

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНОВ НА ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ СПЕРМАТОЗОИДОВ ЧЕЛОВЕКА И ЖИВОТНЫХ. ОБЗОР

*Д.В. Задубенко¹, Д.Н. Султанова², М.И. Пак², И.М. Ким², Е.К. Килина²,
В.Н. Локшин³, В.А. Голиченков⁴

1. Городской центр репродукции человека
Казахстан, Алматы

2. Казахский национальный университет им. аль-Фараби
Казахстан, Алматы

3. Международный клинический центр репродуктологии Persona
Казахстан, Алматы

4. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова.
Российская Федерация, Москва

АННОТАЦИЯ

В данном обзоре представлены результаты 40 экспериментальных исследований влияния электромагнитных излучений различных диапазонов на мужскую репродуктивную функцию человека и других позвоночных. В обзор включены работы, выполненные в период с 2010 по 2020 годы. В настоящее время исследования показали не только отрицательное воздействие электромагнитного излучения – радиоволн, рентгена и гамма-излучения – на сперматогенез в целом и физиологические, биохимические процессы в сперматозоидах в частности, но благоприятное влияние, что доказано множеством проведенных опытов. Цель данного обзора литературы – поиск вариантов воздействия электромагнитным излучением для модулирования биологических процессов сперматогенеза и подвижности сперматозоидов *in vitro*.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, сперматозоиды, сперматогенез, эякулят, бесплодие, фертильность, астенозооспермия, олигозооспермия, фрагментация ДНК.

ВВЕДЕНИЕ

Все большее число сообщений специалистов в мире показывает, что мужская фертильность постепенно снижается. Актуален поиск, как причин снижения мужской фертильности, так и способов коррекции сперматогенеза *in vivo* и модулирования физиологических процессов в сперматозоидах *in vitro*. Электромагнитное излучение в данном случае, представляет интерес, так как имеет выраженное влияние на биологические объекты. Поскольку большинство ключевых физиологических и биохимических процессов в сперматозоидах человека и других позвоночных животных имеют единую природу, то экспериментальные работы с сперматозоидами, как человека, так и животных имеют практическую и теоретическую значимость для медицины. Электромагнитное излучение (ЭМИ) имеет двойственное влияние на сперматогенез человека. Это зависит от спектра воздействия, например, длинные радиоволны влияют пагубно на морфологию и подвижность сперматозоидов. Это может быть связано с тем, что излучение может вызывать окислительный стресс и вызывать нарушения в митохондриях сперматозоидов [1]. Но в то же время короткое инфракрасное и низкочастотное лазерное излучения (НИЛИ) наоборот, способны воздействовать благоприятно на сперматозоиды, и имеют перспективы применения при лечении бесплодия. В настоящее время это широко изучается:

благоприятное воздействие можно соотнести с повышением подвижности сперматозоидов, с понижением титра антиспермальных антител (АСАТ), а также с понижением активных форм кислорода в семенной плазме [2]. До настоящего времени информации о влиянии электромагнитного излучения всё ещё недостаточно, но в последние годы проводится множество исследований в этом направлении. Поэтому поиск отрывочных данных о влиянии ЭМИ на сперматогенез и физиологию сперматозоида и систематизация их имеют большое теоретическое значение и могут представлять интерес, как для ученых, так и для практических специалистов – урологов-андрологов, репродуктологов, а также врачей общей практики.

ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ

Радиация является фактором, существенно влияющим на здоровье человека [3]. Анализ достижений в области техники и технологии, говорит нам о все возрастающей интенсивности производства ЭМИ. Ученые не всегда способны адекватно оценить воздействие ЭМИ на живые объекты [4]. Основным механизмом метаболических изменений в клетках под действием подвижных ЭМИ является окислительный стресс. Под влиянием ЭМИ изменяется скорость диффузии через биологические мембраны, ориентация и конформация биологических макромолекул, что приводит к избыточному образованию

в клетке свободных радикалов, вызывающих повреждение клеточных структур [5-6]. Об эти процессах можно подробно узнать в работах Логинова П.В. и Николаева А.А., где описаны опыты, в которых самцы белых крыс подвергались воздействию микроволнового излучения чрезвычайно высоких частот в течение 30 дней по 30 минут ежедневно. Для создания электромагнитного поля использовался генератор монохроматических электромагнитных волн («Яв-1-7.1»; $\lambda = 7,1$ мм, частота $f = 42,194$ ГГц). Общее количество сперматогенных клеток в семенниках самцов контрольной группы составляло $52,36 \pm 270$ млн. Различные типы сперматогенных клеток характеризовались определенным процентным соотношением: сперматогонии в среднем составляли $22,5 \pm 2,01$ %, сперматоциты – $20,7 \pm 2,10$ %, сперматозоиды – $21,6 \pm 2,32$ %, сперматозоиды – $35,2 \pm 2,7$ %. После воздействия микроволнового излучения общее количество сперматогенных клеток у подопытных животных уменьшилось в 1,2 раза по сравнению с животными контрольной группы и составило 4353 ± 154 млн ($p < 0,02$). Для различных типов сперматогенных клеток характерно следующее стабильное процентное соотношение: сперматогонии составляют $26,1 \pm 2,22$ %, сперматоциты – $27,2 \pm 1,43$ %, сперматозоиды – $20,8 \pm 3,11$ %, сперматозоиды – $25,9 \pm 2,74$ %. В результате микроволнового излучения сверхвысоких частот (42,194 ГГц) вызывало абсолютное и относительное снижение сперматозоидов на фоне общего увеличения незрелых форм в общем пуле сперматогенных клеток - сперматогоний и сперматоцитов.

Длительное воздействие микроволнового излучения сверхвысоких частот оказывает стимулирующее действие на незрелые половые клетки, в результате чего истощаются ресурсы пролиферации, что наблюдается к концу второго месяца облучения [7].

Для изучения влияния низкоинтенсивного миллиметрового электромагнитного излучения на процесс апоптоза мужских половых клеток были изучены эякуляты 28 фертильных доноров в возрасте от 22 до 38 лет. Экспериментальные образцы эякулята подвергались воздействию электромагнитного поля со следующими характеристиками: длина волны $\lambda = 7,1$ мм, частота $f = 42,194$ ГГц, плотность мощности $P = 0,1$ мВт * см². Время экспозиции – 30 минут. Полученные результаты свидетельствуют о том, что облучение не вызывает морфологических изменений или изменений двигательной активности сперматозоидов у фертильных мужчин при использовании данного способа воздействия [8]. Однако основными мишенями при воздействии миллиметровых волн на биологические объекты являются плазматические мембраны клеток. Одним из самых ранних биохимических изменений, происходящих в клетке, подвергающейся апоптозу, считается нарушение симметрии клеточной мембраны и перемещение фосфатидилсерина (ФС) на ее внешнюю сторону (экстернализация). ФС – это фосфолипид, который локализуется на поверхности клетки во время апоптоза и формирует один из специфических сигналов для обнаружения апоптотической клетки [9-10].

Миллиметровые волны, воздействуя на плазматические мембраны клеток, могут возбуждать в них акустоэлектрические колебания, как в диэлектрических

резонаторах – колебания Фрелиха. Вероятно, снижение экстернализации ФС на поверхности мембран сперматозоидов в результате воздействия низкоинтенсивных ЭМИ миллиметрового диапазона, проявляющееся в уменьшении количества сперматозоидов с признаками апоптоза, можно объяснить стабилизацией мембран сперматозоидов, происходящей за счет явления стохастического резонанса с собственными частотами биомембран сперматозоидов, что приводит к повышению их адаптивных возможностей [8].

При астенозооспермии у пациентов, пользующихся сотовым телефоном в течение длительного времени на протяжении ≥ 4 часов в сутки, в качестве митохондриального маркера изучалась НАД⁺ – зависимая изоцитратдегидрогеназа (ИДГ).

НАД⁺ - ИДГ в семенной плазме человека может быть одной из мишеней излучения сотового телефона. Изменения ее активности приводят к снижению выработки АТФ в клетках млекопитающих. ИДГ – это фермент, который катализирует окислительное декарбоксилирование изоцитрата с образованием альфа-кетоглутарата (α -кетоглутарата) и CO₂. Это двухэтапный процесс, который включает окисление изоцитрата (вторичного спирта) до оксалосукцината (кетона) с последующим декарбоксилированием бета-карбоксылной группы до кетона с образованием альфа-кетоглутарата. У человека ИДГ существует в трех изоформах. ИДГ3 катализирует третью стадию цикла лимонной кислоты при превращении НАД⁺ в НАДН в митохондриях. Изоформы ИДГ1 и ИДГ2 катализируют ту же реакцию вне контекста цикла лимонной кислоты и используют НАДФ⁺ в качестве кофактора вместо НАД⁺. Они локализованы в цитозоле, а также в митохондриях и пероксисомах. По сообщению Santini S.J. и соавторов (2018) изменения в ее уровне активности могут отражать дефектную подвижность сперматозоидов у некоторых пользователей сотовых телефонов [11].

