

Читать
онлайн
Read
online

Лукьянова С.Н., Степанов В.С., Торубаров Ф.С.

Изучение биоэффектов сложноорганизованных электромагнитных воздействий низкой интенсивности

ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна», 123182, Москва, Россия

Введение. Одной из современных задач гигиенической оценки среды обитания человека является накопление данных о биоэффектах электромагнитных полей (ЭМП), формируемых одновременным действием нескольких СВЧ-источников. Практически отсутствует литература о параллельном анализе феноменологии и механизмов соответствующих нейроэффектов в сравнительном изучении на животных и с участием человека.

Цель работы – сравнение биоэффектов и анализ возможных механизмов их формирования в результате действия ЭМП одной, двух и трёх несущих СВЧ частот, с эквивалентными энергетическими и модуляционными характеристиками в исследованиях на животных и с участием добровольцев.

Материалы и методы. Работа выполнена в экспериментах на 11 кроликах породы шиншилла массой тела 2,5–3 кг и клинико-физиологических исследованиях с участием 14 добровольцев-мужчин (возраст 40–50 лет). Облучению подвергали главным образом голову объекта. Серии различались количеством несущих частот (в пределах 0,9–1,4 ГГц), их конкретным значением и модуляцией в пределах различных диапазонов электроэнцефалограммы (ЭЭГ) при сохранении в суммарном импульсе плотности потока энергии (ППЭ), равной 300 мкВт/см². Анализовали комплекс показателей, относящихся к функциональной оценке различных систем организма: центральной нервной, сердечно-сосудистой, дыхательной, мышечной.

Результаты. Представлены результаты о зависимости эффекта ЭМП сложной организации от несущей частоты, их количества и характера модуляции. Установлено, что каждая из наблюдаемых реакций находилась в пределах физиологической нормы, но с увеличением количества несущих частот и при конкретном значении модуляции их качественные и количественные характеристики возрастали. Анализ их феноменологии (увеличение только альфа-диапазона ЭЭГ при одной несущей; увеличение дельта-диапазона с отражением реакции в других показателях – при двух несущих; увеличение процента реакции по комплексу показателей, особенно ЭМГ, при трёх несущих) свидетельствовал о различной степени синхронизации биоэлектрической активности головного мозга как нейрофизиологическом механизме формирования таких реакций.

Полученная информация ограничена конкретными параметрами ЭМП. Она дополняет имеющиеся сведения, подчёркивая необходимость дополнительных исследований при изучении каждой конкретной ситуации.

Ограничения исследования. Изучение феноменологии и механизма биоэффектов одновременно нескольких ЭМП низкой интенсивности является комплексной задачей, требующей анализа большего количества электромагнитных источников и разнообразия показателей реакции организма. Это явилось ограничением настоящего исследования и одновременно обозначило его перспективы и новые направления.

Заключение. В проведённом исследовании не было отмечено реакций, которые выходили бы за пределы физиологической нормы. Однако дальнейшее усиление процессов синхронизации в ЦНС (при соответствующем усугублении условий облучения), согласно анализу литературных данных, способно привести к подобным изменениям. Это обстоятельство диктует необходимость его учёта при соответствующей санитарно-гигиенической оценке.

Ключевые слова: ЭМП; количество СВЧ-несущих частот; модуляция в диапазоне ритмов ЭЭГ; исследования; кролики; добровольцы; комплекс физиологических показателей; реакция; синхронизация биоэлектрической активности головного мозга; нейрофизиологический механизм

Для цитирования: Лукьянова С.Н., Степанов В.С., Торубаров Ф.С. Изучение биоэффектов сложноорганизованных электромагнитных воздействий низкой интенсивности. *Гигиена и санитария*. 2022; 101(5): 515–521. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-5-515-521>

Для корреспонденции: Лукьянова Светлана Николаевна, доктор биол. наук, профессор ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна», 123182, Москва. E-mail: lukyanovasp@yandex.ru

Участие авторов: Лукьянова С.Н. – проведение экспериментов и исследований, обработка результатов, их обсуждение, написание статьи; Степанов В.С. – проведение исследований, обсуждение результатов.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело финансовой поддержки.

Поступила: 13.01.2022 / Принята к печати: 21.04.2022 / Опубликована: 31.05.2022

Svetlana N. Lukyanova, Vladimir S. Stepanov, Felix S. Torubarov

Studying the bioeffects of complexly organized electromagnetic impacts of low intensity

State Scientific Center of the Russian Federation – Federal Medical Biophysical Center named after A.I. Burnazyan, Moscow, 123182, Russian Federation

Introduction. One of the modern tasks of hygienic assessment of the human environment is the accumulation of data on the bioeffects of electromagnetic fields (EMF), formed by the simultaneous action of several microwave sources. There is virtually no literature on the corresponding comparative analysis of the results of identical in conditions and energy effects on animals and humans.

The purpose of this work is to compare bioeffects and analyze possible mechanisms of their formation, as a result of the action of electromagnetic fields (EMF) of one, two and three carrier frequencies, within 0.9–1.4 GHz with equivalent energy and modulation characteristics.

Materials and methods. The work was performed in experiments on 11 rabbits (2.5–3 kg) of the Chinchilla breed and clinical-physiological studies involving 14 volunteers – men, aged 40–50 years. Irradiation was subjected mainly to the head of the object. The series differed in the number of carrier frequencies, their specific value and modulation within different EEG ranges, while maintaining an energy flux density (EPR) in the total pulse – 300 μW/cm². We analyzed a set of indicators related to the functional assessment of central nervous, cardiovascular, respiration and muscular body systems.

