

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-9-592-596>

УДК 577.3:537.531т

© Коллектив авторов, 2020

Сарапульцева Е.И.^{1,2,3}, Ускалова Д.В.², Устенко К.В.¹**Биологические эффекты низкоинтенсивных радиочастотных полей и анализ риска для природных систем**¹ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Каширское ш., 31, Москва, Россия, 115409;²Обнинский институт атомной энергетики — филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Студгородок, 1, Обнинск, Калужская обл., Россия, 249040;³Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба — филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, ул. Королева, 4, Обнинск, Калужская обл., Россия, 249036

Несмотря на то, что до сих пор существуют противоречивые мнения относительно ущерба от современных беспроводных технологий связи, большинство ученых сообщают о негативном биологическом действии низкоинтенсивных радиочастотных электромагнитных излучений на разных уровнях организации живой природы. Не вызывает сомнения необходимость не только санитарно-гигиенической оценки техногенного электромагнитного воздействия на человека, но экологической оценки для биоты.

Цель работы состоит в оценке потенциальной экологической опасности электромагнитного воздействия низкоинтенсивных излучений сантиметровой длины на природные системы.

Исходными данными явились собственные результаты, а также опубликованные материалы отечественных и зарубежных исследователей в области радиобиологии неионизирующих излучений. Проанализированы биологические эффекты действия радиочастотных электромагнитных полей, выявленные у организмов разных систематических групп и уровней организации.

Научные исследования свидетельствуют о высокой чувствительности представителей биоты к низкоинтенсивным радиочастотным излучениям. Проанализированные в обзоре результаты указывают на необходимость учитывать особенность действия низкоинтенсивных электромагнитных полей, используемых в современных технологиях связи, т. к. они могут привести к нарушению гомеостаза природных экосистем.

Ключевые слова: низкоинтенсивные электромагнитные поля; экологическая опасность; биологические эффекты; беспозвоночные животные

Для цитирования: Сарапульцева Е.И., Ускалова Д.В., Устенко К.В. Биологические эффекты низкоинтенсивных радиочастотных полей и анализ риска для природных систем. *Мед. труда и пром. экол.* 2020; 60(9). <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-9-592-596>

Для корреспонденции: Сарапульцева Елена Игоревна, проф. отделения биотехнологий Обнинского института атомной энергетики НИЯУ МИФИ, д-р биол. наук, проф. E-mail: helen-bio@yandex.ru

Финансирование. Работа частично профинансирована программой повышения конкурентоспособности МИФИ (No. 02.a03.21.0005)

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Дата поступления: 15.06.2020 / **Дата принятия к печати:** 12.08.2020 / **Дата публикации:** 07.10.2020

Elena I. Sarapultseva^{1,2,3}, Darya V. Uskalova², Ksenya V. Ustenko¹**Biological effects of low-intensity radiofrequency fields and risk assessment for biota**¹National Research Nuclear University “MEPhI”, 31, Kashirskoye Sh., Moscow, Russia, 115409;²Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, 1, Studgorodok, Obninsk, Kaluga Region, Russia, 249040;³Tsyba Medical Radiological Research Center — branch of the National Medical Research Radiological Center, 4, Koroleva Str., Obninsk, Kaluga Region, Russia, 249036

Despite the fact that there are still conflicting opinions about the damage caused by modern wireless communication technologies, most scientists report on the negative biological effects of low-intensity radio frequency electromagnetic radiation at different levels of the organization of live nature. There is no doubt that there is a need not only for a sanitary and hygienic assessment of man-made electromagnetic effects on humans, but also for an environmental assessment for biota.

The purpose of the study was to assess the potential environmental risk of electromagnetic impact in the centimeter range on natural ecosystems.

The initial data were the authors' own results in the field of radiobiology of non-ionizing radiation, as well as published of other researchers. The article analyzes the biological effects of radio frequency electromagnetic fields detected in organisms of different systematic groups and levels of organization.

The data on the non-thermal biological effects of electromagnetic fields indicate a high sensitivity of different species to this factor. The analyzed research results emphasize the need to take into account the features of non-thermal effects of electromagnetic radiation on biota, since these radiations can have a negative impact on different hierarchical levels in natural ecosystems.

