

Обзорная статья

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ СОТОВОЙ СВЯЗИ КАК ФАКТОРЫ РИСКА НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЦЕНТРАЛЬНУЮ НЕРВНУЮ СИСТЕМУ ДЕТЕЙ И ПОДРОСТКОВ (ОБЗОР). ЧАСТЬ 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИИ И СЕНСОМОТОРНЫХ РЕАКЦИЙ

Н.И. Хорсева¹, П.Е. Григорьев²

¹Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Российская Федерация, 119334, г. Москва, ул. Косыгина, 4

²Севастопольский государственный университет, Российская Федерация, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Исследования возможных последствий воздействия электромагнитного поля радиочастотного диапазона (ЭМП РЧ) актуальны, поскольку современное подрастающее поколение стало активными пользователями новейших технологий. Дети и подростки особенно уязвимы к факторам электромагнитной природы, поэтому необходимо понимать последствия такого воздействия на организм.

Центральная нервная система (ЦНС) является одной из основных «мишеней» воздействия ЭМП РЧ. В большинстве случаев пользователи подносят мобильные телефоны (МТ) к голове, подвергая свой головной мозг непосредственному воздействию ЭМП РЧ.

Как показал анализ литературных данных, количество исследований в данной области невелико, тем не менее предлагаемые варианты оценки воздействия ЭМП РЧ на организм детей и подростков весьма разнообразны.

В данной части обзора рассмотрены различные виды моделирования. Это не только фантомные, воксельные модели, метод конечных разностей, но и новые подходы, такие как матрицы распределения, моделирование Монте-Карло и интегрированная радиочастотная модель, основанная на результатах магнитно-резонансной томографии головного мозга и другие методы.

Представлены результаты исследования электроэнцефалографии при воздействии ЭМП РЧ устройств мобильной связи. Полученные результаты противоречивы, однако в большинстве случаев выявляются изменения биологической активности мозга, в частности снижение альфа-ритма.

Поскольку характеристики сенсомоторных реакций достаточно четко отражают силовые отношения в коре головного мозга, сделан анализ изменений параметров простой слухомоторной и зрительно-моторной реакций у детей и подростков – пользователей мобильной связи. Кроме того, представлены результаты изменений работоспособности, утомления, длительности индивидуальной минуты и воспроизведения заданного ритма.

Ключевые слова: электромагнитное поле радиочастотного диапазона, центральная нервная система, моделирование, электроэнцефалография, психофизиологические показатели, дети, подростки, фактор риска.

В настоящее время электромагнитные поля радиочастотного диапазона (ЭМП РЧ) уже являются постоянным источником техногенного загрязнения окружающей среды. В первую очередь к ним относятся излучения базовых станций мобильной связи. Они генерируют ЭМП РЧ круглосуточно, практически в течение всей жизни подвергают облучению все население, включая детей.

Кроме них, источниками ЭМП РЧ являются источники Wi-Fi, а также множества разновидностей гаджетов, к которым присоединяются технологии 5G. Даже если считать, что эти излучения имеют «меньшую интенсивность», на население, включая детей и подростков, их совокупное воздействие может индуцировать различные эффекты, которые трудно предсказать и оценить.

© Хорсева Н.И., Григорьев П.Е., 2024

Хорсева Наталия Игоревна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-химических проблем радиобиологии и экологии (e-mail: sheridan1957@mail.ru; тел.: 8 (905) 782-87-17; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3444-0050>).

Григорьев Павел Евгеньевич – доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры психологии (e-mail: grigorievpe@cfuv.ru; тел.: 8 (978) 767-22-10; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7390-9109>).

В настоящее время накоплены данные о негативном влиянии ЭМП РЧ на все уровни организации – от молекулярного до целого организма. Но особое место в этом ряду исследований занимает оценка данного воздействия на детей и подростков как наиболее уязвимых к любым внешним воздействиям. Безусловно, в первую очередь, это касается их центральной нервной системы (ЦНС), и, несмотря на споры в этом вопросе [1], широкое распространение беспроводных устройств уже приводит к негативным последствиям [2–4].

В настоящее время изучение воздействия ЭМП РЧ на ЦНС детей и подростков ведется по нескольким направлениям: моделирование, через оценку параметров сенсомоторных реакций, показателей электроэнцефалографии (ЭЭГ) и когнитивных функций. Это связано с тем, что при использовании мобильных телефонов (МТ) дети и подростки подносят их к голове, и, следовательно, преимущественно исследования и направлены на выявление возможных негативных воздействий в первую очередь на ЦНС, и основной «мишенью» анализа является головной мозг. А если учесть, что активными пользователями гаджетов уже являются полугодовалые дети [5, 6], то оценка эффектов воздействия ЭМП РЧ на подрастающее поколение становится чрезвычайно актуальной.

Моделирование воздействия ЭМП РЧ на детей и подростков. Исходя из анализа имеющихся литературных данных, можно видеть, что число исследований в области моделирования воздействия ЭМП РЧ на ЦНС именно детей и подростков невелико, но их результаты весьма разнообразны.

Фантомные модели использовали P. Dimbylow et al. (модели 9-месячного, 11- и 14-летнего ребенка мужского пола и 4- и 8-летнего ребенка женского пола) [7] и В.В. Beard и W. Kainz (модель головы 7-летнего ребенка) [8]; воксельные модели – P. Dimbylow et al. (новорожденный женского пола) [9], R.P. Findlay et al. (ребенок 10 лет) [10]. Метод конечных разностей активно применялся в циклах работ О.Р. Gandhi et al. [11–14] и J. Keshvari et al. (модели 3 и 7 лет) [15, 16], исследованиях J. Wiart (модели 5 и 8 лет) [17, 18], а также в работе M.S. Morelli et al. (ребенок мужского и женского пола) [19] для оценки поглощения радиочастотной (РЧ) энергии с частотой 28 ГГц в отношении использования смартфонов / планшетов.