Results. The results on the dependence of the EMF effect of complex organization on the carrier frequency, their number and modulation nature are presented. It was established that each of the observed reactions was within the physiological norm, but along with the gain in the number of carrier frequencies and the specific modulation value, their qualitative and quantitative characteristics increased. Analysis of their phenomenology (of the alpha EEG range only at one carrier; + delta with a reflection of the reaction in other indicators – at two; an increase in the percentage of reactions in a complex of indicators, especially EMG – at three) indicated a different degree of synchronization of the bioelectric activity of the brain and the neurophysiological mechanism of their formation.

The information obtained, of course, is limited to specific EMF parameters. It complements the relevant information available by highlighting the need for more research on a case-by-case basis.

Limitations. The study of the phenomenology and mechanism of bioeffects of several low-intensity EMFs at the same time is a complex task that requires the involvement of a larger number of electromagnetic sources and a variety of indicators of the body's response than this work was limited to and which, undoubtedly, is promising in the development of this area of research.

Conclusion. In this study, there were no reactions that would go beyond the physiological norm. However, further strengthening of synchronization processes in the central nervous system, according to the analysis of the literature, can lead to such changes. This circumstance dictates the need to take it into account in the formation of the appropriate sanitary and hygienic assessment.

Keywords: EMF; number of microwave carriers; modulation in the range of EEG rhythms; studies; rabbits; volunteers; a complex of physiological indicators; reaction; synchronization of biopotentials of the brain; neurophysiological mechanism

For citation: Lukyanova S.N., Stepanov V.S., Torubarov F.S. Studying the bioeffects of complexly organized electromagnetic impacts of low intensity. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian Journal)*. 2022; 101(5): 515–521. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-5-515-521> (In Russian)

For correspondence: Svetlana N. Lukyanova, MD, PhD, DSci., Professor, State Scientific Center of the Russian Federation – Federal Medical Biophysical Center named after A.I. Burnazyan, Moscow, 123182, Russian Federation. E-mail: lukyanovasn@yandex.ru

Information about authors:

Lukyanova S.N., <https://orcid.org/0000-0003-3354-7443> Stepanov V.S., <https://orcid.org/0000-0002-8850-2034> Torubarov F.S., <https://orcid.org/0000-0001-6879-4108>

Contribution: Lukyanova S.N. – conducting experiments and research, processing the results, discussing them, writing an article. Stepanov V.S. – conducting research, discussing the results, writing an article. Torubarov F.S. – conducting research, discussing the results. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement. The study had no sponsorship.

Received: January 13, 2022 / Accepted: April 21, 2022 / Published: May 31, 2022

Введение

Данная работа является частью актуального исследования в рамках изучения феноменологии и нейрофизиологических механизмов биоэффектов слабых ЭМП, формируемых различным количеством несущих частот. С электромагнитными полями, создаваемыми в быту и на производстве, мы постоянно имеем дело в реальной жизни, что требует изучения и нормативно-гигиенической оценки. Нет сомнения в том, что ЭМП можно рассматривать как неспецифический раздражитель для центральной нервной системы (ЦНС), который в своём влиянии на организм подчиняется фундаментальным законам физиологии [1, 2]. Следовательно, усиление биологической значимости ЭМП можно наблюдать как при усложнении параметров одного фактора, так и при неоднозначном комплексном воздействии, что требует изучения каждого конкретного случая.

Одним из неспецифических механизмов повышения функциональной активности мозга является усиление генерализации синхронных биоэлектрических процессов [3, 4]. Это явление свойственно как отдельным нервным клеткам, так и отделам мозга [5, 6]. Причины усиления синхронизации в мозге могут быть различными – от эфаптических влияний друг на друга близко расположенных нервных элементов до внешних воздействий любой модальности. Не составляют исключения и ЭМП, не только высокой, но и низкой интенсивности. Анализ данных литературы и наши исследования свидетельствуют о смене основных форм ЭЭГ: изменений в виде «веретён» альфа-диапазона ЭЭГ на медленные дельта-волны и далее – судорожную активность при переходе от нетепловой ППЭ к тепловой [1, 2, 7, 8]. Это не что иное, как отражение механизма усиления синхронной активности отдельных нервных клеток и далее – образований.

В норме синхронная работа отдельных нервных элементов ткани мозга участвует в формировании ЭЭГ [9]. Увеличение амплитуды волн ЭЭГ отражает больший процент синхронно разряжающихся нейронов. Экспериментально показано, что веретенообразное колебание в ЭЭГ (9–13 Гц) – это постепенный переход: усиление – уменьшение числа синхронно работающих нейронов неспецифических ядер таламуса [10]. Генез высокоамплитудных медленных волн связан с большим числом синхронно разряжающихся нейронов, чем генез веретенообразных колебаний [5]. Переход от веретенообразных и высокоамплитудных колебаний к судорожной активности связан с усилением генерализации синхронного процесса в мозге,

который из локального (местного) переходит в пространственно организованный [3, 4]. Усиление синхронизации, охватывающее различные отделы мозга, находит отражение в моторном отклике и деятельности других систем организма. Важно также отметить, что в генезе первичного физико-химического механизма синхронной работы нервных клеток принимают участие Ca^{+2} и кооперативные процессы, что показано и при формировании нейроэффектов ЭМП [5, 10]. Выход ионов кальция в межклеточную среду приводит к изменению градиента потенциала во внешней среде, что «чувствует» соседний нейрон, отвечая синхронным разрядом [2, 11]. Эфаптический путь передачи информации в мозге свойствен не только нейронам, но и образованиям. Все эти моменты описаны в литературе как этапы формирования реакции ЦНС на ЭМП, при этом подчёркивается его неспецифическое синхронизирующее влияние [1, 2, 7, 10].

