

DOI: 10.7868/S086981391810009X

**ДИНАМИКА ПОВЕДЕНЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ  
И ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕТАБОЛИЗМА У КРЫС  
ПРИ МНОГОКРАТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЕМ**

© С. С. Перцов,<sup>1, 3</sup> А. Ю. Абрамова,<sup>1, 3</sup> А. Б. Симаков,<sup>2</sup>  
И. Н. Водохлебов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт нормальной физиологии им. П. К. Анохина,  
Москва, Россия  
E-mail: nansy71@mail.ru

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Москва, Россия

<sup>3</sup> Московский государственный медико-стоматологический  
университет им. А. И. Евдокимова МЗ РФ, Москва, Россия

Изучена динамика параметров метаболизма и поведенческой активности крыс в разные периоды ежедневного 2-часового электромагнитного излучения (ЭМИ) сверхвысоких частот (СВЧ; 900 МГц) в течение 6 суток. Наиболее выраженные колебания показателей, отражающих интенсивность метаболических процессов, наблюдаются к 3-му сеансу облучения. Это проявляется в увеличении объема потребляемого животными O<sub>2</sub> и уровня тепловыделения. ЭМИ в целом оказывает стимулирующий эффект на питьевое поведение крыс, наиболее выраженный по окончании 3-го СВЧ-воздействия. Показано, что повторное СВЧ-облучение не оказывает значимого влияния на двигательную активность и количество потребляемого животными корма. Выявленные изменения обменных процессов и питьевого поведения при многократном воздействии электромагнитным СВЧ-излучением являются одними из основных критериев активации сложных адаптационных процессов у млекопитающих под влиянием стрессогенных факторов внешней среды.

*Ключевые слова:* крысы, электромагнитное излучение сверхвысоких частот, динамика метаболических показателей, двигательная активность, пищевое и питьевое поведение.

Рос. физиол. журн. им. И. М. Сеченова. Т. 104. № 10. С. 1227—1237. 2018

S. S. Pertsov,<sup>1, 3</sup> A. Yu. Abramova,<sup>1, 3</sup> A. B. Simakov,<sup>2</sup> I. N. Vodokhlebov.<sup>2</sup> DYNAMICS OF BEHAVIORAL ACTIVITY AND METABOLIC PARAMETERS IN RATS DURING REPEATED EXPOSURE TO UHF ELECTROMAGNETIC RADIATION. <sup>1</sup> P. K. Anokhin Research Institute of Normal Physiology, Moscow, Russia; e-mail: nansy71@mail.ru; <sup>2</sup> National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia; <sup>3</sup> A. I. Evdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry, Moscow, Russia.

This work was designed to study the parameters of metabolism and behavioral activity of rats in various stages of daily exposure to 2-h ultra-high frequency (UHF; 900 MHz) electromagnetic radiation (EMR) for 6 days. The most significant variations in the intensity of metabolic processes were found by the 3rd session of irradiation. It is manifested in an increase in the volume of O<sub>2</sub> consumption and level of heat release in animals. EMR has a stimulatory effect on the drinking behavior of rats, which is particularly pronounced after the 3rd UHF-treatment. Repeated UHF irradiation has little effect on locomotor activity and amount of food consumption in animals. The changes in metabolic processes and drinking behavior during repeated exposure to UHF electromagnetic radiation serve as one of the major criteria for activation of complex adaptive processes in mammals under the influence of environmental stress factors.

*Key words:* rats, ultra-high frequency electromagnetic radiation, dynamics of metabolic parameters, locomotor activity, feeding and drinking behavior.

RUSSIAN JOURNAL OF PHYSIOLOGY. V. 104. N 4. P. 1227—1237. 2018

В последние годы большое внимание уделяется изучению влияния электромагнитного излучения (ЭМИ) на человека. Количество источников естественного и искусственного ЭМИ в современном мире чрезвычайно велико и многообразно как по физическим параметрам, так и по характеру влияния на физиологические функции млекопитающих. Люди в течение всей жизни постоянно подвергаются воздействию облучения разной природы. Следует отметить, что в доступной литературе характер влияния ЭМИ на адаптивные процессы в организме человека часто рассматривается в аспекте комплексного взаимодействия экзогенных (природных или искусственных) и эндогенных (электромагнитное поле людей) источников излучения [2]. В ряде работ продемонстрированы разнонаправленные эффекты ЭМИ различной интенсивности на млекопитающих. Имеющиеся данные по этим вопросам подробно описаны в обзорных [20] и аналитических публикациях [12], а также в материалах Международной комиссии по защите от неионизирующей радиации (ICNIRP) [15, 24].

