



Обзор

# Влияние электромагнитного излучения Wi-Fi (2,45 ГГц) на сперматогенез и мужскую фертильность

Л.Е. Белый✉

ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», Ульяновск, Россия

✉lbely@yandex.ru

## Аннотация

Беспроводная связь (Wi-Fi) как предпочтительный способ интернет-коммуникации и подключения стала повседневной необходимостью и широко используется в самых разных устройствах. Несомненно, что широкое использование Wi-Fi (2,45 ГГц) значительно изменило человеческую жизнь к лучшему, однако привело к повсеместному распространению радиочастотного электромагнитного излучения. Накопленные научные данные свидетельствуют о возможном пагубном воздействии Wi-Fi на мужскую фертильность. В настоящем обзоре рассмотрены ключевые патогенетические механизмы мужской инфертильности вследствие влияния беспроводных устройств: оксидативный стресс, повреждение клеточной ДНК и апоптоз мужских гамет. Представлены результаты экспериментальных исследований *in vitro*, доказывающих влияние радиочастотного излучения Wi-Fi на эякулят. Проанализированы результаты исследований, в которых были использованы экспериментальные модели *in vivo*, что позволило получить более целостное представление об эффектах Wi-Fi на мужскую репродуктивную систему и сперматогенез. Представлены новые научные данные, касающиеся влияния повседневного использования Wi-Fi на сперматогенез у мужчин.

**Ключевые слова:** Wi-Fi, сперматогенез, электромагнитное излучение, мужская фертильность, оксидативный стресс, апоптоз.

**Для цитирования:** Белый Л.Е. Влияние электромагнитного излучения Wi-Fi (2,45 ГГц) на сперматогенез и мужскую фертильность. *Клинический разбор в общей медицине*. 2024; 5 (3): 74–81. DOI: 10.47407/kr2023.5.3.00368

Review

## The effects of Wi-Fi radiation (2.45 ghz) on spermatogenesis and male reproductive system

Lev E. Belyi✉

Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia

✉lbely@yandex.ru

## Abstract

Wireless communication (Wi-Fi) has become the preferred way of Internet communication and connectivity, has become a daily necessity and is widely used in a wide variety of devices. Widespread use of Wi-Fi (2.45 GHz) has significantly changed human life for the better, but has led to the widespread spread of radio frequency electromagnetic radiation. Scientific evidence suggests the possible negative effects of Wi-Fi on male fertility. This review examines the main pathogenetic mechanisms of male infertility due to the influence of wireless devices: oxidative stress, DNA fragmentation and apoptosis of male gametes. The results of *in vitro* experimental studies proving the effect of radiofrequency electromagnetic radiation on ejaculate are presented. The results of studies using *in vivo* experimental models were analyzed. This allowed us to get a holistic view of the effects of Wi-Fi on the male reproductive system and spermatogenesis. The presented new scientific data on the impact of everyday Wi-Fi use on spermatogenesis in men.

**Keywords:** Wi-Fi, spermatogenesis, electromagnetic radiation, male fertility, oxidative stress, apoptosis.

**For citation:** Belyi L.E. The effects of Wi-Fi radiation (2.45 ghz) on spermatogenesis and male reproductive system. *Clinical review for general practice*. 2024; 5 (3): 74–81. DOI: 10.47407/kr2023.5.3.00368 (In Russ.).

## Введение

По современным оценкам, бесплодием страдают 8–12% пар во всем мире, причем с мужским фактором частично или полностью связана примерно половина случаев бесплодия [1]. Тенденция к снижению количества сперматозоидов в эякуляте зафиксирована специалистами во многих странах мира, а в Российской Федерации количество бесплодных мужчин за последние два десятилетия выросло вдвое [2]. Причины мужского бесплодия весьма разнообразны и могут быть ассоциированы с врожденными, приобретенными или идиопатическими факторами, нарушающими сперматогенез. Самыми частыми из них являются врожденные аномалии

или приобретенные дефекты мочеполовой системы; злокачественные новообразования; инфекции мочеполовых путей; повышение температуры мошонки (например, как следствие варикоцеле); эндокринные нарушения; генетические отклонения; иммунные процессы [3]. Помимо перечисленного, многие факторы окружающей среды (например, воздействие промышленных химикатов, тяжелых металлов, радиации, загрязнения воздуха и воды, использование лекарственных средств и загрязненных пищевых продуктов; особенности образа жизни) в значительной степени могут способствовать росту распространенности мужского бесплодия [4, 5]. Эти факторы могут вызвать повреждение

генетического материала репродуктивных клеток, приводя к изменениям структуры ДНК. Неблагоприятное воздействие на генетический материал дополнительно приводит к изменению экспрессии и функции различных белков, кодируемых ДНК в клетке.

Мужчина в современном мире подвержен воздействию как ионизирующего, так и неионизирующего излучения, каждое из которых сегодня признано в качестве фактора окружающей среды, негативно влияющего на сперматогенез. Ионизирующее излучение гораздо опаснее неионизирующего излучения. Влияние ионизирующего излучения на репродуктивную функцию мужчин известно [6]. Источниками неионизирующего излучения являются линии электропередач (50–60 Гц), компьютерные мониторы (60–90 Гц), радиовещание с амплитудной модуляцией (530–1600 кГц), радиовещание в FM-диапазоне (88–108 МГц), телевизионное вещание (50–700 МГц), мобильные телефоны (850 МГц–2,4 ГГц), микроволновые печи (2,45 ГГц), ноутбуки и Wi-Fi (2,45 ГГц).