Существуют и новые подходы к моделированию: матрицы распределения [20], запатентованные в 2017 г.¹; моделирование Монте-Карло при анализе неопределенности использования мобильного телефона [21]; интегрированная радиочастотная модель, основанная на объемах мозга, полученных при ска-

нировании магнитно-резонансной томографии [22], через расчеты дозового моделирования [23–25], а также модель приповерхностной ткани, освещенной плоской волной, для оценки воздействия миллиметрового диапазона (технология 5G) [26].

Как видно из представленных данных, число исследований в области моделирования воздействия ЭМП РЧ с указанием возрастных особенностей невелико. Тем не менее полученные результаты дают основание для более пристального внимания к нагрузкам от электромагнитного излучения, которые получают дети и подростки, использующие современные гаджеты.

Безусловно, существуют инструментальные методы оценки воздействия ЭМП РЧ, но их анализ не входит в задачи данного обзора.

Параметры электроэнцефалограммы (ЭЭГ) у детей и подростков. Известно, что показатели ЭЭГ используются для изучения морфофункционального созревания мозга и его отдельных систем, поэтому регистрация возможных изменений параметров ЭЭГ у детей и подростков при воздействии ЭМП РЧ весьма актуальна. Однако, как показал анализ литературы, эти исследования немногочисленны. В частности, исследование воздействия 2G и 3G на респондентов разных возрастных групп показало, что увеличение амплитуды альфа-ритма было зарегистрировано только в группе подростков при действии 2G [27], а при синхронной регистрации ЭЭГ и когнитивных функций – снижение точности выполнения задания, которое у подростков было более выражено при действии 3G, по сравнению с 2G [28].

В цикле работ О.А. Вятлевой с соавт. при регистрации изменений ЭЭГ в группе детей 6–13 лет, даже при кратковременном (3 мин) воздействии ЭМП РЧ МТ, наблюдается значимый ЭЭГ-эффект в виде снижения абсолютной мощности альфа-ритма. Однако выраженность этого эффекта, как показали исследования, зависела от дозы ЭМП РЧ МТ и возраста респондентов. Так, эффект на ЭЭГ от МТ с плотностью потока энергии (ППЭ) около 100 мкВт/см² вызывал снижение альфа-ритма у всех респондентов, был билатеральным с ипсилатеральным преобладанием (со стороны источника излучения), что, как полагают авторы, свидетельствует о влиянии данной интенсивности излучения не только на поверхностные корковые зоны ипсилатерального полушария, но и на глубокие синхронизирующие структуры мозга. Менее интенсивный уровень ППЭ (менее 1 мкВт/см²) вызывал эффект на ЭЭГ лишь в группе детей 6–10 лет, имел локальный ипсилатеральный характер, что свидетельствует о воздействии излучения данной интенсивности на поверхностные отделы коры ипсилатерального полушария [29]. Кроме того, у ак-

¹ Способ измерения плотности потока энергии электромагнитного излучения мобильного телефона: патент RU 2 626 049 C1 / А.В. Бабалян, А.О. Карелин, Р.Г. Старун // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент). – М.: ФИПС, 2017. – Бюлл. 21. – 11 с.

тивных пользователей МТ (максимальная ППЭ более 100 мкВт/см²) вызывает не только угнетающее влияние на биоэлектрическую активность, связанную с глубокими отделами мозга, но и регистрируется ослабление генерализованной пароксизмальной активности с повышением активности высших симпатических центров регуляции сердечного ритма [30]. Также установлена связь между режимом пользования МТ, изменениями ЭЭГ, полученной суммарной дозой электромагнитного излучения и параметрами кратковременной слухоречевой памяти [31].

Однако существуют исследования, где никаких изменений со стороны параметров ЭЭГ и когнитивных процессов у подростков в возрасте 11–13 лет выявлено не было [32]. Эти выводы были сделаны также на основании результатов кратковременного воздействия ЭМП РЧ. Кроме того, позже этот же автор, но с другими соавторами, высказал мнение, что негативное влияние на когнитивные функции и показатели ЭЭГ соответствует исключительно тепловому механизму воздействия [33].

Тем не менее среди этих работ следует обратить внимание на исследование А.В. Гилева и О.Б. Гилевой [34], в котором проведено сравнение показателей ЭЭГ с одновременным решением арифметической, вербально-логической задач и задачи на пространственное мышление у 12-летних подростков, обучающихся в цифровой школе и в школе с преобладанием традиционных образовательных технологий. Так, у учеников традиционной школы при предъявлении экспериментальных задач происходит выраженное и правильно распределенное по регионам коры повышение биоэлектрической активности в тета- и бета-диапазонах, а у обучающихся в цифровой школе подъем мощности тета-ритма наблюдается только в полусных отведениях. Это может свидетельствовать о дефицитности механизмов внимания, памяти, мотивации и целенаправленного поведения, которые выразились в низкой эффективности решения экспериментальных задач.

Поскольку цифровая школа подразумевает использование большого числа электронных средств обучения, которые, в свою очередь, являются источниками ЭМП РЧ, не исключено, что и общий электромагнитный фон при этих условиях обучения будет выше, чем при использовании традиционных форм обучения, и, как следствие, может привести к изменению параметров ЭЭГ и уровня когнитивных процессов.

Наряду с регистрацией параметров ЭЭГ существуют более простые методы, позволяющие дать оценку функционального состояния ЦНС. К ним можно отнести определение времени простых сенсомоторных реакций, которые часто используются в психофизиологических исследованиях, поскольку

достаточно четко отражают силовые отношения в коре головного мозга.

Сенсомоторные реакции и другие психофизиологические показатели как критерии оценки влияния ЭМП РЧ на ЦНС детей и подростков. Анализ возможности применения характеристик сенсомоторных реакций в качестве индикатора функционального состояния ЦНС изложен в обзорах С.В. Шутовой с соавт. [35], А.Н. Нехорошковой [36] с соавт. и исследовании S.S. Geertsen et al. [37].

Однако параметры сенсомоторных реакций для оценки воздействия ЭМП РЧ мобильных телефонов на ЦНС детей и подростков используются крайне редко.