Ведущими параметрами дозиметрии являются продолжительность и последовательность экспозиции ЭМИ. Различают кратковременное (до нескольких часов) и долговременное (сутки и более) облучение [8]. Необходимо подчеркнуть, что при разных периодах экспозиции ЭМИ обнаружены определенные закономерности. Показано, что выраженность отдельных биологических эффектов при кратковременном облучении значительно ниже, чем в условиях длительного или повторного воздействия. Более того, физиологический ответ на уровне целого организма существенно различается в зависимости от продолжительности и вида облучения. Обнаружено, что чувствительность к ЭМИ возрастает у млекопитающих, предварительно подверженных воздействию облучения [8]. Установлен так называемый «эффект накопления», проявления которого наблюдаются по мере многократного суммирования поглощенной дозы. Следует указать, что сильное кратковременное, а также слабое, но длительное или повторное облучение могут оказывать сходное воздействие на организм [18, 21, 22].

В настоящее время внимание многих специалистов медико-биологического профиля сосредоточено на оценке характера влияния ЭМИ мобильной/отовой связи на состояние высших психических функций у млекопитающих [5]. В экспериментальных исследованиях установлено, что при воздействии ЭМИ в диапазоне интенсивностей, используемых в бытовых приборах и системах мобильной связи, на определенных модулирующих частотах наблюдается снижение уровня тревожности у крыс [8]. Выявлено анксиолитическое действие низкоинтенсивного ЭМИ, что выражается в уменьшении фобии к аверсивному раздражению [4]. Отклонения со стороны ЦНС при пользовании

мобильными телефонами, заключающиеся в снижении показателей работоспособности и произвольного внимания, повышении уровня утомления, обнаружены в группе детей-пользователей (хотя анализируемые параметры не выходили за пределы нижних границ возрастной нормы) [9].

Одними из наиболее объективных критериев для оценки влияния экзогенных и эндогенных факторов на состояние гомеостаза являются колебания интенсивности обмена веществ у млекопитающих. Высокоинформативными показателями для изучения метаболических процессов являются объем поглощаемого кислорода и выдыхаемого углекислого газа, а также интенсивность теплообмена. Это связано с тем, что поддержание данных параметров на оптимальном уровне возможно лишь в условиях интеграции и координации деятельности различных функциональных систем организма. Кроме этого, совершенно очевидно, что разные виды поведенческой деятельности — ориентировочно-исследовательская активность, пищевое и питьевое поведение — также являются надежными показателями, отражающими общее состояние организма в разных условиях жизнедеятельности. В частности, в наших предыдущих экспериментах продемонстрировано, что экспериментальные стрессорные воздействия сопровождаются выраженными изменениями двигательной активности и уровня теплопродукции у крыс [6].

Несмотря на значительный интерес к исследованию характера воздействия ЭМИ на физиологические показатели у млекопитающих, многие вопросы в этой области остаются открытыми. В научной литературе практически отсутствуют сведения, иллюстрирующие изменения параметров метаболизма и поведения в динамике многократного электромагнитного облучения.

Целью представленной работы явилось изучение показателей обмена веществ, двигательной активности, а также пищевого и питьевого поведения у крыс в разные временные периоды повторяющегося воздействия ЭМИ сверхвысоких частот (СВЧ).

## МЕТОДИКА

Исследования проведены на 8 крысах-самцах линии Вистар массой  $285.0 \pm 6.1$  г. Животных содержали в виварии при температуре  $20\text{--}22$  °С на стандартном пищевом рационе в условиях искусственного освещения (8.00—20.00 — свет, 20.00—8.00 — темнота). В постановке опытов руководствовались «Правилами проведения работ с использованием экспериментальных животных», утвержденными на заседании этической комиссии НИИ нормальной физиологии им. П. К. Анохина (протокол № 1, 3 сентября 2005 г.), и требованиями Всемирного общества защиты животных (WSPA) и Европейской конвенции по защите экспериментальных животных.

После доставки в лабораторию животные проходили адаптацию к лабораторным условиям в течение 5 дней. Крыс ежедневно подвергали хэндлингу — неоднократному взятию в руки на 10—15 мин — с целью предотвращения стрессорной реакции на взятие в руки экспериментатора. Каждое животное было помечено, индивидуальные метки поддерживались на протяжении всего эксперимента.