Key words: low-intensity electromagnetic fields; environmental hazards; biological effects, invertebrates animals

For citation: Sarapultseva E.I., Uskalova D.V., Ustenko K.V. Biological effects of low-intensity radiofrequency fields and risk assessment for biota. *Med. труда i prom. ekol.* 2020; 60(9). <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-9-592-596>

For correspondence: Elena I. Sarapultseva, prof. of biotechnology Department, Obninsk Institute of Nuclear Power Engineering, Dr. of Sci. (Biol.), prof. E-mail: helen-bio@yandex.ru

Funding. The work, in part, was supported by the MEPhI Academic Excellence Project (No. 02.a03.21.0005).

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interests.

Information about authors: Sarapultseva E.I. <https://orcid.org/0000-0003-4747-5495>

Received: 15.06.2020 / **Accepted:** 12.08.2020 / **Published:** 07.10.2020

Эволюция жизни на древней Земле происходила под воздействием электромагнитного поля (ЭМП). Со временем сформировался естественный электромагнитный фон, к которому адаптировались живущие на Земле организмы. Однако за последние десятилетия, в связи с интенсификацией беспроводной мобильной связи, произошел скачок напряженности и мощно-

сти электромагнитных излучений. Применяемые в новых технологиях радиочастотные излучения (РЧ) имеют широкий спектр длин волн и плотностей потока энергии (ППЭ). Применение сверхслабых излучений оказалось не менее опасным для человека, потому что именно к ним организм проявил наибольшую чувствительность. Научные исследования показали, что по мощ-

ности они сопоставимы с эндогенными излучениями.

В работе анализируются биологические эффекты действия низкоинтенсивных радиочастотных (НИ РЧ) полей на живые организмы разных уровней организации и систематических групп. Как показывает целый ряд исследований, эти излучения способны негативно влиять на функциональное состояние биоты и вызывать трансгенерационные эффекты. Широкое использование источников ЭМИ ставит задачу оценки их экологической безопасности. В настоящее время эта проблема стала еще более актуальной в связи с внедрением в систему сотовой связи 5G стандарта с использованием миллиметровых волн электромагнитного диапазона.

Проявление негативного биологического действия низкоинтенсивных радиочастотных ЭМИ на разных уровнях организации живой природы в большинстве случаев не вызывает сомнений у ученых [1–5]. Подчеркивается необходимость не только санитарно-гигиенической оценки техногенного электромагнитного воздействия на человека, но экологической оценки для биоты.

Цель работы состоит в оценке потенциальной экологической опасности электромагнитного воздействия генерирующих систем сантиметрового диапазона (2G / 3G / 4G-поколения) на природные экологические системы и внедрения 5G-технологий миллиметрового диапазона.

Исходными данными явились собственные результаты, а также опубликованные материалы отечественных и зарубежных авторов в области радиобиологии неионизирующих излучений. В статье проанализированы биологические эффекты действия РЧ ЭМП, выявленные у представителей природного экосистем из разных систематических групп и уровней организации.

Микроорганизмы, которые первыми появились на древней Земле, являются наиболее адаптированными к ЭМИ. Однако широкое внедрение новых технологий, в том числе генной инженерии, значительно преобразовало микробное сообщество. Модифицированные штаммы могут оказаться более чувствительными к радиации, чем исходные. Обнаружено снижение выживаемости мутантного штамма *E.coli hcr exr* при экспозиции в НИ РЧ поле с частотой 10 ГГц. Дикий штамм *E.coli WP₂* оказался устойчивым, поскольку у него не нарушены системы репарации [6]. При остром воздействии с частотой 10 ГГц и ППЭ 200 мкВт/см² на культуру одноклеточных водорослей *Chlorella vulgaris* обнаружено снижение численности клеток и уменьшение первичной биомассы [7]. У дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, облученных с частотой 1,8 ГГц и мощностью 4,7 Вт/кг, выявлено нарушение экспрессии некоторых кандидатных генов [8]. Радиационно-индуцированные генетические эффекты и повышение активных форм кислорода (АФК) обнаружено в клетках легких китайского хомяка и фибробластах кожи человека, которых облучали в РЧ ЭМП с той же частотой и мощностью 3,0 Вт/кг [9]. Повышенный уровень аберраций хроматидного типа обнаружен в модельных опытах на лимфоцитах периферической крови человека, облученных в РЧ ЭМП [10]. Однако следует подчеркнуть, что облучение не вызывало длительную остановку клеточного цикла, нарушение пролиферации клеток или изменение их жизнеспособности, т. е. не приводило к аталланым клеточным дисфункциям.