Сеть устройств, использующих нелицензируемый радиочастотный спектр, таких как мобильные телефоны, Wi-Fi, ноутбуки, стремительно растет. Беспроводная связь (Wi-Fi) как предпочтительный способ интернет-коммуникации и подключения стала повседневной необходимостью и широко используется в различных устройствах. Несомненно, что широкое использование Wi-Fi значительно изменило человеческую жизнь к лучшему, однако привело к распространению радиочастотного электромагнитного излучения (РЧ ЭМИ) в общественных местах [7]. Накопленные научные данные свидетельствуют о возможном пагубном воздействии Wi-Fi на мужскую фертильность, что, несомненно, диктует необходимость дальнейших исследований.

### **Патогенетические механизмы мужской инфертильности вследствие влияния беспроводных устройств**

Поскольку РЧ ЭМИ не способно вызвать ионизацию клеточных атомов и молекул, то предполагаемое повреждающее воздействие Wi-Fi на гонады можно объяснить тепловыми эффектами [8]. Однако РЧ ЭМИ наряду с термомолекулярными эффектами может оказывать на биологические ткани и специфическое нетепловое воздействие [9]. Влияние ЭМИ на живые организмы зависит от частоты, интенсивности и продолжительности воздействия сигнала [10] и, что наиболее важно, от положения устройств во время использования [11, 12]. Если воздействие РЧ ЭМИ мобильного телефона носит локальный характер, то аналогичное излучение передатчиком Wi-Fi включает воздействие на все тело [13]. В то же время более высокий уровень поглощения радиочастотной энергии можно наблюдать и при использовании лежащего на коленях ноутбука, подключенного к Wi-Fi [11]. В качестве основного показателя, определяющего энергию электромагнитного поля, поглощающуюся в тканях тела человека за одну секунду, используют удельный коэффициент поглоще-

ния (англ. specific absorption rate, SAR). Эту величину выражают в Вт/кг. В нормативных документах ряда зарубежных стран, в международных (ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Международный комитет по защите от неионизирующего излучения) и европейских (CENELEC – European Committee for Electrotechnical Standardization, Европейский комитет по стандартизации в электротехнике) рекомендациях устанавливаются не значения предельно допустимого уровня излучения, а лишь величины так называемых «контрольных уровней» для определенных условий облучения. В этих стандартах в качестве порога повреждающего (теплого) действия рассматривается значение SAR, равное 4 Вт/кг. В нормативах CENELEC и ICNIRP усредненное на все тело значение SAR не должно превышать 0,4 Вт/кг для контролируемых условий (профессиональное воздействие) и 0,08 Вт/кг – для неконтролируемых условий (население) [14]. В РФ оценка воздействия электромагнитных полей радиочастотного диапазона передающих радиотехнических объектов в диапазоне частот 300 МГц – 300 ГГц осуществляется по средним значениям плотности потока энергии в мкВт/см<sup>2</sup>. В этом диапазоне для населения действует гигиенический норматив в виде регламентации плотности потока энергии, равной 10 мкВт/см<sup>2</sup> [15].

Негативное влияние Wi-Fi на мужские гонады и снижение мужской фертильности связывают с окислительным стрессом, повреждением клеточной ДНК и апоптозом [16]. Вследствие окислительного стресса повышаются уровни свободных радикалов и супероксидных анионов, в частности. Именно повышение концентрации последних приводит к снижению подвижности и жизнеспособности сперматозоидов [11]. Свободные радикалы вступают в реакции с молекулами различной химической природы, вызывая деградацию структурных белков и липидов клеточных мембран, нуклеиновых кислот, ингибирование ферментов, изменение структуры и функциональных свойств гормонов и их рецепторов [17]. Перекисное окисление фосфолипидов, являющихся основным компонентом оболочки митохондрий сперматозоидов, может нарушить целостность митохондриальной мембраны. Это неизбежно приведет к высвобождению в цитоплазму больших количеств активных форм кислорода, вызовет расстройство энергетического метаболизма сперматозоидов и окажет негативное влияние на подвижность мужских гамет [18, 19].

На усиление активности перекисного окисления липидов вследствие воздействия РЧ ЭМИ (мобильная связь, Wi-Fi) указывают результаты целого ряда экспериментальных исследований [20–24]. Предполагается, что окислительный стресс играет ключевую роль в механизме фрагментации ДНК сперматозоидов [25]. R. Meena и соавт. сообщили о значительном усилении повреждения ДНК сперматозоидов экспериментальных животных после микроволнового воздействия на все тело частотой 2,45 ГГц [26]. На окислительный характер повреждения ДНК сперматозоидов вследствие

радиочастотного воздействия указывают В. J. Houston и соавт. [27]. Доказательством этому, по мнению исследователей, является увеличение в ядрах сперматозоидов биомаркера окислительного стресса – 8-ОН-дезоксигуанозина (8-ОНdG), свидетельствующее об активном окислении гуанозина. Аналогичные выводы сделаны С. Liu и соавт. [28], которые зафиксировали значительное повышение образования 8-ОН-dG в сперматоцитах мышей после воздействия ЭМИ с частотой 1,8 ГГц. G.N. De Iuliis и соавт. [29] подвергали очищенные сперматозоиды влиянию ЭМИ аналогичной частоты. Были зафиксированы повышенная продукция активных форм кислорода в митохондриях сперматозоидов с последующим снижением их подвижности, усиленное образование аддуктов оснований ДНК, что в итоге приводило к фрагментации ДНК.