Показатели интенсивности метаболизма у крыс в разных экспериментальных условиях определяли с помощью автоматизированной модульной установки Phenomaster (TSE Systems GmbH, Германия), позволяющей проводить мониторинг суточных колебаний физиологических показателей. В состав этого программно-аппаратного комплекса входят метаболические

клетки (36 × 45 см) для индивидуального размещения животных. Двигательную активность крыс регистрировали в двух плоскостях (X и Y) с помощью рамки из инфракрасных лучей (ActiMot2), находящихся на расстоянии 3 см друг от друга. Вычисляли общее число пересеченных животными лучей («пробег»). Непрямую калориметрию проводили с использованием модуля CaloSys, позволяющего измерять расход энергии с помощью датчиков газов для метаболического фенотипирования. Калориметрический показатель — уровень выделения тепла (H, ккал/ч/кг) — рассчитывали по количеству потребляемого животными кислорода ( $VO_2$ , мл/ч/кг) и выдыхаемого углекислого газа ( $VCO_2$ , мл/ч/кг) в единицу времени с учетом массы крыс. Питьевое и пищевое поведение животных оценивали по объему выпитой воды (Drink, мл) и массе съеденного корма (Feed, г).

Регистрацию указанных параметров у крыс проводили ежедневно по окончании 6-часового периода нахождения в метаболических клетках. Общая длительность эксперимента составляла 8 суток. В 1-е и 2-е сутки опыта животных помещали в установку Phenomaster на 6 ч без применения СВЧ-излучения. Оценку поведенческой активности и показателей метаболизма у крыс с 3-х по 8-е сутки проводили в условиях повторного ЭМИ по следующей схеме: первый 2-часового период — нет воздействия, второй 2-часовой период — облучение, третий 2-часовой период — последствие. Таким образом, в указанные сроки животные были подвергнуты 6-кратному СВЧ-излучению. Фоновые параметры, зарегистрированные в 1-е сутки опыта («Контроль—Фон», табл. 1, 2), в дальнейшем принимались в качестве контрольных исходных значений.

В работе использовали установку для изучения влияния слабых кодированных электромагнитных полей на биологические объекты DEMI [16]. Облучение крыс производили на частоте 900 МГц в режиме непрерывной генерации на протяжении 2 ч. Данная частота соответствует примерно середине диапазона GSM 900 (890—915 МГц), именно на этих частотах излучают абонентские аппараты сотовой связи [23]. Излучатель размещался на максимально равном расстоянии от метаболических клеток. Антенна в виде четверть-волнового штыря располагалась вертикально. Диаграмма направленности антенны в горизонтальной плоскости является круговой. Уровень излучения у разных метаболических клеток составлял от 8 до 17 мкВт/см<sup>2</sup>. Данный показатель выбран исходя из условий максимально допустимого уровня облучения для человека — 10 мкВт/см<sup>2</sup> (согласно [1], п. 3.3).

Результаты эксперимента обрабатывали с использованием пакетов программ Statistica 10.0 и Microsoft Office Excel 2010. Так как распределение полученных значений отличалось от нормального, анализ различий между переменными проводили с применением критерия Friedman ANOVA. В случае наличия статистически значимых различий между вариационными рядами проводили апостериорный анализ с помощью Wilcoxon matched pairs test с последующим FDR-контролем групповой вероятности ошибки I рода. Числовые данные в таблицах приведены как медиана (Me), верхний и нижний квартили (Q1, Q3).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Динамика изменений физиологических показателей крыс в метаболических клетках на разных стадиях исследования представлена в табл. 1 и 2. Необходимо отметить, что статистически достоверных отличий анализируемых

Таблица 1

Расчетные показатели объема потребляемого кислорода ( $VO_2$ , мл/ч/кг), количества выдыхаемого углекислого газа ( $VCO_2$ , мл/ч/кг) и выделения тепла ( $H$ , ккал/ч/кг) в единицу времени с учетом массы тела животного [ $Me$  ( $Q_1$ ;  $Q_3$ )]