Тем не менее наши исследования, которые проводятся с 2006 г. по настоящее время в рамках мониторинга психофизиологических показателей детей и подростков – пользователей мобильной связью, позволили установить закономерности изменения параметров сенсомоторных реакций у детей и подростков – пользователей мобильной связью.

Эффект увеличения времени простой слухомоторной реакции как при стерео-, так и при монопредъявлении звукового сигнала проявляется только при достижении определенного суммарного времени пользования ребенком мобильным телефоном: 360 мин при условии, что ребенок начал пользоваться мобильным телефоном в 7-летнем возрасте, и от 750 мин для детей в возрасте 9 лет. Впервые установлено, что у всех детей-пользователей МТ увеличено число нарушений фонематического восприятия (неправильное восприятие сходного звучания или сходства в артикуляции речевых звуков, проявляющееся в передаче / замене букв, перестановке слогов, неправильном чтении или произнесении слов и т.д.). И в 79,3 % случаев зарегистрирован контралатеральный эффект (на стороне, противоположной воздействию ЭМП РЧ мобильного телефона) [3]. Однако проявление контралатерального эффекта уменьшается с возрастом, а ипсилатеральный эффект увеличивается, но этот процесс не является линейным: величина трендов изменений параметров простой слухомоторной реакции может служить прогностическим критерием, изменяя время реакции на звуковой сигнал у пользователей мобильной связью², а особенности проявления контралатерального и ипсилатерального эффекта для каждой возрастной группы зависят как от времени ежедневного использования мобильного телефона, так и от общей продолжительности его использования [38].

Кроме того, впервые показана связь показателей простой слухомоторной реакции с параметрами воспроизведения заданного ритма в трех частотных диапазонах – 1000; 750; 1500 мс – и длительностью индивидуальной минуты [39]. Эффекты увеличения

² Режим пользования мобильным телефоном и индивидуальные особенности проявления ипсилатеральных и контралатеральных эффектов простой слухомоторной реакции у детей. Пилотное мониторинговое исследование / Н.И. Хорсева, А.А. Скиданова, П.Е. Григорьев, Н.Ю. Шульженко // Крымский журнал экспериментальной и клинической медицины. – 2018. – Т. 8, № 1. – С. 93–99.

времени реакции у детей и подростков, пользователей мобильной связью, зарегистрированы и для зрительно-моторной реакции³.

При сравнении динамики изменений слухо- и зрительно-моторных реакций было установлено, что более «чувствительным» показателем к воздействию излучения мобильного телефона можно считать время реакции на звуковой сигнал, т.е. показатели простой слухомоторной реакции. В частности, суммарное время пользования МТ для детей 7-летнего возраста, при котором выявляется увеличение времени реакции на световой сигнал, составляет 730 мин для зрительно-моторной реакции и 360 мин для простой слухомоторной реакции [3].

Кроме сенсомоторных реакций, для оценки функционального состояния ЦНС используются такие показатели, как утомляемость (через показатель мышечного напряжения, определяемый с помощью тремометрии) и работоспособность (через показатели теппинг-теста). Установлено, что для детей и подростков, пользователей мобильной связью, было зарегистрировано увеличение показателя утомляемости на фоне снижения параметра работоспособности [3].

Следует особо отметить, что сенсомоторные реакции используются как опосредованные характеристики когнитивных процессов. Это связано с тем, что показатели «время реакции» и «точность реак-

ции» служат коррелятами компонента ЭЭГ головного мозга Р2 – когнитивных вызванных потенциалов – и указывают на степень зрелости процессов восприятия ребенка [40], которые зависят от пола [41]. И, как ранее подчеркивалось в обзоре А.Н. Нехорошковой с соавт. [36], методы измерения показателей сенсомоторных реакций весьма актуальны для психофизиологического изучения как когнитивной, так и эмоционально-личностной сферы человека.

Выводы. Проведенный анализ результатов исследований влияния ЭМП РЧ на ЦНС детей и подростков показал достаточно широкий диапазон подходов в регистрации данного влияния: от моделирования воздействия до изменений параметров ЭЭГ, сенсомоторных реакций, работоспособности, утомляемости.

Полученные результаты указывают на негативное воздействие на ЦНС подрастающего поколения, что в очередной раз подчеркивает необходимость разработки новых подходов к регламентации использования современных гаджетов, а также электромагнитной обстановки, в частности, в период обучения.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН (44.1 гос. № темы: 0084-2019-004).