Считается, что ядро и митохондрии более чувствительны к радиации. Повреждение этих структур происходит при ее малых дозах и проявляется в самые ранние сроки. В этом случае обнаруживаются изменения физико-химических свойств нуклеопротеиновых комплексов, в результате чего количественные и качественные изменения в ДНК и процесс синтеза ДНК-РНК-белка разобщаются. Стоит отметить, что воздействие ЭМИ на клетку является результатом сложных взаимосвязанных и взаимозависимых превращений [12].

В экспериментальных работах Логинова П.В. и Николаева А.А. описано как самцы белых крыс массой 215-240 г подвергались воздействию микроволнового излучения при частоте 42 ГГц («Яв-1-7,1»; $\lambda = 7,1$ мм) в течение 30 дней по 30 минут ежедневно. Под воздействием электромагнитного излучения указанной частоты регистрировалось достоверное повышение перекисного окисления эритроцитов у подопытных животных по сравнению с животными контрольной группы ($50,2 \pm 2,21$ и $42,2 \pm 3,49$ % соответственно), что свидетельствует об усилении свободнорадикальных окислительных процессов в крови и развитии окислительного стресса. Развитие окислительного стресса, связанного с радикальным окислением

ненасыщенных фосфолипидов рН, можно выразить следующей схемой: усиление процессов свободнорадикального окисления (СРО) может означать ухудшение функционального состояния систем организма. В условиях воздействия микроволнового излучения (СВЧ) в ткани яичек динамика процессов СРО усиливалась. Исходный уровень малонового диальдегида (МДА) увеличился почти на 38,5% по сравнению с контрольными значениями. Кинетические характеристики перекисного окисления липидов (ПОЛ) в условиях индуцированного стресса также значительно возросли. Количество МДА, нмоль / ч и МВИ подвижных сперматозоидов уменьшилось более чем на четверть ($P < 0,01$); в то же время количество подвижных форм уменьшилось в основном за счет прогрессивно подвижных сперматозоидов, а именно за счет самых молодых высокоподвижных клеток. Это обстоятельство авторы объясняют тем, что длительное воздействие низкоинтенсивного электромагнитного излучения постепенно истощает ресурс пролиферации, что в итоге приводит к уменьшению количества половых клеток на фоне увеличения числа дефектных форм. Количество погибших сперматозоидов увеличилось почти в 3 раза.

Описанное выше исследование позволяет сделать следующие выводы о механизме гонадотоксического действия низкоинтенсивного электромагнитного излучения: 1) под воздействием низкоинтенсивного электромагнитного излучения миллиметрового спектра изменяется стабильность мембран сперматозоидов; его воздействие на клеточные мембраны согласуется с теорией поддержания акустоэлектрических колебаний (колебаний Фрелиха) в клеточной мембране; 2) длительное низкоинтенсивное электромагнитное излучение истощает ресурс пролиферации половых клеток; 3) при увеличении динамики процессов СРО и резонансного эффекта возможно негативное воздействие этого излучения на быстро пролиферирующие и незрелые половые клетки [13].

Низкоинтенсивная лазерная терапия (НИЛТ) в настоящее время используется в инфракрасном диапазоне для лечения проблем мужской фертильности. Лечение способствует улучшению у больных качеств сперматогенеза, таких как секреция сперматозоидов, степень фрагментации ДНК сперматозоидов (ФДНКС), снижение титра АСАТ. В работе Потапова М.К. показано, что лазерное излучение оказывает значительное влияние на тканевые фотосенсибилизаторы – порфирины, цитохром С-оксидазу и никотинамидадениндинуклеотиды. Фотосенсибилизатор поглощает свет из инфракрасного спектра, ионизирует его и передает энергию близлежащим молекулам, что дополнительно создает электрохимический потенциал в митохондриях, приводящий к увеличению скорости синтеза аденозинтрифосфата (АТФ), в результате чего повышается подвижность сперматозоидов [2]. Положительный терапевтический эффект лазерного облучения напрямую связан с оксидами азота (II). Как сообщает Yeste M. с соавторами (2018), концентрация оксида азота (II) в ткани яичек увеличивает концентрацию циклического гуазинмонофосфата в сосудистом русле, снижает концентрацию ионов Ca^{2+} , расширяет капилляры и улучшает питание тканей [14]. Эксперимен-

тальные практики Borhani S. и его соавторов (2018) показали, что лазерная терапия расширяет капиллярную сеть клеток Лейдига и Сертоли, что повышает естественный уровень тестостерона и количество нормальных сперматозоидов [15].

Использование НИЛТ также помогает бороться с активными формами кислорода (АФК). Появление АФК в клетках способствует деградации мембраны и снижению способности сперматозоидов к оплодотворению [2]. Высокие концентрации АФК могут приводить к денатурации молекул ДНК и одно-или двухцепочечным разрывам нитей ДНК [16]. Москвиным С.В. (2016), предложен механизм действия НИЛТ на ФДНКС, заключающийся в изменении активности антиоксидантных ферментов и фотолизе нитрозильных комплексов, что приводит к уменьшению свободных радикалов в тканях и стабилизации негативного влияния окислительного стресса на структурную целостность ДНК сперматозоидов. Другим возможным механизмом влияния НИЛТ на ФДНКС является способность лазерного излучения воздействовать на процессы репарации полового хроматина, что способствует репарации нитей ДНК сперматозоидов [17].

Помимо описанных выше эффектов, как сообщает Потапова М.К. (2019), под влиянием лазерной терапии могут быть улучшены показатели MAR-теста, стабилизироваться мембранный потенциал сперматозоидов, что предотвращает адгезию антиспермальных антител. [2].

Следует отметить, что стимуляция и торможение сперматогенеза полностью зависят от плотности, мощности и времени воздействия лазера. Например, неправильный подбор параметров лазерного излучения может привести только к отрицательным результатам. Alves M. и Taha M.F. (2016) делают два важных вывода: не следует фокусировать лазер на минимальном размере (точке) пятна, а время экспозиции каждой области не должно превышать 1,5 минуты. Того же мнения придерживаются по результатам экспериментальной работы Аполихин О.И. и Москвин С.В. (2017) [20]. В связи с этим к выбору параметров лазерного облучения следует относиться с осторожностью, чтобы активизировать жизненный процесс и дать предварительное объяснение его причин. Следует отметить, что в ряде исследований были сделаны выводы о ведущей роли активных форм кислорода (АФК) в механизме биорегуляторного действия НИЛИ [21-22]. По мнению Moskvin S.V. (2014) АФК является лишь вторичным продуктом лазерной активации клеточного метаболизма, то есть результатом, а не причиной [23].

Важен вопрос выбора наилучшей длины волны и режима работы лазера. В большинстве исследований освещение осуществлялось почти полностью непрерывным НИЛИ в красном цвете (633-650 нм), с гораздо более низкими частотами в других спектральных диапазонах: 532 нм, 633-637 нм, 647 нм, 655-660 нм, 780 нм, 890-904 нм. Однако из-за физических особенностей (малой глубины воздействия) лазер с такими параметрами клинически невозможно или практически невозможно эффективно использовать [20]. Проблему возможно частично решить применением разных типов световодов для стимуляции светом какой-либо полости организма (напри-

мер, ректальное освечивание предстательной железы), однако полноценная лазерная терапия возможна только при использовании импульсного НИЛИ красного и инфракрасного спектров [23-24].

По сообщению Firestone R.S., Esfandiari N., Moskovtsev S.I. (2012) при использовании импульсного инфракрасного лазера (длина волны – 905 нм) мощностью 50 Вт (длительность импульса – 200 нс) и плотностью мощности – 50 Вт/см² наблюдалось повышение подвижности и отсутствие повреждений ДНК сперматозоидов. Вероятно, положительный результат получен вследствие небольшой экспозиции (30 с); он наблюдался у образцов пациентов с олигоастенотератозооспермией через 30 минут после облучения, однако отсутствовал при нормо- и астенозооспермии [25].

