

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

EDN: <https://elibrary.ru/aebgsg>DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-8-528-536>

УДК 613.6; 613.64

© Коллектив авторов, 2023

Фесенко М.А., Голованева Г.В., Мителева Т.Ю., Вуйцик П.А.

Влияние вредных производственных физических факторов на репродуктивное здоровье работников-мужчин

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», пр-т Будённого, 31, Москва, 105275

В данной работе приведён обзор литературы для анализа и оценки профессионального риска нарушений репродуктивного здоровья работников-мужчин при действии вредных физических факторов производства.

Для оценки риска воздействия вредных производственных физических факторов на репродуктивное здоровье работников-мужчин применён метод аналитического обзора полученных данных.

Данные литературы показывают, что работа мужчин, в условиях как повышенной, так и пониженной температуры, может приводить к нарушению репродуктивной функции. На ряде производств — хлебопекарном, изготовлении керамики, в сталелитейном, при проведении сварочных и других работ, — условия труда которых характеризуются наличием гипертермии, у работников, наряду с изменениями физиологических параметров, гомеостаза организма, выявлено нарушение репродуктивной функции.

Исследования по изучению воздействия шума и вибрации на репродуктивное здоровье работников-мужчин немногочисленны, а по воздействию ультра- и инфразвука — единичны. Последствиями такого воздействия являются нарушения гормонального статуса, сперматогенеза, приводящие в дальнейшем к изменению репродуктивной функции, импотенции и бесплодию. Эти данные были подтверждены экспериментальными исследованиями на животных и добровольцах. Воздействие ионизирующего излучения — доказанный фактор нарушения репродуктивной функции, который приводит к изменениям количества и качества спермы, репродуктивных гормонов. Последствием воздействия ионизирующего излучения являются хромосомные нарушения, ведущие к врождённым аномалиям у потомства.

Показано, что биологическое действие электромагнитных полей различного частотного диапазона (сотовых телефонов, микроволновых печей, ноутбуков, устройств с Wi-Fi, а также др. видов неионизирующего излучения — низкочастотных электромагнитных полей и крайне высокочастотных) на репродуктивные органы может проявиться в изменении показателей сперматогенеза, повреждении ДНК, геномной нестабильности, нарушениях гормональной регуляции и работы протеинкиназ, гормонов и антиоксидантных ферментов, приводя к расстройствам сексуального поведения, снижению фертильности, вплоть до бесплодия.

Представленные данные показывают, что вредные производственные физические факторы могут приводить к нарушениям репродуктивного здоровья работников-мужчин. В настоящее время отсутствует системный подход к решению проблемы. В этой связи необходимы разработка научно обоснованной системы оценки профессионального риска и принятие управленческих решений по сохранению репродуктивного здоровья, поскольку снижение фертильности работников-мужчин потенциально затрагивает благополучие семьи и общества в целом.

Ключевые слова: работники-мужчины; репродуктивное здоровье; условия труда; вредные физические факторы; профессиональный риск; профилактика

Для цитирования: Фесенко М.А., Голованева Г.В., Мителева Т.Ю., Вуйцик П.А. Влияние вредных производственных физических факторов на репродуктивное здоровье работников мужчин. *Мед. труда и пром. экол.* 2023; 63(8): 528–536. <https://elibrary.ru/aebgsg> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-8-528-536>

Для корреспонденции: Фесенко Марина Александровна, заведующий лабораторией профилактики нарушений репродуктивного здоровья работников ФГБНУ «НИИ МТ» доктор медицинских наук. E-mail: marnast@mail.ru

Участие авторов:

Фесенко М.А. — концепция и дизайн исследования, анализ и интерпретация данных; одобрение окончательной версии;

Голованева Г.В. — концепция и дизайн исследования, анализ и интерпретация данных, редактирование;

Мителева Т.Ю. — сбор и обработка материала, написание текста;

Вуйцик П.А. — сбор материала, написание текста раздела статьи.

Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотруднику лаборатории Мискевичу А.В. за помощь при сборе литературы.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы статьи сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Дата поступления: 29.06.2023 / Дата принятия к печати: 02.07.2023 / Дата публикации: 05.09.2023

Marina A. Fesenko, Galina V. Golovaneva, Tatyna Yu. Miteleva, Peter A. Vuicik

The influence of harmful occupational physical factors on the male workers' reproductive health

Izmerov Research Institute of Occupational Health, 31, Budyonnogo Ave., Moscow, 105275

This paper provides a review of the literature for the analysis and assessment of the occupational risk of reproductive health disorders of male workers under the influence of harmful physical factors of production.

To assess the risk of exposure to harmful industrial physical factors on the reproductive health of male workers, the authors have applied the method of analytical review of the data obtained.

Literature data show that the work of men in conditions of both high and low temperatures can lead to a violation of reproductive function. In the bakery, ceramic, steel, welding and other industries, working conditions are characterized by the presence of hyperthermia. Researchers have identified a violation of reproductive function in male workers, along with changes in the physiological parameters of the body's homeostasis.

There are few studies on the effects of noise and vibration on the reproductive health of working men, and there are few studies on the effects of ultra- and infrasound. The consequences of such exposure are disorders of hormonal status, spermatogenesis, leading to further changes in reproductive function, impotence and infertility. Scientists confirm these data with experimental studies on animals and volunteers.

Exposure to ionizing radiation is a proven factor of reproductive dysfunction, which leads to changes in the quantity and quality of sperm, reproductive hormones. The consequence of exposure to ionizing radiation are chromosomal abnormalities, leading to congenital anomalies in offspring.

It has been shown that the biological effect of electromagnetic fields of various frequency ranges (cell phones, microwave ovens, laptops, devices with Wi-Fi, as well as other types of non-ionizing radiation — low-frequency electromagnetic fields and extremely high-frequency) on reproductive organs can manifest itself in changes in spermatogenesis indicators, DNA damage, genomic instability, hormonal regulation and work disorders protein kinases, hormones, antioxidant enzymes, leading to disorders of sexual behavior, decreased fertility, up to infertility.

The presented data show that harmful occupational physical factors can lead to violations of the reproductive health of male workers. Currently, there is no systematic approach to solving the problem. In this regard, it is necessary to develop a scientifically sound system for assessing occupational risk and making managerial decisions to preserve reproductive health, since a decrease in the fertility of male workers potentially affects the well-being of the family and society as a whole.

Keywords: *male employees; reproductive health; working conditions; harmful physical factors; occupational risk; prevention*

For citation: Fesenko M.A., Golovaneva G.V., Miteleva T.Yu., Vujtsik P.A. The influence of harmful occupational physical factors on the male workers' reproductive health. *Med. truda i prom. ekol.* 2023; 63(8): 528–536. <https://elibrary.ru/aebgsg> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-8-528-536> (in Russian)

For correspondence: Marina A. Fesenko, the Head of Laboratory for the Prevention of Reproductive Health Disorders of employees at the Izmerov Research Institute of Occupational Health, Dr. of Sci. (Med.). E-mail: marnast@mail.ru

Author IDs: Fesenko M.A. <https://orcid.org/0000-0001-7136-1442>

Golovaneva G.V. <https://orcid.org/0000-0002-6693-4186>

Miteleva T.Yu. <https://orcid.org/0000-0002-2007-4731>

Vuicik P.A. <https://orcid.org/0000-0003-4824-4648>

Contribution:

Fesenko M.A. — concept and design of research, analysis and interpretation of data; approval of the final version;

Golovaneva G.V. — concept and design of research, analysis and interpretation of data, the editing;

Miteleva T.Yu. — collection and processing of material, writing the text;

Vujtsik P.A. — collection of material, writing the text of the section of the article.

