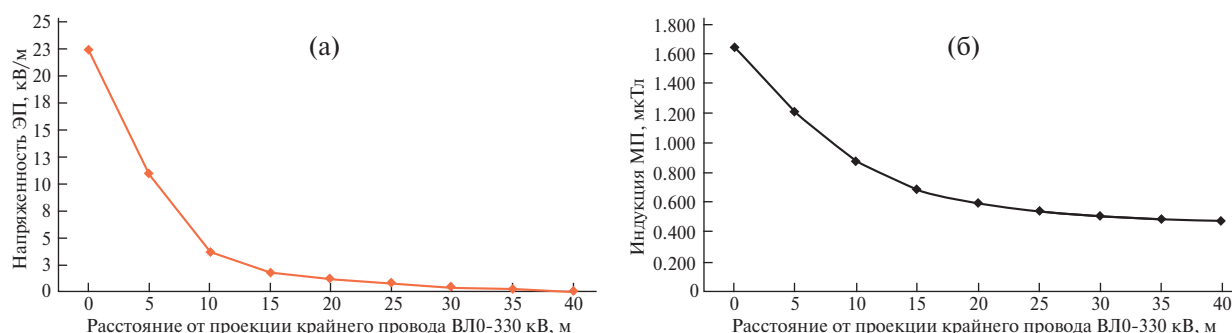


Рис. 2. Изменения средних значений напряженности электрического поля (а) и магнитной индукции (б) по мере удаления от проводов ВЛ-330 кВ в г. Мурино.

Fig. 2. Changes of average values of electric field strength (a) and magnetic induction (b) in process of removal from wires of high-voltage line 330 kV in Murino.

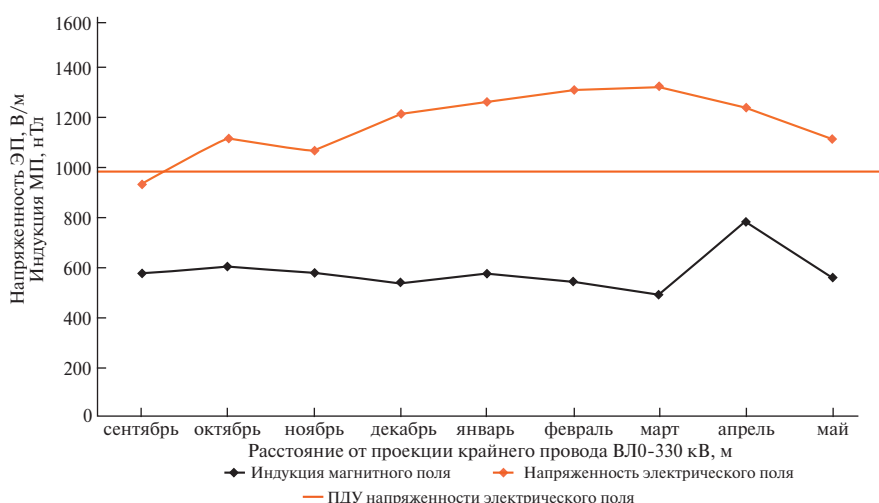


Рис. 3. Динамика среднемесячных значений напряженности электрического поля и магнитной индукции на границе санитарного разрыва в 2022–2023 гг.

Fig. 3. Dynamics of average monthly values of electric field strength and magnetic induction on border of a sanitary zone in 2022–2023.

Значения напряженности электрического поля уменьшаются с увеличением расстояния от окна. Также закрытое окно снижает значения напряженности электрического поля около окна в 1.8 раза. Магнитная индукция в помещении практически не меняется, и это означает, что электромагнитное поле в квартире формируется не от ВЛ-330 кВ, а за счет домовых коммуникаций и бытовой техники (рис. 4).

С учетом характера застройки и расположения жилых домов, в данных условиях экспозиции (в сторону ВЛ) проживают примерно от 100 человек (если принимать во внимание только 24-е этажи) до 3000 человек, если считать, начиная с 1-го этажа. Наиболее реалистичное

количество – 1700 проживающих на 10-м и более высоких этажах. При этом доля детей до 6 лет составляет 10%, а до 17 лет – 22% населения г. Мурино [8] (данные неофициальные).

Важно отметить, что по результатам мониторинга показателей ЭМП ПЧ за окном на 24-м этаже ближайшей линии застройки оказалось, что значения на высоте ~72 м, в зависимости от месяца, были в 18–68 раз больше, чем у дома на 1.8 м от поверхности земли (рис. 5). В апреле 2023 г. среднемесячное значение напряженности превышало предельно допустимый уровень. В отношении магнитной индукции разница между значениями на 1.8 м от поверхности земли и на 24-м этаже незначительная.