Конфликт интересов. Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Controversies on electromagnetic field exposure and the nervous systems of children / A.A. Warille, M.E. Onger, A.P. Turkmen, Ö.G. Deniz, G. Altun, K.K. Yurt, B.Z. Altunkaynak, S. Kaplan // *Histol. Histopathol.* – 2016. – Vol. 31, № 5. – P. 461–468. DOI: 10.14670/HH-11-707
2. Григорьев Ю.Г., Григорьев О.А. Сотовая связь и здоровье: электромагнитная обстановка, радиобиологические и гигиенические проблемы, прогноз опасности. – М.: Экономика, 2016. – 574 с.
3. Григорьев Ю.Г., Хорсева, Н.И. Мобильная связь и здоровье детей. Оценка опасности применения мобильной связи детьми и подростками. Рекомендации детям и родителям. – М.: Экономика, 2014. – 230 с.
4. Grigoriev Y.G., Khorseva N.I. A Longitudinal Study of Psychophysiological Indicators in Pupils Users of Mobile Communications in Russia (2006–2017) // In book: *Mobile Communications and Public Health* / ed. by M. Markov. – Boca Raton: CRC Press, 2018. – P. 237–253. DOI: 10.1201/b22486-10
5. Exposure and Use of Mobile Media Devices by Young Children / H.K. Kabali, M.M. Irigoyen, R. Nunez-Davis, J.G. Budacki, S.H. Mohanty, K.P. Leister, R.L. Bonner Jr. // *Pediatrics.* – 2015. – Vol. 136, № 6. – P. 1044–1050. DOI: 10.1542/peds.2015-2151
6. Exposure to and use of mobile devices in children aged 1–60 months / A.O. Kılıç, E. Sari, H. Yucel, M.M. Oğuz, E. Polat, E.A. Acoglu, S. Senel // *Eur. J. Pediatr.* – 2019. – Vol. 178, № 2. – P. 221–227. DOI: 10.1007/s00431-018-3284-x
7. Dimbylow P., Bolch W. Whole-body-averaged SAR from 50 MHz to 4 GHz in the University of Florida child voxel phantoms // *Phys. Med. Biol.* – 2007. – Vol. 52, № 22. – P. 6639–6649. DOI: 10.1088/0031-9155/52/22/006
8. Beard B.B., Kainz W. Review and standardization of cell phone exposure calculations using the SAM phantom and anatomically correct head models Meta-Analysis // *Biomed. Eng. Online.* – 2004. – Vol. 3, № 1. – P. 34. DOI: 10.1186/1475-925X-3-34
9. Dimbylow P., Bolch W., Lee C. SAR calculations from 20 MHz to 6 GHz in the University of Florida newborn voxel phantom and their implications for dosimetry // *Phys. Med. Biol.* – 2010. – Vol. 55, № 5. – P. 1519–1530. DOI: 10.1088/0031-9155/55/5/017
10. Findlay R.P., Dimbylow P.J. SAR in a child voxel phantom from exposure to wireless computer networks (Wi-Fi) // *Phys. Med. Biol.* – 2010. – Vol. 55, № 15. – P. N405–N411. DOI: 10.1088/0031-9155/55/15/N01
11. Gandhi O.P., Kang G. Calculation of induced current densities for humans by magnetic fields from electronic article surveillance devices // *Phys. Med. Biol.* – 2001. – Vol. 46, № 11. – P. 2759–2771. DOI: 10.1088/0031-9155/46/11/301
12. Gandhi O.P. Electromagnetic fields: human safety issues // *Annu. Rev. Biomed. Eng.* – 2002. – Vol. 4. – P. 211–234. DOI: 10.1146/annurev.bioeng.4.020702.153447

³ Хорсева Н.И., Григорьев Ю.Г., Горбунова Н.В. Изменение параметров зрительного анализатора детей-пользователей мобильной связью: лонгитюдное исследование // *Радиационная биология. Радиоэкология.* – 2014. – Т. 54, № 1. – С. 62–71. DOI: 10.7868/S0869803114010081