Апоптоз или запрограммированная гибель клеток является важным и неизбежным событием в процессе сперматогенеза. Апоптоз является не только механизмом регулирования интенсивности сперматогенеза, но и позволяет осуществлять селективную элиминацию патологически измененных гамет [30]. При проточной цитометрии после воздействия ЭМИ с частотой 10 ГГц зафиксировано появление апоптотического пика суб-G1, свидетельствующего о фрагментации ДНК сперматозоидов [31]. Повышенный уровень апоптотических сперматозоидов в семенниках самцов крыс линии Wistar был обнаружен после радиочастотного воздействия 2,45 ГГц ( $14,30 \pm 1,92\%$ ) по сравнению с группой ложного воздействия ( $7,43 \pm 1,30\%$ ) [32].

Гибель части половых клеток в конечном итоге повлияет на гормональный баланс, поскольку они являются одним из важных компонентов гипоталамо-гипофизарно-гонадной оси [12]. Воздействие микроволнового излучения наряду с разрушением сперматогенного эпителия ведет к снижению популяции клеток Лейдига. Последние являются одними из наиболее восприимчивых клеток к ЭМИ, а их повреждение будет влиять на сперматогенез [33]. Доказано, что РЧ ЭМИ, исходящее от мобильных телефонов и Wi-Fi, вызывает усиление окислительного стресса и апоптоза в клетках Лейдига [34]. Несмотря на неоднородность дизайнов исследований, посвященных изучению влияния РЧ ЭМИ от мобильных телефонов и Wi-Fi, и имеющуюся порой противоречивость полученных результатов, большинство исследований согласуются с утверждением, что длительное воздействие РЧ ЭМИ может нарушить выработку мужских репродуктивных гормонов, особенно тестостерона [12].

### **Исследования влияния радиочастотного излучения Wi-Fi (2,45 ГГц) на эякулят человека**

На сегодняшний день проведено немало исследований, в качестве объекта в которых выступает эякулят человека. В подобных исследованиях *in vitro* невозможно использовать концентрацию сперматозоидов в качестве параметра оценки влияния Wi-Fi на сперматогенез и репродуктивное здоровье в целом, поскольку

после эякуляции концентрация сперматозоидов останется неизменной. Чаще всего подвергают оценке изменения подвижности сперматозоидов и состояние их ДНК, реже – жизнеспособность и морфологию сперматозоидов.

Одними из первых результаты оценки влияния портативного компьютера, подключенного к сети Интернет через Wi-Fi, на эякулят опубликовали С. Avendaño и соавт. [35]. В образцах спермы от 29 здоровых доноров проводился отбор сперматозоидов с помощью swim-ур-теста. Суспензию от каждого донора делили на две аликвоты. Одна аликвота спермы (экспериментальная) помещалась в непосредственной близости от ноутбука, подключенного к сети Интернет через Wi-Fi, и подвергалась экспозиции в течение 4 часов при 25 °С (плотность потока энергии 1,0–1,2 мкВт/см<sup>2</sup>), тогда как вторая аликвота (контрольная) находилась в аналогичных условиях в другом помещении, в котором отсутствовали компьютеры и иные электронные устройства. Было установлено, что после воздействия ЭМИ *ex vivo* наблюдалось значительное снижение прогрессивной подвижности и увеличение фрагментации ДНК сперматозоидов. Оценка жизнеспособности сперматозоидов не показала существенных различий между группами.

Описанное выше исследование вызвало широкую научную дискуссию. Так, J.F. Doré и M.C. Chignol [36] считают, что представленные результаты не могут восприниматься как доказательства того, что наблюдаемые эффекты являются нетепловыми и вызваны воздействием РЧ ЭМИ Wi-Fi. По мнению экспертов, поддержание постоянной температуры под компьютером с помощью системы кондиционирования воздуха недостаточно для обеспечения однородности температур в экспериментальной зоне. Контрольные образцы, находившиеся в другой комнате, вдали от компьютеров и электронных устройств, на самом деле не содержались в идентичных условиях, а более подходящей экспериментальной схемой была бы имитация воздействия, при которой контрольные образцы подвергались воздействию того же активно работающего ноутбука, но с отключенным Wi-Fi. По мнению T. Freour, P. Barriere [37], слабыми сторонами исследования были ручной анализ спермы и отсутствие информации о донорах (отцовство; профессиональные контакты с токсичными веществами и/или высокими температурами; наличие в анамнезе заболеваний, которые могли бы каким-либо образом повлиять на их фертильность; вредные привычки, в частности, курение).

Экспериментальное исследование *in vitro* влияния радиочастотного излучения (2,4 ГГц) на эякулят человека выполнено O.M. Oni и соавт. [38]. Образцы спермы были взяты у 10 доноров после воздержания в течение 48–72 ч. После разжижения эякулята в течение 15–30 мин образцы, как и в описанном выше исследовании, делили на две аликвоты: контрольную (не подвергавшуюся воздействию радиочастотного излучения) и экспонируемую. Последняя в течение часа находилась на расстоянии 60 см от ноутбука, подключенного к сети

Интернет через Wi-Fi и находящегося в активном режиме отправки и приема данных. Контрольные аликваты находились в идентичных условиях, но без воздействия радиочастотного излучения 2,4 ГГц. Было обнаружено, что параметры подвижности сперматозоидов значительно отличаются между двумя группами образцов. Доля прогрессивно подвижных сперматозоидов и процентная доля сперматозоидов с нормальной морфологией были достоверно ниже в группе образцов, подвергшихся воздействию Wi-Fi.

