

– осуществлять производственный контроль за воздействием вредных производственных факторов на рабочих местах в соответствии с требованиями санитарно-эпидемиологического законодательства;

– разрабатывать и внедрять мероприятия по улучшению условий труда.

Список литературы

1. Федеральный закон «О железнодорожном транспорте в Российской Федерации» от 10.01.2003 N 17-ФЗ.

2. Распоряжение ОАО РЖД от 05.07.2023 N 1677/р Об утверждении Инструкции по охране труда для работников, занятых на эксплуатации сетей водоснабжения и водоотведения (вместе с ИОТ РЖД-4100612-ЦДТВ-282-2023. Инструкция...)

3. Приказ Минтруда России от 30.08.2019 N 595н Об утверждении профессионального стандарта «Машинист по эксплуатации и обслуживанию устройств железнодорожного водоснабжения и водоотведения».

4. Бабилова В.В. «Особенности организаций условий труда на предприятиях железнодорожного транспорта». Сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики: в 3 т, 2022. том 3. С. 298-301.

5. Кунц К.Л. Ким И.Л. «О состоянии систем железнодорожного водоснабжения». Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2016. № 3, С. 25-28.

6. Материалы по результатам обследования объектов водоотведения, водоснабжения железнодорожного транспорта в рамках проведения плановых надзорных мероприятий в 2023 году (экспертные заключения, акты санитарно-эпидемиологического обследования Органа инспекции Филиала Федерального бюджетного учреждения здравоохранения «Центр гигиены и эпидемиологии в городе Санкт-Петербурге и Ленинградской области» на транспорте, Уникальный номер записи об аккредитации в реестре аккредитованных лиц RA.RU.710491).

Сведения об авторе

Шамилова Татьяна Сидорова — врач по общей гигиене санитарно-гигиенического отделения Филиал Федерального бюджетного учреждения здравоохранения «Центр гигиены и эпидемиологии в городе Санкт-Петербурге и Ленинградской области» на транспорте, e-mail: shamilova-tatjana@mail.ru.

УДК: 613.647:004.77:612.822.1

НЕЙРОХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПРЕФРОНТАЛЬНОЙ КОРЕ ПРИ ХРОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ УСТРОЙСТВ Wi-Fi: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ УСИЛЕНИЯ МЕР ПРОФИЛАКТИКИ ДЛЯ ПОДРОСТКОВ

Щемелев В.М.¹, Чуешова Н.В.¹, Новицкая С.П.¹, Бортновский В.Н.²

¹Институт радиобиологии НАН Беларуси, Гомель, Беларусь

²Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Беларусь

Реферат. Исследование посвящено анализу нейрохимических изменений в префронтальной коре (ПФК) при хроническом воздействии электромагнитного поля (ЭМП) устройств Wi-Fi, с целью обоснования мер профилактики для подростков. Научное сообщество дискутирует о влиянии низкоинтенсивного ЭМП: одни исследования подтверждают его нейротоксичность, другие отрицают значимые эффекты. В эксперименте молодые крысы подвергались воздействию ЭМП (2,4+5 ГГц) в течение 7, 14, 60 и 90 суток. Методы исследований включали ВЭЖХ для анализа моноаминов (5-НТ, DA) и родственных соединений в ПФК. Результаты выявили

нелинейную динамику: через 7 суток снижение МНPG (22,3%), Trp (29,4%), 5-НТP (33,3%), 5-НТ (18,8%); через 14 суток — рост DOPAC (118,2%) и 5-НIAA (14,9%); через 60 суток — увеличение 5-НТ (13,2%); через 90 суток — резкий рост DA (300%) при снижении Tyr (27,7%). Это свидетельствует о компенсаторной гиперрегуляции дофаминергической системы при длительной экспозиции. Практическая ценность работы — в разработке рекомендаций по ограничению времени использования Wi-Fi-устройств и внедрению мер профилактики для подростков, занятых в цифровой сфере. Результаты подтверждают необходимость пересмотра гигиенических нормативов с учетом кумулятивных эффектов ЭМП.