13. Exposure limits: the underestimation of absorbed cell phone radiation, especially in children / O.P. Gandhi, L.L. Morgan, A.A. de Salles, Y.-Y. Han, R.B. Herberman, D.L. Davis // *Electromagn. Biol. Med.* – 2012. – Vol. 31, № 1. – P. 34–51. DOI: 10.3109/15368378.2011.622827
14. Gandhi O.P., Kang G. Some present problems and a proposed experimental phantom for SAR compliance testing of cellular telephones at 835 and 1900 MHz // *Phys. Med. Biol.* – 2002. – Vol. 47, № 9. – P. 1501–1518. DOI: 10.1088/0031-9155/47/9/306
15. Keshvari J., Lang S. Comparison of radio frequency energy absorption in ear and eye region of children and adults at 900, 1800 and 2450 MHz // *Phys. Med. Biol.* – 2005. – Vol. 50, № 18. – P. 4355–4369. DOI: 10.1088/0031-9155/50/18/008
16. Keshvari J., Keshvari R., Lang S. The effect of increase in dielectric values on specific absorption rate (SAR) in eye and head tissues following 900, 1800 and 2450 MHz radio frequency (RF) exposure // *Phys. Med. Biol.* – 2006. – Vol. 51, № 6. – P. 1463–1477. DOI: 10.1088/0031-9155/51/6/007
17. Modeling of RF head exposure in children / J. Wiart, A. Hadjem, N. Gadi, I. Bloch, M.F. Wong, A. Pradier, D. Lautru, V.F. Hanna, C. Dale // *Bioelectromagnetics.* – 2005. – Suppl. 7. – P. S19–S30. DOI: 10.1002/bem.20155
18. Analysis of RF exposure in the head tissues of children and adults / J. Wiart, A. Hadjem, M.F. Wong, I. Bloch // *Phys. Med. Biol.* – 2008. – Vol. 53, № 13. – P. 3681–3695. DOI: 10.1088/0031-9155/53/13/019
19. Numerical Analysis of Electromagnetic Field Exposure from 5G Mobile Communications at 28 GHz in Adults and Children Users for Real-World Exposure Scenarios / M.S. Morelli, S. Gallucci, B. Siervo, V. Hartwig // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* – 2021. – Vol. 18, № 3. – P. 1073. DOI: 10.3390/ijerph18031073
20. Оценка интенсивности электромагнитного излучения мобильных телефонов, воздействующего на голову человека / Н.И. Вторникова, А.В. Бабалян, А.О. Карелин, В.А. Иванов // *Ученые записки СПбГМУ им. акад. И.П. Павлова.* – 2017. – Т. 24, № 4. – С. 75–81. DOI: 10.24884/1607-4181-2017-24-4-75-81
21. Uncertainty Analysis of Mobile Phone Use and Its Effect on Cognitive Function: The Application of Monte Carlo Simulation in a Cohort of Australian Primary School Children / C. Brzozek, K.K. Benke, B.M. Zeleke, R.J. Croft, A. Dalecki, C. Dimitriadis, J. Kaufman, M.R. Sim [et al.] // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* – 2019. – Vol. 16, № 13. – P. 2428. DOI: 10.3390/ijerph16132428
22. Estimated whole-brain and lobe-specific radiofrequency electromagnetic fields doses and brain volumes in preadolescents / A. Cabré-Riera, H. El Marroun, R. Muetzel, L. van Wel, I. Liorni, A. Thielens, L.E. Birks, L. Pierotti [et al.] // *Environ. Int.* – 2020. – Vol. 142. – P. 105808. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105808
23. Radiofrequency electromagnetic fields from mobile communication: Description of modeled dose in brain regions and the body in European children and adolescents / L.E. Birks, L. van Wel, I. Liorni, L. Pierotti, M. Guxens, A. Huss, M. Foerster, M. Capstick [et al.] // *Environ. Res.* – 2021. – Vol. 193. – P. 110505. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110505
24. Modelling of daily radiofrequency electromagnetic field dose for a prospective adolescent cohort / M. Eeftens, C. Shen, J. Sönksen, C. Schmutz, L. van Wel, I. Liorni, R. Vermeulen, E. Cardis [et al.] // *Environ. Int.* – 2023. – Vol. 172. – P. 107737. DOI: 10.1016/j.envint.2023.107737
25. Association between estimated whole-brain radiofrequency electromagnetic fields dose and cognitive function in preadolescents and adolescents / A. Cabré-Riera, L. van Wel, I. Liorni, A. Thielens, L.E. Birks, L. Pierotti, W. Joseph, L. González-Safont [et al.] // *Int. J. Hyg. Environ. Health.* – 2021. – Vol. 231. – P. 113659. DOI: 10.1016/j.ijheh.2020.113659
26. Sacco G., Pisa S., Zhadobov M. Age-dependence of electromagnetic power and heat deposition in near-surface tissues in emerging 5G bands // *Sci. Rep.* – 2021. – Vol. 11, № 1. – P. 3983. DOI: 10.1038/s41598-021-82458-z
27. Effects of 2G and 3G mobile phones on human alpha rhythms: Resting EEG in adolescents, young adults, and the elderly / R.J. Croft, S. Leung, R.J. McKenzie, S.P. Loughran, S. Iskra, D.L. Hamblin, N.R. Cooper // *Bioelectromagnetics.* – 2010. – Vol. 31, № 6. – P. 434–444. DOI: 10.1002/bem.20583
28. Effects of 2G and 3G mobile phones on performance and electrophysiology in adolescents, young adults and older adults / S. Leung, R.J. Croft, R.J. McKenzie, S. Iskra, B. Silber, N.R. Cooper, B. O'Neill, V. Copley [et al.] // *Clin. Neurophysiol.* – 2011. – Vol. 122, № 11. – P. 2203–2216. DOI: 10.1016/j.clinph.2011.04.006
29. Вятлева О.А., Текшева Л.М., Курганский А.М. Физиолого-гигиеническая оценка влияния мобильных телефонов различной интенсивности излучения на функциональное состояние головного мозга детей и подростков методом электроэнцефалографии // *Гигиена и санитария.* – 2016. – Т. 95, № 10. – С. 965–968. DOI: 10.18821/0016-9900-2016-95-10-965-968
30. Вятлева О.А., Курганский А.М. Уровень излучения мобильных телефонов, используемых современными школьниками, и его влияние на биоэлектрическую активность мозга и вегетативную регуляцию сердечного ритма детей // *Экологические проблемы современности: выявление и предупреждение неблагоприятного воздействия антропогенно детерминированных факторов и климатических изменений на окружающую среду и здоровье населения: материалы Международного форума Научного совета Российской Федерации по экологии человека и гигиене окружающей среды.* – М., 2017. – С. 93–94.
31. Вятлева О.А. Влияние длительного использования мобильного телефона у правого уха на межполушарную асимметрию альфа-ритма и слуховую память младших школьников // *Асимметрия.* – 2019. – Т. 13, № 3. – С. 28–39. DOI: 10.25692/ASY.2019.13.3.003
32. No increased sensitivity in brain activity of adolescents exposed to mobile phone-like emissions / S.P. Loughran, D.C. Benz, M.R. Schmid, M. Murbach, N. Kuster, P. Achermann // *Clin. Neurophysiol.* – 2013. – Vol. 124, № 7. – P. 1303–1308. DOI: 10.1016/j.clinph.2013.01.010
33. Radiofrequency Electromagnetic Field Exposure and the Resting EEG: Exploring the Thermal Mechanism Hypothesis / S.P. Loughran, A. Verrender, A. Dalecki, C.A. Burdon, K. Tagami, J. Park, N.A.S. Taylor, R.J. Croft // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* – 2019. – Vol. 16, № 9. – P. 1505. DOI: 10.3390/ijerph16091505
34. Гилев А.В., Гилева О.Б. Влияние ИКТ технологий обучения на биоэлектрическую активность головного мозга школьников // *Вестник психофизиологии.* – 2022. – № 2. – С. 59–73. DOI: 10.34985/h7833-6875-6818-z
35. Шутова С.В., Муравьева И.В. Сенсомоторные реакции как характеристика функционального состояния ЦНС // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки.* – 2013. – Т. 18, № 5–3. – С. 2831–2840.

36. Нехорошкова А.Н., Грибанов А.В., Депутат И.С. Сенсомоторные реакции в психофизиологических исследованиях (обзор) // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Медико-биологические науки. – 2015. – № 1. – С. 38–48.

37. Motor Skills and Exercise Capacity Are Associated with Objective Measures of Cognitive Functions and Academic Performance in Preadolescent Children / S.S. Geertsen, R. Thomas, M.N. Larsen, I.M. Dahn, J.N. Andersen, M. Krause-Jensen, V. Korup, C.M. Nielsen [et al.] // PLoS One. – 2016. – Vol. 11, № 8. – P. e0161960. DOI: 10.1371/journal.pone.0161960

38. Режим пользования мобильным телефоном и изменения времени простой слухомоторной реакции. Возрастные особенности проявления ипсил- и контралатеральных эффектов / Н.И. Хорсева, О.Р. Аль-Курди, П.Е. Григорьев, Р.Н. Ислямов, Н.Ю. Шульженко // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2021. – Т. 24, № 1. – С. 35–41. DOI: 10.18127/j15604136-202101-05

39. Хорсева Н.И., Аль-Курди О.Р., Шульженко Н.Ю. Сенсомоторные реакции и длительность индивидуальной минуты у детей-пользователей мобильной связью // Вестник Физико-технического института Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. – 2017. – Т. 1 (67–69), № 1. – С. 66–85.