Радиационно-индуцированные нарушения обнаружены у одноклеточных инфузорий *Spirostomum ambiguum*. Облучение простейших в НИ РЧ поле с частотами (1 и 10) ГГц и ППЭ (5 и 10 мкВт/см²) приводило к изменениям функциональной активности простейших [11, 12], которые сохранялись в 10–15 поколениях [13]. Изменения в подвижности инфузорий происходили в результате действия низких доз и интенсивностей РЧ-ЭМИ, рекомендуемых в России в качестве допустимых для человека [14]. Тем самым результаты исследования показали, что инфузории *S. ambiguum* являются не менее чувствительными к РЧ ЭМИ организмами по важным жизненным показателям, чем человек. Снижение подвижности у *S. ambiguum* коррелировало с морфометрическими нарушениями, что косвенно отражало индуцированные НИ РЧ ЭМП физиологические изменения у

простейших [15].

У плоских червей *Dugesia tigrina* и *Schmidtea mediterranea*, остро облученных с частотой 900 МГц и ППЭ 100 мкВт/см², выявлены нарушения регенерационной, пролиферативной и метаболической активности [16]. Процесс регенерации нарушался за счет сокращения пула жизнеспособных неопластов. Однако, как и в случае с простейшими, в данном эксперименте процесс регенерации планарий восстанавливался после выведения животных из ЭМП [17]. В целом цетах дождевых червей *Eisenia fetida* 900 МГц РЧ поля индуцировали антиоксидантный стресс и генотоксические эффекты, которые усиливались при модуляции [18].

Облучение более высокоорганизованных животных ракообразных *Daphnia magna* в ЭМП с частотой 900 МГц и ППЭ 100 мкВт/см² в ювенильный и пубертатный периоды онтогенеза приводило к снижению пула жизнеспособных клонок и метаболической активности, но не вызывало гибели рачков [19]. Следует отметить, что облучение популяции родительских особей приводило к снижению плодовитости следующего поколения *D. magna*. В природных условиях сокращение численности планктонных ракообразных как важного экологического звена и основного корма многих промысловых рыб может привести к нарушению гомеостаза водоема [20]. Однако было обнаружено, что при прекращении радиационного воздействия жизнеспособность беспозвоночных восстанавливалась во втором и последующих поколениях. В радиочастотном диапазоне ЭМП подобные эффекты обнаружены у разных представителей живой природы, в том числе человека. У растений обнаружены, индуцированные НИ РЧ полями, цитогенетические эффекты, которые подобно описанным выше эффектам у представителей животного мира, сохранялись после облучения еще некоторый промежуток времени [22, 23].

Цитогенетические эффекты, индуцируемые НИ РЧ ЭМИ, выявлены в клетках разных представителей одноклеточных и многоклеточных организмов: в клетках крови человека (изменение плазмидных генов), растений (микроядра и хромосомные аберрации) и беспозвоночных животных [24]. Это дает возможность оценить универсальные механизмы повреждающего действия РЧ ЭМИ и прогнозировать экологический риск. Важно подчеркнуть, что эффекты, обнаруженные *in vitro*, хорошо воспроизводились *in vivo*.

Среди описанных в литературе механизмов биологического действия НИ РЧ ЭМИ можно выделить следующее: влияние на энергетический этап клеточного дыхания [25, 26]; изменение активности ферментов печени и головного мозга [27]; конформационная перестройка белков [28], нарушение этапов транскрипции и трансляции в биосинтезе белков [29]; нарушение рецепторной функции мембран и ионов активного транспорта [30]; нейрогуморальные нарушения [31, 32], снижение подвижности сперматозоидов [33, 34], повышение уровня свободных радикалов и связанный с этим оксидативный стресс в клетках мозга, печени, почек и крови [35–38], а также перекисное окисление липидов клеточных мембран [17, 39]. В большинстве процитированных работ сообщается о восстановлении функциональной активности клеток и организма после выхода из ЭМП.

Радиочастотное излучение все чаще признается в качестве новой формы загрязнения окружающей среды. Научные исследования свидетельствуют о высокой чувствительности представителей биоты к низкоинтенсивным радиочастотным излучениям. Проанализированные в обзоре результаты указывают на необходимость учитывать особенность действия низкоинтенсивных электромагнитных полей, используемых в современных технологиях связи, т. к. они могут привести к нарушению гомеостаза природных экосистем из-за функциональных нарушений, происходящих на разных трофических уровнях. Не следует забывать о возможных трансгенерационных эффектах облучения, способных сохраняться в течение длительного времени и передаваться следующему необлученному поколению. Однако следует подчеркнуть, что в большинстве исследований после прекращения радиочастотного воздействия обнаружено восстановление

ние функциональной активности клеток и организма в целом.