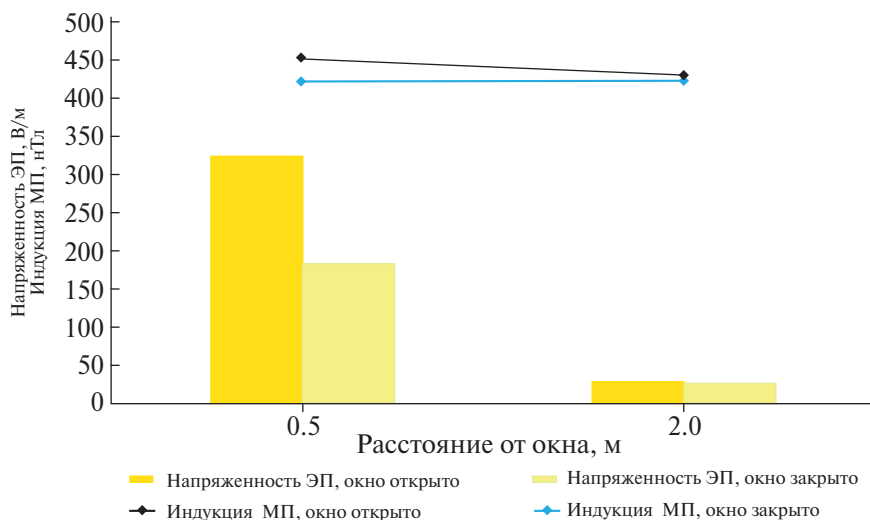


Рис. 4. Средние значения показателей ЭМП ПЧ в квартире ближайшей застройки от ВЛ-330 кВ.

Fig. 4. Average values of indicators of electromagnetic fields of industrial frequency in the apartment of the next building from high-voltage line 330 kV.

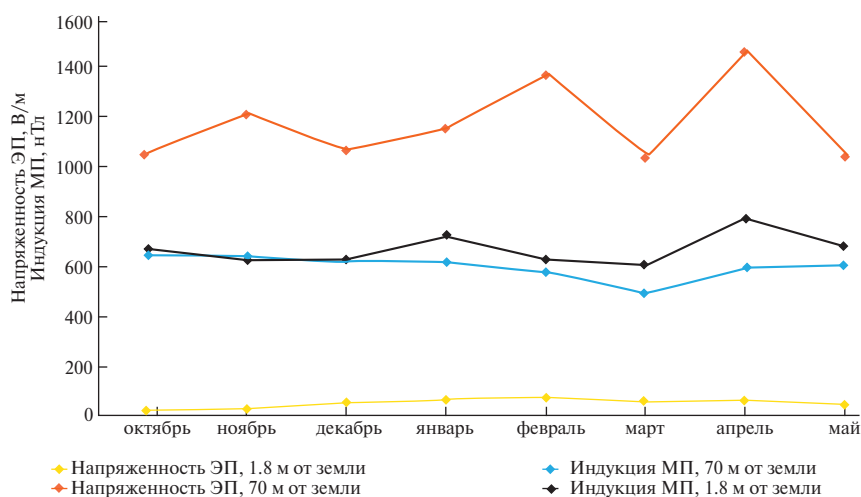


Рис. 5. Среднемесячные значения ЭМП на высоте 1.8 и 72 м (24-й этаж) от земли.

Fig. 5. Electromagnetic fields average monthly values at the height of 1.8 and 72 meters (the 24-th floor) from the earth.

Для оценки влияния метеорологических характеристик на формирование электромагнитного фона ПЧ были посчитаны коэффициенты корреляции методом Спирмена. После выполнения расчетов была проведена проверка коэффициентов на достоверность при уровне значимости $p = 0.01$, путем сравнения с критическим табличным значением ($r_t = 0.28$, при $n = 88$). Результаты представлены в табл. 1 и 2.

То есть связи слабые и средней силы являются для температуры и давления. Для

напряженности электрического поля связи обратные, для магнитной индукции — прямые.

Результаты мониторинга ЭМП РЧ представлены в виде карт значений плотности потока энергии (рис. 6, 7). Как следует из них, превышений ПДУ ЭМП РЧ обнаружено не было. Максимальное зафиксированное разовое значение составляло 9.650 мкВт/см^2 (10 мая — на частоте 2000 МГц).