Что касается режимов и параметров воздействующих факторов, способствующих повышению синхронной работы нервных элементов, то известны следующие: навязывание частоты предъявления стимулов в соответствии с частотными диапазонами ЭЭГ; комбинированное действие стимулов, адресованных различным точкам (или отделам) в мозге; повторение коротких воздействий в режиме кумуляции. В литературе (в том числе и в наших работах) описано, что эти пути работают и в случае использования слабого ЭМП [2, 12–15]. Экспериментально показано, что предъявление СВЧ-импульсов в режиме обратной связи от волн ЭЭГ, а также использование нескольких разнородных или одноимённых стимулов (в том числе и ЭМП) усиливало отрицательный эффект воздействия.

Изучение усиления биологической значимости ЭМП путём усложнения режима и увеличения количества источников находится на стадии накопления материалов исследований. Данная работа дополняет имеющиеся сведения. Представлено сравнение биоэффектов и анализ возможных механизмов их формирования в результате действия электромагнитных полей (ЭМП) одной, двух и трёх несущих частот в пределах 0,9–1,4 ГГц с эквивалентными энергетическими и модуляционными характеристиками. Отличительной особенностью работы являются: оценка комплекса показателей, характеризующих функциональное состояние различных систем организма; анализ нейрофизиологического механизма реакций; сопоставление результатов одноимённых воздействий в экспериментах на кроликах и в исследованиях с участием добровольцев.

Таблица 1 / Table 1

Сравнительная характеристика показателей ЭМП, модулированных частотами различных диапазонов ЭЭГ
Comparative characteristics of EMF indicators modulated by frequencies of different EEG ranges

Диапазон ЭЭГ «условное обозначение серии» EEG range "conditional designation Series"	Характеристика СВЧ-импульса / Microwave pulse characteristic				Средняя ППЭ, мкВт/см ² Average Energy flux density (EFD), μW/cm ²
	длительность, мс duration, ms	скважность bandwidth	частота, Гц frequency, Hz	ППЭ, мкВт/см ² PPE, μW/cm ²	
Дельта (Delta) «3→1»	20	0.02–0.06	1–3	300	4–12
Тета (Theta) «8→4»	20	0.08–0.16	4–8	300	16–32
Альфа (Alpha) «13→9»	20	0.18–0.26	9–13	300	36–52

Материалы и методы

Работа выполнена в экспериментах на 11 здоровых кроликах массой тела 2,5–3 кг породы шиншилла и в исследованиях с участием 14 испытуемых-добровольцев (практически здоровые мужчины в возрасте 40–50 лет, сотрудники ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России). Один объект мог принимать участие в различных сериях с интервалом 1 день – 1 нед. Все эксперименты и исследования проводили в идентичных условиях с использованием эквивалентных частотно-амплитудных характеристик ЭМП. Серии различались количеством одновременно действующих несущих частот из области СВЧ (0,9; 1,1 и 1,4 ГГц), которые имели единую модуляцию в диапазоне ритмов ЭЭГ и ППЭ в суммарном импульсе – 300 мкВт/см². Облучению подвергали главным образом голову объекта. Источниками служили отдельные прецизионные отечественные генераторы частот в пределах 1–2 ГГц. Облучение проводили в безэховой камере при температуре воздуха плюс 21–23 °С в зоне сформированной волны ЭМП (2,5–3,5 м от рупора антенны), в изодозном поле ($\pm 10\%$) при вертикальной ориентации E-вектора. В зоне облучения ППЭ контролировали с помощью измерителя уровня ЭМП ПЗ-9. Были проведены серии с облучением отдельно каждой из трёх указанных несущих частот с различными комбинациями из двух и трёх несущих. Сравнение биоэффектов одной, двух и трёх несущих частот проводили в условиях единой амплитудной модуляции в режиме плавного перехода частот от высокого значения к низкому за 0,5 мин в том или ином диапазоне ритмов ЭЭГ. Сравнили биоэффекты излучений, модулированных частотами в дельта-диапазонах (3→1), тета-диапазонах (8→4) или альфа-диапазонах (13→9) ЭЭГ. Они различались значениями ППЭ в среднем (табл. 1).

Экспозиция во время сеанса облучения была установлена как 3–5 мин воздействия, производимого 10 раз с меняющимися интервалами (3–15 мин). Серии с облучениями сопровождал контроль, который был их полной копией за исключением включения поля. Количественные характеристики отдельных серий представлены в результатах исследования.

Реакцию организма оценивали по комплексу показателей, характеризующих функциональное состояние различных систем: ЭЭГ, частота пульса (ЧП), частота дыхания (ЧД), мышечный тонус (ЭМГ) – у кроликов; дополнительно у испытуемых – артериальное давление (АД), температура кожных покровов (t , °С), реоэнцефалограмма (РЭГ). Все показатели регистрировали традиционными способами в процессе всего исследования. Далее статистически сравнивали периоды до и после облучения персонально у каждого объекта, а также по их группе, используя параметрический критерий Стьюдента, непараметрический (χ^2) критерий и компьютерную программу Statistica. За реакцию принимали статистически достоверные изменения во время и после сеанса облучения по сравнению с фоном. Проценты реакций по группе таких исследований приведены в результатах работы.

Исследования проводили 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» [16]. Исследования с участием испытуемых были полной копией предварительно проведённых экспериментов на кроликах. Испытуемые-добровольцы проходили медицинское обследование в клиническом отделе ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России и принимали участие в исследованиях в присутствии дежурного врача (сотрудника той же больницы) под руководством доктора медицинских наук, профессора Ф.С. Торубарова.