Сутки	Условия опыта	$VO_2$	$VCO_2$	$H$
1-е	Контроль—Фон	1550.00 (1454.00; 1802.33)	1747.33 (1522.66; 2025.67)	8.01 (7.47; 9.34)
2-е	Без облучения	1482.67 (1284.33; 2023.00)	1532.33 (1308.33; 2128.00)	7.54 (6.36; 10.36)
3-и	Облучение-1	1733.67 (1412.00; 2170.00)	1762.00 (1561.67; 2421.00)	8.78 (7.32; 11.23)
4-е	Облучение-2	1796.00 (1540.00; 1919.00)*	1698.33 (1562.00; 1962.33)	8.93 (7.80; 9.73)
5-е	Облучение-3	1838.00 (1729.67; 2331.33)*	1859.67 (1727.67; 2372.33)	9.20 (8.87; 11.86)*
6-е	Облучение-4	1648.67 (1501.00; 2087.33)	1625.33 (1513.00; 2093.67)	8.29 (7.66; 10.63)
7-е	Облучение-5	1454.67 (1331.67; 1799.00)	1596.00 (1318.00; 1776.67)	7.40 (6.71; 9.05)
8-е	Облучение-6	1840.33 (1785.67; 2003.00)	1850.00 (1796.00; 1947.67)	9.41 (9.04; 9.91)
Friedman ANOVA		$\chi_r^2 = 18.90$ , $p = 0.008$	$\chi_r^2 = 12.76$ , $p = 0.08$	$\chi_r^2 = 16.95$ , $p = 0.02$

Примечание. \*  $p < 0.05$  по сравнению с соответствующими показателями «Контроль—Фон».

параметров в 1-е («Контроль—Фон») и 2-е сутки опыта («Без облучения») не обнаружено. Таким образом, показатели, зарегистрированные в 1-е сутки эксперимента, были в дальнейшем использованы в качестве референсных значений.

На первом этапе исследования проанализирован характер влияния повторного ЭМИ на интенсивность метаболических процессов у крыс (табл. 1). Установлено, что однократное СВЧ-излучение не приводит к достоверным изменениям потребления животными кислорода ( $VO_2$ ). Однако данный параметр прогрессивно возрастал после 2-го и 3-го сеанса облучения ( $p < 0.05$  по сравнению с контролем). Объем потребляемого крысами кислорода несколько снижался после 4-го и 5-го воздействия ЭМИ (по сравнению с таковым на предыдущей стадии), но возрастал и практически не отличался от исходного значения к окончанию опыта (8-е сутки).

В дальнейшем нами была изучена динамика количества выделяемого крысами углекислого газа ( $VCO_2$ ) при низкоинтенсивном ЭМИ. Многократное СВЧ-излучение не сопровождалось статистически значимыми колебаниями данного показателя. После 3-го сеанса облучения обнаружено незначительное увеличение объема выдыхаемого животными углекислого газа. Интенсивность выделения углекислого газа проявляла тенденцию к уменьшению после 4-го и 5-го СВЧ-воздействия с последующим увеличением до контрольного уровня к окончанию наблюдений.

Изучение характера влияния многократного СВЧ-излучения на интенсивность тепловыделения ( $H$ ) у крыс показало следующее. Анализируемый индекс практически не изменялся в условиях однократного и двукратного экс-

Таблица 2

Показатели двигательной активности животных (ХТ + УТ, *n*),  
 объема выпитой воды (Drink, мл) и количества съеденного корма [Feed, г; Me (Q<sub>1</sub>; Q<sub>3</sub>)]

Сутки	Условия опыта	ХТ + УТ	Drink	Feed
1-е	Контроль—Фон	1787.00 (941.67; 3251.33)	0.03 (0.03; 0.08)	0.04 (0.03; 0.33)
2-е	Без облучения	1583.00 (610.00; 2492.67)	0.67 (0.10; 2.70)	3.24 (0.03; 5.69)
3-и	Облучение-1	1580.67 (1330.67; 2098.00)	1.26 (0.80; 2.70)*	3.76 (3.27; 4.96)
4-е	Облучение-2	1459.00 (560.33; 1639.33)	0.77 (0.07; 2.31)*	2.64 (0.11; 4.91)
5-е	Облучение-3	1600.33 (1229.33; 2165.33)	2.24 (1.03; 5.00)*	2.53 (1.79; 3.99)
6-е	Облучение-4	948.33 (661.33; 1040.33)	0.06 (0.03; 1.41)	0.03 (0.00; 0.04)
7-е	Облучение-5	1393.33 (724.00; 1748.67)	1.43 (0.03; 2.06)*	0.81 (0.03; 2.54)
8-е	Облучение-6	1290.33 (536.67; 1506.67)	0.13 (0.05; 2.82)	0.35 (0.16; 0.79)
Friedman ANOVA		$\chi_r^2 = 12.33,$ $p = 0.09$	$\chi_r^2 = 14.84,$ $p = 0.03$	$\chi_r^2 = 12.89,$ $p = 0.07$

Примечание. \*  $p < 0.05$  по сравнению с соответствующими показателями «Контроль—Фон».