Исследователи Аполихин О.Я. и Москвин С.В. (2017) отмечают тот факт, что воздействие импульсного инфракрасного НИЛИ с трансректальной доставкой энергии лазерного света является предпочтительным при лечении больных хроническим неспецифическим простатитом (ХНП). По частоте изменения активности воспалительного процесса простатита можно проводить персонализированное лечение больных с ХНП и получать лучшие терапевтические результаты [20].

Влияние ЭМИ на репродуктивную функцию изучается также на некоторых позвоночных животных. Полученные результаты Н. В. Барулиным (2015) на гибридах бестера показывают, что воздействие на сперматозоиды самцов осетровых рыб модулируется оптическим излучением в спектральном диапазоне от 450 до 1270 нм, плотностью мощности $P=0,5-100$ мВт/см², частотой модуляции $F=50-60$ Гц. Это способствует повышению активности сперматозоидов. Показано, что фотобиологическое воздействие на сперматозоиды зависит от длины волны воздействующего излучения, его плотности, мощности, дозы энергии и частоты модуляции. Так, автором показано, что в контрольной группе процент оплодотворенных икринок осетровых составлял 72%, но в случае сперматозоидов, обработанных требуемым методом, процент оплодотворенных икринок достигал 90% [26]. В исследовании, проведенном Н.В. Барулиным и М.В. Шалаком (2013), изучалось влияние поляризованного лазерного излучения в красной области спектра 670-690 нм с плотностью мощности $P=3,0+0,2$ мВт/см² в сочетании с магнитным полем 50+5МТ на сперматозоиды самца гибрида бестера. Установлено, что лазерное излучение в красной области спектра 670 нм при 40-секундном облучении оказывает более выраженное активирующее действие на сперму осетровых рыб. Увеличение или уменьшение времени воздействия может привести к уменьшению стимулирующего эффекта. Совместное воздействие лазерного излучения и постоянного магнитного поля оказывает значительное активирующее действие на сперматозоиды осетровых рыб. В то же время, при действии двух физических факторов, максимальная стимуляция спермы осетровых рыб наблюдалась при экспозиции 20-30 с. Таким образом, при одновременном действии 2-х физических факторов оптимальное время воздействия оказывается ниже, чем у каждого отдельно воздействия [27].

Следующее исследование было проведено Корнеевой Е.Я. (2016) со спермой 5-6-летних самцов крупного рогатого скота. Быки-производители подвергались воздействию прибора «Узор-3к» для экспонирования НИЛИ в области яичек совместно с универсальным блоком передатчика УБИ—01 (синий спектр, длины волн 0,89 и 0,41 мкм). Облучали паренхиму яичек быка-донора низкоинтенсивным лазерным излучением синего спектра частотой 0,30 кГц в импульсном режиме, с экспозицией 1 минуту, в течение 7 дней. Это приводило к увеличению концентрации сперматозоидов в одном миллилитре эякулята. Значительное повышение концентрации спермы у быков-доноров в опытной группе наблюдалось с шестой недели после облучения и продолжалось в течение пяти недель после его окончания. Разница между количеством сперматозоидов в 1 мл составляло от 5,5 до 5,8%. По мнению автора, из-за воздействия на клетки Лейдига некогерентный поляризованный свет приводит к гормональной активации быков, стимулируя процесс сперматогенеза [28].

В другом исследовании быков-производителей возрастом 4-11 лет, проведенным Евтухом Л.Г. (2015) в качестве источника светоблучения использовался прибор Биоптрон Компакт III производства фирмы Bioptron AG, Швейцария. Волны поляризованного света, излучаемые прибором Биоптрон Компакт III, распространяются в параллельных плоскостях. Система светотерапии «Биоптрон» охватывает диапазон длин волн от 480 до 3400 нм. Удельная мощность света, излучаемого прибором Биоптрон Компакт III, равна примерно 40 мВт/см² при действии с расстояния 10 см. Исследователи проводили 10 сеансов, по одному в день. Качество спермопродукции по сравнению с периодом до облучения, во время облучения и после его окончания, за исключением объема эякулята, который оставался почти стабильным, у всех быков-производителей улучшилось за счет подвижности сперматозоидов и их концентрации в 1 мл. Значительно уменьшилось количество отбракованной спермы. Так, при облучении у быков-производителей активность движения сперматозоидов повышалась с $6,61 \pm 0,26$ до $7,44 \pm 0,16$ балла, концентрация в 1 мл с 1750 ± 110 до 2050 ± 80 млрд/мл, что подтверждает влияние НПС на активацию сперматогенеза и метаболизма питательных веществ спермиев. После облучения концентрация сперматозоидов в 1 мл была высокой и составляла 2260 ± 70 млн/мл, общее количество спермиев в эякуляте – 9550 ± 550 млн/мл. Исследования показали, что через 55 дней после окончания облучения подвижность, концентрация и общее количество спермиев в эякуляте оставались выше по сравнению с периодом до облучения [29].

В другом исследовании по влиянию инфракрасного излучения проводили на сперматозоидах ослов с использованием методики разных последовательностей облучения свет-темнота-свет. Ученые из Испании сравнивали результаты облучения свежей разбавленной и охлажденной спермы осла. Свежие образцы спермы разбавляли раствором Kenney (EquiPRO® Cool Guard MOFA Global) и стимулировали красным светом сразу после сбора, тогда как охлажденную сперму хранили при 4 градусах в течение 24 часов после разбавления, а затем облучали.

Во всех случаях образцы спермы были распределены по прозрачным соломинкам объемом 0,5 мл, которые затем были случайным образом разделены на контрольную и 19 обработанных образцов: 6 включали однократное воздействие красным светом, а остальные 13 включали облучение с интервалами свет-темнота-свет. Длина волны источника света составляла 620-630 нм. В данном исследовании использовали 16 порций эякулята от восьми здоровых взрослых особей с нормальной фертильностью. Сразу после сбора сперму без геля разбавляли в отношении 1:5 разбавителем Kenpey, предварительно нагретым до 37 градусов. Концентрацию сперматозоидов определяли во всех образцах с помощью гемоцитомера.

В этой работе была представлена методика чередования включения и выключения источника инфракрасного излучения в разных временных промежутках. Из 19 образцов, 6 образцов испытывали однократное облучение инфракрасным светом по отрезкам времени в 1, 2, 3, 4, 5 и 10 минут, остальные 13 образцов облучали попеременно, чередуя свет и тьму по следующим последовательностям: 1-1-1, 2-1-2, 2-2-2, 3-1-3, 3-3-3, 4-1-4, 4-4-4, 5-1-5, 5-5-5, 10-5-10, 10-10-10, 15-5-15, 15-15-15.

Были собраны результаты влияния излучения инфракрасного диапазона на такие характеристики, как подвижность, потенциал митохондриальной мембраны (ПММ) и количество жизнеспособных сперматозоидов с высоким содержанием пероксидов.

Подвижность сперматозоидов контрольного образца составляла 44,1%. В образцах со свежей спермой увеличение прогрессивной подвижности сперматозоидов было выше после облучения в течение 4 минут (56%), чем в течение 1 минуты (55%).

В контрольном образце подвижность сперматозоидов после охлаждения составляла 45,2%. Облучение инфракрасным светом охлажденных сперматозоидов также положительно сказалась на этой характеристике, однако, показатели оказались немного меньше, чем в свежей сперме осла. Облучение в течение 1 минуты повысило общую подвижность сперматозоидов до 50%, а в течение 4 минут – до 55%. Облучение режимом 4-1-4 показало максимальную подвижность сперматозоидов в данном опыте, которая составляла 58%. Облучение светом инфракрасного диапазона уменьшало процентное содержание сперматозоидов с высоким уровнем пероксидов. В контрольном образце данный показатель варьируется в пределах от 15% до 15,5%. После облучения спермы самый низкий процент сперматозоидов (7,5%) с этим показателем пришелся на непрерывное облучение в течение 5 минут, при этом, самым облучение в течение 10 минут оказалось самым неэффективным и усугубляющим (16,5%). Данные свежей спермы коррелируют с данными свежей спермы.

Представляет интерес следующее исследование, которое основывалось на показателе потенциала митохондриальной мембраны (ПММ). Данная характеристика в контрольном образце составляет 44%, тенденция к уменьшению или увеличению данного показателя неоднозначна. Авторы наблюдали увеличение ПММ в режимах облучения 10 минут и 3-3-3, что составляло 60% и 59% соответственно. Облучение режимом 15-5-15

выраженно уменьшало ПММ (30%). Также облучение режимами 4-1-4, 4-4-4 и 5-1-5 показало примерно одинаковый результат, который составлял 32%. Эти данные были собраны по показателям охлажденной спермы. В свежей разбавленной сперме процент сперматозоидов с высоким ПММ увеличивался после облучения в течение 4 минут, 3-3-3, 4-1-4, 4-4-4, 5-5-5, 10-5-10, 10-10-10 и 15-15-15.