All co-authors — approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Gratitude. The authors express their gratitude to A.V. Miskevich, an employee of the laboratory, for his help in collecting literature.

Funding. The study had no funding.

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

Received: 29.06.2023 / Accepted: 02.07.2023 / Published: 05.09.2023

Введение. Стратегия развития здравоохранения в Российской Федерации на период до 2025 года предусматривает «...обеспечение безопасных и комфортных условий труда, базирующихся на гигиенических критериях оценки профессионального риска вреда здоровью работников» [1]. В настоящее время неблагоприятная демографическая ситуация в стране характеризуются ростом смертности и снижением рождаемости среди населения.

Высокая смертность граждан трудоспособного возраста, среди которых 80% — мужская часть населения, является основной причиной низкой продолжительности жизни в России. На этом фоне ухудшение репродуктивного здоровья, состояние которого играет важную роль в демографических показателях, в частности воспроизводстве населения, является одной из серьёзных проблем в современном развитии страны.

Одной из основных причин снижения рождаемости является увеличение частоты бесплодия в популяции. Проблема бесплодия касается от 48 миллионов пар до 186 миллионов человек в мире [2–4]. По оценке ВОЗ каждый шестой человек репродуктивного возраста во всем мире страдает бесплодием в течение своей жизни [5].

По данным A. Agarwal et al. (2015) доля бесплодных мужчин колеблется от 2,5% до 12% [6]. Другие авторы заявляют, что мужской фактор является причиной бесплодия в 50% случаев [7, 8]. В нашей стране, согласно резуль-

татам официальной статистики и отечественных исследователей (Г.С. Лебедев, О.И. Аполихин, 2019), общее число мужчин с бесплодием в период 2000–2018 гг. увеличилось с 22 348 до 47 886 человек (прирост — 114%), при этом число больных с первично установленным диагнозом выросло на 82% [9]. К концу XX века в научной литературе накоплены многочисленные данные о снижении у мужчин количества и качества спермы (уменьшении объёма эякулята и активности сперматогенеза, аномалий в морфологии сперматозоидов и пр.), что приводит к увеличению случаев мужского бесплодия [9].

Результаты исследований показывают, что снижение качества репродуктивного здоровья мужчин служит отражением возрастающего воздействия на организм человека вредных факторов окружающей среды, включая экологические, производственные, факторы образа жизни и др.

Накапливаются данные о воздействии физических, химических и биологических факторов производственной среды, а также физической тяжести и нервно-эмоциональной напряжённости труда, в т. ч. сменной работы. Несмотря на неблагоприятное состояние здоровья мужчин, в литературе имеются лишь отдельные данные, посвящённые изучению репродуктивного здоровья мужчин, в частности при воздействии вредных производственных факторов [11].

Проведён обзор и анализ данных литературы по оценке риска воздействия вредных производственных

физических факторов на репродуктивное здоровье (РЗ) мужчин-работников.

Для оценки риска воздействия вредных производственных физических факторов на репродуктивное здоровье работников-мужчин применён метод аналитического обзора полученных данных.

Согласно обзору Ramezanifar S. et al. (2022), отмечено, что только 10% исследований были посвящены оценке влияния физических факторов на РЗ работников и 14% — совместному воздействию физических и химических факторов [11].

К вредным физическим факторам рабочей среды, воздействие которых на организм работников может вызывать нарушения репродуктивного здоровья, относят следующие:

- параметры микроклимата — температура (гипертермия и гипотермия); влажность, скорость движения воздуха; тепловое излучение;
- производственный шум, ультразвук, инфразвук; вибрация (локальная и общая);
- различные виды неионизирующих электромагнитных полей (ЭМП) и излучений, например, электростатическое поле, постоянное магнитное поле, в т. ч. гипогеомагнитное и др. виды излучений, включая лазерное и ультрафиолетовое;
- ионизирующие излучения;
- барометрическое давление (повышенное или пониженное).

Рассмотрим каждый из них отдельно.

Воздействие параметров микроклимата. В литературе накапливается всё больше данных о влиянии нагревающего микроклимата на состояние мужской репродуктивной системы. В настоящее время показано, что у мужчин, работающих в условиях повышенной температуры, уже в первые часы происходит нарушение сперматогенеза, что связано с дегенерацией сперматогенного эпителия и изменением соотношения гонадотропинов и андрогенов в крови [12].

Показано, что на ряде производств — хлебопекарном, изготовлении керамики, при проведении сварочных и некоторых других работ, — условия труда характеризуются наличием высоких температур, что ведёт к изменению физиологических параметров и нарушению гомеостаза организма. Так, поперечное исследование по изучению влияния гипертермии на параметры спермы работников сталелитейной промышленности (2000–2021 гг.) выявило изменение объёма, морфологии, количества и подвижности сперматозоидов [12, 14]. При изучении репродуктивного здоровья сварщиков в Великобритании установлено снижение доли сперматозоидов с нормальными параметрами после воздействия высокой температуры в течение 6 недель и возвращение этих параметров к норме после прекращения воздействия [15].

В Италии у работников керамического производства, подвергавшихся действию повышенных температур, было выявлено большее количество аномальных сперматозоидов, чем у работников группы сравнения [16].

Воздействие высоких температур при работе «сидя» более 6 часов за рабочую смену были связаны со снижением подвижности сперматозоидов и повышением индекса фрагментации ДНК (DFI) ($p=0,03$ и $p=0,001$ соответственно) [17].

Мета-анализ девяти статей, посвящённых изучению влияния высокой температуры окружающей среды на

мужскую репродуктивную функцию, включивших данные 356 мужчин из Ирана, Италии, Таиланда, Китая, Египта, показал статистически значимое снижение следующих показателей: объёма спермы (CPC (стандартизованная разность средних) = $-0,74$; 95% ДИ $-1,11, -0,36$), концентрации сперматозоидов (CPC = $-1,07$; 95% ДИ $-1,42, -0,72$), их общего количества (CPC = $-1,52$; 95% ДИ $-2,96, -0,08$), подвижности (CPC = $-1,93$; 95% ДИ $-2,83, -1,04$), а также прогрессивной подвижности сперматозоидов (CPC = $-1,65$; 95% ДИ $-2,39, -0,91$) и изменение их нормальной морфологии (CPC = $-2,41$; 95% ДИ $-3,30, -1,52$) [17].

Приведённые данные подтверждаются экспериментальными исследованиями. При воздействии гипертермии на репродуктивную систему белых крыс самцов в первые сутки после острого теплового воздействия увеличивалось общее количество сперматозоидов в семенной жидкости животных, снижаясь через одну неделю, но не достигая исходного уровня у здоровых животных [18, 20].