периментального воздействия. После 3-го сеанса облучения выявлено статистически значимое повышение уровня выделения тепла животными ( $p < 0.05$ ). Данный показатель интенсивности метаболизма у крыс незначительно снижался в динамике 2 последующих экспозиций, но возрастал и не отличался от фонового значения после 6-го СВЧ-воздействия.

На следующем этапе работы был проведен анализ показателей двигательной активности животных (ХТ + УТ) в динамике повторного воздействия ЭМИ (табл. 2). В динамике 6-кратного СВЧ-облучения обнаружены волнообразные колебания числа пересеченных крысами лучей в метаболических клетках, при этом показатель пробега на всех стадиях исследования был меньше контрольного значения. Статистически значимых изменений этого параметра при повторном воздействии ЭМИ не выявлено.

Заключительная часть работы была посвящена выяснению характера изменений пищевого и питьевого поведения крыс на разных стадиях повторного воздействия ЭМИ (табл. 2). Показано, что объем потребляемой животными жидкости возрастает в условиях однократного СВЧ-излучения ( $p < 0.05$  по сравнению с исходным значением) и остается повышенным после повторной экспозиции на следующие сутки исследования. Третий сеанс облучения сопровождался дальнейшим увеличением анализируемого показателя по сравнению с контролем ( $p < 0.05$ ). После 4-го воздействия ЭМИ обнаружена тенденция к снижению объема выпитой крысами воды, который практически не отличался от фонового параметра. В условиях 5-й экспозиции выявлено повторное возрастание объема потребляемой жидкости ( $p < 0.05$ ). К окончанию исследования после 6-го сеанса облучения наблюдалась тенденция к уменьшению потребления животными воды, в результате чего характер их питьевого поведения практически не отличался от исходного показателя.

При изучении пищевого поведения крыс в разных условиях эксперимента получены следующие результаты. Установлено, что однократное облучение животных сопровождается незначительным увеличением количества потребляемого корма. В последующий период обнаружена тенденция к угнетению пищевого поведения крыс. Наиболее выраженное уменьшение потребления корма наблюдалось после 4-го сеанса облучения по сравнению с фоновым уровнем (статистически незначимо). Несмотря на незначительный рост объема потребляемого корма при 5-кратном СВЧ-излучении (по сравнению с таковым на предыдущей стадии опыта), к окончанию наблюдений после 8-го воздействия ЭМИ данный показатель оставался меньше фонового уровня, однако указанные различия не были статистически значимы.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Благодаря значительному технологическому прогрессу и широкому использованию источников электромагнитного излучения люди постоянно подвергаются воздействию ЭМИ. Это обуславливает растущий интерес исследователей к изучению характера влияния низкоинтенсивного излучения на организм человека. В связи со сложностью проведения подобных наблюдений на людях большинство работ в этой области выполняется на животных.

В проведенной работе исследован характер влияния повторного ЭМИ в диапазоне СВЧ на ряд физиологических показателей у крыс. Особое внимание уделено выяснению динамики параметров метаболизма и поведенческой активности животных в разные временные периоды ежедневного 2-часового облучения (900 МГц) в течение 6 суток.

Установлено, что наиболее значимые колебания показателей, иллюстрирующих интенсивность метаболических процессов, наблюдаются к 3-му сеансу СВЧ-облучения. Это проявлялось в первую очередь в увеличении потребления животными кислорода. Прямым следствием этих изменений явилось выраженное повышение уровня тепловыделения у крыс в данный временной период. Необходимо отметить, что общая динамика указанных показателей обмена веществ была сходной на разных стадиях повторяющихся воздействий ЭМИ.