Из сравнения рис. 6 и 7 видно, что, хотя значения плотности потока энергии в зависимости от частоты формируются по-разному, сохраняется приуроченность максимальных значений к одним

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между напряженностью электрического поля и климатическими параметрами для полных выборок за 2022–2023 гг.**Table 1.** Correlation coefficients between electric field strength and climatic parameters for complete samples for 2022–2023.

Климатические параметры	Значение коэффициента корреляции напряженности электрического поля								
	Расстояние от проекции крайнего провода ВЛ-330 кВ, м								
	0	5	10	15	20	25	30	35	40
$T, ^\circ\text{C}$	–0.253	–0.151	–0.092	–0.225	0.023	–0.285	–0.422	0.201	–0.265
$U, \%$	–0.062	–0.007	0.010	0.135	–0.035	–0.063	0.175	–0.326	–0.177
$P, \text{мм рт. ст.}$	–0.236	–0.088	–0.044	–0.420	–0.486	–0.183	–0.296	–0.123	–0.170

Примечание: жирным шрифтом выделены достоверные значения при 1%-ном уровне значимости.

Обозначения: T – температура, U – относительная влажность, P_1 – давление атмосферного воздуха на уровне метеостанции, P_2 – давление, приведенное к уровню моря.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между индукцией магнитного поля и климатическими параметрами для полных выборок за 2022–2023 гг.**Table 2.** Correlation coefficients between induction of magnetic field and climatic parameters for complete samples for 2022–2023

Климатические параметры	Значение коэффициента корреляции индукции магнитного поля								
	Расстояние от проекции крайнего провода ВЛ-330кВ, м								
	0	5	10	15	20	25	30	35	40
$T, ^\circ\text{C}$	0.256	0.151	0.089	0.122	0.095	0.102	0.025	0.180	–0.132
$U, \%$	–0.277	–0.232	–0.21	–0.260	–0.189	–0.060	–0.124	–0.208	–0.181
$P, \text{мм рт. ст.}$	0.378	0.346	0.453	0.432	0.462	0.408	0.509	0.361	0.307

Примечание. Жирным шрифтом выделены достоверные значения при 1%-ном уровне значимости.

и тем же областям. Наибольшие значения приурочены к одной и той же БССС, на участке, куда были направлены антенны БССС, установленные на крыше. Значения плотности потока энергии на частоте 2000 МГц больше, чем на частоте 1800 МГц; разница составляет примерно 12%. Поскольку выбранный участок мониторинга представляет собой типичную часть г. Мурино, приведенные на рис. 6 и 7 изменчивые, но не превышающие величину ПДУ ЭМП РЧ значения можно экстраполировать на все население этого города, составлявшее на начало 2023 г. 104 611 человек (данные официальные) [9], включая в том числе по неофициальным данным [8] 22% несовершеннолетних до 17 лет (включая 10% детей до 6 лет).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наиболее неожиданным результатом исследования следует признать большую (от 18 до 68 раз) разницу между значениями напряженности электрического поля у поверхности земли (1.8 м) и на уровне 24-го этажа (примерно 72 м), на

одинаковом расстоянии от ВЛ, при отсутствии существенной разницы между величинами магнитной индукции. Временная разница между проведением измерений на 24-м этаже и на земле была не более 10 мин, кроме этого, такая большая разница значений была зафиксирована каждый раз, поэтому, изменяющаяся токовая нагрузка и параметры атмосферного воздуха вряд ли могли стать причиной в таком отличии значений. Скорее всего, разница значений объясняется характером подстилающей поверхности, так как на высоте 72 м ее как таковой нет, все пространство занимает воздух с текущими однородными электрофизическими свойствами. А на высоте 1.8 м земля выступает структурой с отличными от воздуха диэлектрическими характеристиками, благодаря которым она может “заземлять” электрические поля и снижать напряженность, как следует из полученных данных на 1–2 порядка на 70 м вертикали.