В другом экспериментальном исследовании показано снижение показателя подвижности сперматозоидов на 40% при повышении температуры с 36 до 42°C, и полное отсутствие подвижности сперматозоидов — при повышении температуры на 18°C. Авторы полагают, что механизм патологического действия высоких температур связан с денатурацией клеточных белков [21].

Экспериментальные исследования на добровольцах-мужчинах показали, что даже незначительное стойкое повышение температуры яичек и придатков яичка приводит к морфологическим нарушениям сперматозоидов, в основном, за счёт нарушения стадий спермиогенеза и мейоза. Морфологическая картина и показатели индекса множественных аномалий (ИМА) (*multiple anomalies index — MAI*) возвращались к норме только через 73 дня после воздействия повышенной температуры. Показано, что белки AKAP4, ODF1, ODF2, GAPDHS, SPESP1 и ACTRT2 играют важную роль в обратимом снижении концентрации и подвижности сперматозоидов, вызванном гипертермией, и потенциально могут быть биомаркерами для выявления и лечения репродуктивной патологии [22, 22].

При воздействии низких температур на мужскую репродуктивную функцию животных выявлено как снижение подвижности и жизнеспособности мужских половых гамет, так и угнетение активности окислительно-восстановительных реакций в сперматозоидах в постгипотермическом периоде. Установлено, что воздействие низких температур приводит к угнетению оплодотворяющей способности клеток, снижению эффективности зачатий, а также к увеличению постимплантационной гибели зародышей [24].

Бердыш Д.С. с соавторами (2018) установили, что при снижении температуры от 13°C до 3°C подвижность сперматозоидов снижается на 60%, а при температурах от нуля до -1°C наблюдали полное (100%) отсутствие подвижности. По мнению авторов, такие изменения связаны с кристаллизацией воды и последующим разрушением структуры клеток [21].

Таким образом, данные литературы показывают, что работа мужчин в условиях как повышенной, так и пониженной температуры, может приводить к нарушению репродуктивной функции. Эти данные были подтверждены в экспериментальных исследованиях на животных и добровольцах.

Воздействие производственного шума и вибрации. Работы о влиянии производственного шума на репродук-

тивное здоровье мужчин единичны, однако доступные имеющиеся отдельные эпидемиологические исследования свидетельствуют о неблагоприятном воздействии шума на репродуктивную систему [11, 25].

Экстраауральная концепция воздействия шума показывает, что у работников, подвергающихся воздействию шума, частота жалоб (повышенная утомляемость, эмоциональная неустойчивость, снижение либидо, нарушение сна) и степень их выраженности зависят от интенсивности и характера шума, а также стажа работы во вредных условиях. Установлено, что при воздействии шума высокой интенсивности происходят изменения в нейроэндокринной системе — стимуляция передней доли гипофиза, что способствует нарушению циркадного ритма секреции гонадотропинов (ЛГ, ФСГ, ПРА) [20] и может приводить к нарушениям репродуктивной функции [11, 26, 26].

В исследовании *Jurewicz J. et al.* (2014), установлено связь между воздействием производственного шума и снижением подвижности сперматозоидов с увеличением числа повреждений ДНК в них ($p=0,005$ и $p=0,02$ соответственно) [17]. В этой же работе отмечено снижение подвижности сперматозоидов при воздействии производственного шума у работников, которые находились в позе «стоя» более 6 часов [17].

В ряде последних работ выявлена статистически значимая связь ($p=0,001$) между воздействием производственного шума и изменениями средних уровней тестостерона у работников мужчин. Самые низкие средние уровни тестостерона наблюдали в группе с уровнем воздействия шума более 92,69 дБА [28].

Исследование по изучению взаимосвязи между профессиональным воздействием шума и общей вибрации и уровнями половых гормонов у работников завода по производству автомобильных запчастей показало, что только у 49% мужчин их значения находились в пределах нормы [11].

Результаты нескольких эпидемиологических исследований показывают, что воздействие такого неблагоприятного производственного фактора, как общая вибрация, может способствовать снижению фертильности как у мужчин, так и у женщин [11, 28]. Найдены отдельные работы по изучению влияния производственной вибрации на мужскую репродуктивную систему.

Воздействие общей вибрации способствует снижению образования тестостерона, эстрадиола, а также приводит к угнетению секреторной активности предстательной железы [29, 30].

Изучение РЗ водителей, операторов тяжёлой и лёгкой техники, механизаторов, бурильщиков, для которых общая вибрация является одним из вредных профессиональных факторов, выявило снижение объёма эякулята, подвижности сперматозоидов, повышение количества сперматозоидов с появлением аномальных форм [29].

Для изучения воздействия общей вибрации на репродуктивную функцию водителей такси в Тегеране обследовали 70 таксистов; группу сравнения составили 70 офисных служащих. Различия в среднесуточной экспозиции общей вибрации (WBV) водителей такси и офисных служащих составили $0,697 \pm 0,13$ м/с² и $0,068 \pm 0,09$ м/с² соответственно ($p<0,05$). Выявлены статистически значимые различия между группами по следующим показателям: общее количество сперматозоидов; прогрессивной, непрогрессивной и общей их подвижности; морфологии ($p<0,05$). Авторы отмечают, что необходимо дополнительно изучать роль таких факторов, как психологический стресс и качество сна [31].

Результаты недавних экспериментальных исследований *Krajnak K. et al.*, 2022, подтверждают, что воздействие общей вибрации является фактором риска развития репродуктивной дисфункции. Крыс самцов подвергали воздействию общей вибрации (31,5 Гц) 4 ч/день в течение 10 дней, что приводило к значительному снижению уровня сперматидов и циркулирующего пролактина, увеличению числа самцов с более высокими концентрациями циркулирующего тестостерона и заметным изменением уровней транскриптов, связанных с окислительным стрессом, воспалением и факторами, участвующими в регуляции клеточного цикла, что может в дальнейшем привести к снижению фертильности [31].

Воздействие ультра- и инфразвука. В доступной литературе встречается относительно мало исследований, посвящённых действию ультра- и инфразвука на репродуктивное здоровье.

Воздействие в эксперименте ультразвука на беременных самок мышей приводило к снижению массы и объёма яичек у плодов, а также к гистологическим изменениям в клетках Сертоли на 18-й день воздействия [*Carnes et al.*, 1991, 1995]. Эти изменения сохранялись у новорождённых, приводя к снижению функции яичек у взрослых животных. Не все результаты этих исследований были статистически значимы, но позднее появились новые данные, показывающие, что кратковременное воздействие ультразвука внутриутробно может вызывать стойкие изменения репродуктивной функции у рождённых мышесамцов. В более ранних экспериментальных исследованиях *Stolzenberg et al.*, 1980, наблюдали обратное — увеличение массы яичек и семенных пузырьков на 25-й день при экспозиции ультразвуком [33].

Не найдено данных о влиянии инфразвука на репродуктивное здоровье.

Воздействие барометрического давления. Воздействию пониженного атмосферного давления подвержены экипажи воздушных кораблей, работники в условиях высокогорья и др. В доступных источниках сообщают о нарушении морфофункционального состояния мужских половых желёз при воздействии гипоксии, что является следствием нарушения кислотно-щелочного состояния половых клеток и клеток сперматогенного эпителия и развития ацидоза. В эксперименте по моделированию гипоксии у лабораторных животных определялось достоверное снижение числа сперматозоидов в эякуляте, а также появление различного рода кинезиологических нарушений сперматозоидов. Отмечено, что максимальное повреждающее действие гипоксии проявлялось у более дифференцированных клеток сперматогенеза [20].