Полученные данные дополняют результаты наших предыдущих экспериментов [7]. Метаболические показатели у крыс были изучены при низкоинтенсивном СВЧ-излучении, которое модулировалось частотами, характерными для экспериментально вызванных отрицательных эмоциональных состояний. В указанных условиях наиболее выраженные изменения анализируемых параметров были отмечены лишь на 7-е сутки опыта. Это выражалось в снижении объема потребляемого кислорода и выдыхаемого углекислого газа, а также в уменьшении интенсивности выделения тепла. Существенно, что данный эффект обнаруживался не только во время облучения, но и между воздействиями. Представленные факты указывают, что изменения показателей, характеризующих обмен веществ в организме млекопитающих при воздействии ЭМИ, могут значительно варьировать и быть разнонаправленными в зависимости от наличия или отсутствия модулирующих сигналов.

Изменения многих физиологических показателей при ЭМИ во многом связаны с его модулирующим влиянием на содержание активных форм кислорода (АФК). АФК образуются в клетках организма в процессе нормального метаболизма, под действием ионизирующего излучения и в ряде других усло-

вий. Известно, что эти молекулы могут играть роль медиаторов внутриклеточных сигнальных путей. Однако повышенная генерация АФК сопровождается развитием окислительного стресса, что приводит к повреждению белков и ДНК, активации перекисного окисления липидов и другим негативным эффектам. В недавно опубликованном обзоре [25] обобщены результаты исследований характера влияния магнитных полей на концентрацию АФК. Выявлено, что в большинстве случаев это воздействие вызывает увеличение содержания АФК в клетках и тканях млекопитающих. Однако есть данные, указывающие на отсутствие изменений или даже снижение уровня АФК под влиянием магнитных полей.

В работе А. Burlaka и соавт. [10] показано, что воздействие ЭМИ СВЧ-диапазона в пульсовом режиме сопровождается дисфункцией электрон-транспортной цепи митохондрий в клетках печени и аорты крыс. Это приводит к ускоренной продукции супероксидных радикалов и развитию клеточной гипоксии. На основании полученных данных сделан вывод, что данный вид облучения может вызывать формирование окислительных метаболических изменений у млекопитающих.

С другой стороны, в экспериментах на новорожденных крысятах и 6-дневных животных продемонстрировано, что многократное ЭМИ СВЧ-диапазона (950 МГц, 30 мин в день, 27 суток, удельная мощность поглощения 1.32—1.14 Вт/кг) не обладает генотоксичностью и не вызывает оксидативный стресс в тканях коры головного мозга [19]. Кроме этого, установлено, что генотоксический эффект 950-МГц ЭМИ на клетки печени проявляется у 30-дневных крыс, но отсутствует у животных меньшего возраста и новорожденных особей [18].

Таким образом, результаты наших исследований и опубликованные ранее данные указывают на то, что характер влияния ЭМИ на метаболические показатели у млекопитающих в значительной степени зависит от вида, интенсивности и частоты излучения, периода экспозиции, времени проведения измерений, возраста животных и других факторов.

В наших опытах установлено, что многократное воздействие низкоинтенсивного ЭМИ в целом оказывает стимулирующий эффект на питьевое поведение животных. Статистически достоверные отличия изучаемого параметра от контрольного значения выявлены после 1, 2, 3 и 5-го сеансов облучения. Необходимо отметить, что потребление крысами жидкости в наибольшей степени превышало фоновый уровень по окончании 3-го СВЧ-воздействия. Данный факт представляет особый интерес, так как этот период соответствует формированию наиболее значимых изменений показателей метаболизма в динамике повторных экспозиций, обнаруженных в нашей работе (усиление потребления кислорода и рост теплоотдачи).

В отличие от показателя питьевого поведения крыс статистически значимых изменений количества потребляемого корма в разные временные периоды воздействия ЭМИ не обнаружено. Известно, что питьевая потребность у млекопитающих имеет более высокую биологическую значимость, чем пищевая. Наиболее выражено это проявляется при адаптации к изменяющимся условиям внешней среды. По-видимому, это обуславливает выявленное нами увеличение потребления животными воды при повторном воздействии ЭМИ, не сопровождающееся изменением пищевого поведения.

При изучении двигательной активности животных установлено, что показатель пробега крыс в метаболических клетках практически не изменяется во всех изученных временных периодах электромагнитного СВЧ-облучения. По-видимому, это связано со спецификой воздействия сверхвысоких частот



на млекопитающих. В классических опытах, проведенных S. F. Korbel и соавт. еще в 1971 г. [17], было установлено, что облучение лабораторных крыс ультравысокими частотами (500 МГц, 0.43—0.15 мВ) в течение 38 суток приводит к выраженным нарушениям их поведения. Это проявлялось в снижении двигательной активности животных не только во время, но и после окончания повторных экспериментальных воздействий.