Основным методом изучения распределения характеристик ЭМП по высоте является расчетный

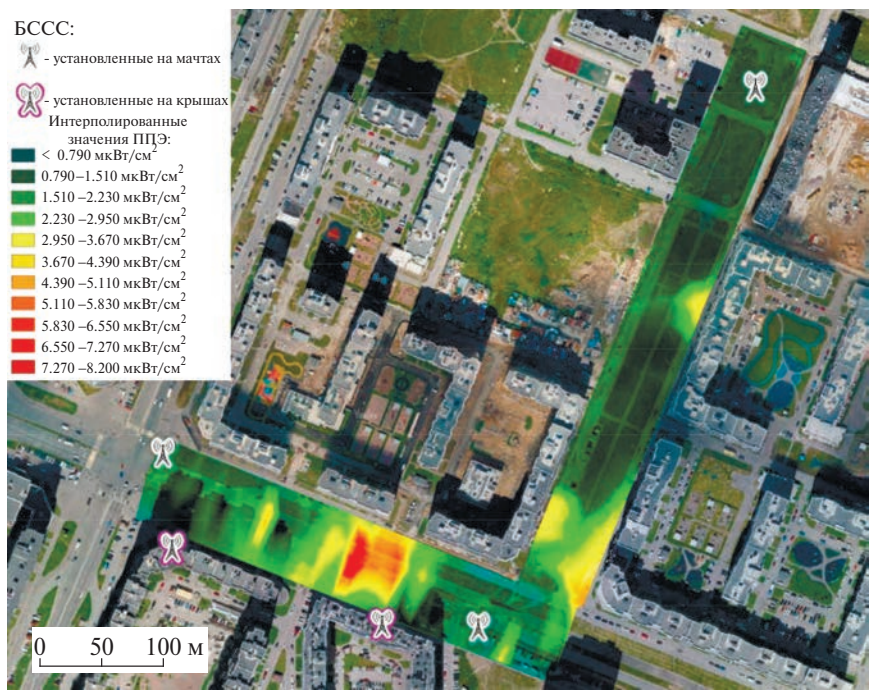


Рис. 6. Интерполированные усредненные значения плотности потока энергии на частоте 2000 МГц за весь период измерений.

Fig. 6. The interpolated average values of density of a stream of energy at a frequency of 2000 MHZ for the entire period of measurements.

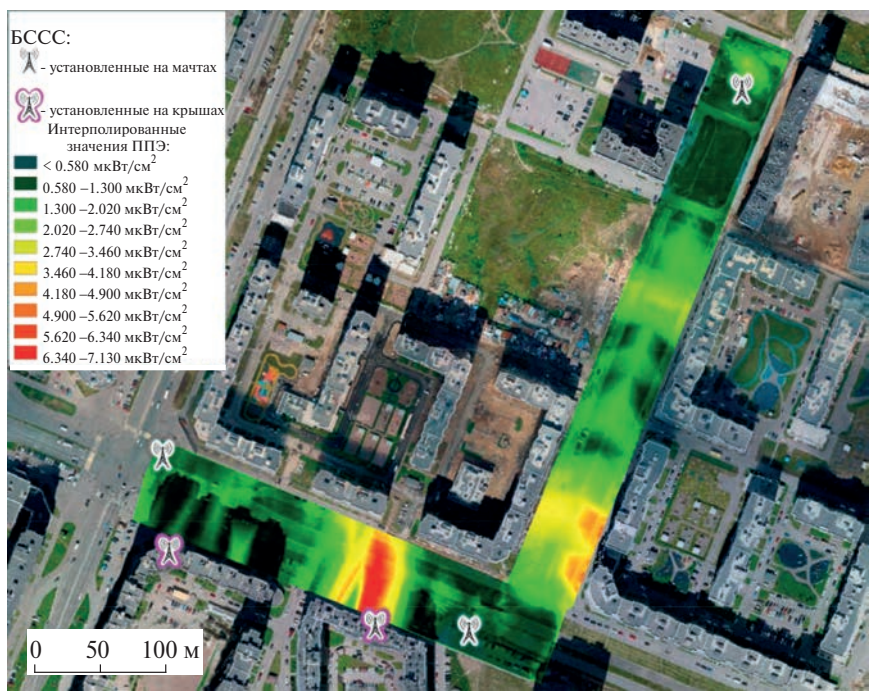


Рис. 7. Интерполированные усредненные значения плотности потока энергии на частоте 1800 МГц за весь период измерений.

Fig. 7. The interpolated average values of density of a stream of energy at a frequency of 1800 MHZ for the entire period of measurements.

[10], с учетом таких параметров как расстояние от источника, фазовое напряжение, токовая нагрузка, технические характеристики провода, электрофизические коэффициенты атмосферного воздуха и подстилающей поверхности.

Для описания электрического поля системы проводов ВЛ использовалась модель, основанная на принципе суперпозиции. Влияние подстилающей поверхности учтено введением зеркального изображения проводников, при этом делается предположение о металлическом характере электропроводности почвы. Расчет напряженности электрического поля был выполнен по формулам [10]:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^N (\vec{E}_i + \vec{E}_i'), \quad (1)$$

где $N = 3$ – число проводов, соответствующее типу опоры ЛЭП (опора типовая промежуточная ПЗ30-2Т); E_i – первичное поле i -го провода над поверхностью Земли; E_i' – вторичное поле i -го провода над поверхностью Земли.