Воздействие ионизирующего (радиационного) и неионизирующего излучения и магнитных полей. Радиационное излучение является доказанным фактором нарушения функции репродуктивной системы. Ещё в 1903 г. была показана возможность радиационной стерилизации животных. Характер изменений в репродуктивных органах зависит от общей дозы, кратности и длительности воздействия радиационного облучения. Воздействие малых доз радиации на семенники носит выраженный кумулятивный характер. Облучение клеток на ранней стадии развития приводит к снижению количества сперматогониев; зрелые клетки-сперматозоиды, наоборот, крайне радиорезистентны [34, 35].

Промышленные рабочие специальных предприятий подвергаются воздействию ионизирующего излучения

(ИИ) во время рабочей смены [36]. Показано, что воздействие ИИ приводит к изменению качества спермы и репродуктивных гормонов, оказывая неблагоприятное воздействие на фертильность [37]. Последствием воздействия ИИ являются хромосомные нарушения, что может привести к врождённым аномалиям у потомства [16].

Персонал по утилизации атомных подводных лодок, подвергается сочетанному воздействию хронического облучения в малых дозах (1–5 мЗв в год) и воздействию высокотоксичных химических веществ в уровнях, не превышающих ПДК. В этой группе отмечалась высокая частота рождения детей с общей патологией по сравнению с общей группой населения — 61,0% и 27,9% соответственно; частота врождённых пороков развития у новорождённых этих работников в два раза превышала показатели в общей группе населения — 11,1 и 5,2 на 1000 соответственно. Авторы считают, что подтверждение взаимосвязи между состоянием репродуктивного здоровья мужчин-работников этой профессии и патологией рождённых у них детей, требует дальнейшего изучения [33, 38].

Для выявления связи между воздействием магнитных полей и нарушением качества спермы у работников проведено исследование, участники которого фиксировали суточную дозу излучения. Установлено, что работники, суточная доза которых составила 1,6 мГс (миллиГаусс), имеют вдвое больший риск развития аномальной подвижности и нарушений строения сперматозоидов ($OR=2,0$, 95% ДИ: 1,0–3,9). Увеличение продолжительности излучения выше 1,6 мГс статистически значимо увеличивало риск репродуктивных нарушений ($p=0,03$). Важно отметить, что связь и зависимость доза–эффект становились более сильными у работников, замеры дозы магнитного поля которых, охватывали период 3 месяца, т. е. период сперматогенеза [39].

Экспериментальные исследования показали, что на степень подвижности и активности сперматозоидов влияют как доза, так и продолжительность излучения. При малой дозе излучения (от 0,8 Сi) и коротком воздействии (2 мин), подвижность сперматозоидов снижена на 60%, тогда как при увеличении дозы до 4 Сi и времени воздействия до 21 мин жизнеспособность сперматозоидов снижается на 99%. Авторы объясняют это разрушением молекулярных связей под воздействием огромной скорости и энергии радиоактивных частиц. С одной стороны, они оказывают прямое повреждающее действие на нуклеиновые кислоты и белки, вызывая радиоллиз воды с образованием активных радикалов. С другой стороны, активируют перекисное окисление липидов и образование вторичных радиотоксинов, нарушающих целостность мембран и внутриклеточных органелл клетки, что может приводить к образованию мутаций и спонтанным изменениям биофизической структуры клетки [21].

Влияние неионизирующего излучения на мужское РЗ. В настоящее время используется множество генерирующих электромагнитные поля (ЭМП) устройств, среди которых наиболее распространёнными источниками микроволн являются линии электропередач (50–60 Гц), компьютерные мониторы (60–90 Гц), вещательные радиопередачи (530–1600 кГц), радиопередачи FM (88–108 МГц), телевизионные передачи (50–700 МГц), мобильные телефоны (850 МГц – 2,4 ГГц), микроволновые печи (2,45 ГГц), ноутбуки и иные устройства с Wi-Fi (2,4 ГГц) [40, 41].

Радиочастотное излучение (РЧИ) — компонент электромагнитной энергии, охватывающий диапазон частот от 3 КГц до 300 ГГц. При излучении сотовых телефонов

РЧИ носит кратковременный и повторяющийся характер со сравнительно высокой интенсивностью, тогда как РЧИ базовых станций сотовых телефонов имеет большую продолжительность, но с очень низкой интенсивностью.

Ряд источников указывает на воздействие данного вида излучения на отдельные органы и системы человека — центральную нервную систему (нарушения сна, головная боль), систему кровообращения (повышение частоты сердечных сокращений и артериального давления) и репродуктивную систему (мужские и женские проблемы с фертильностью) [42–45].

Количество энергии ЭМП, поглощаемой тканями человека, зависит от физических параметров, таких как частота, интенсивность, плотность потока и поляризация, мощность и глубина проникновения [46–48], а также продолжительность воздействия, расстояние до источника излучения, и, самое главное, положения устройства во время использования [49].

Более высокий уровень поглощения излучения можно наблюдать при удержании телефона при разговоре у головы или ношении в кармане брюк, при использовании подключённого к Wi-Fi ноутбука на коленях, а также при частом использовании микроволновых печей. Показано, что хранение телефонов GSM в кармане брюк или на поясе приводит к снижению подвижности сперматозоидов [50, 51].

При анкетировании мужчин в период 2012–2020 гг., планирующих деторождение, в Дании ($n=751$) и Северной Америке ($n=2349$) выявлена слабая связь между ношением телефона в переднем кармане брюк и снижением способности к оплодотворению. У респондентов с индексом массы тела менее 25 кг/м кв. установлена умеренная обратная связь [52].

Ряд исследований показывают, что использование мобильных телефонов отрицательно влияет на качество спермы, уменьшая количество сперматозоидов, их концентрацию, подвижность и жизнеспособность, ведёт к нарушению их нормальной морфологии, снижению метаболизма [48, 53, 58] и нестабильности генома, а также способствует увеличению концентрации активных форм кислорода (АФК), что может привести к развитию мужского бесплодия [53].

Kesari K.K., Behari J., 2012, продемонстрировали, что у мужчин, пользующихся мобильными телефонами, наблюдают повышенный уровень аномальной морфологии сперматозоидов [55]. Вызванные ЭМП морфологические изменения зависят от типа, дозы, режима и продолжительности воздействия [56, 57].

Яички очень чувствительны к воздействию излучения широкого спектра, из-за происходящих в них процессов развития и созревания сперматозоидов [59, 60]. Luo Y. et al., 2013 [61] показали, что воздействие РЧИ непосредственно влияет на ткани яичек, вызывая значительное уменьшение диаметра и относительной массы семенных канальцев, а также средней высоты зародышевого эпителия и другие патологические и физиологические изменения в тканях яичек, что может послужить причиной развития бесплодия у обследованных [62].