К. Kamali и соавт. [39] оценили влияние модемов 3G+Wi-Fi на качество спермы человека. Образцы спермы были разделены на две группы. Образцы эякулята из первой группы накрывали тремя слоями алюминиевой фольги и помещали в инкубатор при температуре 37 °C на 50 мин. В другом помещении образцы из второй группы помещали в аналогичный инкубатор при температуре 37 °C на 50 мин. Внутри инкубатора был установлен модем 3G+Wi-Fi, к которому был подключен портативный компьютер и осуществлялась загрузка данных в течение всего времени экспозиции (SAR=1,3 Вт/кг). Воздействие ЭМИ привело к значительному снижению подвижности и скорости сперматозоидов. Если средние процентные доли сперматозоидов с подвижностью классов А и В существенно не различались в двух группах ( $p=0,22$  и  $0,54$  соответственно), то доля сперматозоидов класса С была значительно ниже в образцах, подвергшихся воздействию ЭМИ ( $p=0,046$ ), а доля сперматозоидов с подвижностью класса D в этой же группе была значительно выше ( $p=0,022$ ).

### Экспериментальные исследования влияния радиочастотного излучения Wi-Fi (2,45 ГГц) на мужскую репродуктивную систему

В качестве объекта во многих исследованиях, посвященных изучению данной проблемы, были выбраны либо изолированные сперматозоиды, либо изолированные незрелые мужские половые клетки [28, 40]. Подобный подход, несомненно, способствует изучению сложных биохимических и клеточных реакций, возникающих в ответ на ЭМИ, однако одновременное использование экспериментальных моделей *in vivo* позволит получить более целостное представление об эффектах Wi-Fi (2,45 ГГц) на мужскую репродуктивную систему и сперматогенез [27]. Очевидно, что экспериментальные исследования *in vivo* дадут возможность оценивать эффекты ЭМИ на всех этапах сперматогенеза, включая функциональное созревание сперматозоидов во время их пассажа через придаток семенника.

На сегодняшний день опубликованы результаты нескольких десятков исследований, посвященных влиянию Wi-Fi на мужскую репродуктивную систему лабораторных животных. В экспериментах были использованы совершенно разные источники излучения диапазона Wi-Fi, разными были продолжительность воздействия и расстояние от источника волн до лабораторных животных.

Так, Kesari K.K. и Behari J. [32] подвергали самцов крыс линии Wistar воздействию радиочастотного излучения 2,45 ГГц с плотностью мощности 0,34 мВт/см<sup>2</sup> и SAR – 0,11 Вт/кг непрерывно в течение 2 ч в день на протяжении 35 дней, при этом удельная скорость поглощения энергии всем телом составляла 0,11 Вт/кг. Животные находились в вентилируемой клетке из плексигласа на расстоянии 2 м от рупорной антенны. У животных, подвергшихся воздействию, было выявлено снижение количества сперматозоидов, увеличение в семенниках апоптотических клеток. В ткани семенников было отмечено снижение активности антиоксидантных ферментов (супероксиддисмутазы, глутатионпероксидазы) и увеличение активности каталазы.

На отрицательное влияние микроволнового воздействия на мужскую фертильность указывают Kumar S. и соавт. [41]. После воздействия излучения (2,45 ГГц) на самцов крыс линии Wistar (70-дневного возраста) по 2 ч в день в течение 60 дней (SAR – 0,014 Вт/кг, плотностью мощности 0,21 мВт/см<sup>2</sup>) было обнаружено значительное увеличение каспазы и креатинкиназы в сперме и значительное снижение уровня тестостерона и мелатонина в сыворотке крови. Иными словами, генерация активных форм кислорода и снижение биодоступности андрогенов для созревающих сперматозоидов, индуцированные Wi-Fi, являются факторами снижения мужской фертильности.

О негативных эффектах ЭМИ, генерируемого беспроводными устройствами (2,45 ГГц), на морфофункциональное состояние гонад сообщают и Saugin M. и соавт. [42]. В своем исследовании авторы подвергали воздействию РЧ ЭМИ самцов крыс Sprague Dawley шестинедельного возраста (3 ч в день в течение 30 дней находились в непосредственной близости от монополярной антенны Wi-Fi, SAR – 3,21 Вт/кг). После завершения эксперимента в сыворотке крови животных зафиксировано увеличение уровня малонового диальдегида, снижение показателей антиоксидантного статуса. Увеличение уровня простагландина E2 и кальцитонин-ген-родственного пептида (CGRP) в семенных канальцах свидетельствует о том, что наряду с развитием оксидативного стресса длительное воздействие электромагнитного излучения (2,45 ГГц) инициирует развитие вазодилатации и воспаления. При морфологическом исследовании гонад отмечено уменьшение количества сперматозоидов в просвете семенных канальцев.

На выраженные дегенеративные изменения сперматогенного эпителия под влиянием электромагнитного излучения указывают V. Almášiová и соавт. [43]. Половозрелых крыс линии Wistar подвергали воздействию импульсного электромагнитного поля частотой 2,45 ГГц и плотностью мощности 2,8 мВт/см<sup>2</sup> в течение 3 ч ежедневно на протяжении 3 нед. При электронной микроскопии было установлено, что большая часть семенных канальцев приобрела неправильную форму, в структуре сперматогенного эпителия обнаруживались пустоты различного размера. В просвете канальцев ви-

зуализировались скопления отслоившихся эпителиальных клеток, некрозу подверглась часть клеток Сертоли и сперматогоний. В то же время клетки Лейдига не имели выраженных морфологических изменений. Спустя несколько лет V. Almášiová и соавт. были опубликованы результаты исследования влияния электромагнитного излучения [44] на подвижность сперматозоидов, полученных путем пункции хвоста придатка семенника. Показатели подвижности сперматозоидов оценивались сразу после забора, спустя 1 ч и 2 ч после пункции. Все показатели подвижности сперматозоидов (общая подвижность, прогрессивная подвижность, средняя скорость движения, амплитуда бокового смещения головки сперматозоида и ряд других параметров) значительно ухудшились после воздействия электромагнитного излучения. Наиболее значительные изменения наблюдались через 1 ч после пункции придатка.