40. Калинина Л.П., Кузьмин А.Г. Взаимосвязь показателей зрительно-моторной реакции и когнитивных зрительных вызванных потенциалов у школьников-северян // Журнал медико-биологических исследований. – 2019. – Т. 7, № 4. – С. 487–490. DOI: 10.17238/issn2542-1298.2019.7.4.487

41. Козлова П.И., Джос Ю.С. Характеристика зрительных когнитивных вызванных потенциалов у школьников 13–18 лет в зависимости от пола // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки. – 2014. – № 1. – С. 64–71.

Хорсева Н.И., Григорьев П.Е. Электромагнитные поля сотовой связи как факторы риска негативного воздействия на центральную нервную систему детей и подростков (обзор). Часть 1. Моделирование. Параметры электроэнцефалографии и сенсомоторных реакций // Анализ риска здоровью. – 2024. – № 2. – С. 162–169. DOI: 10.21668/health.risk/2024.2.15

UDC 57.042+57.049+614

DOI: 10.21668/health.risk/2024.2.15.eng



Review

ELECTROMAGNETIC FIELDS OF CELLULAR COMMUNICATION AS RISK FACTORS ABLE TO PRODUCE NEGATIVE EFFECTS ON THE CENTRAL NERVOUS SYSTEM OF CHILDREN AND ADOLESCENTS (REVIEW). PART 1. MODELING. PARAMETERS OF ELECTROENCEPHALOGRAPHY AND SENSORIMOTOR REACTIONS

N.I. Khorseva¹, P.E. Grigoriev²

¹Emanuel Institute of Biochemical Physics of Russian Academy of Sciences, 4 Kosygina St., Moscow, 119334, Russian Federation

²Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation

It is quite relevant to investigate possible outcomes of exposure to radio frequency electromagnetic fields (RF EMF) since contemporary children and adolescents have become active users of the most advanced technologies. They are especially susceptible to electromagnetic factors; therefore, it is necessary to have a proper insight into outcomes of such exposures for the body.

The central nervous system (CNS) is one of the main targets under exposure to RF EMF. In most cases, users hold mobile phones close to their heads thereby directly exposing their brains to RF EMF.

As the analysis of literature data has shown, there are few studies in this area; however, proposed options for assessing the impact of RF EMF on children and adolescents are very diverse.

© Khorseva N.I., Grigoriev P.E., 2024

Natalia I. Khorseva – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Physical and Chemical Problems of Radiobiology and Ecology (e-mail: sheridan1957@mail.ru; tel.: +7 (905) 782-87-17; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3444-0050>).

Pavel E. Grigoriev – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Professor of Psychological Department (e-mail: grigorievpe@cfuv.ru; tel.: +7 (978) 767-22-10; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7390-9109>).

This part of the review focuses on various types of modeling. These are not only phantom, voxel models or the finite difference method but also new approaches such as distribution matrices, Monte Carlo simulations and an integrated radio frequency model based on the results of magnetic resonance imaging of the brain and other methods.

The review provides the results obtained by investigating encephalography under exposure to RF EMF created by mobile communication devices. They are rather contradictory; however, changes in the bioelectrical activity of the brain are detected in most cases, in particular, a decrease in the alpha rhyme.

Since the characteristics of sensorimotor reactions quite clearly reflect the power relations in the cerebral cortex, we analyzed changes in the parameters of simple auditory-motor and visual-motor reactions in children and adolescents who were mobile communication users. In addition, the review covers the results of changes in working capacity, fatigue, the duration of an individual minute and the reproduction of a given rhythm.

Keywords: radio frequency electromagnetic field, central nervous system, modeling, electroencephalography, psychophysiological indicators, children, adolescents, risk factor.