Результаты

Проведённые исследования показали отсутствие каких-либо реакций, выходящих за пределы колебаний физиологической нормы, во всех изучаемых сериях. Однако увеличение количества одновременно используемых электромагнитных частот от одной к трём статистически достоверно усиливало эффект. Эти данные представлены в табл. 2–4 и на рисунке. В табл. 2 приведена сравнительная количественная характеристика исследований и реакций на ЭМП 1 ГГц в непрерывном и модулированном «3→1» режимах. По сравнению с контрольными исследованиями усиление эффекта можно было наблюдать только в режиме модуляции. Это имело место как в экспериментах на кроликах, так и в исследованиях на добровольцах и заключалось в усилении альфа-диапазона в спектре ЭЭГ. Такая реакция неоднократно описана нами [2] и нашла отражение в литературе как основная при действии слабых электромагнитных воздействий.

Похожие результаты были получены и в сериях с другими по значению (но близкими) несущими частотами, модулированными в том же дельта-диапазоне ЭЭГ (см. табл. 3).

Совокупность данных табл. 2 и табл. 3 представляет неоднозначность эффектов различных несущих, хотя они и близки по своим частотным характеристикам. 1 и 1,4 ГГц (в отличие от 0,9 и 1,1 ГГц) приводили к статистически достоверным изменениям по группе исследований относительно соответствующего контроля. Феноменология реакции, как и в предыдущей серии, сводилась только к усилению альфа-диапазона в спектре ЭЭГ. При этом сходство процессов в передних и задних отделах коры (оценивали по значению коэффициентов кросс-корреляции КК между ЭЭГ О1 и ЭЭГ F1) оставалось неизменным.

Использование этих частот в комбинации из двух при их одновременной экспозиции с той же модуляцией в режиме «3→1» с сохранением ППЭ в суммарном импульсе 300 мкВт/см² усилило эффект (см. табл. 4).

Как показано в табл. 4, реакция по ЭЭГ-показателю существенно возрастает, выражаясь в усилении не только альфа-диапазона в спектре отдельных отведений, но и сходства этих изменений в передних и задних отделах мозга. Весьма важным является выход реакции за пределы ЦНС, что находит отражение в других показателях (ЧП, ЧД, ЭМГ). Однако этот комплекс наблюдался не при всех комбинациях, и наибольшим процентом изменений в ЦНС и реакцией по комплексу показателей выделялось сочетание 1,1 + 1,4 ГГц.

Таблица 2 / Table 2

Сравнительная характеристика реакций в сериях с непрерывным и модулированным режимами СВЧ ЭМП с несущей частотой 1 ГГц
Comparative response percentage characteristic in series with continuous and modulated microwave EMF modes with a carrier frequency of 1 GHz

Серия Series	Объект (число участников) Object (quantity)	Реакции по показателям, % / Reactions by indicators, %				
		ЭЭГ / EEG		частота пульса, уд. в 1 мин heart rate, beats per 1 min	частота дыхания в 1 мин respiratory rate in 1 min	ЭМГ EMG
		спектр spectrum	КК OL–FL			
Непрерывный режим Continuous mode	Кролики / rabbits (11)	30	10	0	0	10
	Испытуемые / Volunteers (12)	35	20	20	0	10
Режим модуляции («3→1») Modulation mode	Кролики / rabbits (10)	42*	10	0	0	15
	Испытуемые / Volunteers (12)	40*	20	20	0	15
Контроль (К) Control	Кролики / rabbits (12)	16		9	9	9
	Испытуемые / Volunteers (12)	14		16	0	6

Примечание. Здесь и в табл. 3–5: за реакцию принимали статистически достоверные различия показателя за сеанс облучения (10 по 3–5 мин воздействия) по сравнению с фоном; * – $p < 0,05$ по χ^2 относительно контроля; КК OL–FL – коэффициент кросс-корреляции между ЭЭГ затылочной и лобной областей слева.

Note: Here and in Table 3–5: statistically significant differences in the radiation session (10 to 3–5 minutes of exposure) compared to the background were taken as the reaction; * – $p < 0.05$ to χ^2 regarding control. KK OL–FL is the cross-correlation coefficient between the EEG of the occipital and frontal regions on the left.

Таблица 3 / Table 3

Сравнительная характеристика эффектов СВЧ-несущих 0,9; 1,1 и 1,4 ГГц с едиными характеристиками ППЭ в импульсе и в режиме модуляции

Comparative characteristics of the effects of microwave carriers of 0.9 GHz, 1.1 GHz and 1.4 GHz with uniform characteristics of PPE in pulse and modulation mode

Серия «3→1», несущая частота ГГц Series "3→1", carrier frequency GHz	Объект (число участников) Object (quantity)	Реакции по показателям, % / Reactions by indicators, %				
		ЭЭГ / EEG		частота пульса, уд. в 1 мин heart rate, beats per 1 min	частота дыхания в 1 мин respiratory rate in 1 min	ЭМГ EMG
		спектр spectrum	КК OL–FL			
0,9	Кролики / Rabbits (11)	27	9	18	9	9
	Испытуемые / Volunteers (13)	23	15	23	0	8
1,1	Кролики / Rabbits (11)	30	12	9	8	9
	Испытуемые / Volunteers (13)	30	18	21	0	8
1,4	Кролики / Rabbits (11)	41*	10	0	0	10
	Испытуемые / Volunteers (13)	50*	20	20	0	10
Контроль Control	Кролики / Rabbits (11)	18	9	9	9	9
	Испытуемые / Volunteers (13)	21	14	21	0	7