Видимо, живые организмы смогли адаптироваться к сформировавшемуся техногенному электромагнитному фону. Однако природные экосистемы, как, впрочем, и человека, поджидает новое испытание. На пороге внедрение сотовой связи 5G-поколения с миллиметровыми длинами волн. Будущие длины волн ЭМП, планируемые к широкому использованию в системе беспроводной связи, уменьшатся и станут сопоставимы с размером тела простейших и беспозвоночных животных, яв-

ляющихся важными звеньями многих трофических цепей природных экосистем. Ученые считают, что основное воздействие будет приходиться на насекомых, птиц и других мелких животных, а также на поверхностные ткани млекопитающих, включая человека. 5G-технологии будет не только давать в десятки и сотни раз больше излучения, чем 2G, 3G и 4G-поколения сотовой связи, но их внедрение будет означать целый ряд новых опасностей для биосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козьмин Г.В., Егорова Е.И. Устойчивость биоценозов в условиях изменяющихся электромагнитных свойств биосферы. *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника*. 2006; 3: 61–72.
2. Жаворонков А.П., Петин В.Г. Влияние электромагнитных излучений сотовых телефонов на здоровье. *Радиация и риск*. 2016; 25(2): 43–56.
3. Sagar S., Dongus S., Schoeni A. et al. Radiofrequency Electromagnetic Field Exposure in Everyday Microenvironments in Europe: A Systematic Literature Review. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2018; 28(2): 147–60. <https://doi.org/10.1038/jes.2017.13>
4. Belpomme D., Hardell L., Belyaev I. et al. Thermal and Non-Thermal Health Effects of Low Intensity Non-Ionizing Radiation: An International Perspective. *Environ Pollut*. 2018; 242(Pt A): 643–58. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.019>
5. Григорьев Ю.Г. Мобильная связь и электромагнитная опасность для здоровья населения. Современная оценка риска — от электромагнитного смога до электромагнитного хаоса (обзор литературы). *Вестник новых медицинских технологий*. 2019; 26(2): 88–95.
6. Иголкина Ю.В., Егорова Е.И., Козьмин Г.В. и др. Влияние на *Escherichia coli* электромагнитного излучения нетепловой мощности в частотном диапазоне от 8820 до 10400 МГц. *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника*. 2004; 1-2: 88–92.
7. Егорова Е.И. Влияние низкоинтенсивного СВЧ-излучения на изменение численности и биомассы планктонных водорослей. *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника*. 2005; 11-12: 20–6.
8. Chen G., Lu D., Chiang H., Leszczynski D., Xu Z. Using Model Organism *Saccharomyces cerevisiae* to Evaluate the Effects of ELF-MF and RF-EMF Exposure on Global Gene Expression. *Bioelectromagnetics*. 2012; 33(7): 550–60. <https://doi.org/10.1002/bem.21724>
9. Xu S., Chen G., Chen Ch. et al. Cell Type-Dependent Induction of DNA Damage by 1800 MHz Radiofrequency Electromagnetic Fields Does Not Result in Significant Cellular Dysfunctions. *PLoS One*. 2013; 8(1): e54906. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0054906>
10. Panagopoulos D.J. Chromosome Damage in Human Cells Induced by UMTS Mobile Telephony Radiation. *Gen Physiol Biophys*. 2019; 38(5): 445–54. https://doi.org/10.4149/gpb_2019032
11. Sarapultseva E.I., Igolkina J.V. Experimental Study of Relationship between Biological Hazards of Low-Dose Radiofrequency Exposure and Energy Flow Density in *Spirostomum ambiguum* Infusoria Exposed at a Mobile Connection Frequency (1 GHz). *Bull Exp Biol Med*. 2011; 151(4): 477–80. <https://doi.org/10.1007/s10517-011-1361-5>
12. Сарапульцева Е.И. Спонтанная двигательная активность инфузорий *Sp.ambiguum* после γ -облучения в широком диапазоне доз как информативный метод биотестирования. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2008. 48(3): 346–8.
13. Sarapultseva E.I., Igolkina J.V., Tikhonov V.N. et al. The in Vivo Effects of Low-Intensity Radiofrequency Fields on the Motor Activity of Protozoa. *Int J Radiat Biol*. 2014; 90(3): 262–7. <https://doi.org/10.3109/09553002.2014.868612>
14. СанПин 2.2.4.1191-03. *Электромагнитные поля в производственных условиях*. М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России; 2003.
15. Uskalova D.V., Igolkina Y.V., Sarapultseva E.I. Intravital Computer Morphometry on Protozoa: A Method for Monitoring of the Morphofunctional Disorders in Cells Exposed in the Cell Phone Communication Electromagnetic Field. *Bull Exp Biol Med*. 2016; 161(4): 554–7. <https://doi.org/10.1007/s10517-016-3459-2>