В недавних исследованиях продемонстрировано, что электромагнитные волны как один из наиболее серьезных и широко распространенных физических факторов могут оказывать негативное влияние на когнитивные и другие функции у млекопитающих [19]. Показано, что различные по длительности воздействия излучения СВЧ-диапазона вызывают изменения метаболизма и двигательного поведения у крыс, во многом зависящие от частотных характеристик ЭМИ. Выявленные нарушения были связаны с колебаниями содержания нейротрансмиттеров и нейрогормонов (в частности, с повышением уровня АКТГ в плазме крови), что указывает на стрессорный характер наблюдающихся реакций.

Следует отметить, что многообразные эффекты разных видов облучения на параметры поведения, процессы обучения и памяти, обмен веществ и другие физиологические показатели у млекопитающих могут быть связаны с особенностями их модулирующего влияния на функциональное состояние ЦНС. Это предположение находит подтверждение в ряде работ. Например, в исследованиях С. Н. Лукьяновой [3] продемонстрировано, что кратковременная экспозиция ЭМИ нетепловой интенсивности сопровождается ростом суммарной активности головного мозга у экспериментальных животных. В указанных условиях выявлено увеличение числа веретенообразных колебаний в альфа- и бета-1-диапазонах ЭЭГ. На основании представленных данных можно сделать вывод, что низкоинтенсивное ЭМИ является подпороговым раздражителем для ЦНС.

Результаты наших исследований указывают на то, что многократное воздействие электромагнитного СВЧ-излучения оказывает значимое влияние на физиологические показатели у крыс. Это проявляется, в частности, в усилении питьевого поведения, увеличении теплообмена и повышении потребления кислорода. Наиболее выраженные изменения анализируемых параметров наблюдаются после третьего сеанса облучения, что косвенно свидетельствует о развитии «эффекта накопления» в этих условиях. Данные изменения являются одними из ведущих критериев активации сложных адаптационных процессов у млекопитающих под влиянием стрессогенных факторов внешней среды. По-видимому, это определяет выявленное нами отсутствие отличий указанных показателей от исходного уровня к окончанию наблюдений. Тонкие механизмы, лежащие в основе действия низкоинтенсивного ЭМИ СВЧ-диапазона на поведенческие, метаболические и другие физиологические показатели у млекопитающих, являются предметом дальнейших исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 16-19-00167.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] *Гигиенические требования к размещению и эксплуатации средств сухопутной подвижной радиосвязи: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы.* Москва. Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России. 2003.

[2] Краюшкина Н. Г., Александрова Л. И., Загребин В. Л., Перепелкин А. И., Пикалов М. А. Биотропные эффекты электромагнитных излучений (ЭМИ). Волгоград. науч.-мед. журн. 42(2): 24—27. 2014.

[3] Лукьянова С. Н. Электромагнитное излучение нетепловой интенсивности и короткой экспозиции как подпороговый раздражитель для центральной нервной системы. Радиационная биология. Радиоэкология. 53(6): 625—633. 2013.

[4] Павлова Л. Н., Дубовик Б. В., Жаворонков Л. П., Глушакова В. С. Экспериментальное обоснование возможных механизмов влияния электромагнитных полей (ЭМП) низкой интенсивности на поведение животных. Радиационная биология. Радиоэкология. 52(4): 1—6. 2012.

[5] Павлова Л. Н., Дубовик Б. В., Жаворонков Л. П., Лушникова Г. А. Влияние широкополосного импульсно-модулированного ЭМИ СВЧ низкой интенсивности на крыс Вистар с высокой организацией адаптивного поведения. Радиация и риск. 25(2): 67—77. 2016.

[6] Перцов С. С., Алексеева И. В., Коплик Е. В., Шаранова Н. Э., Курбаева Н. В., Гаппаров М. Г. Динамика изменений двигательной активности и уровня тепловыделения у крыс после острой стрессорной нагрузки. Бюл. эксперим. биологии и медицины. 157(1): 14—18. 2014.

[7] Перцов С. С., Гурковский Б. В., Абрамова А. Ю., Трифонова Н. Ю., Симаков А. Б., Журавлев Б. В. Динамика показателей метаболизма у крыс при многократном воздействии модулированным низкоинтенсивным СВЧ-излучением. Бюл. эксперим. биологии и медицины. 165(4): 404—408. 2018.