Облучение не только увеличивает процент сперматозоидов с высоким содержанием ПММ, но также увеличивает интенсивность митохондриальной активности. Эти данные подтверждают гипотезу о том, что красный свет оказывает свое действие через активацию митохондриальных фотосенсибилизаторов, таких как комплекс цитохрома C/ цитохрома С оксидазы. Это фотонное поглощение приводит к увеличению продукции АТФ и митохондриальному Ca²⁺ поглощению, что ведет к прогрессии подвижности сперматозоидов и повышает их оплодотворяющую способность.

Похожее исследование было проведено на девяти взрослых жеребцах с доказанной фертильностью, помещенных в службу воспроизводства лошадей Автономного Университета Барселоны. Способ обработки эякулята аналогичен способу из предыдущего опыта [30], однако в данном эксперименте собранный эякулят не подвергался охлаждению.

В экспериментах J. Cataláни его коллег (2020) было оценено в общей сложности 19 протоколов облучения (красный свет). Шесть из этих протоколов состояли из отдельных периодов светового излучения (1, 2, 3, 4, 5, и 10 мин), в то время как остальные 13 процедур состояли из интервалов свет-темно-свет (1-1-1, 2-1-2, 2-2-2, 3-1-3, 3-3-3, 4-1-4, 4-4-4, 5-1-5, 5-5-5, 10-5-10, 10-10-10, 15-5-15, и 15-15-15 мин). Контрольные образцы не облучались. Для определения влияния каждой радиационной картины оценивали жизнеспособность сперматозоидов, подвижность и подвижные субпопуляции, митохондриальную активность, внутриклеточный уровень АТФ, скорость потребления O₂ и фрагментацию ДНК. Результаты, представленные в этом исследовании, показывают, что сперматозоиды жеребцов, подвергнутые воздействию коротких протоколов стимуляции красным светом, как одиночных, так и комбинированных режимов света и темноты, демонстрируют лучшую реакцию на параметры подвижности, чем длинные. Излучение в соответствии с протоколами 4, 2-2-2, 3-3-3, 4-4-4, 5-1-5, а на 5-5-5 была отмечена повышенная подвижность сперматозоидов. Увеличение структуры субпопуляций сперматозоидов наблюдалось после воздействия инфракрасного излучения по протоколам 2, 2-2-2, 3-3-3 и 4-1-4. Митохондриальная активность повышается за счет воздействия инфракрасного излучения в протоколах 4, 3-3-3, 4-4-4, 5-1-5, 5-5-5, 15-5-15, и 15-15-15. Полученные результаты также показали увеличение внутриклеточного уровня АТФ и скорости потребления O₂ (нормализованной скорости потребления O₂ относительно соответствующего контрольного образца) в образцах, облученных в течение 4 минут, по сравнению с необлученным контрольным образцом [31].

В исследовании Yeste M. соавторов (2016) оценивалось влияние воздействия различных режимов светодиода красного света на качество спермы хряка. Процедура фотостимуляции состояла из 10 минут света, 10 минут отдыха и 10 минут дополнительного освещения (образец 10-10-10). Этот протокол индуцировал интенсивное и временное увеличение большинства параметров подвижности без изменения жизнеспособности сперматозоидов и целостности акросом. Инкубация не стимулированных светом сперматозоидов при 37 ° С в течение 90 минут снизила все параметры качества спермы, но это снижение было предотвращено при применении ранее описанной световой процедуры. Этот эффект сопровождался увеличением процента сперматозоидов с высоким потенциалом митохондриальной мембраны. Обработка коммерческих доз спермы, предназначенных для искусственного осеменения, с использованием схемы фотостимуляции 10-10-10, значительно увеличила показатели опорода и количество как полных, так и живорожденных поросят для отведения. Таким образом, результаты показывают, что точная процедура фотостимуляции может увеличить оплодотворяющую способность спермы кабана посредством механизма, который может быть связан с функцией митохондрий [32]. Согласно данным, приведенным Van Frangez H. и соавторами (2015) было показано, что освещение *in vitro* повышает подвижность сперматозоидов у мужчин с астенозооспермией в среднем в 4-5 раз почти независимо от длины волны (470, 625, 660 и 850 Нм) [33].

Новым перспективным методом лечения секреторных и аутоиммунных форм мужского бесплодия, как сообщает Потапова М. К., (2019), является низкоинтенсивная лазерная терапия (НИЛТ) органов мошонки. По результатам исследований оценено влияние НИЛТ в инфракрасном спектре на основные показатели сперматогенеза, фрагментацию ДНК сперматозоидов и показатель MAR-теста у мужчин с необструктивной патозооспермией. Лечение проводилось по результатам обследования 50 мужчин в возрасте от 23 до 40 лет. После обследования пациентам проводился курс тестикулярной НИЛТ в инфракрасном свете с длиной волны 870 Нм и мощностью 25 мВт с использованием прибора Рубин-Ц (Россия). Через день проводилось 10 процедур лазерной терапии с попеременным освещением тканей обоих яичек в течение 3 минут (воздействие на 5 точек с экспозицией 35 секунд каждая). После курса НИЛТ отмечалось повышение концентрации сперматозоидов (в среднем на 17%) сразу после лечения и через месяц после него (на 25%). Количество прогрессивно подвижных форм сперматозоидов увеличивалось в среднем на 25% к концу курса НИЛТ и оставалось таковым в течение месяца. Количество нормальных форм сперматозоидов увеличилось в среднем на 26 % и 58%. Положительное влияние НИЛТ на основные показатели спермограммы сохранялось в течение одного месяца после лечения. Сразу после курса НИЛТ значение MAR-теста снизилось в среднем на 69%. Этот эффект сохранялся у 11 из 12 пациентов в течение 2 месяцев. Проведение курса НИЛТ способствовало увеличению общей и свободной фракции тестостерона в плазме крови через 1 месяц после лечения. Тот же ав-

тор указывает, что после 120 минут облучения нативной спермы у большинства больных зафиксировано снижение степени патологической ФДНКС [2].

В следующем опыте с больными хроническим неспецифическим простатитом (ХНП) использовался лазерный терапевтический аппарат «Матрикс-Уролог» с двумя лазерными излучающими головками инфракрасного диапазона (длина волны – 890 нм, импульсная мощность до 10 Вт, частота повторения импульсов от 80 до 3000 Гц). Больные в течение 10 дней проходили биполярное лазерное освещивание яичек в боковой и продольной проекциях. Воздействие в виде монотерапии при варикоцеле повышает концентрацию активно-подвижных форм сперматозоидов с 25% до 37%, количество морфологически нормальных форм – с 27% до 39%. При идиопатическом бесплодии применение локальной лазеротерапии вызывает повышение доли подвижных сперматозоидов с 19% до 34% и увеличение количества морфологически нормальных форм сперматозоидов с 13% до 23%. Лазерная терапия больных простатитами и везикулитами позволяет устранять инфильтративно-экссудативные изменения в предстательной железе, а назначение зависит от стадии воспалительного процесса. Благодаря лазерной терапии улучшается отток воспаленного секрета из желез предстательной железы, повышается местный иммунитет, ликвидируются болевые и дизурические симптомы. Показана также высокая эффективность внутривенного лазерного освещивания крови (ВЛОК) при лечении больных ХНП с нарушениями фертильности. Процедура проводилась аппаратом Матрикс-ВЛОК (длина волны – 635 нм, мощность – 1,5–2,0 мВт на выходе КИВЛ-01) на курс 10 сеансов по 10 мин. Больным, 15 (37,5%) из которых имели сильную, 14 (35%) – среднюю и 11 (27,5%) – слабую половую конституцию, также ежедневно проводился массаж предстательной железы (курс – 15 процедур). После терапевтического курса концентрация сперматозоидов в 1 мл в среднем составила 25,4±2,1 млн, подвижность сперматозоидов – 57,3±3,1%, патологических форм сперматозоидов – 23,2±1,4%, концентрация фруктозы – 10,3±0,8 нмоль/л, лимонной кислоты – 20,3±1,4 нмоль/л, резистентности спермий (РС) – 9,5±1,5 мин, дыхательной способности спермий (ДСС) – 77,6±11,3 мин. В результате лечения нормоспермия была выявлена у 29 (72,5%) пациентов с сильной и средней половой конституцией, концентрация фолликулостимулирующего гормона (ФСГ) в крови снизилась на 28%, лютеинизирующего гормона (ЛГ) – на 17%, эстрадиола (Е2) – на 17, пролактина (ПРЛ) – на 38, дегидроэпиандростерона-сульфата (ДГЭА-С) – на 18%, тестостерона (ТС) – повысилась на 33,5% ($p>0,05$). В результате лечения функциональная активность гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковотестикулярной системы повысилась у 27 (67,5%) больных с длительностью ХНП не более 5 лет. В течение 1 года после лечения беременность наступила в 25 (62,5%) супружеских парах, в которых мужчины были возрастом от 22 до 40 лет, с сильной и средней половой конституцией, длительностью ХНП ≤ 5 лет [34].