Абсолютно иные результаты по сравнению с описанными выше были получены S. Delavarifarg и соавт. [45]. 30 взрослых мышей-самцов Balb/c (возраст 7–8 нед, масса тела 30–35 г) случайным образом разделили на 5 равных групп. Животным первых двух групп с целью инициации олигоспермии внутрибрюшинно вводили бусульфан (10 мг/кг). Поскольку цикл сперматогенеза у мышей составляет 35 дней, мышам подвергали воздействию Wi-Fi-излучения (2,4 ГГц) через 35 дней после введения бусульфана (по 2 ч в день, в течение 4 дней подряд). Ноутбук, находившийся в соседней комнате, обменивался данными через Wi-Fi-роутер, установленный в 100 см (1-я группа) и 150 см (2-я группа) от плексигласовой клетки с животными. В первых двух группах плотность мощности излучения составила 3125 мкВт/м<sup>2</sup> и 1401 мкВт/м<sup>2</sup>, а средняя SAR – 30 мВт/кг и 92 мВт/кг соответственно. Мышам из 3-й группы тоже вводили бусульфан, но маршрутизатор Wi-Fi не подключался к электрической сети. Четвертая и 5-я группы выступали в качестве контрольных: в 4-й группе животным не вводили бусульфан, но подвергали воздействию Wi-Fi, а животные из 5-й группы не подвергались ни химическому, ни электромагнитному воздействию.

Объем семенников и концентрация сперматозоидов во всех группах животных, получавших бусульфан, были достоверно ниже по сравнению с контрольными группами.

Излучение Wi-Fi с низкой плотностью мощности (1401 мкВт/м<sup>2</sup>) значительно увеличило концентрацию сперматозоидов у животных в 4-й группе по сравнению с животными из 5-й группы. Однако увеличение количества сперматидных клеток было незначительным. Концентрация сперматозоидов во 2-й группе была выше, чем в 1-й, вместе с увеличением концентрации сперматозоидов произошло увеличение количества сперматид. Полученные результаты авторы объясняют феноменом гормезиса, заключающегося в благотворном стимулирующем воздействии малых доз неионизирующего излучения.

## Влияние повседневного использования Wi-Fi (2,45 ГГц) на сперматогенез у мужчин

Нужно признать, что беспроводное подключение к сети Интернет с помощью Wi-Fi-технологии прочно вошло в нашу жизнь вслед за повсеместным использованием телефонной мобильной связи. Однако, если влияние ежедневного использования мобильного телефона на сперматогенез изучено пусть не досконально, но достаточно полно, то исследования, посвященные влиянию Wi-Fi на фертильность современного мужчины, практически единичны. В то же время, по мнению М.Е. Yildirim и соавт. [46], использованию Wi-Fi сегодня необходимо уделять значительно больше внимания, чем использованию сотового телефона, из-за его более высокого частотного диапазона и более длительного времени воздействия. Автор приводит данные из отчета Турецкого агентства телекоммуникаций и информационных технологий, согласно которым ежедневное использование сети Интернет в Турции составляет почти 6 ч. Было проведено исследование влияния длительности ежедневного использования беспроводного подключения к сети Интернет на мужскую фертильность. В зависимости от времени ежедневного использования беспроводного подключения мужчины были разделены на три группы: группа А: пользовались менее 30 мин/день (327 мужчин); группа Б – от 30 мин до 2 ч в день (164 мужчины); и группа С – более 2 ч в день (540 мужчин). Общее количество подвижных сперматозоидов и количество прогрессивно подвижных сперматозоидов были ниже в группе, использующей беспроводной Интернет, по сравнению с группой, использующей проводное соединение ( $p=0,009$  и  $p=0,018$  соответственно). Была обнаружена отрицательная корреляция между продолжительностью использования беспроводного подключения к сети Интернет и общим количеством сперматозоидов.

В аналогичном исследовании S.S. Ding и соавт. [47] оценили качество спермы и выраженность оксидативного стресса у мужчин, которые ежедневно подвергались воздействию комбинации ЭМИ от смартфонов 4G с частотой 1800 МГц и Wi-Fi с частотой 2,45 ГГц. Как и в предыдущем исследовании, испытуемые в зависимости от времени ежедневного использования Wi-Fi-соединения были разделены на три группы: 1-я группа (89 мужчин) пользовались Wi-Fi менее 30 мин в день; 2-я группа (104 мужчины) – от 31 до 120 мин; и 3-я группа (77 мужчин) – более 121 мин. Все мужчины были активного репродуктивного возраста. Субъекты, у которых были подтверждены хронические заболевания (сахарный диабет, артериальная гипертензия и др.), генетические болезни, болезни мужской репродуктивной системы, которые употребляли табак и алкоголь, регулярно использовали лекарственные средства или подвергались профессиональному воздействию ядов и облучения, были исключены из исследования. Рутинный анализ эякулята не обнаружил существенных изменений его объема, pH, времени разжижения во всех трех группах. Однако были установлены значительные