Ключевые слова: префронтальная кора, дофамин, серотонин, электромагнитное поле, крысы-самцы.

NEUROCHEMICAL CHANGES IN THE PREFRONTAL CORTEX AFTER CHRONIC EXPOSURE TO THE ELECTROMAGNETIC FIELD OF Wi-Fi DEVICES: EXPERIMENTAL RATIONALE FOR PREVENTIVE MEASURES FOR ADOLESCENTS

Shchemelev V.M.¹, Chueshova N.V.¹, Navitskaya S.P.¹, Bortnovsky V.N.²

¹Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

²Gomel State Medical University, Gomel, Belarus

Abstract. The study is devoted to the analysis of neurochemical changes in the prefrontal cortex (PFC) during chronic exposure to the electromagnetic field (EMF) of Wi-Fi devices, in order to substantiate preventive measures for adolescents. The scientific community is debating the effects of low-intensity EMF: some studies confirm its neurotoxicity, while others deny significant effects. In the experiment, young rats were exposed to EMF (2.4 + 5 GHz) for 7, 14, 60 and 90 days. Research methods included HPLC for the analysis of monoamines (5-HT, DA) and related compounds in the PFC. The results revealed nonlinear dynamics: after 7 days, a decrease in МНPG (22.3%), Trp (29.4%), 5-НТP (33.3%), 5-НТ (18.8%); after 14 days — an increase in DOPAC (118.2%) and 5-НIAA (14.9%); after 60 days — an increase in 5-НТ (13.2%); after 90 days — a sharp increase in DA (300%) with a decrease in Tyr (27.7%). This indicates compensatory hyperregulation of the dopaminergic system during long-term exposure. The practical value of the work is in developing recommendations for limiting the time of using Wi-Fi devices and introducing preventive measures for adolescents engaged in the digital sphere. The results confirm the need to revise hygienic standards taking into account the cumulative effects of EMF.

Keywords: prefrontal cortex, dopamine, serotonin, electromagnetic field, male rats.

Актуальность. В современном мире подростки всё чаще подвергаются воздействию электромагнитных полей (ЭМП), исходящих от беспроводных устройств, таких как Wi-Fi роутеры и мобильные телефоны. Это вызывает серьёзную обеспокоенность в отношении возможного влияния ЭМП на развивающуюся центральную нервную систему (ЦНС) в период активного нейрофизиологического и когнитивного созревания. Одной из причин такой обеспокоенности является стремительное развитие технологий мобильной связи, которое значительно опережает темпы изучения их биологических эффектов. Начиная с первого поколения, мобильные технологии достигли пятого поколения без проведения комплексного скрининга их потенциального воздействия на здоровье человека и животных.

Накапливаются данные о возможных нетермических биологических эффектах ЭМП на функции мозга и поведение. Особое внимание в поведенческих исследованиях уделяется влиянию ЭМП на процессы обучения, памяти, тревожности и двигательной активности.

Одним из механизмов действия ЭМП считается изменение уровней нейромедиаторов в различных структурах мозга. Поскольку ни одна область мозга не функционирует изолированно, а поведенческие реакции являются результатом сложного взаимодействия различных нейрональных

систем и медиаторных путей, модулирующее воздействие ЭМП на нейрохимические процессы вызывает серьёзные опасения. Согласно ряду исследований, существует связь между воздействием ЭМП и нарушением баланса аминокислотных нейромедиаторов как у взрослых, так и у молодых крыс, а также у человека. В экспериментах на эмбрионах крыс показано, что кратковременное хроническое воздействие сигналов мобильной связи может вызывать повышение концентраций норадреналина и дофамина, тогда как более длительное воздействие, напротив, приводит к их снижению.

Кроме того, были зафиксированы изменения в уровнях нейромедиаторов в гипоталамусе, таламусе и стриатуме как при кратковременном, так и при длительном облучении. Воздействие ЭМП также может изменять корковую возбудимость, что сопровождается нарушением баланса аминокислотных медиаторов в коре головного мозга, что, вероятно, лежит в основе наблюдаемых поведенческих нарушений у экспериментальных животных [1–2].