Стимуляция лазерным светом 630 Нм может привести к образованию активных форм кислорода (АФК), таких как перекись водорода (H₂O₂) в митохондриях

сперматозоидов мышей. Низкие уровни АФК действуют как важный посредник в оплодотворении, позволяя акросоме сперматозоида реагировать с яйцеклеткой. Однако высокий уровень АФК может нанести вред клеточной ДНК. Окислительное повреждение ДНК может привести к множественным формам мутаций в результате структурных изменений оснований, а также искажений спиралей и образования одно-и двухцепочечных разрывов ДНК. Наиболее распространенным продуктом окислительного повреждения ДНК является окисление гуанина с образованием 8-гидроксигуанина (8-оксо-G). Если оставить это основание нераскрытым, то оно соединится с аденином вместо цитозина [36].

Сперматозоиды способны фосфорилировать гистон H2AX на Серине 139 в присутствии H₂O₂. Эта модификация белка называется γ H2AX и используется клеткой для маркировки двухцепочечных разрывов до 1-2 мегабаз за пределами места повреждения. Поэтому он считается высокочувствительным маркером для двухцепочечных разрывов ДНК, производимых АФ [37]. Лазерное облучение сперматозоидов длиной волны 633 Нм при плотности мощности 5,66 мВт/см² увеличивает скорость движения сперматозоидов. Химический механизм внутриклеточного фотонного поглощения, указывающий на то, что фотонная энергия в красном свете поглощается цитохром-С-оксидазой, увеличивая выработку АТФ и тем самым повышая подвижность сперматозоидов. Лазерное облучение не привело к достаточно высокому уровню продукции АФК, чтобы вызвать значительное повреждение ДНК. Путем иммуностабирования γ H2AX и анализа на 8-оксо-G было определено, что облучение красным светом не вызывает значительных уровней окислительного повреждения в ядерной ДНК сперматозоидов.

Исследование Ргесе D. и соавторов (2017) показывает, что лазерное облучение сперматозоидов с длиной волны 633 нм при плотности мощности 5,66 мВт/см² увеличивает скорость движения сперматозоидов. Эти данные подтверждают предложенный химический механизм внутриклеточного фотонного поглощения, который указывает на то, что фотонная энергия в красном свете поглощается цитохром-С-оксидазой (Cco), увеличивая выработку АТФ и тем самым повышая подвижность сперматозоидов. Было высказано предположение, что Cco является основным фотоакцептором для диапазона red-NIR в клетках млекопитающих. Поглощение фотонов в митохондриальном Cco повышает выработку АТФ и энергоснабжение, а также может увеличить поглощение митохондриями Ca²⁺. Считается, что у сперматозоидов это приводит к повышению подвижности и увеличению потенциала оплодотворения. Однако в исследовании не учитывалась возможность повышения подвижности за счет локального нагрева. Результаты исследования показали, что воздействие на сперматозоиды лазерного излучения длиной волны 633 Нм при плотности мощности 31 мВт/см² не вызывает значительных уровней двухцепочечных разрывов ДНК, отмеченных γ H2AX, и не вызывает значительных уровней окислительного повреждения ДНК, измеренного с помощью 8-оксо-G. Из количественного ИФА видно, что повреждение ДНК

было обнаружено в экспериментальной и отрицательной контрольных группах. Аналогичные уровни были обнаружены между этими двумя, что указывает на то, что это, вероятно, артефакт центрифугирования, криоконсервации и оттаивания [38].

С. Х. Аль-Шукри и соавторы (2015) сообщают, об исследовании, проведенном на 112 больных, страдающих хроническим простатитом, в комплексе с лечением проводили лазерные процедуры ежедневно в течение 5 минут. Курс лечения составил 10 дней. Использовалась эндополостная ректальная методика, при которой применялся световод с зеркалом, скошенным под углом 45° (СФ750). Мощность инфракрасного излучения на выходе световода составила 20 мВт, частота следования импульсов — 100 Гц. Было установлено достоверное повышение объема, уменьшение вязкости спермы, а также увеличение общего количества сперматозоидов и подвижных форм [39].

И. А. Ваисов с коллегами (2012) сообщили об исследовании 80 бесплодных мужчин в возрасте от 20 до 35 лет с астенозооспермией, получивших специфическое лечение в результате выявленных у них ИППП, и 10 фертильных мужчин (контрольная группа). Лечение проводилось лазерным терапевтическим аппаратом «Матрикс» с 4 каналами излучения для низкоинтенсивной лазерной и магнитно-лазерной терапии, с различными режимами излучения инфракрасного спектра (длина волны 0,365 мкм, импульсная мощность от 1 до 250 мВт, частота повторения импульсов до 3 000 Гц). Всем пациентам проводилось биполярное лазерное облучение яичек в боковой и продольной проекциях, ежедневно по 10 минут на каждое яичко, в течение 10 дней. Впоследствии проведенной ЛТ, у всех больных, достоверно увеличивалась жизнеспособность сперматозоидов, подвижность, численность морфологически нормальных форм ($p < 0,01$). При оценке гормонального статуса было выявлено понижение значения ФСГ и незначительное увеличение содержания ЛГ ($p < 0,05$) в периферической крови.

Влияние НИЛИ на семенники при нормозооспермии вызывало увеличение количества жизнеспособных форм с 78% до 88%, подвижности с 52% до 64% и количество морфологически нормальных форм сперматозоидов с 54% до 66%. Влияние НИЛИ на семенники вызывало улучшение параметров спермы и снижение уровня ФСГ у всех больных.

При идиопатическом бесплодии использование локальной НИЛИ вызывало увеличение подвижности сперматозоидов с 19% до 34% и количества морфологически нормальных форм сперматозоидов с 13% до 23%. По мнению авторов, у пациентов с олигоастенотератозооспермией целесообразно проведение курса НИЛИ при подготовке к ЭКО для улучшения качества параметров спермы [40].

ВЫВОД

Представительный свод работ авторов из ближнего и дальнего зарубежья показывает, что ЭМИ обладают выраженным биологическим эффектом на репродуктивные органы и половые клетки мужчин и самцов иных позвоночных животных. Воздействие ЭМИ на клетку явля-

ется результатом сложных взаимосвязанных и взаимозависимых превращений. Биологический эффект ЭМИ заключается в изменении работы ферментных комплексов выработки макроэргических молекул АТФ, изменении потенциала мембран и их структурной конформации. Применение ЭМИ может приводить к изменению активности антиоксидантных ферментов, фотолиза нитрозильных комплексов, что приводит к уменьшению свободных радикалов в тканях и стабилизации негативного влияния окислительного стресса на структурную целостность ДНК сперматозоидов. Индуцируемое ЭМИ фотонное поглощение приводит к увеличению продукции АТФ и митохондриальному Ca^{2+} поглощению, что ведет к прогрессии подвижности сперматозоидов и повышает их оплодотворяющую способность. При применении отдельных протоколов ЭМИ *in vivo* на животных было установлено достоверное повышение объема спермы, уменьшения ее вязкости, а также увеличение общего количества сперматозоидов и подвижных форм в ней. Воздействие НИЛИ на семенники мужчин вызывало улучшение параметров спермы и снижение уровня ФСГ у всех больных, что указывает не только на возможность непосредственного воздействия ЭМИ на сперматозоиды, но и на опосредованный, системный гуморальный эффект. Выдвигается предположение, что из-за воздействия на клетки Лейдига некогерентный поляризованный свет приводит к гормональной активации быков, стимулируя процесс сперматогенеза. Определен химический механизм внутривитального фотонного поглощения, указывающий на то, что фотонная энергия в красном свете поглощается цитохром-С-оксидазой, увеличивает выработку АТФ и тем самым повышает подвижность сперматозоидов.