Таблица 4 / Table 4

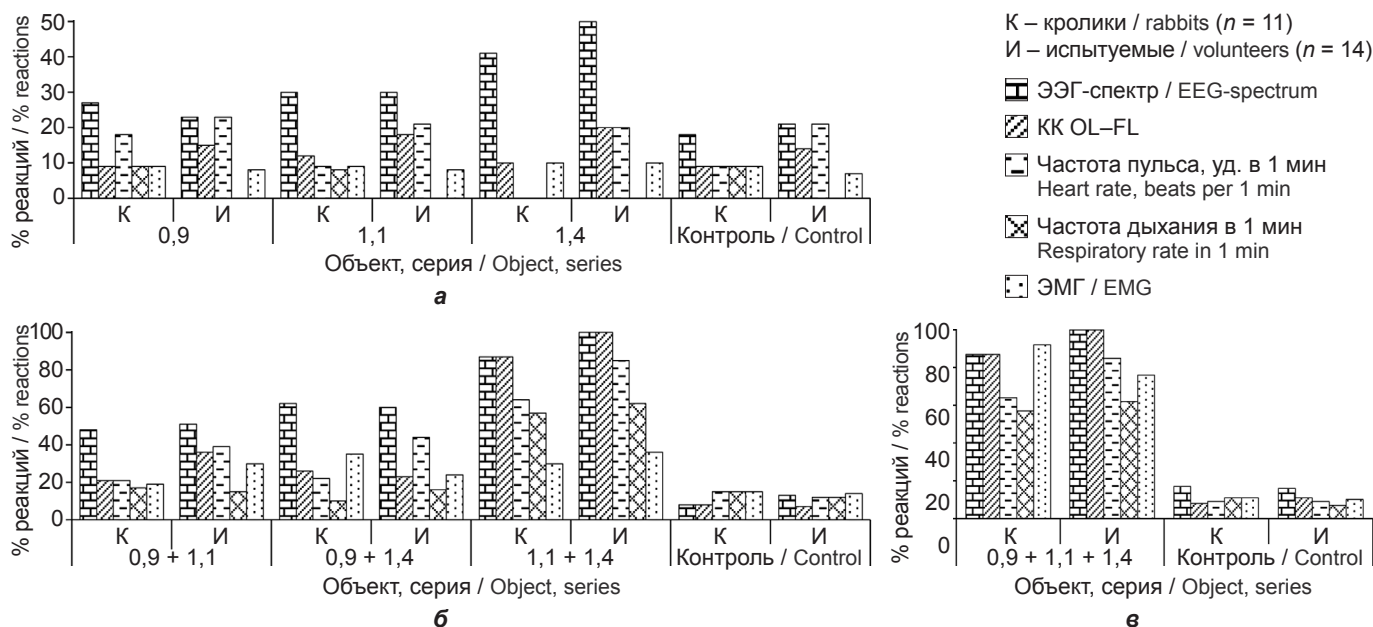
Сравнительная характеристика реакций за сеанс облучения в сериях с двумя несущими частотами, модулированными в режиме «3→1»
Comparative characteristics of the percentage of reactions per irradiation session in series with two carrier frequencies modulated in the mode of "3→1"

Серия «3→1», несущая частота ГГц Series "3→1", carrier frequency GHz	Объект (число участников) Object (quantity)	Реакции по показателям, % / Reactions by indicators, %				
		ЭЭГ / EEG		частота пульса, уд. в 1 мин heart rate, beats per 1 min	частота дыхания в 1 мин respiratory rate in 1 min	ЭМГ EMG
		спектр spectrum	КК OL–FL			
0,9 + 1.1	Кролики / Rabbits (11)	48*	21*	21	17	19
	Испытуемые / Volunteers (13)	51*	36*	39*	15	30*
1,1 + 1.4	Кролики / Rabbits (11)	62*	26*	22	10	35*
	Испытуемые / Volunteers (13)	60*	23*	40*	16	24
1.1 + 1,4	Кролики / Rabbits (11)	87**	87**	44**	36*	30*
	Испытуемые / Volunteers (13)	100**	100**	55**	53**	36*
Контроль Control	Кролики / Rabbits (11)	8	8	15	15	15
	Испытуемые / Volunteers (13)	13	7	12	12	14

Примечание. ** – при $p < 0,01$ по χ^2 относительно контроля и других показателей. Жирным шрифтом выделено наиболее эффективное воздействие.

Note: ** – at $p < 0.01$ to χ^2 , regarding control and other indicators. Bold indicates the most effective effect.

Original article



Сравнительная характеристика реакций в сериях с одной (а), двумя (б) и тремя (в) несущими с единой модуляцией в режиме «3→1» при сохранении ППЭ в суммарном импульсе 300 мкВт/см².

Comparative characteristics of the reactions of rabbits and testers in series with one (a), two (б) and three (в) carriers with a single modulation in the mode “3→1” while maintaining the PPE in a total pulse of 300 μW/cm².

Реакция организма на одновременное воздействие трёх рассматриваемых СВЧ-несущих ещё больше усилила ответную реакцию, что отразилось на всех показателях, особенно ЭМГ (табл. 5).

Наглядно сравнение биоэффектов одной, двух и трёх СВЧ-несущих представлено на рисунке, где заметно возрастание реакций ЦНС и их отражение в других показателях.

Все приведённые выше результаты были получены в условиях амплитудной модуляции в режиме «3→1», который в наших предыдущих исследованиях [12] показал себя как наиболее эффективный по сравнению с меандром или фиксированной частотой из данного диапазона ЭЭГ. Сравнение режима «3→1» с модуляциями в диапазоне альфа (13→9 Гц) или тэта (8→4 Гц) показало зависимость реакции от частоты модуляции (табл. 6).