16. Sarapultseva E.I., Matchuk O., Uskalova D. et al. The effects of electromagnetic field and γ -radiation on cell proliferation and regeneration in planarian *Schmidtea mediterranea*. 2019. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 487 (1): 012018.
17. Ускалова Д.В., Сарапульцева Е.И. Снижение регенерации планарий в низкоинтенсивном радиочастотном поле за счет нарушения пролиферативной активности и метаболизма клеток. *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2020. 23(1): 60–6.
18. Tkalec M., Stambuk A., Srut M. et al. Oxidative and Genotoxic Effects of 900 MHz Electromagnetic Fields in the Earthworm *Eisenia Fetida*. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2013; 90: 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.12.005>
19. Устенко К.В., Ускалова Д.В., Сарапульцева Е.И. Отдаленные биологические эффекты низкоинтенсивного радиочастотного облучения *Daphnia magna* в разные периоды онтогенеза. *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2017.4: 34–41.
20. Устенко К.В., Ускалова Д.В., Сарапульцева Е.И. Изменение морфофизиологических параметров *D. magna* при хроническом действии ЭМП базовых станций сотовой связи в условиях голодания. Актуальные проблемы экологии и природопользования. Матер. научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов, посвященной 75-летию победы в Великой отечественной войне. С-Пб: СПГАВМ; 2020.
21. Belyaev I. Dependence of non-thermal biological effects of microwaves on physical and biological variables: implications for reproducibility and safety standards. In: Guiliani L., Soffritti M. Ed. *Non thermal effects and mechanisms of interaction between EMF and living matter*. Bologna: National Institute for the Study and Control of Cancer and Environmental Diseases. 2010: 187–218.
22. Tkalec M., Malaric K., Pavlica M. et al. Effects of radiofrequency electromagnetic fields on seed germination and root meristematic cells of *Allium cepa* L. *Mutat Res*. 2009. 31; 672(2): 76–81. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2008.09.022>
23. Pesnya D.S., Romanovsky A.V. Comparison of cytotoxic and genotoxic effects of plutonium-239 alpha particles and mobile phone GSM 900 radiation in the *Allium cepa* test. *Mutat Res*. 2013. 750(1–2): 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2012.08.010>
24. Verschaeve L., Juutilainen J., Lagroye I. et al. In vitro and in vivo genotoxicity of radiofrequency fields. *Mutat Res*. 2010. 705(3): 252–68. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2010.10.001>
25. Lerchl A., Krüger H., Niehaus M. et al. Effects of mobile phone electromagnetic fields at non thermal SAR values on melatonin and body weight of Djungarian hamsters (*Phodopus sungorus*). *J Pineal Res*. 2008; 44(3): 267–72. <https://doi.org/10.1111/j.1600-079x.2007.00522.x>
26. Meral I., Mert H., Mert N. et al. Effects of 900-MHz electromagnetic field emitted from cellular phone on brain oxidative stress and some vitamin levels of guinea pigs. *Brain Res*. 2007; 1169: 120–4. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2007.07.015>
27. Barteri M., Diociaiuti M., Pala A. et al. Structural and kinetic effects of mobile phone microwaves on acetylcholinesterase activity. *Biophys. Chem*. 2004; 111(1): 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.bpc.2004.04.002>
28. Velizarov S., Raskmark P., Kwee S. The Effects of Radiofrequency Fields on Cell Proliferation Are Non-Thermal. *Bioelectrochem Bioenerg*. 1999; 48(1): 177–80. [https://doi.org/10.1016/s0302-4598\(98\)00238-4](https://doi.org/10.1016/s0302-4598(98)00238-4)
29. Tkalec M., Malaric K., Pavlica M. et al. Effects of radiofrequency electromagnetic fields on seed germination and root meristematic cells of *Allium cepa* L. *Mutat Res*. 2009; 672: 76–81.
30. Maskey D., Kim M., Aryal B. et al. Effect of 835MHz radiofrequency radiation exposure on calcium binding proteins in the hippocampus of the mouse brain. *Brain Res*. 2010. 1313: 232–41. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2009.11.079>
31. Hung C.S., Anderson C., Horne J.A. et al. Mobile phone 'talk-mode' signal delays EEG-determined sleep onset. *Neurosci. Lett*. 2007. 421(1): 82–6. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2007.05.027>
32. Divan H.A., Kheifets L., Obel C. et al. Prenatal and postnatal exposure to cell phone use and behavioral problems in children. *Epidemiology*. 2008. 19(4): 523–9. <https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e318175dd47>
33. Desai N.R., Kesari K.K., Agarwal A. Pathophysiology of cell phone