Воздействие ЭМИ на сперму достоверно благоприятно влияет на число случаев оплодотворения, как показано на примере оплодотворения икринок осетровых рыб (72% без облучения против 90% при воздействии ЭМИ). Однако в зависимости от природы ЭМИ, характера и методики воздействия возможно индуцирование отрицательных последствий, таких как изменение стабильности мембран сперматозоидов, истощение ресурса пролиферации половых клеток, негативное воздействие на быстро пролиферирующие и незрелые половые клетки.

На наш взгляд особое внимание стоит уделить инфракрасному излучению (НИЛТ), так как при его применении наблюдается тенденция положительного влияния на сперматозоиды – мы видим увеличение подвижности, снижение показателя MAR-теста, снижение продуктов свободнорадикального окисления в тканях и нивелирование негативного влияния окислительного стресса на целостность структуры ДНК сперматозоидов. Улучшение состояния этих показателей приводит к нормализации эякулята. Это может стать выбором для лечения таких состояний как астенозооспермия, олигозооспермия, тератозооспермия и их сочетаний.

Несмотря на сообщения о положительном эффекте воздействия электромагнитного излучения на физиологию сперматозоидов и достоверном увеличении фертильного статуса эякулята следует расширять доказательную базу относительно безопасности применения ЭМИ при лечении бесплодия. Необходимо направить усилия на поиск безопасных протоколов воздействия ЭМИ *in vivo* и *in vitro*, с целью исключения индуцирования патологии концептуса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wdowiak A. et al. Effect of electromagnetic waves on human reproduction // *Ann Agric Environ Med.* – 2017. – Т. 24. – № 1. – С. 13-18.
2. Потапова М.К., Боровец С.Ю., Соколов А.В., и др. К вопросу об эффективности низкоинтенсивной лазерной терапии в инфракрасном спектре при секреторном бесплодии у мужчин // *Урологические ведомости.* – 2019. – Т.9. – №4. – С.11–17. <https://doi.org/10.17816/uroved9411-17>
3. Бердыш Д.С., Мирзоева Р.К. Влияние физических факторов на подвижность сперматозоидов человека // *Международный студенческий научный вестник.* – 2018. – №. 4-3. – С. 370-373.
4. Grigor'ev Yu.G. From electromagnetic smog to electromagnetic chaos. to evaluating the hazards of mobile communication for health of the population. *Meditinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost' -Medical Radiology and Radiation Safety*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 28–33 (in Russian).
5. Hamada, A.J. Cell phones and their impact on male fertility: fact or fiction / A. J. Hamada, A. Singh, A. Agarwal // *Open Reprod. Sci. J.* – 2011. – Vol. 5. – P. 125–137. <https://doi.org/10.2174/1874255601103010125>
6. Hinrikus, H. Understanding physical mechanism of low-level microwave radiation effect / H. Hinrikus, M. Bachmann, J. Lass // *Intern. J. Rad. Biol.* – 2018. – Vol. 94, N 10. – P. 877–882. <https://doi.org/10.1080/09553002.2018.1478158>
7. Логинов П.В., Николаев А.А. Эффекты микроволнового излучения крайне высоких частот на состояние сперматогенных клеток самцов белых крыс // *международный журнал экспериментального образования.* – 2014. – № 5-2. – С. 141-142
8. Плосконос М.В. Влияние миллиметрового электромагнитного излучения низкой интенсивности на процесс апоптоза мужских половых клеток // *Успехи современного естествознания.* – 2015. – № 1-6. – С. 974-976;
9. Плосконос М.В. Методы определения апоптоза сперматозоидов (Обзор литературы) // *Клин. лаб. диаг.* – 2013. – № 4. – С. 3-8.
10. Плосконос М.В. Применение эозина и йодистого пропидия для оценки жизнеспособности сперматозоидов человека // *Клиническая лабораторная диагностика.* – 2014. – Т. 59. – №. 11.
11. Santini S. J. et al. Role of mitochondria in the oxidative stress induced by electromagnetic fields: focus on reproductive systems // *Oxidative Medicine and Cellular Longevity.* – 2018. – Т. 2018.

12. Ильин Л.А., Радиационная гигиена / Ильин Л.А., Кириллов В.Ф., Коренков И.П. - М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010. - 384 с. - ISBN 978-5-9704-1483-5
13. Логинов П.В., Николаев А.А. Морфофункциональное состояние репродуктивной системы самцов белых крыс в условиях воздействия низкоинтенсивного электромагнитного излучения // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №. 6. – С. 1438-1438.
14. Yeste M. et al. Impact of light irradiation on preservation and function of mammalian spermatozoa // *Animal reproduction science*. – 2018. – Т. 194. – С. 19-32.
15. Borhani S, Yazdi R.S. Clinical Applications of Low-Level Laser Therapy in Reproductive Medicine; A Literature Review. Preprints. 2018;2018040086. <https://doi.org/10.20944/pre-prints201804.0086.v1>.
16. Макутина В.А., Балезин С.Л., Рослый О.Ф., и др. Фрагментация ДНК в мужских половых клетках: влияние на репродукцию, причины происхождения и методы диагностики // Уральский медицинский журнал. - 2010. - № 3. - С. 123-128. [Makutina VA, Balezin SL, Roslyy OF, et al. Fragmentation of DNA in the male germ cells: impact on reproduction, the causes of origin and methods of diagnosis. *Ural'skiy meditsinskiy zhurnal*. 2010;(3):123-128 (In Russ.)]
17. Москвин С.В., Хадартцев А.А. Лазерный свет — можно ли им навредить? (Обзор литературы) // Вестник новых медицинских технологий. - 2016. - Т. 23. - № 3. - С. 265-283. [Moskvin SV, Khadartsev AA. Laser light — it can harm them? (literature review). *Journal of new medical technologies*. 2016;23(3):265-283. (In Russ.)]. doi: 10.12737/21772
18. Alves M.B.R. et al. Low-level laser therapy to recovery testicular degeneration in rams: effects on seminal characteristics, scrotal temperature, plasma testosterone concentration, and testes histopathology // *Lasers in medical science*. – 2016. – Т. 31. – №. 4. – С. 695-704.
19. Taha M.F., Valojerdi M.R. Quantitative and qualitative changes of the seminiferous epithelium induced by Ga. Al. As.(830 nm) laser radiation // *Lasers in Surgery and Medicine: The Official Journal of the American Society for Laser Medicine and Surgery*. – 2004. – Т. 34. – №. 4. – С. 352-359.
20. Аполихин О.И., Москвин С.В. Лазерная терапия при мужском бесплодии. Ч. 1. Этиология и патогенез. Экспериментальные исследования // *Урология*. – 2017. – №. 5. – С. 115.
21. Lavi R. et al. Detailed analysis of reactive oxygen species induced by visible light in various cell types // *Lasers in surgery and medicine*. – 2010. – Т. 42. – №. 6. – С. 473-480.
22. Shahar S. et al. Light-mediated activation reveals a key role for protein kinase A and sarcoma protein kinase in the development of sperm hyper-activated motility // *Human reproduction*. – 2011. – Т. 26. – №. 9. – С. 2274-2282.
23. Moskvin S.V. Efficiency of laser therapy. Series “Effective Laser Therapy.” Т. 2 // М.–Твер: Triada. – 2014.
24. Moskvin S. V., Khadartsev A. A. EHF-laser therapy // М.–Твер: Triada. – 2016.
25. Firestone R.S. et al. The effects of low-level laser light exposure on sperm motion characteristics and DNA damage // *Journal of andrology*. – 2012. – Т. 33. – №. 3. – С. 469-473.
26. Барулин Н.В. Анализ подвижности сперматозоидов гибрида бестера под влиянием оптического излучения низкой интенсивности // *Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства*. – 2015. – №. 18 (1).
27. Барулин Н.В., Шалак М.В., Плавский В.Ю. Способ повышения активности сперматозоидов самцов осетровых рыб // *Животноводство и ветеринарная медицина*. – 2013. – №. 3.
28. Корнеева Е.И. Применение низкоинтенсивного лазерного излучения для стимуляции спермиогенеза у быков-производителей // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. – 2016. – №. 8 (142).
29. Евтух Л.Г. Эффективность облучения мошонки быков-производителей некогерентным поляризованным светом // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. – 2015. – №. 4. – С. 65-71.
30. Jaime Catalán, Sabrina Gacem, Federico Noto, Ariadna Delgado, Bermúdez, Joan E. Rodríguez, Marc Yeste, Gill Jordi Miro Effects of red-light irradiation on the function and survival of fresh and liquid-stored donkey semen <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.03.024>
31. Catalán J. et al. Red-Light Irradiation of Horse Spermatozoa Increases Mitochondrial Activity and Motility through Changes in the Motile Sperm Subpopulation Structure // *Biology*. – 2020. – Т. 9. – №. 9. – С. 254.
32. Yeste Oliveras M. et al. Specific LED-based red light photo-stimulation procedures improve overall sperm function and reproductive performance of boar ejaculates // *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, p. 22569. – 2016.
33. Frangez H. B. et al. Photobiomodulation with light-emitting diodes improves sperm motility in men with asthenozoospermia // *Lasers in medical science*. – 2015. – Т. 30. – №. 1. – С. 235-240.
34. Аполихин О. И., Москвин С. В. Лазерная терапия при мужском бесплодии. Ч. 2. Систематический обзор клинических исследований // *Урология*. – 2017. – №. 6. – С. 164-171.
35. Ikhayev A.B. Combined use of magnetolaser and LD-laser therapy of infertility in patients with chronic prostatitis. Abstract of the thesis. Candidate of medical sciences. Pyatigorsk. 2013. Russian (Ихаев А.Б. Комбинированное использование магнитолазерной и ЛЮД лазеротерапии инфертильности у больных хроническим простатитом: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. Пятигорск. 2013. 28 с.).
36. Wright C., Milne S., Leeson H. Sperm DNA damage caused by oxidative stress: modifiable clinical, lifestyle and nutritional factors in male infertility // *Reproductive biomedicine online*. – 2014. – Т. 28. – №. 6. – С. 684-703.
37. Mah L. J., El-Osta A., Karagiannis T. C. γ H2AX: a sensitive molecular marker of DNA damage and repair // *Leukemia*. – 2010. – Т. 24. – №. 4. – С. 679-686.