Первичное поле i -го провода над поверхностью Земли определяется выражением:

$$E_i = \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0 R_i} = \frac{C_i \cdot U_\Phi \cdot e^{j(i-1)\Delta}}{2\pi\epsilon_0 R_i}, \quad (2)$$

где C_i – погонная емкость системы провод–Земля; $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная (учтено, что поле определяется в воздухе); $U_\Phi = 330$ кВ – класс напряжения ВЛ; $\Delta = 120^\circ$ – фазовый сдвиг, j – мнимая единица; $R_i = \sqrt{(x - d_i)^2 + (h_i - z_0)^2}$ – расстояние от фазного провода до расчетной точки.

Погонная емкость провода ЛЭП относительно Земли определяется следующим образом:

$$C_i = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2h_i}{\alpha}}. \quad (3)$$

Выражение (2) с учетом (3) принимает вид:

$$E_i = \frac{U_\Phi \cdot e^{j(i-1)\Delta}}{2 \ln \frac{2h_i}{\alpha} \sqrt{(x - d_i)^2 + (h_i - z_0)^2}}, \quad (4)$$

где $z_0 = 1.8$ м – высота точки наблюдения; $h_i = 24.5$ м; 31 м; 38.5 м расстояние от земли до

фазного провода; $\alpha = 26.8$ мм диаметр поперечного сечения провода; $(x - d_i)$ – расстояние от расчетной точки до проекции фазного провода;

Аналогичным образом находится вторичное поле провода над поверхностью Земли:

$$E_i' = \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0 R_i'}, \quad (5)$$

где $R_i' = \sqrt{(x - d_i)^2 + (h_i + z_0)^2}$ – расстояние от фазного провода до расчетной точки.

С учетом (3) можно переписать (5) в виде:

$$E_i' = \frac{U_\Phi \cdot e^{j(i-1)\Delta}}{2 \ln \frac{2h_i}{\alpha} \sqrt{(x - d_i)^2 + (h_i + z_0)^2}}. \quad (6)$$

Модуль вектора, стоящего под знаком суммы в (1), находится по формуле:

$$|\vec{E}_i + \vec{E}_i'| = \frac{U_\Phi \cdot e^{j(i-1)\Delta}}{2 \ln \frac{2h_i}{\alpha}} \sqrt{\frac{1}{R_i^2} + \frac{1}{(R_i')^2} + \frac{2}{R_i(R_i')} \cos \Psi}. \quad (7)$$

То есть учет электрофизических свойств воздуха сводится к одной величине – электрической постоянной $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ Ф/м.

По результатам расчетов (табл. 3) напряженности электрического поля расчетное значение на высоте 1.8 м на границе селитебной зоны составляет 5457 В/м, что больше измеренного в 10 раз и в 5.5 раз превышает предельно допустимый уровень. На высоте 72 м расчетное значение составляет 3516 В/м, что больше усредненного эмпирического в 4 раза, и превышает ПДУ в 3.5 раза. В рассматриваемом случае все параметры, кроме реальных электрофизических свойств воздуха и подстилающей поверхности идентичны, и только их некорректность может объяснить столь большое и устойчивое отличие измеренных значений от расчетных.

То обстоятельство, что по мере удаления от проводов разница между расчетными и эмпирическими значениями меняет знак и стремительно нарастает, и реальное снижение напряженности на расстоянии 40 м составляет более 700 раз, тогда как расчетное – всего 1.55, трудно объяснить чем-либо иным, кроме как значительно большей заземляющей ролью приземного воздуха и поверхности земли, нежели это предусмотрено в расчетной методике.