Последние данные показывают, что Wi-Fi ноутбуков негативно влияет на качество спермы [63]. ЭМП также ответственны за снижение частоты оплодотворения [53, 64], количество сперматогенных клеток и запуск апоптоза [65], сниженное качество спермы [39], гормональные изменения в яичке [66], и могут привести к нару-

шениям эмбрионального развития или потере плода [67].

Исследования, направленные на изучение механизма повреждающего действия РЧИ, показывают, что развитие патологии яичек и изменения показателей качества спермы вызваны состоянием окислительного стресса и стимуляцией образования свободных радикалов и АФК митохондриями сперматозоидов [68]. Свободные радикалы окисляют мембранные фосфолипиды, что приводит к снижению жизнеспособности и снижению вязкости мембран с нарушением подвижности клеток [53]. Окислительный стресс может ускорить гибель клеток сперматозоидов и даже способствовать канцерогенезу в тканях яичек [69].

В исследовании *Gautam R. et al., 2020*, установили, что неионизирующее излучение вызывает генотоксичность, приводит к геномной нестабильности и окислительному стрессу [70], и может влиять на физиологическую активность яичек [71].

Rai U. et al., 2023, проанализировали статьи об исследованиях по генотоксическому действию РЧИ на мужскую репродуктивную систему *in vitro* и *in vivo*, и выяснили, что проблемы бесплодия у большинства мужчин связаны с повреждением ДНК сперматозоидов [40].

Экспериментальные исследования по воздействию излучения мобильных телефонов 3G на репродуктивную систему взрослых крыс самцов выявили повышение уровня АФК и перекисного окисления липидов, что подтвердило приведённые выше данные. Последнее свидетельствует о развитии окислительного стресса у самцов, с одновременным изменением параметров спермы (снижением количества сперматозоидов, изменением морфологии хвостов сперматозоидов), что может повлиять на фертильность [72]. Другие экспериментальные работы также показали снижение количества сперматозоидов [59] и их подвижности [72] при действии мобильных телефонов на животных.

Kesari K.K. et al., 2012, в эксперименте на самцах крыс линии Вистар показали статистически значимое снижение ($p < 0,0001$) количества сперматозоидов ($61,33 \pm 3,68\%$ против $31,14 \pm 13,6\%$) и увеличение процента апоптотических клеток ($5,93 \pm 1,64\%$ против $13,15 \pm 1,26\%$) после воздействия излучения сотового телефона (2 ч. в день в течение 35 дней) [55]. Воздействие на животных портативных компьютеров, подключённых к Wi-Fi 7 часов в день в течение одной недели, снижало количество и подвижность сперматозоидов [74]. Такое воздействие может вызвать состояние окислительного стресса и стимуляцию образования свободных радикалов митохондриями сперматозоидов [68].

В нескольких исследованиях сообщают о связи низкочастотных ЭМП с изменениями в мужской репродуктивной системе и нарушением фертильности [28]. Так, на заводе по производству автомобильных запчастей исследовали репродуктивное здоровье рабочих, занятых процессами литья, вредным производственным фактором для которых были низкочастотные магнитные и электрические поля. Выявлена статистически значимая связь между воздействием электрических полей и количеством сперматозоидов, нарушением их морфологии и подвижности [28].

Проведены исследования по изучению реакций живого организма на действие природных и техногенных ЭМИ крайне высокочастотного (КВЧ) диапазона с интенсивностью ниже тепловой (т. е. при плотности потока энергии $< 10 \text{ мВт/см}^2$), широко применяемые в физиотерапевтических кабинетах лечебных учреждений [75].

Несмотря на мнение о безопасности терапевтических частот КВЧ-излучений, исследования на лабораторных

животных все же выявили негативное воздействие облучения на репродуктивные и эндокринные ткани и органы [75]. Так, показано патогенное действие низкоинтенсивных ЭМИ КВЧ на сперматогенез в виде формирования множества дегенераций и полиморфизма сперматозоидов, в основе которых лежит нарушение митотических и мейотических делений клеток [34, 35].

Следует сказать, что при разработке ПДК при профессиональном облучении не учитывается потенциальное воздействие ЭМИ и МИ на репродуктивную систему. Поэтому разработка мер по защите работников от профессиональных воздействий, влияющих на репродуктивную систему, имеет первостепенное значение [28].

Таким образом данные литературы показывают, что воздействие на работников мужчин таких профессиональных факторов, как нагревающий микроклимат, шум и вибрация, могут оказывать повреждающее воздействие на их репродуктивную функцию. Последствиями такого воздействия являются нарушения гормонального статуса, сперматогенеза, приводящие в дальнейшем к изменению репродуктивной функции организма и бесплодию. Эти данные были подтверждены клиническими исследованиями.

В доступных источниках литературы показано, что ионизирующее (радиационное) излучение является доказанным фактором нарушений репродуктивного здоровья, характер изменений которых зависит от общей дозы, кратности и длительности облучения. Воздействие ИИ приводит к изменениям количества и качества спермы, репродуктивных гормонов, оказывая неблагоприятное воздействие на фертильность. Последствием воздействия ИИ являются хромосомные нарушения, ведущие к врождённым аномалиям у потомства.

Установлено, что биологическое действие электромагнитных полей различного частотного диапазона (сотовых телефонов, микроволновых печей, ноутбуков или устройств с Wi-Fi, а также некоторых др. видов неионизирующего излучения — низкочастотного ЭМП и КВЧ на репродуктивные органы может проявиться в изменении количества сперматозоидов, нарушении их морфологии, подвижности, повреждении ДНК, приводя к геномной нестабильности, а также нарушениям в работе протеиназы, гормонов и антиоксидантных ферментов, что может привести к нарушению гормональной регуляции, расстройствам сексуального поведения, а также снижению фертильности, вплоть до бесплодия.

Закключение. Таким образом, представленные данные отечественных и зарубежных авторов показывают, что воздействие физических факторов рабочей среды приводит к нарушениям репродуктивного здоровья мужчин-работников.

Однако в настоящее время отсутствуют масштабные и структурные программы, сфокусированные на исследовании и охране репродуктивного здоровья работников-мужчин. В этой связи необходим системный подход, включающий создание государственных программ по изучению влияния вредных факторов рабочей среды и трудового процесса на репродуктивное здоровье мужчин; раннему выявлению репродуктивных нарушений, связанных с таким воздействием, а также с воздействием среды обитания; разработке научно обоснованной системы оценки профессионального риска и принятия на их основе управленческих решений по сохранению репродуктивного здоровья, поскольку снижение фертильности работников-мужчин потенциально затрагивает благополучие семьи и общества в целом.