Таблица 5 / Table 5

Сравнительная характеристика реакций в серии с тремя СВЧ-несущими с одинаковой модуляцией в режиме «3→1»

Comparative characteristics of the reactions of rabbits and testers in a series with three microwave carriers with the same modulation in the “3→1”

Серия «3→1», несущая частота ГГц Series “3→1”, carrier frequency GHz	Объект (число участников) Object (quantity)	Реакции по показателям, % / Reactions by indicators, %				
		ЭЭГ / EEG		частота пульса, уд. в 1 мин heart rate, beats per 1 min	частота дыхания в 1 мин respiratory rate in 1 min	ЭМГ EMG
		спектр spectrum	КК OL–FL			
0,9 + 1.1 + 1.4	Кролики / Rabbits (11)	87*	87*	64*	57*	92*
	Испытуемые / Volunteers (13)	100*	100*	85*	62*	76*
Контроль Control	Кролики / Rabbits (11)	17	8	9	11	7
	Испытуемые / Volunteers (13)	16	11	9	7	10

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически достоверные отличия от контроля.

Note: in bold are statistically significant differences from control.

Таблица 6 / Table 6

Реакция испытуемых по комплексу физиологических показателей за сеанс облучения в серии «1,1 + 1,4 ГГц» в условиях модуляции частотами различных диапазонов ЭЭГ

Reaction of testers on a complex of physiological parameters for a radiation session in the series “1.1 GHz + 1.4 GHz” under modulation conditions with frequencies of different EEG ranges

Серия (число участников) Series (number of volunteers)	Реакции по показателям, % / Reactions by indicators, %							
	ЭЭГ-спектр EEG spectrum ↑ α	КК FL–OL ↓	частота пульса, уд. в 1 мин heart rate, beats per 1 min ↓	t °C кожных покровов skin t °C	АД Blood pressure	РЭГ-индекс rheoencephalogram, index ↓	по комплексу on the complex	
2δ (13)	100*	100*	55*	84.6*	61.5*	84*	61.5*	
2α (13)	84.6*	84.6*	69.2*	69.2*	46.1*	69*	46.1*	
2θ (12)	33.3	33.3	50*	16.6	25	50*	16.6	
Контроль / Control (14)	20	13.3	13.3	20	23.0	16.7	13.3	

Примечание. 2δ, 2α, 2θ – условное обозначение серий с модуляциями в пределах дельта-(3→1), альфа-(13→9) и тэта-(8→4) частот ЭЭГ; * – p < 0,05 относительно контроля.

Note: 2δ, 2α, 2θ is a symbol for series with modulations within the delta (3→1), alpha (13→9) and theta (8→4) of EEG frequencies; * – p < 0.05 regarding control.

Обсуждение

Существующие обзоры литературы о биоэффектах ЭМП описывают главным образом результаты облучения одной несущей частотой [1, 2, 7, 12]. Единичные работы представляют данные воздействия двух и более частот [13–15]. Показана зависимость реакций организма не только от одного, но и от целого комплекса параметров электромагнитного воздействия. В реальной жизни именно комбинация нескольких несущих частот формирует электромагнитное воздействие, которое оказывает влияние на жизнедеятельность организмов. Одна из актуальных задач гигиенической практики – изучение его эффективности, которое находится на стадии накопления материалов.

Настоящая работа описывает феномен усиления биологической значимости эффекта ЭМП при увеличении количества одновременно действующих источников. Одна несущая частота, приблизительно 1 ГГц (0,9; 1; 1,1; 1,4 ГГц), при однократном (в течение 3–5 мин) воздействии или при его повторении могла вызывать реакции только в биоэлектрической активности головного мозга, что заслуживает внимания. При этом важным было наличие модуляции и конкретное значение несущей частоты. Основная реакция, что соответствует и литературным данным [1, 2], сводилась к усилению альфа-диапазона ЭЭГ вследствие отражения синхронной работы близко расположенных нервных элементов [9, 10]. Однако пространственная организация биопотенциалов, оцениваемая по КК ОI–F1, сохранялась неизменной при отсутствии реакции по другим показателям. Использование одновременно двух несущих частот в любых комбинациях из трёх при сохранении энергетических (ППЭ в суммарном импульсе 300 мкВт/см²) и модуляционных (режим «3→1») характеристик усиливало эффект. Реакция сводилась не только к усилению альфа-диапазона ЭЭГ, но и к повышению сходства процессов в дистанционно расположенных (передних и задних) областях мозга. Это явление указывает на дальнейшее усиление синхронных процессов в мозге и может служить основой откликов в частоте пульса, дыхания и ЭМГ [3, 4]. По показателям ЧП и ЧД реакция сводилась лишь к их замедлению, что не выходило за пределы физиологической нормы. Не изменялась при этом и двигательная активность, но в ЭМГ можно было наблюдать «всплески» усиления мышечного тонуса. Степень выраженности этих изменений зависела от комбинации несущих частот, наибольшую эффективность демонстрирует вариант 1,1 + 1,4 ГГц. Важную роль играла и частота модуляции. Описанный эффект наблюдали при модуляции в режиме частот дельта- и альфа-диапазонов, тогда как в режиме тета-диапазона он отсутствовал. Этот вывод требует уточнения, так как в табл. 6 отражён процент реакций в виде усиления только альфа-диапазона ЭЭГ, тогда как мог усиливаться и тета-диапазон, что и нашло отражение в показателях ЧП и РЭГ.