- radiation: Oxidative stress and carcinogenesis with focus on male reproductive system. *Reprod. Biol. Endocrinol.* 2009; 7: 114. <https://doi.org/10.1186/1477-7827-7-114>
34. Kesari K.K., Kumar S., Nirala J. et al. Biophysical Evaluation of Radiofrequency Electromagnetic Field Effects on Male Reproductive Pattern. *Cell Biochem Biophys.* 2013; 65(2):85-96. <https://doi.org/10.1007/s12013-012-9414-6>
 35. Ragy M.M. Effect of exposure and withdrawal of 900-MHz-electromagnetic waves on brain, kidney and liver oxidative stress and some biochemical parameters in male rats. *Electromagn Biol Med.* 2015; 34(4):279-84. <https://doi.org/10.3109/15368378.2014.906446>
 36. Sokolovic D., Djindjic B., Nikolic J. et al. Melatonin reduced oxidative stress induce by chronic exposure of microwave radiation from mobile phone in rat brain. *J Radiat Res.* 2008; 49(6): 579–86. <https://doi.org/10.1269/jrr.07077>
 37. Ozguner F., Oktem F., Armagan A. et al. Comparative analysis of the protective effects of melatonin and caffeic acid phenethyl ester (CAPE) on mobile phone-induced renal impairment in rat. *Mol. Cell. Biochem.* 2005; 276(1–2): 31–7. <https://doi.org/10.1007/s11010-005-2734-8>
 38. Irmak M.K., Fadillioğlu E., Gulec M. et al. Effects of electromagnetic radiation from a cellular telephone on the oxidant and antioxidant levels in rabbits. *Cell Biochem. Funct.* 2002; 20(4): 283–9. <https://doi.org/10.1002/cbf.976>
 39. Margaritis L.H., Manta A.K., Kokkaliaris K.D. et al. Drosophila as a biomarker responding to EMF sources. *Electromagn Biol Med.* 2014; 33(3): 165–89. <https://doi.org/10.3109/15368378.2013.800102>
- ## REFERENCES
1. Kozmin G.V., Egorova E.I. Stability of biocenoses in conditions of changing electromagnetic properties of the biosphere. *Biomedical technologies and radio electronics.* 2006; 3: 61–72 (in Russian).
 2. Zhavoronkov L.P., Petin V.G. Influence of electromagnetic radiation of cell phones on health. *Radiation and risk.* 2016; 25(2): 43–56 (in Russian).
 3. Sagar S., Dongus S., Schoeni A. et al. Radiofrequency Electromagnetic Field Exposure in Everyday Microenvironments in Europe: A Systematic Literature Review. *J Expo Sci Environ Epidemiol.* 2018; 28(2): 147–60. <https://doi.org/10.1038/jes.2017.13>
 4. Belpomme D., Hardell L., Belyaev I. et al. Thermal and Non-Thermal Health Effects of Low Intensity Non-Ionizing Radiation: An International Perspective. *Environ Pollut.* 2018; 242(Pt A): 643–58. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.019>
 5. Grigoriev Yu.G. Mobile communication and electromagnetic hazard for public health. Modern risk assessment - from electromagnetic smog to electromagnetic chaos (literature review). *Bulletin of new medical technologies.* 2019; 26(2): 88–95 (in Russian).
 6. Igolkina Yu.V., Egorova E.I., Kozmin G.V. et al. Influence of electromagnetic radiation of non-thermal power on *Escherichia coli* in the frequency range from 8820 to 10400 MHz. *Biomedical technologies and radio electronics.* 2004; 1–2: 88–92 (in Russian).
 7. Egorova E.I. Influence of low-intensity microwave radiation on changes in the abundance and biomass of planktonic algae. *Biomedical technologies and radio electronics.* 2005; 11–12: 20–6 (in Russian).
 8. Chen G., Lu D., Chiang H. et al. Using Model Organism *Saccharomyces cerevisiae* to Evaluate the Effects of ELF-MF and RF-EMF Exposure on Global Gene Expression. *Bioelectromagnetics.* 2012; 33(7): 550–60. <https://doi.org/10.1002/bem.21724>
 9. Xu S., Chen G., Chen Ch. Et al. Cell Type-Dependent Induction of DNA Damage by 1800 MHz Radiofrequency Electromagnetic Fields Does Not Result in Significant Cellular Dysfunctions. *PLoS One.* 2013; 8(1): e54906. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0054906>
 10. Panagopoulos D.J. Chromosome Damage in Human Cells Induced by UMTS Mobile Telephony Radiation. *Gen Physiol Biophys.* 2019; 38(5): 445–54. https://doi.org/10.4149/gpb_2019032
 11. Sarapultseva E.I., Igolkina J.V. Experimental Study of Relationship between Biological Hazards of Low-Dose Radiofrequency Exposure and Energy Flow Density in *Spirostomum ambiguum* Infusoria Exposed at a Mobile Connection Frequency (1 GHz). *Bull Exp Biol Med.* 2011; 151(4): 477–80. <https://doi.org/10.1007/s10517-011-1361-5>
 12. Sarapultseva E.I. Spontaneous motional activity of paramecium *Spirostomum ambiguum* after gamma-irradiation in a broad variety of dose as a bioassay. *Radiatsionnaia biologiya, radioecologiya.* 2008; 48 (3): 346–8 (in Russian).
 13. Sarapultseva E.I., Igolkina J.V., Tikhonov V.N. et al. The in Vivo Effects of Low-Intensity Radiofrequency Fields on the Motor Activity of Protozoa. *Int J Radiat Biol.* 2014; 90(3): 262–7. <https://doi.org/10.3109/09553002.2014.868612>