С учётом того, что подростковый возраст является критическим для формирования нейрональных связей и когнитивных функций, подобные нейрохимические изменения могут иметь долгосрочные последствия для психоэмоционального состояния. Это подчёркивает необходимость разработки профилактических мер и рекомендаций по ограничению воздействия ЭМП на подростков с учетом их биологической обоснованности.

Цель. исследовать содержание основных нейромедиаторов в ткани префронтальной коры головного мозга у крыс-самцов, подвергшихся хроническому воздействию электромагнитного поля радиочастотного диапазона на ранних этапах постнатального развития.

Материалы и методы. Исследования выполнены на 70 белых крысах самцах линии Вистар. Все животные были разделены на две группы: 1. Контроль (n=35) — животные, не подвергавшиеся воздействию ЭМП; 2. Wi-Fi (n=35) — животные, подвергавшиеся воздействию ЭМП устройства Wi-Fi. Воздействие ЭМП на организм животных начали с 30-дневного возраста. Выведение из зоны облучения и анализ содержания медиаторов моноаминергических (дофамин- и серотонинергических) систем, их предшественников и метаболитов в ПФК проводили по истечении 7, 14, 30, 60 и 90 суток воздействия.

Источником электромагнитного поля (ЭМП) являлся маршрутизатор Netis WF2780. Облучение проводилось на несущей частоте 2,45 ГГц, 24 час/день. Расстояние от источника излучения (роутер) до клетки составляло 20 см. Роутер размещался в центральной части рабочей зоны (1,2×0,8 м), в которой находились 4 пластиковые клетки с животными.

Во время облучения осуществлялся дистанционный контроль наличия электромагнитного поля. Плотность потока электромагнитной энергии (ППЭ) в клетке измерялась прибором ПЗ-41 (СКБ Питон, РФ) в 8 точках на расстоянии 20-ти см от источника облучения и не превышало 10,20 мкВт/см², составляя в среднем — 0,79±0,37 мкВт/см².

По окончании ЭМ воздействия животных контрольной (n=7) и экспериментальной (n=7) групп соответствующего возраста наркотизировали (эфирный наркоз), подвергали декапитации, выделяли префронтальную кору больших полушарий головного мозга с немедленной её глубокой заморозкой в жидком азоте.

Выделенный биологический материал гомогенизировали в 10-кратном объеме экстракционной среды, содержащей 0,2М HClO₄, 10 мг Na₂S₂O₅, 10 мг ЭДТА, 100 мкМ/л C₈H₈O₄, 212 мл H₂O. Гомогенизацию проводили на холоде, с помощью ультразвукового гомогенизатора Biologics Model 3000. Полученную суспензию центрифугировали в течение 15 мин. при 12000 g. Затем отбирали супернатант и хранили при –80°C для последующей процедуры.

Разделение биогенных аминов и родственных соединений проводили по модифицированному методу, описанному в статье Е.М. Дорошенко и соавт. (2020) с помощью ион-парной высокоэффективной жидкостной хроматографией на оборудовании системы Agilent серии 1100 с детектированием по флуоресценции. Внутренним стандартом являлась 100 мкМ/л C₈H₈O₄ — ванилиновая кислота. Подвижной фазой являлся буферный раствор, содержащий 0,1 М

дигидрофосфата натрия, 0,021 М уксусной кислоты, 0,055 г гидрата октансульфоната натрия, 0,025 г EDTA, 5,82% (об.) ацетонитрила, 500 мл деионизированной воды, профильтрованный через нейлоновый фильтр с размером пор 0,22 мкм. Используемая колонка Boltimate C18 2,1×150 мм; 2.7-Micron (Welch Technologies) термостатировалась при 28°C. Скорость потока 0,2 мл/мин. Детектирование: длина волны возбуждения 280 нм, излучения — 340 нм.