Наша более ранняя работа показывает, что используемый режим может быть эффективным при использовании частот модуляции в диапазонах ЭЭГ не только альфа- и дельта-, но и тэта [12]. Дальнейшее усиление реакции организма имело место при трёх несущих частотах с единой модуляцией в режиме «3→1» при сохранении в суммарном импульсе 300 мкВт/см². Важно отметить, что в данном случае феноменология реакции по ЭЭГ-показателю сводилась не только к усилению альфа-, но и дельта-диапазона. Статистически достоверно изменялись и все остальные показатели, что в процентном отношении сравнимо с серией 1,1 + 1,4 ГГц за исключением ЭМГ. Совокупность реакций показателей организма при трёх несущих может быть отражением дальнейшего усиления синхронных процессов в мозге. Несмотря на усиление реакций организма в сериях с двумя и тремя несущими, выхода за пределы физиологической нормы не наблюдалось ни по одному из показателей. Однако сам факт усиления синхронных процессов

в мозге и его генерализация с отражением в деятельности других систем организма, несомненно, заслуживают особого внимания как основа возможного нарушения жизнедеятельности организма. Сотрудниками Медицинского радиологического научного центра им. А.Ф. Цыба – филиала ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России был выполнен ряд исследований в этом направлении [13–15]. Авторы описывали возможность отрицательного влияния на поведение и реактивность ЦНС крыс одновременного воздействия нескольких источников слабых ЭМП радиочастотного диапазона. Экспериментально показано, что расширение спектрального диапазона за счёт увеличения числа несущих при прочих равных условиях усиливало отрицательный эффект воздействия. Авторы предполагали, что, вполне вероятно, такое воздействие (по сравнению с моновоздействием) вовлекает в ответную реакцию большее количество точек организма, усиливая эффект.

Важным в проведённом исследовании является сходство реакций, наблюдаемых у кроликов, и эффектов, отмечаемых у испытуемых, при облучении (преимущественно головы) одними и теми же слабыми ЭМП. Эти данные поддерживают мнение об отсутствии прямой пропорциональной зависимости эффекта от ППЭ и важной роли исходных фоновых характеристик в пределах низких значений [2, 13–15]. По мнению Е.Б. Бурлаковой [17], этот вывод относится к микродозам любого по модальности слабого воздействия.

Заключение

Проведённое исследование подтверждает, что нетепловое и кратковременное электромагнитное воздействие можно рассматривать как обычный слабый раздражитель для ЦНС [1, 2]. К нему могут быть применимы различные неспецифические пути повышения биологической значимости слабого раздражителя, что было использовано и в настоящей работе. Это одновременное действие двух и трёх СВЧ-несущих частот, единая модуляция в диапазоне ритмов ЭЭГ и дробное облучение. При этом энергетическая характеристика не изменяется, и экспозиция остаётся кратковременной.

Сопоставление феноменологии наблюдаемых реакций и их нейрофизиологических механизмов свидетельствует об усилении процессов синхронизации в биоэлектрической активности мозга при возрастании биологической значимости ответной реакции. При переходе от одной несущей частоты к двум и трём наблюдали соответственно усиление альфа- и дельта-диапазонов ЭЭГ и возрастание сходства биопотенциалов в передних и задних областях головного мозга, что находило отражение также в показателях, характеризующих деятельность других систем организма. Выделяется ЭМГ, которая наиболее чётко показывает наличие и степень выхода изменений за пределы ЦНС. Этот показатель заслуживает отдельного внимания как информативный легко регистрируемый индикатор реакции организма в условиях облучения головы объекта. Важно отметить, что данное явление мы наблюдали не только в экспериментах на кроликах, но и в исследованиях с участием испытуемых-добровольцев. Полученные результаты, касающиеся феноменологии и механизмов биоэффектов, были идентичны. В исследованиях с участием добровольцев также наблюдали усиление реакций при увеличении количества одновременно действующих несущих частот. Конкретно в данном исследовании не было отмечено реакций, которые выходили бы за пределы физиологической нормы. Однако дальнейшее усиление процессов синхронизации в ЦНС (при соответствующем усугублении условий облучения), согласно анализу приведённой литературы, способно привести к подобным изменениям. Это обстоятельство диктует необходимость его учёта при соответствующей санитарно-гигиенической оценке.

Литература

- Холодов Ю.А. Неспецифическая реакция нервной системы на неионизирующее излучение. *Радиационная биология. Радиоэкология.* 1998; 38(1): 121–5.
- Лукьянова С.Н. Электромагнитное поле СВЧ диапазона как раздражитель для ЦНС. М.; 2015.
- Ливанов М.Н. *Пространственно-временная организация потенциалов и системная деятельность головного мозга.* М.: Наука; 1989.
- Верхлютов В.М. *Переливы ЭЭГ и движущиеся волны альфа-ритма коры головного мозга человека.* М.; 1999.
- Виноградова Л.В. *Нейрофизиологические механизмы рефлекторной аудио генной эпилепсии.* М.; 2014.
- Anastassiou C.A., Perin R., Markram H., Koch C. Ephaptic coupling of cortical neurons. *Nat. Neurosci.* 2011; 14(2): 217–23. <https://doi.org/10.1038/nn.2727>
- Лукьянова С.Н. Феноменология и генез изменений в суммарной биоэлектрической активности головного мозга на электромагнитное излучение. *Радиационная биология. Радиоэкология.* 2002; 42(3): 308–14.
- Свидерская Н.Е. *Значение синхронных корковых биоэлектрических процессов для оценки активности мозга в норме и патологии.* М.; 1985.
- Leresche N., Lambert R.C., Errington A.C., Crunelli V. From sleep spindles of natural sleep to spike and wave discharges of typical absence seizures: is the hypothesis still valid? *Pflugers Arch.* 2012; 463(1): 201–12. <https://doi.org/10.1007/s00424-011-1009-3>
- Леднёв В.В. Биоэффекты слабых комбинированных постоянных и переменных магнитных полей. *Биофизика.* 1996; 41(1): 224–32.
- Хайтин А.М. *Участие ионов кальция в выживании и смерти нейронов и глиальных клеток после аксотомии.* Воронеж; 2021.
- Лукьянова С.Н., Григорьев Ю.Г., Степанов В.С. К вопросу об эффективности ЭМП, модулированных в диапазоне ритмов ЭЭГ. *Радиационная биология. Радиоэкология.* 2021; 61(1): 46–54. <https://doi.org/10.31857/S0869803121010082>
- Павлова Л.Н., Жаворонков Л.П., Дубовик Б.В., Глушакова В.С., Посадская В.М. Экспериментальная оценка реакций ЦНС на воздействие импульсных ЭМИ низкой интенсивности. *Радиация и риск.* 2010; 19(3): 104–19.
- Павлова Л.Н., Колганова О.И., Посадская В.М. Влияние широкополосного импульсно-модулированного ЭМП низкой интенсивности на общую возбудимость ЦНС. *Радиация и риск.* 2011; 20(2): 64–74.
- Павлова Л.Н., Жаворонков Л.П., Дубовик Б.В. Влияние низкоинтенсивного широкополосного импульсно-модулированного электромагнитного поля на когнитивные функции мозга крыс. *Радиация и риск.* 2013; 22(2): 91–100.
- Руководство по проведению доклинических исследований лекарственных средств. М.; 2012.
- Бурлакова Е.Б. Особенности биологического действия малых доз ионизирующего излучения. В кн.: *Материалы II Международной конференции «Человек и электромагнитные поля».* Саров; 2007: 188–91.