 14. *The sanitary rules and norms 2.2.4.1191-03. Electromagnetic fields in production conditions.* — M.: Federal center of Gossanepidnadzor of the Ministry of health of Russia; 2003 (in Russian).
 15. Uskalova D.V., Igolkina Y.V., Sarapultseva E.I. Intravital Computer Morphometry on Protozoa: A Method for Monitoring of the Morphofunctional Disorders in Cells Exposed in the Cell Phone Communication Electromagnetic Field. *Bull Exp Biol Med.* 2016; 161(4): 554–7. <https://doi.org/10.1007/s10517-016-3459-2>
 16. Sarapultseva E.I., Matchuk O., Uskalova D. et al. The effects of electromagnetic field and γ -radiation on cell proliferation and regeneration in planarian *Schmidtea mediterranea*. 2019. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 487 (1): 012018.
 17. Uskalova D.V., Sarapultseva E.I. Reduction of planarian regeneration in a low-intensity radiofrequency field due to violation of proliferative activity and cell metabolism. *Biomedical radio electronics.* 2020; 23(1): 60–6 (in Russian).
 18. Tkalec M., Stambuk A., Srut M. et al. Oxidative and Genotoxic Effects of 900 MHz Electromagnetic Fields in the Earthworm *Eisenia Fetida*. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2013; 90: 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.12.005>
 19. Ustenko K.V., Uskalova D.V., Sarapultseva E.I. Remote biological effects of low-intensity radiofrequency irradiation of *Daphnia magna* in different periods of ontogenesis. *Biomedical Radioelectronics.* 2017; 4: 34–41 (in Russian).
 20. Ustenko K.V., Uskalova D.V., Sarapultseva E.I. Changes in morphophysiological parameters of *D. magna* under chronic EMF action of cellular base stations in conditions of starvation. Actual problems of ecology and nature management. *Matera. scientific and practical conference of students, postgraduates, young scientists and specialists dedicated to the 75th anniversary of victory in the great Patriotic war.* S-Pb: SPAWM; 2020 (in Russian).
 21. Belyaev I. Dependence of non-thermal biological effects of microwaves on physical and biological variables: implications for reproducibility and safety standards. In: Guiliani L., Soffritti M. Ed. *Non thermal effects and mechanisms of interaction between EMF and living matter.* Bologna: National Institute for the Study and Control of Cancer and Environmental Diseases. 2010: 187–218.
 22. Tkalec M., Malaric K., Pavlica M. et al. Effects of radiofrequency electromagnetic fields on seed germination and root meristematic cells of *Allium cepa* L. *Mutat Res.* 2009; 31; 672(2): 76–81. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2008.09.022>
 23. Pesnya D.S., Romanovsky A.V. Comparison of cytotoxic and genotoxic effects of plutonium-239 alpha particles and mobile phone GSM 900 radiation in the *Allium cepa* test. *Mutat Res.* 2013; 750(1–2): 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2012.08.010>
 24. Vershaev L., Juutilainen J., Lagroye I. et al. In vitro and in vivo genotoxicity of radiofrequency fields. *Mutat Res.* 2010; 705(3): 252–68. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2010.10.001>
 25. Lerchl A., Krüger H., Niehaus M. et al. Effects of mobile phone electromagnetic fields at non thermal SAR values on melatonin and body weight of Djungarian hamsters (*Phodopus sungorus*). *J Pineal Res.* 2008; 44(3): 267–72. <https://doi.org/10.1111/j.1600-079x.2007.00522.x>
 26. Meral I., Mert H., Mert N. et al. Effects of 900-MHz electromagnetic field emitted from cellular phone on brain oxidative stress and some vitamin levels of guinea pigs. *Brain Res.* 2007; 1169: 120–4. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2007.07.015>
 27. Barteri M., Diociaiuti M., Pala A. et al. Structural and kinetic effects of mobile phone microwaves on acetylcholinesterase activity. *Biophys. Chem.* 2004; 111(1): 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.bpc.2004.04.002>
 28. Velizarov S., Raskmark P., Kwee S. The Effects of Radiofrequency Fields on Cell Proliferation Are Non-Thermal. *Bioelectrochem Bioenerg.* 1999; 48(1): 177–80. [https://doi.org/10.1016/s0302-4598\(98\)00238-4](https://doi.org/10.1016/s0302-4598(98)00238-4)
 29. Tkalec M., Malaric K., Pavlica M. et al. Effects of radiofrequency electromagnetic fields on seed germination and root meristematic cells of *Allium cepa* L. *Mutat. Res.* 2009; 672: 76–81.
 30. Maskey D., Kim M., Aryal B. et al. Effect of 835MHz radiofrequency radiation exposure on calcium binding proteins in the hippocampus of the mouse brain. *Brain Res.* 2010; 1313: 232–41. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2009.11.079>
 31. Hung C.S., Anderson C., Horne J.A. et al. Mobile phone 'talk-mode' signal delays EEG-determined sleep onset. *Neurosci. Lett.* 2007; 421(1): 82–6. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2007.05.027>