Список литературы (пп. 2–6, 8, 12, 14–18, 22, 23, 25, 26, 28–33, 36, 37, 39–75 см. References)

1. Указ Президента Российской Федерации от 06.06.2019 г. № 254 «О Стратегии развития здравоохранения в Российской Федерации на период до 2025 года». Официальный интернет-портал правовой информации: [электронный ресурс]. <https://clck.ru/35BHBj> (дата обращения 10.07.2023).
7. Белый Л.Е. Факторы образа жизни и их влияние на мужскую фертильность. *Клинический разбор в акушерстве, гинекологии и репродуктологии*. 2021; 1(1): 29–35. <https://doi.org/10.47407/kragr2021.1.1.00006>
9. Лебедев Г.С., Голубев Н.А., Шадакин И.А. Мужское бесплодие в Российской Федерации: статистические данные за 2000–2018 годы. *Экспериментальная и клиническая урология*. 2019; 4: 4–13. <https://doi.org/10.29188/2222-8543-2019-11-4-4-12>
10. Литвинова Н.А., Лесникова А.И., Толочко Т.А., Шмелева А.А. Эндогенные и экзогенные факторы, влияющие на мужскую фертильность. *Фундаментальная и клиническая медицина*. 2021; 6(2): 124–135. <https://doi.org/10.23946/2500-0764-2021-6-2-124-135>
11. Карельская А.П. Репродуктивное здоровье мужчин как медико-социальная проблема. *Материалы Международной научно-практической конференции «Медико-социальные и психологические аспекты безопасности промышленных агломераций»*. Екатеринбург: УрФУ; 2016: 21–7. <https://elibrary.ru/vtulwl>
13. Капашин В.П. (к 70-летию со дня рождения). *Вестник войск РХБ защиты*. 2020; 4(3): 392–393.
19. Потемина Т.Е., Тукмакова Т.С. Влияние теплового воздействия на сперматогенез в эксперименте. *Современные технологии в медицине*. 2011; 4: 99–101.
20. Халимов Ю.Ш., Зайцев В.А., Матвеев С.Ю. Состояние гипофизарно-гонадной системы и сперматогенеза у военнослужащих, принимающих участие в работах по уничтожению химического оружия. *Эндокринология. Новости. Мнения. Обучение*. 2016; 2(15): 74–79. <https://elibrary.ru/whouvf>
21. Бердыш Д.С., Мирзоева Р.К. Влияние физических факторов на подвижность сперматозоидов человека. *Международный студенческий научный вестник*. 2018; 4–3. <https://elibrary.ru/xplfud>
24. Васильев В.С. Морфометрические и кинетические показатели спермы человека до и после воздействия низких температур при различных состояниях сперматогенеза. *Здоровье мужчины*. 2009; 2: 184–186.
27. Алексеев С.Б., Кадыскина Е.Н., Суворов Г.А. *Производственный шум*. Л.: Медицина. 1991: 134.
34. Дергилев А.А., Чибисова О.Ф., Палыга Г.Ф. Влияние ионизирующей радиации в нестерилизующих дозах на эмбриогенез и постнатальное развитие потомства двух поколений самцов крыс, половые клетки которых облучены на премейотических стадиях сперматогенеза. *Радиация и риск*. 2012; 21(2): 39–45. <https://elibrary.ru/oxprkf>
35. Зайцев В.А., Цепкова Г.А., Говердовский Ю.Б. Репродуктивное здоровье мужчин в условиях воздействия сложного комплекса вредных профессиональных и экологических факторов. *Врач*. 2020; (8): 45–53. <https://doi.org/10.29296/25877305-2020-08-07>
38. Лягинская А.М., Шандала Н.К., Киселев С.М. Состояние здоровья персонала предприятия по обращению с радиоактивными отходами утилизируемого атомного флота СССР. *Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра)*. 2019; 28(4): 73–87. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2019-28-4-73-87>

References

1. Decree of the President of the Russian Federation of June 6, 2019 No. 254 "On the Strategy for the Development of Healthcare in the Russian Federation for the period up to 2025". Official Internet portal of legal information: [electronic resource]. <https://clck.ru/35BHBj> (Accessed 12.06.2022).
2. Mascarenhas M.N., Flaxman S.R., Boerma T., et al. National, regional, and global trends in infertility prevalence since 1990: a systematic analysis of 277 health surveys. *PLoS Med*. 2012; 9(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1001356>
3. Boivin J., Bunting L., Collins J.A., et al. International estimates of infertility prevalence and treatment-seeking: potential need and demand for infertility medical care. *Human reproduction (Oxford, England)*. 2007; 22(6): 1506–12. <https://doi.org/10.1093/humrep/dem046>
4. Rutstein S.O., Shah I.H. Infecundity infertility and childlessness in developing countries. Geneva: World Health Organization 2004.
5. WHO. Infertility. Byulleten' Vsemirnoj organizacii zdavooohraneniya. Besplodie. (po sostoyaniyu na 10 noyabrya 2022 g.). <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/infertility>
6. Agarwal A., Mulgund A., Hamada A., Chyatte M.R. A unique view on male infertility around the globe. *Reprod Biol Endocrinol*. 2015; 13: 37. <https://doi.org/10.1186/s12958-015-0032-1>
7. Belyj L.E. Lifestyle factors and their impact on male fertility. *Klinicheskij razbor v akusherstve, ginekologii i reproduktologii*. 2021; 1(1): 29–35. <https://doi.org/10.47407/kragr2021.1.1.00006>
8. Assidi M. Infertility in Men: Advances towards a Comprehensive and Integrative Strategy for Precision Therapeutics. *Cells*. 2022; 11(10): 1711. <https://doi.org/10.3390/cells11101711>
9. Lebedev G.S., Golubev N.A., Shaderkin I.A. Male infertility in the Russian Federation: statistical data for 2000–2018. *Ekspperimental'naya i klinicheskaya urologiya*. 2019; 4: 4–13. <https://doi.org/10.29188/2222-8543-2019-11-4-4-12>
10. Litvinova N.A., Lesnikova A.I., Tolochko T.A., Shmeleva A.A. Factors affecting male fertility: a review. *Fundamental and Clinical Medicine*. 2021; 6(2): 124–135. <https://doi.org/10.23946/2500-0764-2021-6-2-124-135>
11. Karel'skaya L.P. Reproductive health of men as a medical and social problem. Materials of the International scientific-practical conference "Medical-social and psychological aspects of the safety of industrial agglomerations". <https://elibrary.ru/vtulwl>
12. Ramezanifar S., Beyrarni S., Mehrifar Y. et al. Occupational Exposure to Physical and Chemical Risk Factors: A Systematic Review of Reproductive Pathophysiological Effects in Women and Men. *Saf Health Work*. 2023; 14(1): 17–30. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2022.10.005>
13. Kapashin V.P., 70th Birth Anniversary. *Journal of NBC Protection Corps*. 2020; 4(3): 392–393.
14. Hamerezaee M., Dehghan S.F., Golbabaei F., Fathi A., Barzegar L., Heidarnajad N. Assessment of semen quality among workers exposed to heat stress: a crosssectional study in a steel industry. *Saf. Health Work*. 2018; 9(2): 232–5. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2017.07.003>
15. Jung A., Eberl M., Schill W.-B. Improvement of semen quality by nocturnal scrotal cooling and moderate behavioural change to reduce genital heat stress in men with oligoasthenoteratozoospermia. *Reproduction*. 2001; 121: 595–603. <https://doi.org/10.1530/rep.0.1210595>
16. Ashiru O.A., Odusanya O.O. Fertility and occupational hazards: review of the literature. *Afr J. Reprod Health*. 2009; 13(1): 159–165. PMID: 20687273
17. Jurewicz J., Radwan M., Sobala W. et al. Effects of occupational exposure — is there a link between exposure based on an occupational questionnaire and semen quality? *Syst Biol Reprod Med*. 2014; 60 (4): 227–33. <https://doi.org/10.3109/19396368.2014.907837>
18. Hoang-Thi A.P., Dang-Thi A.T., Phan-Van S. et al. The Impact of High Ambient Temperature on Human Sperm Parameters:

- A Meta-Analysis. *Iran J Public Health*. 2022; 51(4): 710–723. <https://doi.org/10.18502/ijph.v51i4.9232>
19. Potemina T.E., Tukmakova T.S. The effect of thermal exposure on spermatogenesis in the experiment. *Sovremennye tekhnologii v medicinu*. 2011; 4: 99–101.
 20. Halimov Yu.Sh., Zajcev V.A., Matveev S.Yu. Status of the pituitary-gonadal sistem and spermatogenesis in troops, participated in the destruction of chemical weapons. *Endokrinologiya. Novosti. Mneniya. Obuchenie*. 2016; 2(15): 74–79. <https://elibrary.ru/whouvf>
 21. Berdysh D.S., Mirzoeva R.K. Influence of physical factors on the motility of human spermatozoa. *Mezhdunarodnyj studencheskij nauchnyj vestnik*. 2018; 4-3. <https://elibrary.ru/xplfud>
 22. Abdelhamid M.H.M., Walschaerts M., Ahmad G. et al. Mild experimental increase in testis and epididymis temperature in men: effects on sperm morphology according to spermatogenesis stages. *Transl Androl Urol*. 2019; 8(6): 651–665. <https://doi.org/10.21037/tau.2019.11.18>
 23. Wu Y.Q., Rao M., Hu S.F. et al. Effect of transient scrotal hyperthermia on human sperm: an iTRAQ-based proteomic analysis. *Reprod Biol Endocrinol*. 2020; 12; 18(1): 83. <https://doi.org/10.1186/s12958-020-00640-w>
 24. Vasil'ev V.S. Morphometric and kinetic parameters of human sperm before and after exposure to low temperatures in various states of spermatogenesis. *Zdorov'e muzhchiny*. 2009; 2: 184–186.
 25. Ristovska G., Laszlo H.E., Hansell A.L. Reproductive outcomes associated with noise exposed: a systematic review of the literature. *Int J Environ Res Public Health*. 2014; 11(8): 7931–52. <https://doi.org/10.3390/ijerph110807931>
 26. Figà-Talamanca I. Occupational risk factors and reproductive health of women. *Occupational Medicine*. 2006; 56 (8): 521–531. <https://doi.org/10.1093/occmed/kql114>
 27. Alekseev S.B., Kadyskina E.N., Suvorov G.A. *Production noise*. Medicina; 1991: 134.
 28. Mohammadi H., Golbabaie F., Dehghan S.F. et al. Relationship between occupational exposure to whole-body vibration and noise with sex hormone levels: an empirical assessment in an automobile parts manufacturing plant. *Toxicol Ind Health*. 2021; 37(7): 377–90. <https://doi.org/10.1177/07482337211006535>
 29. Penkov I.A., Tzvetkov D. Effect of vibration on male reproductive system and function. *Cent Eur J Public Health*. 1999; 7(3): 149–154.
 30. De Fleurian G., Perrin J., Ecochard R. et al. Occupational exposures obtained by questionnaire in clinical practice and their association with semen quality. *J Androl*. 2009; 30(5): 566–79. <https://doi.org/10.2164/jandrol.108.005918>
 31. Zarei S., Dehghan S.F., Vaziri M.H. et al. Assessment of semen quality of taxi drivers exposed to whole body vibration. *J Occup Med Toxicol*. 2022; 17: 16. <https://doi.org/10.1186/s12995-022-00357-z>
 32. Krajnak K., Waugh S., Welcome D. et al. Effects of whole-body vibration on reproductive physiology in a rat model of whole-body vibration. *J. Toxicol Environ Health A*. 2022; 85(23): 953–71. <https://doi.org/10.1080/15287394.2022.2128954>
 33. Health Effects of Exposure to Ultrasound and Infrasound. *Report of the independent Advisory Group on Non-ionising Radiation Documents of the Health Protection Agency Radiation, Chemical and Environmental Hazards*. 2010; February; 89–94.
 34. Dergilev A.A., Chibisova O.F., Palyga G.F. et al. Effect of exposure of rat male germ cells in the pre-meiotic phase of spermatogenesis to radiation at doses below a castration level on ontogenesis of two generations of posterity. *Radiatsiya i risk*. 2012; 21(2): 39–45. <https://elibrary.ru/oxprkf>
 35. Zajcev V.A., Cepkova G.A., Goverdovskij Yu.B. Reproductive health of men under the influence of the complex of harmful professional and environmental factors. *Vrach*. 2020; (8): 45–53. <https://doi.org/10.29296/25877305-2020-08-07>
 36. Kumar S. Occupational exposure associated with reproductive dysfunction. *J Occup Health*. 2004; 46(1): 1–19. <https://doi.org/10.1539/joh.46.1>
 37. Grajewski B., Cox C., Schrader S.M. et al. Semen quality and hormone levels among radiofrequency heater operators. *J. Occup Environ Med*. 2000; 42(10): 993–1005. <https://doi.org/10.1097/00043764-200010000-00005>
 38. Lyaginskaya A.M., Shandala N.K., Kiselev S.M. et al. The health state of the enterprises personnel for the management of radioactive waste of the USSR dismantled nuclear fleet. *Radiatsiya i risk (Byulleten' Nacional'nogo radiacionno-epidemiologicheskogo registra)*. 2019; 28(4): 73–87. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2019-28-4-73-87>
 39. Li D.K., Yan B. et al. Exposure to magnetic fields and the risk of poor sperm quality. *Reprod Toxicol*. 2010; 29(1): 86–92. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2009.09.004>
 40. Rai U., Singh R. Genotoxic Risks to Male Reproductive Health from Radiofrequency Radiation. *Cells*. 2023; 12(4): 594. <https://doi.org/10.3390/cells12040594>
 41. Avendano C., Mata A., Sarmiento C.S., Doncel G. Use of laptop computers connected to internet through Wi-fi decreases human sperm motility and increases sperm DNA fragmentation. *Fertil Steril*. 2012; 97: 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2011.10.012>
 42. Behari J. Biological correlates of low-level electromagnetic-field exposure, general. *Applied and systems toxicology*. Wiley, Book chapter. 2009; 109.
 43. Singh R., Nath R., Mathur A.K. et al. Effect of radiofrequency radiation on reproductive health. *Indian J Med Res*. 2018; 148: 92–99. https://doi.org/10.4103/ijmr.IJMR_1056_18
 44. Repacholi M.H. Low-level exposure to radiofrequency electromagnetic fields: Health effects and research needs. *Bioelectromagnetics*. 1998; 19: 1–19. PMID: 9453702.
 45. Paulraj R., Behari J. Radio frequency radiation effects on protein kinase C activity in rats' brain. *Mutat Res*. 2004; 545: 127–30. [https://doi.org/10.1016/s0027-5107\(03\)00113-1](https://doi.org/10.1016/s0027-5107(03)00113-1)
 46. Aitken R.J., Bennetts L.E., Sawyer D. et al. Impact of radio frequency electromagnetic radiation on DNA integrity in the male germline. *Int J Androl*. 2005; 28: 171–9. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2605.2005.00531.x>
 47. Eroglu O., Oztas E., Yildirim I., Kir T. et al. Effects of electromagnetic radiation from a cellular phone on human sperm motility: An in vitro study. *Arch Med Res*. 2006; 37: 840–3. <https://doi.org/10.1016/j.arcmed.2006.05.003>
 48. Agarwal A., Singh A., Hamada A. et al. Cell phones and male infertility: a review of recent innovations in technology and consequences. *Int Braz J Urol*. 2011; 37: 432–454. <https://doi.org/10.1590/s1677-55382011000400002>
 49. Bernabò N., Tettamanti E., Pistilli M.G. et al. Effects of 50 Hz extremely low frequency magnetic field on the morphology and function of boar spermatozoa capacitated in vitro. *Theriogenology*. 2007; 67: 801–15. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2006.10.014>
 50. Kilgallon S.J., Simmons L.W. Image content influences men's semen quality. *Biol Lett*. 2005; 1: 252–255. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2005.0324>
 51. Al-Bayyari N. The effect of cell phone usage on semen quality and fertility among Jordanian males. *Middle East Fertil Society J*. 2017; 22: 178–182. <https://doi.org/10.1016/J.MEFS.2017.03.006>
 52. Hatch E.E., Willis S.K., Wesselink A.K. et al. Male cellular telephone exposure, fecundability, and semen quality: results from two preconception cohort studies. *Hum Reprod*. 2021; 20; 36 (5): 1395–1404. <https://doi.org/10.1093/humrep/deab001>
 53. Kesari K.K., Agarwal A., Henkel R. Radiations and male fertility. *Reprod Biol Endocrinol*. 2018; 9; 16 (1): 118. <https://doi.org/10.1186/s12958-018-0431-1>
 54. Kumar S., Kesari K.K., Behari J. The therapeutic effect of a pulsed electromagnetic field on the reproductive patterns of male Wistar rats exposed to a 2.45-GHz microwave field. *Clin (Sao Paulo)*. 2011; 66: 1237–1245. <https://doi.org/10.3109/15368378.2012.700292>
 55. Kesari K.K., Behari J. Evidence for mobile phone radiation exposure effects on reproductive pattern of male rats: role of