References

1. Warille A.A., Onger M.E., Turkmen A.P., Deniz Ö.G., Altun G., Yurt K.K., Altunkaynak B.Z., Kaplan S. Controversies on electromagnetic field exposure and the nervous systems of children. *Histol. Histopathol.*, 2016, vol. 31, no. 5, pp. 461–468. DOI: 10.14670/HH-11-707
2. Grigoriev Yu.G., Grigoriev O.A. Sotovaya svyaz' i zdorov'e: elektromagnitnaya obstanovka, radiobiologicheskie i gigienicheskie problemy, prognoz opasnosti [Cellular communication and health. Electromagnetic environment. Radiobiological and hygienic issues]. Moscow, Ekonomika Publ., 2016, 574 p. (in Russian).
3. Grigoriev Yu.G., Khorseva N.I. Mobil'naya svyaz' i zdorov'e detei. Otsenka opasnosti primeneniya mobil'noi svyazi det'mi i podrostkami. Rekomendatsii detyam i roditelyam [Mobile communication and children health. Assessment of the hazard of using mobile communications by children and teenagers. Recommendations for children and parents]. Moscow, Ekonomika Publ., 2014, 230 p. (in Russian).
4. Grigoriev Y.G., Khorseva N.I. A Longitudinal Study of Psychophysiological Indicators in Pupils Users of Mobile Communications in Russia (2006–2017). In book: *Mobile Communications and Public Health*; M. Markov ed. Boca Raton, CRC Press Publ., 2018, pp. 237–253. DOI: 10.1201/b22486-10
5. Kabali H.K., Irigoyen M.M., Nunez-Davis R., Budacki J.G., Mohanty S.H., Leister K.P., Bonner R.L. Jr. Exposure and Use of Mobile Media Devices by Young Children. *Pediatrics*, 2015, vol. 136, no. 6, pp. 1044–1050. DOI: 10.1542/peds.2015-2151
6. Kılıç A.O., Sari E., Yucel H., Oğuz M.M., Polat E., Acoglu E.A., Senel S. Exposure to and use of mobile devices in children aged 1–60 months. *Eur. J. Pediatr.*, 2019, vol. 178, no. 2, pp. 221–227. DOI: 10.1007/s00431-018-3284-x
7. Dimbylow P., Bolch W. Whole-body-averaged SAR from 50 MHz to 4 GHz in the University of Florida child voxel phantoms. *Phys. Med. Biol.*, 2007, vol. 52, no. 22, pp. 6639–6649. DOI: 10.1088/0031-9155/52/22/006
8. Beard B.B., Kainz W. Review and standardization of cell phone exposure calculations using the SAM phantom and anatomically correct head models Meta-Analysis. *Biomed. Eng. Online*, 2004, vol. 3, no. 1, pp. 34. DOI: 10.1186/1475-925X-3-34
9. Dimbylow P., Bolch W., Lee C. SAR calculations from 20 MHz to 6 GHz in the University of Florida newborn voxel phantom and their implications for dosimetry. *Phys. Med. Biol.*, 2010, vol. 55, no. 5, pp. 1519–1530. DOI: 10.1088/0031-9155/55/5/017
10. Findlay R.P., Dimbylow P.J. SAR in a child voxel phantom from exposure to wireless computer networks (Wi-Fi). *Phys. Med. Biol.*, 2010, vol. 55, no. 15, pp. N405–N411. DOI: 10.1088/0031-9155/55/15/N01
11. Gandhi O.P., Kang G. Calculation of induced current densities for humans by magnetic fields from electronic article surveillance devices. *Phys. Med. Biol.*, 2001, vol. 46, no. 11, pp. 2759–2771. DOI: 10.1088/0031-9155/46/11/301
12. Gandhi O.P. Electromagnetic fields: human safety issues. *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, 2002, vol. 4, pp. 211–234. DOI: 10.1146/annurev.bioeng.4.020702.153447
13. Gandhi O.P., Morgan L.L., de Salles A.A., Han Y.-Y., Herberman R.B., Davis D.L. Exposure limits: the underestimation of absorbed cell phone radiation, especially in children. *Electromagn. Biol. Med.*, 2012, vol. 31, no. 1, pp. 34–51. DOI: 10.3109/15368378.2011.622827
14. Gandhi O.P., Kang G. Some present problems and a proposed experimental phantom for SAR compliance testing of cellular telephones at 835 and 1900 MHz. *Phys. Med. Biol.*, 2002, vol. 47, no. 9, pp. 1501–1518. DOI: 10.1088/0031-9155/47/9/306
15. Keshvari J., Lang S. Comparison of radio frequency energy absorption in ear and eye region of children and adults at 900, 1800 and 2450 MHz. *Phys. Med. Biol.*, 2005, vol. 50, no. 18, pp. 4355–4369. DOI: 10.1088/0031-9155/50/18/008
16. Keshvari J., Keshvari R., Lang S. The effect of increase in dielectric values on specific absorption rate (SAR) in eye and head tissues following 900, 1800 and 2450 MHz radio frequency (RF) exposure. *Phys. Med. Biol.*, 2006, vol. 51, no. 6, pp. 1463–1477. DOI: 10.1088/0031-9155/51/6/007
17. Wiart J., Hadjem A., Gadi N., Bloch I., Wong M.F., Pradier A., Lautru D., Hanna V.F., Dale C. Modeling of RF head exposure in children. *Bioelectromagnetics*, 2005, suppl. 7, pp. S19–S30. DOI: 10.1002/bem.20155
18. Wiart J., Hadjem A., Wong M.F., Bloch I. Analysis of RF exposure in the head tissues of children and adults. *Phys. Med. Biol.*, 2008, vol. 53, no. 13, pp. 3681–3695. DOI: 10.1088/0031-9155/53/13/019
19. Morelli M.S., Gallucci S., Siervo B., Hartwig V. Numerical Analysis of Electromagnetic Field Exposure from 5G Mobile Communications at 28 GHz in Adults and Children Users for Real-World Exposure Scenarios. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2021, vol. 18, no. 3, pp. 1073. DOI: 10.3390/ijerph18031073
20. Vtomikova N.I., Babalyan A.V., Karelin A.A., Ivanov V.A. Evaluation of EMF exposure of mobile phones on human head. *Uchenye zapiski SPbGMU im. akad. I.P. Pavlova*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 75–81. DOI: 10.24884/1607-4181-2017-24-4-75-81 (in Russian).
21. Brzozek C., Benke K.K., Zeleke B.M., Croft R.J., Dalecki A., Dimitriadis C., Kaufman J., Sim M.R. [et al.]. Uncertainty Analysis of Mobile Phone Use and Its Effect on Cognitive Function: The Application of Monte Carlo Simulation in a Cohort of Australian Primary School Children. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2019, vol. 16, no. 13, pp. 2428. DOI: 10.3390/ijerph16132428