Таблица 3. Расчетные и эмпирические значения напряженности электрического поля на высотах 1.8 м и 72 м
Table 3. Calculated and empirical values of electric field strength at the heights of 1.8 m and 72 m

На высоте 1.8 м, В/м:									
X, м	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Расчетные	7161	7747	7895	7287	6579	5973	5457	5010	4619
Эмпирические (усредненные)	22519	10974	3652	1782	1230	825	431	128	36
На высоте 72 м, В/м:									
Расчетные	5113	5139	5033	4827	4567	4287	4013	3754	3516
Эмпирические (усредненные)	-	-	-	-	-	-	-	-	847

Реальные электрофизические характеристики воздуха изменяются с погодными условиями. Следствием этого являются зависимости показателей ЭМП от метеорологических характеристик и, в частности, отмеченные выше слабые и средней силы достоверные зависимости от температуры и давления. Для напряженности электрического поля связи обратные, для магнитной индукции — прямые. Поскольку электрическое поле ВЛ практически не зависит от нагрузки и полностью определяется напряжением, а магнитное существенно зависит от нагрузки [10], обратная зависимость напряженности от температуры может быть интерпретирована как следствие повышенного потребления электричества для обогрева помещений и уличного освещения при более низких температурах. Сложнее обстоит дело с интерпретацией зависимостей от атмосферного давления. Влияние давления может быть как косвенным, так и прямым. Косвенное влияние связано с тем, что высокому давлению (антициклональные условия) соответствует пониженная влажность (и более сильное электрическое сопротивление воздуха), а также повышенные температуры летом и пониженные зимой. То и другое влечет за собой повышенное энергопотребление и рост нагрузки ВЛ в сочетании с падением напряжения. С другой стороны (прямое влияние), при повышении давления воздух сжимается, что приводит к уменьшению объема межмолекулярного пространства, увеличению концентрации газов и повышению электрической активности частиц, из-за чего проводимость увеличивается, что может быть причиной более низких значений напряженности при повышенном атмосферном давлении.

Оценивая территориальное распределение плотности потока энергии ЭМП РЧ (рис. 6, 7), следует отметить, что участки повышенных значений

располагаются в виде криволинейных полос, образующих фрагменты колец вокруг источников — БССС, в определенных интервалах расстояний от них (порядка десятков метров), что образует концентрический тип территориальной структуры загрязнения [11]. Более четко это выражено на частоте 1800 МГц (рис. 7). Определенный вклад могут давать и устройства в домах, формируя прилегающие непосредственно к ним ореолы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам инструментального исследования в жилой зоне г. Мурино Ленинградской области значения магнитной индукции ПЧ и плотности потока энергии РЧ не превышали допустимых уровней. Значения напряженности электрического поля на границе зоны санитарного разрыва ВЛ-330 кВ устойчиво превышали допустимый уровень. Установлено, что значения напряженности электрического поля ПЧ на уровне 24-го этажа (примерно 72 м) на 1–2 порядка превышают аналогичные величины на уровне 1.8 м от поверхности. Эта разница может быть объяснена только заземляющей ролью поверхности земли. Существующие расчетные методы не вполне учитывают электрофизические свойства реального воздуха и их изменчивость. Установлено, что по мере удаления от проводов разница между расчетными и эмпирическими значениями меняет знак и стремительно нарастает, и это трудно объяснить чем-либо иным, кроме как значительно большей заземляющей ролью приземного воздуха и поверхности земли, нежели это предусмотрено в расчетной методике.

Электрофизические свойства воздуха изменяются с погодными условиями, вследствие чего выявляются зависимости показателей ЭМП от метеорологических характеристик и,

в частности, слабые и средней силы достоверные зависимости от температуры и давления.

Закрытое окно снижает значения напряженности электрического поля в помещении почти в 1.8 раза.

Значения плотности потока энергии в зависимости от частоты (2000 МГц и 1800 МГц) формируются по-разному, хотя сохраняется приуроченность максимальных значений к одним и тем же участкам. В рамках территориальной структуры ЭМП РЧ могут быть выделены фрагменты колец, окружающих БССС на определенных расстояниях от них (десятки метров), и ореолы, непосредственно прилегающие к соответствующим домам (метры — первые десятки метров).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Стурман Владимир Ицхакович, доктор географических наук, профессор, профессор кафедры экологической безопасности телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. <https://orcid.org/0000-0003-2467-9997>. Вклад в статью: научное руководство исследованием, написание разделов: введение, результаты (за исключением графиков и карт), обсуждение результатов (за исключением расчетов), заключение. Итого 50%.

Пищугина Александра Дмитриевна, магистрант Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Вклад в статью: выполнение измерений, раздел материалы и методика, оформление графиков и карт. Итого 30%.