[8] Семенова Т. П., Медвинская Н. И., Блисковка И. Г., Акоев И. Г. Влияние электромагнитного излучения на эмоциональное поведение крыс. Радиационная биология. Радиоэкология. 40(6): 693—695. 2000.

[9] Хорсева Н. И., Григорьев Ю. Г., Горбунова Н. В. Психофизиологические показатели детей — пользователей мобильной связью. Сообщение 2. Результаты 4-летнего мониторинга. Радиационная биология. Радиоэкология. 51(5): 617—623. 2011.

[10] Burlaka A., Selyuk M., Gafurov M., Lukin S., Potaskalova V., Sidorik E. Changes in mitochondrial functioning with electromagnetic radiation of ultra high frequency as revealed by electron paramagnetic resonance methods. Int. J. Radiat. Biol. 90(5): 357—362. 2014.

[11] Di Carlo A., White N., Guo F., Garrett P., Litovitz T. Chronic electromagnetic field exposure decreases HSP70 levels and lowers cytoprotection. J. Cell. Biochem. 84(3): 447—454. 2002.

[12] Elwood J. M. Epidemiological studies of radio frequency exposures and human cancer. Bioelectromagnetics. 6: S63—S73. 2003.

[13] Furtado-Filho O. V., Borba J. B., Dallegrave A., Pizzolato T. M., Henriques J. A., Moreira J. C., Saffi J. Effect of 950 MHz UHF electromagnetic radiation on biomarkers of oxidative damage, metabolism of UFA and antioxidants in the livers of young rats of different ages. Int. J. Radiat. Biol. 90(2): 159—168. 2014.

[14] Furtado-Filho O. V., Borba J. B., Maraschin T., Souza L. M., Henriques J. A., Moreira J. C., Saffi J. Effects of chronic exposure to 950 MHz ultra-high-frequency electromagnetic radiation on reactive oxygen species metabolism in the right and left cerebral cortex of young rats of different ages. Int. J. Radiat. Biol. 91(11): 891—897. 2015.

[15] Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Health Physics. 74(4): 494—522. 1998.

[16] Gurkovskiy B. V., Zhuravlev B. V., Onishchenko E. M., Simakov A. B., Trifonova N.Y., Voronov Y. A. Techniques and instrumental complex for research of influence of microwaves encoded by brain neural signals on biological objects' psycho physiological state. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 151(1): 012019. 2016.

[17] Korbel S. F., Johnson K. D., Rowland P. S. Aftereffects of low intensity UHF radiation. Psychonomic Science. 23(1): 50—51. 1971.

[18] Magras I. N., Xenos T. D. RF radiation-induced changes in the prenatal development of mice. Bioelectromagnetics. 18(6): 455—461. 1997.

[19] Mahdavi S. M., Sahraei H., Yaghmaei P., Tavakoli H. Effects of electromagnetic radiation exposure on stress-related behaviors and stress hormones in male Wistar rats. Biomol. Ther. (Seoul). 22(6): 570—576. 2014.

[20] Markov M. S. Electromagnetic field in biology and medicine. CRC Press. 2015.

[21] *Persson B. R. R., Salford L. G., Brun A.* Blood-brain barrier permeability in rats exposed to electromagnetic fields used in wireless communication. *Wireless Network.* 3(6): 455—461. 1997.

[22] *Phillips J. L., Ivaschuk O., Ishida-Jones T., Jones R. A., Campbell-Beachler M., Haggren W.* DNA damage in Molt-4 T-lymphoblastoid cells exposed to cellular telephone radiofrequency fields in vitro. *Bioelectrochem. Bioenerg.* 45(1): 103—110. 1998.

[23] *Vanderstraeten J.* GSM fields and health: an updated literature review. *Rev. Med. Brux.* 30(4) : 416—424. 2009.

[24] *Vecchia P., Matthes R., Lin G. Z. J., Saunders R., Swerdlow A.* Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz—300 GHz). Review of the scientific evidence on dosimetry, biological effects, epidemiological observations, and health consequences concerning exposure to high frequency electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). Munich: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. 2009.

[25] *Wang H., Zhang X.* Magnetic fields and reactive oxygen species. *Int. J. Mol Sci.* 2017. 18(10): 2175. 2017. <https://doi.org/10.3390/ijms18102175>.

Поступила 25 VI 2018  
После доработки 30 VII 2018