22. Cabré-Riera A., El Marroun H., Muetzel R., van Wel L., Liorni I., Thielens A., Birks L.E., Pierotti L. [et al.]. Estimated whole-brain and lobe-specific radiofrequency electromagnetic fields doses and brain volumes in preadolescents. *Environ. Int.*, 2020, vol. 142, pp. 105808. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105808
23. Birks L.E., van Wel L., Liorni I., Pierotti L., Guxens M., Huss A., Foerster M., Capstick M. [et al.]. Radiofrequency electromagnetic fields from mobile communication: Description of modeled dose in brain regions and the body in European children and adolescents. *Environ. Res.*, 2021, vol. 193, pp. 110505. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110505
24. Eeftens M., Shen C., Sönksen J., Schmutz C., van Wel L., Liorni I., Vermeulen R., Cardis E. [et al.]. Modelling of daily radiofrequency electromagnetic field dose for a prospective adolescent cohort. *Environ. Int.*, 2023, vol. 172, pp. 107737. DOI: 10.1016/j.envint.2023.107737
25. Cabré-Riera A., van Wel L., Liorni I., Thielens A., Birks L.E., Pierotti L., Joseph W., González-Safont L. [et al.]. Association between estimated whole-brain radiofrequency electromagnetic fields dose and cognitive function in preadolescents and adolescents. *Int. J. Hyg. Environ. Health*, 2021, vol. 231, pp. 113659. DOI: 10.1016/j.ijheh.2020.113659
26. Sacco G., Pisa S., Zhadobov M. Age-dependence of electromagnetic power and heat deposition in near-surface tissues in emerging 5G bands. *Sci. Rep.*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 3983. DOI: 10.1038/s41598-021-82458-z
27. Croft R.J., Leung S., McKenzie R.J., Loughran S.P., Iskra S., Hamblin D.L., Cooper N.R. Effects of 2G and 3G mobile phones on human alpha rhythms: Resting EEG in adolescents, young adults, and the elderly. *Bioelectromagnetics*, 2010, vol. 31, no. 6, pp. 434–444. DOI: 10.1002/bem.20583
28. Leung S., Croft R.J., McKenzie R.J., Iskra S., Silber B., Cooper N.R., O'Neill B., Cropley V. [et al.]. Effects of 2G and 3G mobile phones on performance and electrophysiology in adolescents, young adults and older adults. *Clin. Neurophysiol.*, 2011, vol. 122, no. 11, pp. 2203–2216. DOI: 10.1016/j.clinph.2011.04.006
29. Vyatleva O.A., Teksheva L.M., Kurgansky A.M. Physiological and hygienic assessment of the impact of mobile phones with various radiation intensity on the functional state of brain of children and adolescents according to electroencephalographic data. *Gigiena i sanitariya*, 2016, vol. 95, no. 10, pp. 965–968. DOI: 10.18821/0016-9900-2016-95-10-965-968 (in Russian).
30. Vyatleva O.A., Kurgansky A.M. Uroven' izlucheniya mobil'nykh telefonov, ispol'zuemykh sovremennymi shkol'niki, i ego vliyanie na bioelektricheskuyu aktivnost' mozga i vegetativnuyu regulyatsiyu serdechnogo ritma detei [The level of radiation from mobile phones used by modern schoolchildren and its impact on the bioelectrical activity of the brain and autonomic regulation of the heart rate of children]. *Ekologicheskie problemy sovremennosti: vyyavlenie i preduprezhdenie neblagopriyatnogo vozdeistviya antropogenno determinirovannykh faktorov i klimaticheskikh izmenenii na okruzhayushchuyu sredu i zdorov'e naseleniya: Materialy Mezhdunarodnogo Forum Nauchnogo soveta Rossiiskoi Federatsii po ekologii cheloveka i gigiene okruzhayushchei sredy*, Moscow, 2017, pp. 93–94 (in Russian).
31. Vyatleva O.A. The impact of long-term mobile phone use at the right ear on the interhemispheric asymmetry of alpha rhythm and the auditory memory of young school children. *Asimetriya*, 2019, vol. 13, no. 3, pp. 28–39. DOI: 10.25692/ASY.2019.13.3.003 (in Russian).
32. Loughran S.P., Benz D.C., Schmid M.R., Murbach M., Kuster N., Achermann P. No increased sensitivity in brain activity of adolescents exposed to mobile phone-like emissions. *Clin. Neurophysiol.*, 2013, vol. 124, no. 7, pp. 1303–1308. DOI: 10.1016/j.clinph.2013.01.010
33. Loughran S.P., Verrinder A., Dalecki A., Burdon C.A., Tagami K., Park J., Taylor N.A.S., Croft R.J. Radiofrequency Electromagnetic Field Exposure and the Resting EEG: Exploring the Thermal Mechanism Hypothesis. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2019, vol. 16, no. 9, pp. 1505. DOI: 10.3390/ijerph16091505
34. Gilev A.V., Gileva O.B. Influence of ICT learning technologies on the bioelectric activity of the brain of schoolchildren. *Vestnik psikhofiziologii*, 2022, no. 2, pp. 59–73. DOI: 10.34985/h7833-6875-6818-z (in Russian).
35. Shutova S.V., Muravyova I.V. Sensorimotor reactions as characteristics of functional state of CNS. *Vestnik tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2013, vol. 18, no. 5–3, pp. 2831–2840 (in Russian).
36. Nekhoroshkova A.N., Griбанov A.V., Deputat I.S. Sensorimotor reactions in psychophysiological studies (review). *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Seriya: Mediko-biologicheskie nauki*, 2015, no. 1, pp. 38–48 (in Russian).
37. Geertsens S.S., Thomas R., Larsen M.N., Dahn I.M., Andersen J.N., Krause-Jensen M., Korup V., Nielsen C.M. [et al.]. Motor Skills and Exercise Capacity Are Associated with Objective Measures of Cognitive Functions and Academic Performance in Preadolescent Children. *PLoS One*, 2016, vol. 11, no. 8, pp. e0161960. DOI: 10.1371/journal.pone.0161960
38. Khorseva N.I., Al'-Kudri O.R., Grigoryev P.E., Islyamov R.N., Shulzhenko N.Yu. Mode of use by mobile phone and change of time of simple audio-motor reaction for users of mobile communication. Age related features of ipsilateral and contralateral effects. *Biomeditsinskaya radioelektronika*, 2021, vol. 24, no. 1, pp. 35–41. DOI: 10.18127/j15604136-202101-05 (in Russian).
39. Khorseva N.I., Al'-Kurdi O.R., Shul'zhenko N.Yu. Sensorimotor reactions and individual minute duration of children-users of mobile communication. *Vestnik Fiziko-tehnicheskogo instituta Krymskogo federal'nogo universiteta im. V.I. Vernadskogo*, 2017, vol. 1 (67–69), no. 1, pp. 66–85 (in Russian).
40. Kalinina L.P., Kuz'min A.G. Correlation between visual-motor reaction parameters and visual event-related potentials in schoolchildren living in the north of Russia. *Zhurnal mediko-biologicheskikh issledovaniy*, 2019, vol. 7, no. 4, pp. 487–490. DOI: 10.17238/issn2542-1298.2019.7.4.487 (in Russian).
41. Kozlova P.I., Dzhos Yu.S. Sex-related characteristics of visual cognitive evoked potentials in schoolchildren aged 13–18 year. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*, 2014, no. 1, pp. 64–71 (in Russian).

Khorseva N.I., Grigoriev P.E. Electromagnetic fields of cellular communication as risk factors able to produce negative effects on the central nervous system of children and adolescents (review). Part 1. Modeling. Parameters of electroencephalography and sensorimotor reactions. Health Risk Analysis, 2024, no. 2, pp. 162–169. DOI: 10.21668/health.risk/2024.2.15.eg

Получена: 24.09.2023

Одобрена: 31.05.2024

Принята к публикации: 20.06.2024