- ROS. *Electromagn Biol Med.* 2012; 31: 213–222. <https://doi.org/10.3109/15368378.2012.700292>
56. Seyhan N., Guler G. Review of in vivo static and ELF electric fields studies performed at Gazi biophysics department. *Electromag Biol Med.* 2006; 25: 307–323. <https://doi.org/10.1080/15368370601054803>
57. Türedi S., Hancı H., Topal Z. et al. The effects of prenatal exposure to a 900-MHz electromagnetic field on the 21-day-old male rat heart. *Electromag Biol Med.* 2015; 34(4): 390. <https://doi.org/10.3109/15368378.2014.952742>
58. Yan J.G., Agresti M., Bruce T. et al. Effects of cellular phone emissions on sperm motility in rats. *Fertil Steril.* 2007; 88: 957–964. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2006.12.022>
59. Kesari K., Kumar S., Behari J. Mobile phone usage and male infertility in Wistar rats. *Ind J Exp Biol.* 2010; 48: 987–992. PMID: 21299041.
60. Bhat M.A. Effects of Electromagnetic Waves Emitted by Mobile Phones on Male Fertility. *Computer Engineering and Intelligent Systems.* 2013; 4(3): 51–64.
61. Luo Y., Wang X., Chen Y. et al. Effects of electromagnetic radiation on morphology and TGF- β 3 expression in mouse testicular tissue. *Toxicology.* 2013; 310: 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2013.05.004>
62. Kumar S., Nirala J.P., Behari J., Paulraj R. Effect of electromagnetic irradiation produced by 3G mobile phone on male rat reproductive system in a simulated scenario. *Indian J. Exp. Biol.* 2014; 52: 890–897.
63. Avendano C., Mata A., Sarmiento C.S., Doncel G. Use of laptop computers connected to internet through Wi-fi decreases human sperm motility and increases sperm DNA fragmentation. *Fertil Steril.* 2012; 97: 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2011.10.012>
64. Al-Akhras M.A., Elbetieha A., Hasan M.K. et al. Effects of extremely low frequency magnetic field on fertility of adult male and female rats. *Bioelectromagnetics.* 2001; 22: 340–344. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2007.01.166>
65. Lee J.S., Ahn S.S., Jung K.C. et al. Effects of 60 Hz electromagnetic field exposure on testicular germ cell apoptosis in mice. *Asian J Androl.* 2004; 6: 29–34.
66. Agarwal A., Deepinder F., Sharma R.K. et al. Effect of cell phone usage on semen analysis in men attending infertility clinic: an observational study. *Fertil Steril.* 2007; 89: 124–128.
67. Sharma A., Kesari K.K., Saxena V.K., Sisodia R. The influence of prenatal 10 GHz microwave radiation exposure on a developing mice brain. *Gen Physiol Biophys.* 2017; 36: 41–51. https://doi.org/10.4149/gpb_2016026
68. De Iuliis G.N., Newey R.J., King B.V., Aitken R.J. Mobile phone radiation induces reactive oxygen species production and DNA damage in human spermatozoa in vitro. *PLoS One.* 2009; 4: 176–179. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006446>
69. Desai N., Sharma R., Makker K. et al. Physiologic and pathologic levels of reactive oxygen species in neat semen of infertile men. *Fertil Steril.* 2009; 92: 1626–1631. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2008.08.109>
70. Gautam R., Priyadarshini E., Nirala J., Rajamani P. Impact of nonionizing electromagnetic radiation on male infertility: an assessment of the mechanism and consequences. *Int J Radiat Biol.* 2022; 98(6): 1063–1073. <https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1859154>
71. Sciorio R., Tramontano L., Esteves S.C. Effects of mobile phone radiofrequency radiation on sperm quality. *Zygote.* 2022; 30(2): 159–168. <https://doi.org/10.1017/S096719942100037X>
72. Gautam R., Singh K.V., Nirala J. et al. Oxidative stress-mediated alterations on sperm parameters in male Wistar rats exposed to 3G mobile phone radiation. *Andrologia.* 2019; 51(3): 13201. <https://doi.org/10.1111/and.13201>
73. Mailankot M., Kunnath A.P., Jayalekshmi H., Koduru B., Valsalan R. Radio frequency electromagnetic radiation (RF-EMR) from GSM (0.9/1.8 GHz) mobile phones induces oxidative stress and reduces sperm motility in rats. *Clinics (Sao Paulo).* 2009; 64: S615. <https://doi.org/10.1590/s1807-59322009000600011>
74. Mortazavi S.M.J., Tavassoli A.R., Ranjbari F., Moammaiee P. Effects of laptop computers' electromagnetic field on sperm quality. *J. Reprod Infertil.* 2010; 11: 251–258. <https://doi.org/10.1080/19338244.2011.564232>
75. Schrader S.M., Marlow K.L. Asian Assessing the reproductive health of men with occupational exposures. *J Androl.* 2014; 16(1): 23–30. <https://doi.org/10.4103/1008-682X.122352>