38. Preece D. et al. Red light improves spermatozoa motility and does not induce oxidative DNA damage //Scientific reports. – 2017. – Т. 7. – С. 46480.
39. Аль-Шукри С. Х. и др. Влияние низкоинтенсивного лазерного излучения на показатели эякулята у больных хроническим простатитом //Урологические ведомости. – 2015. – Т. 5. – №. 4.
40. Ваисов И.А., Шодиев Х. К., Байбеков И. М. Эффективность низкоинтенсивного лазерного излучения (НИЛИ) в комплексном лечении бесплодных мужчин //Новости дерматологии и репродуктивного здоровья. – 2012. – Т. 1. – С. 7-9.

REFERENCES

1. Wdowiak A. et al. Effect of electromagnetic waves on human reproduction //Ann Agric Environ Med. – 2017. – Т. 24. – #. 1. – S. 13-18.
2. Potapova M.K., Borovets S.Yu., Sokolov A.V., i dr. K voprosu ob effektivnosti nizkointensivnoy lazernoy terapii v infrakrasnom spektre pri sekretornom besplodii u muzhchin //Urologicheskie vedomosti. – 2019. – Т.9. – #4. – S.11–17. <https://doi.org/10.17816/uroved9411-17>
3. Berdyish D. S., Mirzoeva R. K. Vliyanie fizicheskikh faktorov na podvizhnost spermatozoidov cheloveka //Mezhdunarodnyiy studencheskiy nauchnyiy vestnik. – 2018. – #. 4-3. – S. 370-373.
4. Grigor'ev Yu. G. From electromagnetic smog to electromagnetic chaos. to evaluating the hazards of mobile communication for health of the population. Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost' -Medical Radiology and Radiation Safety, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 28–33 (in Russian).
5. Hamada, A. J. Cell phones and their impact on male fertility: fact or fiction / A. J. Hamada, A. Singh, A. Agarwal // Open Reprod. Sci. J. – 2011. – Vol. 5. – R. 125–137. <https://doi.org/10.2174/1874255601103010125>
6. Hinrikus, H. Understanding physical mechanism of low-level microwave radiation effect / H. Hinrikus, M. Bachmann, J. Lass // Intern. J. Rad. Biol. – 2018. – Vol. 94, N 10. – P. 877.
7. Loginov P.V., Nikolaev A.A. Effekty mikrovolnovogo izlucheniya krayne vyisokih chastot na sostoyanie spermatogennykh kletok samtsov belykh kryis // mezhdunarodnyiy zhurnal eksperimentalnogo obrazovaniya. – 2014. – # 5-2. – S. 141-142
8. Ploskonos M.V., Vliyanie millimetrovogo elektromagnitnogo izlucheniya nizkoy intensivnosti na protsess apoptoza muzhskikh polovyykh kletok // uspehi sovremennogo estestvoznaniya. – 2015. – # 1-6. – S. 974-976;
9. Ploskonos M.V. Metodyi opredeleniya apoptoza spermatozoidov (Obzor literaturyi) // Klin. lab. diag. – 2013. – # 4. – S. 3-8.
10. Ploskonos M. V. Primenenie eozina i yodistogo propidiya dlya otsenki zhiznesposobnosti spermatozoidov cheloveka // Klinicheskaya laboratornaya diagnostika. – 2014. – Т. 59. – #. 11.
11. Santini S. J. et al. Role of mitochondria in the oxidative stress induced by electromagnetic fields: focus on reproductive systems //Oxidative Medicine and Cellular Longevity. – 2018. – Т. 2018.
12. Ilin L.A., Radiatsionnaya gigiena / Ilin L.A., Kirillov V.F., Korenkov I.P. - M. :GEOTAR-Media, 2010. - 384 s. - ISBN 978-5-9704-1483-5
13. Loginov P. V., Nikolaev A. A. Morfofunktsionalnoe sostoyanie reproductivnoy sistemyi samtsov belykh kryis v usloviyah vozdeystviya nizkointensivnogo elektromagnitnogo izlucheniya //Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. – 2014. – #. 6. – S. 1438-1438.
14. Yeste M. et al. Impact of light irradiation on preservation and function of mammalian spermatozoa //Animal reproduction science. – 2018. – Т. 194. – С. 19-32.
15. Borhani S, Yazdi RS. Clinical Applications of Low-Level Laser Therapy in Reproductive Medicine; A Literature Review. Preprints. 2018;2018040086. <https://doi.org/10.20944/pre-prints201804.0086.v1>.
16. Makutina V.A., Balezin S.L., Roslyiy O.F., i dr. Fragmentatsiya DNK v muzhskikh polovyykh kletkah: vliyanie na reproduksiyu, prichinyi proishozhdeniya i metodyi diagnostiki // Uralskiy meditsinskiy zhurnal. - 2010. - # 3. - S. 123-128. [Makutina VA, Balezin SL, Roslyy OF, et al. Fragmentation of DNA in the male germ cells: impact on reproduction, the causes of origin and methods of diagnosis. Ural'skiy meditsinskiy zhurnal. 2010;(3):123-128 (In Russ.)]
17. Moskvina S.V., Hadartsev A.A. Lazernyy svet — mozno li im navredit? (Obzor literaturyi) // Vestnik novyykh meditsinskiykh tekhnologiy. - 2016. - Т. 23. - # 3. - S. 265-283. [Moskvina SV, Khadartsev AA. Laser light — it can harm them? (literature review). Journal of new medical technologies. 2016;23(3):265-283. (In Russ.)]. doi: 10.12737/21772
18. Alves M. B. R. et al. Low-level laser therapy to recovery testicular degeneration in rams: effects on seminal characteristics, scrotal temperature, plasma testosterone concentration, and testes histopathology //Lasers in medical science. – 2016. – Т. 31. – #. 4. – S. 695-704.
19. Taha M. F., Valojerdi M. R. Quantitative and qualitative changes of the seminiferous epithelium induced by Ga. Al. As.(830 nm) laser radiation //Lasers in Surgery and Medicine: The Official Journal of the American Society for Laser Medicine and Surgery. – 2004. – Т. 34. – #. 4. – S. 352-359.
20. Apolihin O. I., Moskvina S. V. Lazernaya terapiya pri muzhskom besplodii. Ch. 1. Etiologiya i patogenez. Eksperimentalnyye issledovaniya //Urologiya. – 2017. – #. 5. – S. 115.
21. Lavi R. et al. Detailed analysis of reactive oxygen species induced by visible light in various cell types //Lasers in surgery and medicine. – 2010. – Т. 42. – №. 6. – С. 473-480.