Черкасов Владимир Алексеевич, магистрант Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина). Вклад в статью: расчеты, представленные в разделе обсуждение результатов. Итого 20%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стурман В.И., Логиновская А.Н. Техногенные электромагнитные поля на городских территориях и подходы к их картографированию. *Изв. РАН. Серия географическая*. 2022;86(2):255–267. [Sturman V.I., Loginovskaya A.N. Technogenic electromagnetic fields on urban areas and approaches to their mapping. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2022;86(2):255–267. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2587556622020091>. — EDN HVQNYJ.
2. Потапов А.А. Мониторинг электромагнитной безопасности урбанизированных территорий с применением широкополосных частотно-нeselectивных измерений и систем геопространственного моделирования. IV Всерос. конф. “Радиолокация и радиосвязь” — ИРЭ РАН, 29 ноября—3 декабря 2010 г. М., 2010. С. 141–154. [Potapov A.A. Monitoring elektromagnitnoj bezopasnosti urbanizirovannyh territorij s primeneniem shirokopolosnyh chastotno-neselektivnyh izmerenij i sistem geopros-transtvennogo modelirovaniya. IV Vserossijskaya konferenciya “Radiolokaciya i radiosvyaz”. (Conference proceedings). Moscow, 2010. P. 141–154. (in Russ.)]
3. Chao Tang, Chuanjun Yang, Hong Ye et al. Analysis of the relationship between electromagnetic radiation characteristics and urban functions in highly populated urban areas. *Sci. Total Environ*. V. 654, 1 March 2019. P. 535–540. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.143>
4. Jesús M. Paniagua-Sánchez, Francisco J. García-Cobos, Montaña Rufo-Pérez, Antonio Jiménez-Barco. Large-area mobile measurement of outdoor exposure to radio frequencies. *Sci. Total Environ*. 877 (2023) 162852.
5. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Академия, 2004. 416 с. [Puzachenko Yu.G. Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyah. Moscow: Izdatel'stvo Akademii, 2004. 416 p. (in Russ.)]
6. МУК 4.3.1167-02 Определение плотности потока энергии электромагнитного поля в местах размещения радиосредств, работающих в диапазоне частот 300 МГц — 300 ГГц. Доступно по: <https://docs.cntd.ru/document/1200030406> Ссылка активна на 23.07.2023 г.
7. Архив погоды в Санкт-Петербурге. Доступно по: <https://rp5.ru>. Ссылка активна на 23.07.2023 г.
8. BDEX. Население Мурино. Доступно по: <https://bdex.ru/naselenie/leningradskaya-oblast/muri-no/> Ссылка активна на 16.08.2023 г.
9. Численность постоянного населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2023 г. Доступно по: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/chisl_MO_Site_01-01-2023.xlsx. Ссылка активна на 16.08.2023 г.
10. Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем: Монография. В.Н. Довбыш, М.Ю. Маслов, Ю.М. Сподобаев. Самара: ООО “ИПК “Содружество”, 2009. 198 с. [Electromagnetic Safety of power systems elements: Monograph. V.N. Dovbish, M.Yu. Maslov, Yu.M. Spodobaev. Samara: “IPK Sodrujestvo”; 2009. 198 p. (in Russ.)]
11. Стурман В.И. Экологическое картографирование: Учебное пособие. М.: Аспект Пресс, 2003. 251 с. [Sturman V.I. Ekologicheskoe kartografirovanie. Uchebnoe posobie. Moscow: Izdatel'stvo “Aspekt Press”; 2003. 251 p. (in Russ.)]

Features of Formation of Electromagnetic Fields of Industrial and Radio-Frequency Ranges in the Conditions of the Modern Residential Development of High Number of Storeys

V. I. Sturman^{1, *}, A. D. Pishchugina¹, V. A. Cherkasov²

¹*The Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications, Saint Peterburg, Russia*

²*St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Peterburg, Russia*

**E-mail: st@izh.com*

The tool research of electromagnetic fields of industrial frequency and radio-frequency range in by Murino of the Leningrad Region is executed. Steady excesses of admissible level of tension on borders of a sanitary rupture of the high-voltage line of 330 kV are revealed. Excesses of admissible levels of magnetic induction and in the radio-frequency range – energy stream density are not revealed. It is established that the difference of values of electric field strength in 1.8 m from a surface and at the height of 72 m reaches 1–2 orders that can be explained only with the grounding Earth's surface role. Considerable divergences of the settlement and measured values of tension and magnetic induction are revealed that means insufficiently correct account when calculating electrophysical properties of air. The detailed cards of density of a stream of energy showing a difficult, but steady picture of distribution of values are created. Some elements of territorial structure of electromagnetic fields of radio-frequency range – fragments of rings around base stations of cellular communication, and the auras dated for certain houses are revealed.