32. Divan H.A., Kheifets L., Obel C. et al. Prenatal and postnatal exposure to cell phone use and behavioral problems in children. *Epidemiology*. 2008. 19(4): 523–9. <https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e318175dd47>
33. Desai N.R., Kesari K.K., Agarwal A. Pathophysiology of cell phone radiation: Oxidative stress and carcinogenesis with focus on male reproductive system. *Reprod. Biol. Endocrinol.* 2009; 7: 114. <https://doi.org/10.1186/1477-7827-7-114>
34. Kesari K.K., Kumar S., Nirala J. et al. Biophysical Evaluation of Radiofrequency Electromagnetic Field Effects on Male Reproductive Pattern. *Cell Biochem Biophys.* 2013; 65(2):85–96. <https://doi.org/10.1007/s12013-012-9414-6>
35. Ragy M.M. Effect of exposure and withdrawal of 900-MHz-electromagnetic waves on brain, kidney and liver oxidative stress and some biochemical parameters in male rats. *Electromagn Biol Med.* 2015; 34(4):279–84. <https://doi.org/10.3109/15368378.2014.906446>
36. Sokolovic D., Djindjic B., Nikolic J. et al. Melatonin reduced oxidative stress induce by chronic exposure of microwave radiation from mobile phone in rat brain. *J Radiat Res.* 2008; 49(6): 579–86. <https://doi.org/10.1269/jrr.07077>
37. Ozguner F., Oktem F., Armagan A. et al. Comparative analysis of the protective effects of melatonin and caffeic acid phenethyl ester (CAPE) on mobile phone-induced renal impairment in rat. *Mol. Cell. Biochem.* 2005. 276(1–2): 31–7. <https://doi.org/10.1007/s11010-005-2734-8>
38. Irmak M.K., Fadillioglu E., Gulec M. et al. Effects of electromagnetic radiation from a cellular telephone on the oxidant and antioxidant levels in rabbits. *Cell Biochem. Funct.* 2002. 20(4): 283–9. <https://doi.org/10.1002/cbf.976>
39. Margaritis L.H., Manta A.K., Kokkaliaris K.D. et al. Drosophila as a bio-marker responding to EMF sources. *Electromagn Biol Med.* 2014; 33(3): 165–89. <https://doi.org/10.3109/15368378.2013.800102>