---

различия количества сперматозоидов, процентной доли прогрессивно подвижных сперматозоидов и неподвижных сперматозоидов между группами. Так, количество сперматозоидов у мужчин 1-й группы составило  $74,20 \pm 3,70 \times 10^6$ /мл, у мужчин второй группы –  $56,90 \pm 7,77 \times 10^6$ /мл ( $p < 0,05$  при оценке достоверности между 1-й и 2-й группами), у мужчин 3-й группы –  $24,10 \pm 1,47 \times 10^6$ /мл ( $p < 0,05$  при оценке достоверности между 2-й и 3-й группами и между 1-й и 3-й группами). Оценка выраженности оксидативного стресса показала, что по мере увеличения длительности воздействия ЭМИ увеличивается продукция активных форм кислорода. По мере увеличения длительности использования Wi-Fi-соединения общая антиоксидантная способность семенной плазмы имела тенденцию к снижению. Наряду с этим происходило снижение активности антиоксидантных ферментов – глутатионпероксидазы и супероксиддисмутазы. Экспрессия 8-гидрокси-2'-дезоксигуанозина как маркера окислительного повреждения ДНК свидетельствовала о фрагментации ДНК сперматозоидов у мужчин всех групп.

## Выводы

1. Отсутствие способности РЧ ЭМИ вызывать ионизацию клеточных атомов и молекул не позволяет считать технологию Wi-Fi безопасной для мужской фертильности.

2. Экспериментальные исследования *in vitro* и *in vivo*, посвященные влиянию Wi-Fi на мужскую репродуктивную систему, несмотря на различия в дизайне, совершенно разные используемые источники излучения, продолжительность воздействия и расстояние от источника волн до объекта, позволяют сегодня считать, что электромагнитное излучение технологии Wi-Fi оказывает негативное влияние на мужское репродуктивное здоровье и сперматогенез, в частности.

3. Негативное влияние РЧ ЭМИ Wi-Fi (2,45 ГГц) на мужскую фертильность связано с оксидативным стрессом, повреждением клеточной ДНК и апоптозом сперматозоидов, а также гормональным дисбалансом вследствие повреждения клеток Лейдига.

4. Клинические исследования, посвященные влиянию Wi-Fi на фертильность современного мужчины, единичны. В связи со стремительным ростом применения Wi-Fi технологии беспроводного соединения в современном мире существует острая необходимость в проведении таких исследований. Их результаты позволят оптимизировать использование Wi-Fi мужчинами, планирующими отцовство или столкнувшимися с проблемой бесплодия.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interests.** The author declares that there is not conflict of interests.