Смесь стандартов, используемые для калибровки, обрабатывали, как описано выше, и включала: тирозин (Tyr), 3,4-диоксифенилаланин (DOPA), дофамин (DA), адреналин (E), норадреналин (NE), 3,4-диоксифенилуксусную кислоту (DOPAC), 3-метокситирамин (3-МТ), 3-метокси-4-гидроксифенилгликоль (МНРГ), гомованилиновую кислоту (HVA), триптофан (Trp), 5-окситриптофан (5-НТР), серотонин (5-НТ) и 5-оксииндолуксусную кислоту (5-НИАА) в концентрациях 1 мкмоль/л.

Идентификация определяемых соединений и количественная обработка хроматограмм проводилась с использованием метода внутреннего стандарта, с помощью программы ChemStation версии В.04.03

Результаты и обсуждение. Развитие мозга зависит от точной регуляции нейрохимических процессов, опосредующих нейронную коммуникацию и формирование цепей. 5-НТ — один из ключевых нейромодуляторов, уровень которого в коре головного мозга достигает пика на ранних этапах онтогенеза: в течение двух лет после рождения у человека и в первую постнатальную неделю у грызунов. Дисбаланс 5-НТ в ходе развития мозга ассоциирован с повышенным риском расстройств, таких как расстройство аутистического спектра, и длительными поведенческими дефицитами.

Анализ экспериментальных данных о содержании биогенных моноаминов и родственных соединений у животных, подвергнутых хроническому воздействию ЭМП от устройства беспроводной передачи данных в течение 7 суток, выявил снижение уровня МНРГ в ПФК на 22,3% по сравнению с контролем.

У животных, подвергавшихся воздействию ЭМП, в ПФК зафиксировано снижение уровня Trp на 29,4%, промежуточного метаболита 5-НТР на 33,3% и самого 5-НТ на 18,8%. Также отмечено близкое к статистически значимому падение концентрации 5-НИАА на 20,1%. Эти данные указывают на подавление как синтетических процессов (снижение Trp и 5-НТР), так и замедление катаболизма 5-НТ (уменьшение 5-НИАА), что может быть компенсаторной реакцией организма для сохранения уровня нейромедиатора.

Анализ экспериментальных данных о содержании моноаминов в ПФК у животных, подвергнутых длительной экспозиции ЭМП от устройства Wi-Fi на протяжении 14 суток, выявил повышение концентрации конечных метаболитов DA и 5-НТ. Содержание DOPAC повышено в сравнении с контролем на 118,2% при росте концентрации 5-НИАА на 14,9%. Эти изменения могут отражать компенсаторное усиление катаболизма DA и 5-НТ в ответ на их избыточное накопление, вызванное дисбалансом нейромедиаторных систем ПФК. Подобный дисбаланс опасен для нормального развития ЦНС, так как ПФК критически важна для интеграции высших когнитивных функций

После 60-суточной экспозиции животных ЭМП от оборудования Wi-Fi зафиксировано повышение уровня 5-НТ в ПФК на 13,2% в сравнении с контролем. Также отмечена близкая к статистически значимой тенденция к снижению уровня Tyr и DOPA на 22,4% и 15,4% соответственно.

В подростковом возрасте дофаминергическая система ПФК находится в фазе активного созревания, что определяет её уникальные особенности. Мезокортикальный путь (от вентральной области покрышки к ПФК) созревает позже, чем мезолимбический (связанный с системой вознаграждения), что создаёт дисбаланс между импульсивностью и когнитивным контролем [4]. Плотность D1-рецепторов в ПФК достигает пика к 15–17 годам, тогда как D2-рецепторы стабилизируются позднее в связи с чем подростки демонстрируют повышенную реактивность D1-

рецепторов к дофамину, что усиливает эмоциональные реакции и снижает устойчивость внимания. Также подростковый период характеризуется сниженным по сравнению со взрослыми уровнем белка транспортера дофамина в ПФК, что замедляет обратный захват дофамина и продлевает его действие в синаптической щели повышая пластичность нейронных сетей, но увеличивая уязвимость к стрессу.