References

- Kholodov Yu.A. Nonspecific reaction of the nervous system to non-ionizing radiation. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya.* 1998; 38(1): 121–5. (in Russian)
- Lukyanova S.N. *Electromagnetic Field of the Microwave Range as an Irritant for the Central Nervous System [Elektromagnitnoe pole SVCh diapazona kak razdrzhitel' dlya TsNS].* Moscow; 2015. (in Russian)
- Livanov M.N. *Spatio-Temporal Organization of Potentials and Systemic Activity of the Brain [Prostranstvenno-vremennaya organizatsiya potentsialov i sistemnaya deyatel'nost' golovnogogo mozga].* Moscow: Nauka; 1989. (in Russian)
- Verkhlyutov V.M. *Overflows of EEG and Moving Waves of Alpha-Rhythm of the Cerebral Cortex of Man [Perelivy EEG i dvizhushchiesya volny al'fa-ritma kory golovnogogo mozga cheloveka].* Moscow; 1999. (in Russian)
- Vinogradova L.V. *Neurophysiological Mechanisms of Reflex Audio Gene Epilepsy [Neyrofiziologicheskie mekhanizmy reflektornoy audio gennoy epilepsii].* Moscow; 2014. (in Russian)
- Anastassiou C.A., Perin R., Markram H., Koch C. Ephaptic coupling of cortical neurons. *Nat. Neurosci.* 2011; 14(2): 217–23. <https://doi.org/10.1038/nn.2727>
- Lukyanova S.N. Phenomenology and genesis of changes in overall bioelectrical activity of the brain in response to electromagnetic radiation. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya.* 2002; 42(3): 308–14. (in Russian)
- Sviderskaya N.E. *The Importance of Synchronous Cortical Bioelectric Processes for Assessing Brain Activity in Norm and Pathology [Znachenie sinkhronnykh korkovykh bioelektricheskikh protsessov dlya otsenki aktivnosti mozga v norme i patologii].* Moscow; 1985. (in Russian)
- Leresche N., Lambert R.C., Errington A.C., Crunelli V. From sleep spindles of natural sleep to spike and wave discharges of typical absence seizures: is the hypothesis still valid? *Pflugers Arch.* 2012; 463(1): 201–12. <https://doi.org/10.1007/s00424-011-1009-3>
- Lednev V.V. Bioeffects of weak combined constants and alternating magnetic fields. *Biofizika.* 1996; 41(1): 224–32. (in Russian)
- Khaytin A.M. *Participation of Calcium Ions in the Survival and Death of Neurons and Glial Cells after Axotomy [Uchastie ionov kal'tsiya v vyzhivanii i smertineyrovov i glial'nykh kletok posle aksotomii].* Voronezh; 2021. (in Russian)
- Lukyanova S.N., Grigor'ev Yu.G., Stepanov V.S. To the question of the effectiveness of EMF modulated in the range of EEG rhythms. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya.* 2021; 61(1): 46–54. <https://doi.org/10.31857/S0869803121010082> (in Russian)
- Pavlova L.N., Zhavoronkov L.P., Dubovik B.V., Glushakova B.C., Posadskaya V.M. Experimental evaluation of CNS reactions to the effects of pulsed low intensity EMIs. *Radiatsiya i risk.* 2010; 19(3): 104–19. (in Russian)
- Pavlova L.N., Kolganova O.I., Posadskaya V.M. Influence of broadband pulse-modulated LOW-intensity EMF on the overall excitability of the central nervous system. *Radiatsiya i risk.* 2011; 20(2): 64–74. (in Russian)
- Pavlova L.N., Zhavoronkov L.P., Dubovik B.V. Influence of low-intensity broadband pulse-modulated electromagnetic field on cognitive functions of the brain of rats. *Radiatsiya i risk.* 2013; 22(2): 91–100. (in Russian)
- Guidelines for Preclinical Studies of Medicinal Products. Moscow; 2012. (in Russian)
- Burlakova E.B. Features of the biological action of small doses of ionizing radiation. In: *Collection of Reports II International Conference «Man and EMF» [Materialy II Mezhdunarodnoy konferentsii «Chelovek i elektromagnitnyye polya»].* Sarov; 2007: 188–91. (in Russian)