---

## Литература / References

- Agarwal A, Baskaran S, Parekh N et al. Male infertility. *Lancet*. 2021; 397(10271):319-33. DOI: 10.1016/S0140-6736(20)32667-2
- Божедомов В.А., Машина М.А., Корнеев И.А. и др. Внутриматочная инсеминация при лечении мужского бесплодия: опыт применения и клинические рекомендации. *Проблемы репродукции*. 2021;27(6):88-96.  
Bozhedomov V.A., Mashina M.A., Korneyev I.A. et al. Intrauterine insemination for treatment of male infertility: experience and clinical recommendations. *Problems and solutions. Problemy Reproduktsii = Russian Journal of Human Reproduction*. 2021;27(6):88-96. DOI: 10.17116/repro20212706188 (in Russian).
- World Health Organization. WHO Manual for the Standardized Investigation and Diagnosis of the Infertile Couple. Cambridge University Press: Cambridge, 2000.
- Безруков Е.А., Проскура А.В. Влияние факторов окружающей среды и образа жизни на репродуктивный потенциал мужчины. *Проблемы репродукции*. 2016;22(5):133-40.  
Bezrukov E.A., Proskura A.V. The impact of environmental exposures and lifestyle on male reproductive performance. *Problemy Reproduktsii = Russian Journal of Human Reproduction*. 2016;22(5):133-40. DOI: 10.17116/repro2016225133-140 (in Russian).
- Галимова Э.Ф., Галимов Ш.Н. Мужская фертильность: модифицируемые и немодифицируемые факторы риска (обзор литературы). *Проблемы репродукции*. 2015;21(5):89-95.  
Galimova E.F., Galimov Sh.N. Male fertility: modifiable and non-modifiable risk factors (a review). *Problemy Reproduktsii = Russian Journal of Human Reproduction*. 2015;21(5):89-95. DOI: 10.17116/repro201521589-95 (in Russian).
- Гончаров Н.П., Кадия Г.В., Колесникова Г.С. и др. Состояние репродуктивной функции у мужчин – участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. *Проблемы Эндокринологии*. 1998; 44(4):25-8. DOI: 10.14341/probl11569  
Goncharov N.P., Katsiya G.V., Kolesnikova G.S. et al. Reproductive function in men – participants in the aftermath of the Chernobyl accident. *Problems of Endocrinology*. 1998;44(4):25-8 (in Russian).
- Teixeira T, Hasan SF. Assessing electromagnetic radiation in our environment. *IEEE Potentials*. 2016;35(2):22-5. DOI: 10.1109/MPOT.2014.2309704
- Foster K, Colombi D. Thermal response of tissue to RF exposure from canonical dipoles at frequencies for future mobile communication systems. *Electron. Lett*. 2017; 3(5):360-2. DOI: 10.1049/el.2016.3488
- Deepinder F, Makker K, Agarwal A. Cell phones and male infertility: dissecting the relationship. *Reprod Biomed Online*. 2007;15(3):266-70. DOI: 10.1016/s1472-6483(10)60338-0
- Sterling L, Harris LR, Carroll K. The effects of wireless devices on male reproductive health: A literature overview. *Rev Int Androl*. 2022;20(3):196-206. DOI: 10.1016/j.androl.2020.10.004
- Kesari KK, Agarwal A, Henkel R. Radiations and male fertility. *Reprod Biol Endocrinol*. 2018;16(1):118. DOI: 10.1186/s12958-018-0431-1
- Maluin SM, Osman K, Jaffar FHF, Ibrahim SF. Effect of radiation emitted by wireless devices on male reproductive hormones: a systematic review. *Front Physiol*. 2021;12:732420. DOI: 10.3389/fphys.2021.732420
- Banaceur S, Banasr S, Sakly M, Abdelmelek H. Whole body exposure to 2.4 GHz WIFI signals: effects on cognitive impairment in adult triple transgenic mouse models of Alzheimer's disease (3xTg-AD). *Behav Brain Res*. 2013;240:197-201. DOI: 10.1016/j.bbr.2012.11.021
- Валенко А.С. Нормы электромагнитной безопасности в Российской Федерации и за рубежом. *Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн*. 2020; 3. URL: <http://mnv.ircgups.ru/toma/39-2020/>  
Valenko A.S. Electromagnetic safety standards in the Russian Federation and in foreign countries. *Young science of Siberia: electronic scientific journal*. 2020;3 URL: <http://mnv.ircgups.ru/toma/39-2020/> (in Russian).
- Маслов М.Ю., Сподобаев Ю.М. Конвергенция в нормировании и контроле электромагнитных полей современных беспроводных технологий. *Медицина труда и промышленная экология*. 2020;60(9):610-3. DOI: 10.31089/1026-9428-2020-60-9-610-613  
Maslov M.Yu, Spodobayev Yu.M. Convergence in norming and control of modern wireless technologies electromagnetic fields. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2020;60(9):610-3 (in Russian).
- Pall ML. Wi-Fi is an important threat to human health. *Environ Res*. 2018;164:405-16. DOI: 10.1016/j.envres.2018.01.035
- Улащик В.С. Активные формы кислорода, антиоксиданты и действие лечебных физических факторов. *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физкультуры*. 2013;90(1):60-9.  
Ulashchik V.S. Active oxygen species, antioxidants, and the action of therapeutic physical factors. *Voprosy kurortologii, fizioterapii, i lechebnoi fizicheskoi kul'tury*. 2013;90(1):60-9 (in Russian).
- Pasqualotto FF, Sharma RK, Nelson DR et al. Relationship between oxidative stress, semen characteristics, and clinical diagnosis in men undergoing infertility investigation. *Fertil Steril*. 2000;73(3):459-64. DOI: 10.1016/s0015-0282(99)00567-1
- Shokri S, Soltani A, Kazemi M et al. Effects of Wi-Fi (2.45 GHz) Exposure on apoptosis, sperm parameters and testicular histomorphometry in rats: a time course study. *Cell J*. 2015;17(2):322-31. DOI: 10.22074/cellj.2016.3740
- Dasdag S, Taş M, Akdag MZ, Yegin K. Effect of long-term exposure of 2.4 GHz radiofrequency radiation emitted from Wi-Fi equipment on testes functions. *Electromagn Biol Med*. 2015;34(1):37-42. DOI: 10.3109/15368378.2013.869752
- Esmekaya MA, Ozer C, Seyhan N. 900 MHz pulse-modulated radiofrequency radiation induces oxidative stress on heart, lung, testis and liver tissues. *Gen Physiol Biophys*. 2011;30(1):84-9. DOI: 10.4149/gpb\_2011\_01\_84
- Jelodar G, Nazifi S, Akbari A. The prophylactic effect of vitamin C on induced oxidative stress in rat testis following exposure to 900 MHz radio frequency wave generated by a BTS antenna model. *Electromagn Biol Med*. 2013;32(3):409-16. DOI: 10.3109/15368378.2012.735208
- Özorak A, Naziroğlu M, Çelik Ö et al. Wi-Fi (2.45 GHz)- and mobile phone (900 and 1800 MHz)-induced risks on oxidative stress and elements in kidney and testis of rats during pregnancy and the development of offspring. *Biol Trace Elem Res*. 2013;156(1-3):221-9. DOI: 10.1007/s12011-013-9836-z
- Oksay T, Naziroğlu M, Doğan S et al. Protective effects of melatonin against oxidative injury in rat testis induced by wireless (2.45 GHz) devices. *Andrologia*. 2014;46(1):65-72. DOI: 10.1111/and.12044
- Kaur P, Rai U, Singh R. Genotoxic Risks to male reproductive health from radiofrequency radiation. *Cells*. 2023;12(4):594. DOI: 10.3390/cells12040594
- Meena R, Kumari K, Kumar J et al. Therapeutic approaches of melatonin in microwave radiations-induced oxidative stress-mediated toxicity on male fertility pattern of Wistar rats. *Electromagn Biol Med*. 2014;33(2):81-91. DOI: 10.3109/15368378.2013.781035
- Houston BJ, Nixon B, McEwan KE et al. Whole-body exposures to radiofrequency-electromagnetic energy can cause DNA damage in mouse spermatozoa via an oxidative mechanism. *Sci Rep*. 2019;9(1):17478. DOI: 10.1038/s41598-019-53983-9
- Liu C, Duan W, Xu S et al. Exposure to 1800 MHz radiofrequency electromagnetic radiation induces oxidative DNA base damage in a mouse spermatocyte-derived cell line. *Toxicol Lett*. 2013;218(1):2-9. DOI: 10.1016/j.toxlet.2013.01.003
- De Iulius GN, Newey RJ, King BV, Aitken RJ. Mobile phone radiation induces reactive oxygen species production and DNA damage in human spermatozoa in vitro. *PLoS One*. 2009;4(7):e6446. DOI: 10.1371/journal.pone.0006446
- Плосконос М., Николаев А. Апоптоз и мужская фертильность. *Врач: ежемесячный научно-практический и публицистический журнал*. 2014;3:23-5.  
Ploskonos M., Nikolaev A. Apoptosis and male fertility. *Vrach*. 2014;3:23-5 (in Russian).
- Kumar S, Kesari KK, 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. *Clinics (Sao Paulo)*. 2011;66(7):1237-45. DOI: 10.1590/s1807-59322011000700020
- Kesari KK, Behari J. Effects of microwave at 2.45 GHz radiations on reproductive system of male rats. *Toxicol. Environ. Chem*. 2010;92(6):1135-47. DOI: 10.1080/0272240903233637
- Wang SM, Wang DW, Peng RY et al. Effect of electromagnetic pulse irradiation on structure and function of Leydig cells in mice. *Zhonghua Nan Ke Xue*. 2003;9(5):327-30.
- Sehitoglu I, Tumkaya L, Kalkan Y et al. Biochemical and histopathological effects on the rat testis after exposure to electromagnetic field during fetal period. *Arch Esp Urol*. 2015;68(6):562-8.