Keywords: electromagnetic fields, industrial frequency, radio-frequency range, electric field strength, magnetic induction, energy stream density, tool research, monitoring, mapping, Murino

РЕЦЕНЗИИ

САЗЫКИНА Т. Г., КРЫШЕВ А. И., КРЫШЕВ И. И.
АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДОЗИМЕТРИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ
ИЗЛУЧЕНИЙ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ.
М.: ООО “МАСКА”, 2024. 236 С.

В связи с развитием ядерных технологий в настоящее время все большую актуальность приобретает проблема обоснования защиты окружающей среды от радиационного воздействия. Определение дозы облучения объектов живой природы — один из ключевых параметров в оценке такого воздействия. Рецензируемая монография посвящена важной научной проблеме развития методов экологической дозиметрии.

Книга состоит из восьми глав и девяти приложений. В первых трех главах приведены характеристики различных типов ионизирующего излучения, биологически значимых радионуклидов, фонового облучения природной биоты. Проанализирован опыт применения традиционных методов дозиметрии, основанных на интегрировании точечных источников излучения. В последующих трех главах излагаются основы разработанных авторами аналитических методов оценки дозы внутреннего и внешнего облучения от распределенных источников излучения. В главе 7 рассмотрены электро-химические факторы воздействия ионизирующей радиации на природную биоту. В главе 8 представлены общие принципы анализа радиационной безопасности биоты на основе информации о дозах ее облучения.

Разработанный авторами унифицированный метод расчета поглощенных фракций и дозовых нагрузок от распределенных источников на организмы биоты (УМПФ-метод) включает процедуру масштабирования с трансформацией реального размера биообъекта в безразмерный параметр, объединяющий информацию о размере, материале объекта, энергии (пробеge) моноэнергетических частиц. На примере моноэнергетического электронного излучения, и гамма-излучения показан универсальный характер поглощения энергии ионизирующего излучения в выпуклых телах с эффектом формирования “универсальных кривых” в виде графиков зависимости величин поглощенных фракций от одного параметра — масштабированного размера объекта. Показана возможность теоретического обоснования

обнаруженного эффекта на основе теории средних хорд в выпуклых телах.

На основе аналитического описания кривых поглощения энергии для β -, γ -распределенных излучателей разработаны аналитические модели расчета поглощенных фракций и мощностей дозы в выпуклых телах. Существенное достоинство этих моделей — отсутствие параметров, определяемых методом подгонки, простые аналитические решения, позволяющие производить прямой расчет дозы от распределенных источников без применения компьютерной имитации процессов методом Монте-Карло.

Разработанные авторами модели позволяют аналитически рассчитывать дозы внутреннего и внешнего облучения биоты в разнообразных радиоэкологических ситуациях: при загрязнении воздуха, почвы, водоемов, самих организмов различными радионуклидами (β -, γ -, α -излучатели). Комплекс моделей предназначен для расчета дозовых нагрузок на организмы разнообразных выпуклых форм (сферы, цилиндры, эллипсоиды, конусы, слои и др.), состоящих из разных биологических материалов (мягкие биологические ткани, костные ткани, травянистая и древесная растительность и др.), в широком диапазоне масс организмов от 10^{-6} до 10^4 кг, обитающих в водных и наземных системах. Модели внешнего облучения биоты включают облучение от радионуклидов в воздухе, воде, почве. Представлены результаты сравнений унифицированной методологии с компьютерными расчетами с использованием метода Монте-Карло. В целом наблюдается хорошее соответствие в оценках дозы аналитическими методами и по методу Монте-Карло.

Книга содержит многочисленные справочные таблицы и дозиметрические параметры по расчету дозы на биологические объекты и может рассматриваться в качестве справочного пособия по методам экологической дозиметрии.

Авторы являются авторитетными специалистами в области оценки дозы на биоту. Результаты их исследований в этой области опубликованы

в ряде статей в рецензируемых отечественных и международных научных журналах (“Атомная энергия”, “Радиация и риск”, “Радиационная биология. Радиоэкология”, “Biomed. Phys. Eng. Express”, “Journal of Environmental Radioactivity”, “Health Physics”, “Radiation” and “Environment Biophysics, Radiation Protection Dosimetry”).

Книга может быть полезной для научных работников и специалистов в области дозиметрии, радиоэкологии, экологической безопасности ядерной энергетики, а также для широкого круга специалистов в области охраны

окружающей среды, студентам, аспирантам и преподавателям подразделений вузов природоохранного профиля.

Монография в цифровом виде с согласия авторов размещена на сайте кафедры радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по адресу <http://soil.msu.ru/kaf-radioecologia/ecoradmod>.

С. В. Мамихин