Анализ экспериментальных данных о содержании нейромедиаторов в ПФК у животных находившихся в условиях хронического воздействия ЭМП от оборудования WiFi на протяжении 90-та суток выявил изменения в дофаминергической системе ПФК. Зафиксировано снижение содержания Туг на 27,7% при увеличении содержания DA на 300%.

Тирозин — незаменимая аминокислота, поступающая в мозг через гематоэнцефалический барьер (ГЭБ). Его дефицит обычно ограничивает синтез DA, так как тирозингидроксилаза (ТН) катализирует превращение Туг в DOPA — ключевой этап биосинтеза DA. Однако ввиду значительного роста содержания DA при неизменном уровне DOPA возможным объяснением выявленных изменений может являться нарушение обратного захвата DA обусловленное снижением экспрессии транспортера DA (DAT) что продлевает его присутствие в синаптической щели [5].

Выявленные изменения содержания нейроактивных веществ в ПФК молодых крыс-самцов позволяют рассматривать ее в качестве критической по отношению к воздействию ЭМП структуры головного мозга. Кроме того, полученные результаты указывают на высокую восприимчивость нейромедиаторных систем структур головного мозга подростков даже при плотностях потока электромагнитной энергии ниже установленных предельных значений что может явиться фактором, опосредующим нарушения нейропсихического развития. Это в свою очередь в свете активного развития технологий указывает на острую необходимость разработки профилактических мероприятий и ужесточения гигиенических нормативов для снижения электромагнитной нагрузки, воздействующей на организм лиц подросткового возраста.

Заключение. Таким образом, показано, что хроническое воздействие низкоинтенсивного электромагнитного поля устройств беспроводной передачи данных (2,45+5 ГГц, ППЭСр. = 0,79 мкВт/см²) способно приводить к изменению фонда нейроактивных соединений в префронтальной коре молодых крыс-самцов. Полученные данные имеют важное теоретическое и прикладное значение и могут являться биологическим обоснованием усиления профилактических мероприятий по минимизации времени взаимодействия подростков с устройствами беспроводной передачи данных.

Список литературы

- 1 Radiofrequency electromagnetic radiation-induced behavioral changes and their possible basis / S.N. Narayanan, R. Jetti, K.K. Kesari [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26. P. 1–18.
- 2 Van den Bosch M. Environmental exposures and depression: biological mechanisms and epidemiological evidence / M. van den Bosch, A. Meyer-Lindenberg // *Annual review of public health*. 2019. Vol. 40. P. 239–259.
- 3 Дорошенко Е.М., Лелевич В.В. Биогенные моноамины, их предшественники и метаболиты в мозге крыс при экспериментальной недостаточности кровообращения / Е.М. Дорошенко, В.В. Лелевич // *Нейрохимия*. 2020. Т. 37. №. 3. С. 240–248.
- 4 Casey B.J. The adolescent brain / B.J. Casey, S. Getz, A. Galvan // *Developmental Review*. 2008. Vol. 28. № 1. P. 62–77.
- 5 Andersen S.L. Stress, sensitive periods and maturational events in adolescent depression / S.L. Andersen, M.H. Teicher // *Trends in Neurosciences*. 2008. Vol. 31. № 4. P. 183–191.

Сведения об авторах

Щемелев Владислав Михайлович — научный сотрудник лаборатории устойчивости биологических систем, Институт радиобиологии НАН Беларуси, Гомель, Республика Беларусь, e-mail: shemelev_vlad@mail.ru;

Чуешова Наталья Владимировна — к.б.н., доцент, заведующий лабораторией устойчивости биологических систем, Институт радиобиологии НАН Беларуси, Гомель, Республика Беларусь, e-mail: natalya-chueshova@tut.by;

Новицкая Снежана Петровна — младший научный сотрудник лаборатории устойчивости биологических систем, Институт радиобиологии НАН Беларуси, Гомель, Республика Беларусь, e-mail: ravkovskaya.sn@mail.ru;

Бортновский Владимир Николаевич — к.м.н., доцент, заведующий кафедрой экологической и профилактической медицины, Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Республика Беларусь, e-mail: kafog2@mail.ru.