35. Avendaño C, Mata A, Sanchez Sarmiento CA, Doncel GF. Use of laptop computers connected to internet through Wi-Fi decreases human sperm motility and increases sperm DNA fragmentation. *Fertil Steril.* 2012;97(1):39-45.e2. DOI: 10.1016/j.fertnstert.2011.10.012
36. Doré JF, Chignol MC. Laptop computers with Wi-Fi decrease human sperm motility and increase sperm DNA fragmentation. *Fertil Steril.* 2012;97(4):e12; author reply e13. DOI: 10.1016/j.fertnstert.2012.01.102
37. Freour T, Barriere P. Wi-Fi decreases human sperm motility and increases sperm DNA fragmentation. *Fertil Steril.* 2012;97(4):e14; author reply e15. DOI: 10.1016/j.fertnstert.2012.02.004
38. Oni OM, Amuda DB, Gilbert CE. Effects of radiofrequency radiation from WiFi devices on human ejaculated semen. *Int J Res Rev Appl Sci.* 2011;9(2):292-4.
39. Kamali K, Atarod M, Sarhadi S et al. Effects of electromagnetic waves emitted from 3G+wi-fi modems on human semen analysis. *Urologia.* 2017;84(4):209-14. DOI: 10.5301/uj.5000269
40. Agarwal A, Desai NR, Makker K et al. Effects of radiofrequency electromagnetic waves (RF-EMW) from cellular phones on human ejaculated semen: an in vitro pilot study. *Fertil Steril.* 2009;92(4):1318-25. DOI: 10.1016/j.fertnstert.2008.08.022
41. Kumar S, Kesari KK, Behari J. Influence of microwave exposure on fertility of male rats. *Fertil Steril.* 2011;95(4):1500-2. DOI: 10.1016/j.fertnstert.2010.04.078
42. Saygin M, Asci H, Ozmen O et al. Impact of 2.45 GHz microwave radiation on the testicular inflammatory pathway biomarkers in young rats: The role of gallic acid. *Environ Toxicol.* 2016;31(12):1771-84. DOI: 10.1002/tox.22179
43. Almášiová V, Holovská K, Cigánková V et al. Structural and ultrastructural study of rat testes influenced by electromagnetic radiation. *J Toxicol Environ Health A.* 2014;77(13):747-50. DOI: 10.1080/15287394.2014.890988
44. Almášiová V, Holovská K, Šimaiová V et al. The thermal effect of 2.45 GHz microwave radiation on rat testes. *Acta Veterinaria Brno.* 2017;86:413-9. DOI: 10.2754/avb201786040413
45. Delavarifar S, Razi Z, Tamadon A et al. Low-power Density Radiations emitted from common Wi-Fi routers influence sperm concentration and sperm histomorphometric parameters: a new horizon on male infertility treatment. *J Biomed Phys Eng.* 2020;10(2):167-76. DOI: 10.31661/jbpe.voio.581
46. Yildirim ME, Kaynar M, Badem H et al. What is harmful for male fertility: cell phone or the wireless Internet? *Kaohsiung J Med Sci.* 2015;31(9):480-4. DOI: 10.1016/j.kjms.2015.06.006
47. Ding SS, Ping S, Hong T. Association between daily exposure to electromagnetic radiation from 4G smartphone and 2.45-GHz wi-fi and oxidative damage to semen of males attending a genetics clinic: A primary study. *Int J Clin Exp Med.* 2018;11:2821-30.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Белый Лев Евгеньевич** – д-р мед. наук, проф. каф. госпитальной хирургии, анестезиологии, реаниматологии, урологии, травматологии, ортопедии, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет». E-mail: lbely@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-0908-1321

Поступила в редакцию: 18.03.2024

Поступила после рецензирования: 22.03.2024

Принята к публикации: 28.03.2024

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Lev E. Belyi** – Dr. Sci. (Med.), Prof., Ulyanovsk State University. E-mail: lbely@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-0908-1321

Received: 18.03.2024

Revised: 22.03.2024

Accepted: 28.03.2024