22. Shahar S. et al. Light-mediated activation reveals a key role for protein kinase A and sarcoma protein kinase in the development of sperm hyper-activated motility //Human reproduction. – 2011. – T. 26. – №. 9. – C. 2274-2282.
23. Moskvina S. V. Efficiency of laser therapy. Series “Effective Laser Therapy.” T. 2 //M.–Tver: Triada. – 2014.
24. Moskvina S. V., Khadartsev A. A. EHF-laser therapy //M.–Tver: Triada. – 2016.
25. Firestone R. S. et al. The effects of low-level laser light exposure on sperm motion characteristics and DNA damage // Journal of andrology. – 2012. – T. 33. – №. 3. – C. 469-473.
26. Barulin N.V. Analiz podvizhnosti spermatozoidov gibrida bestera pod vliyaniem opticheskogo izlucheniya nizkoy intensivnosti //Aktualnyie problemyi intensivnogo razvitiya zhivotnovodstva. – 2015. – #. 18 (1).
27. Barulin N.V., Shalak M.V., Plavskiy V.Yu. Sposob povysheniya aktivnosti spermatozoidov samtsov osetrovyyih ryib // Zhivotnovodstvo i veterinarnaya meditsina. – 2013. – #. 3.
28. Korneeva E.I. Primenenie nizkointensivnogo lazernogo izlucheniya dlya stimulyatsii spermiogeneza u bykov-proizvoditeley //Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2016. – #. 8 (142).
29. Evtuh L.G. Effektivnost oblucheniya moshonki bykov-proizvoditeley nekogerentnyim polarizovannym svetom // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2015. – #. 4. – S. 65-71.
30. Jaime Catalán, Sabrina Gacem, Federico Noto, Ariadna Delgado, Bermúdez, Joan E. Rodríguez, Marc Yeste, Gill Jordi Miro Effects of red-light irradiation on the function and survival of fresh and liquid-stored donkey semen <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.03.024>
31. Catalán J. et al. Red-Light Irradiation of Horse Spermatozoa Increases Mitochondrial Activity and Motility through Changes in the Motile Sperm Subpopulation Structure //Biology. – 2020. – T. 9. – №. 9. – C. 254.
32. Yeste Oliveras M. et al. Specific LED-based red light photo-stimulation procedures improve overall sperm function and reproductive performance of boar ejaculates //Scientific Reports, 2016, vol. 6, p. 22569. – 2016.
33. Frangez H. B. et al. Photobiomodulation with light-emitting diodes improves sperm motility in men with asthenozoospermia //Lasers in medical science. – 2015. – T. 30. – №. 1. – C. 235-240.
34. Apolihin O. I., Moskvina S. V. Lazernaya terapiya pri muzhskom besplodii. Ch. 2. Sistematischeskiy obzorklinicheskikh issledovaniy //Urologiya. – 2017. – #. 6. – S. 164-171.
35. Ikhayev A.B. Combined use of magnetolaser and LD-laser therapy of infertility in patients with chronic prostatitis. Abstract of the thesis. Candidate of medical sciences. Pyatigorsk. 2013. Russian (Ikhayev A.B. Kombinirovannoe ispolzovanie magnitolazernoy i LOD lazeroterapii infertilnosti u bolnykh hronicheskim prostatitom: Avtoref. dis. ... kand. med. nauk. Pyatigorsk. 2013. 28 s.).
36. Wright C., Milne S., Leeson H. Sperm DNA damage caused by oxidative stress: modifiable clinical, lifestyle and nutritional factors in male infertility //Reproductive biomedicine online. – 2014. – T. 28. – №. 6. – C. 684-703.
37. Mah L. J., El-Osta A., Karagiannis T. C. γ H2AX: a sensitive molecular marker of DNA damage and repair //Leukemia. – 2010. – T. 24. – №. 4. – C. 679-686.
38. Preece D. et al. Red light improves spermatozoa motility and does not induce oxidative DNA damage //Scientific reports. – 2017. – T. 7. – C. 46480.
39. Al-Shukri S. H. i dr. Vliyanie nizkointensivnogo lazernogo izlucheniya na pokazateli eyakulyata u bolnykh hronicheskim prostatitom //Urologicheskie vedomosti. – 2015. – T. 5. – #. 4.
40. Vaisov I.A., Shodiev H. K., Baybekov I. M. Effektivnost nizkointensivnogo lazernogo izlucheniya (NILI) v kompleksnom lechenii besplodnykh muzhchin //Novosti dermatologii i reproduktivnogo zdorovya. – 2012. – T. 1. – S. 7-9.

SUMMARY

REVIEW OF THE INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC RADIATIONS OF DIFFERENT RANGE ON THE PHYSIOLOGICAL PROCESSES OF HUMAN AND ANIMAL SPERMATOZOA

*D.V. Zadubenko¹, *D.N. Sultanova², M.I. Pak², I.M. Kim², E.K. Kilina², V.N. Lokshin³, V.A. Golichenkov⁴

1. City Center for Human Reproduction
Kazakhstan, Almaty
2. Al-Farabi Kazakh National University
Kazakhstan, Almaty
3. International Clinical Center for Reproductology Person
Kazakhstan, Almaty
4. Moscow State University M.V. Lomonosov
Russian Federation, Moscow
*denis_zadubenko@mail.ru

This review presents 40 experimental studies of the effect of electromagnetic radiation of various ranges on the male reproductive function of humans and other vertebrates. The review includes works performed in the period from 2010 to 2020. Currently, not only the negative effect of radio waves, X-rays and gamma radiation has been shown, but many experiments have been carried out, where with the help of electromagnetic radiation it is possible to favorably influence spermatogenesis in general and physiological, biochemical processes in spermatozoa in particular. The purpose of this bibliographic study was to search for options for exposure to electromagnetic radiation to modulate the biological processes of spermatogenesis and sperm motility in vitro.

Key words: *electromagnetic radiation, spermatozoa, spermatogenesis, ejaculate, infertility, fertility, asthenozoospermia, oligozoospermia, DNA fragmentation*

ТҮЙІНДЕМЕ

АДАМ ЖАНА ЖАНУАР СПЕРМАТОЗОИДТАРЫНЫҢ ФИЗИОЛОГИЯЛЫҚ ПРОЦЕССТЕРІНЕ ӘРТҮРЛІ ДИАПАЗОНДАҒЫ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИКАЛЫҚ СӘУЛЕЛЕНУДІҢ ӘСЕРІН ШОЛУ

*Д.В. Задубенко¹, Д.Н. Султанова², М.И. Пак², И.М. Ким², Е.К. Килина², В.Н. Локшин³, В.А. Голиченков⁴

1. Қалалық адам ұрпағым өрбіту Орталығы
Қазақстан, Алматы
2. Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті
Қазақстан, Алматы
3. Persona репродуктологияның Халықаралық клиникалық орталығы
Қазақстан, Алматы
4. М.В. Ломоносов атындағы Мәскеу мемлекеттік университеті
Ресей, Мәскеу

Бұл шолуда адамдар мен басқа омыртқалылардағы ер даралардың репродуктивтік қызметіне әртүрлі диапазондағы электромагниттік сәулеленудің әсерін зерттеу бағытындағы 40 эксперименталды зерттеулер ұсынылған. Шолу 2010-2020 жылдар аралығында орындалған жұмыстарды қамтиды. Қазіргі уақыттар радиотолқындардың, рентген сәулелерінің және гамма-сәулеленудің жағымсыз әсерлері ғана емес, сонымен қатар электромагниттік сәулеленудің көмегімен сперматогенезге және сперматозоидтардағы физиологиялық, биохимиялық процестерге жағымды әсер етуге болатындығы көптеген эксперименттер жүргізіліп дәлелденуде. Осы библиографиялық зерттеудің мақсаты *in vitro* жағдайындағы сперматогенездің биологиялық процестері мен сперматозоидтардың қозғалыштығын модуляциялау үшін электромагниттік сәулеленудің әсер ету нұсқаларын іздеу болды.

Түйін сөздер: *электромагниттік сәулелену, сперматозоидтар, сперматогенез, эякулят, бедеулік, құнарлылық, астенозооспермия, олигозооспермия, ДНҚ фрагментациясы*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Д.В. Задубенко – PhD-докторант, шифр 8D.051.01 «Биология», спец. лаборатории ГКП на ПХВ «Городской центр репродукции человека» УОЗ

г.Алматы, Казахстан

e-mail: denis_zadubenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5007-3281>

В.Н. Локшин – академик НАН РК, д.м.н., профессор, генеральный директор МКЦР PERSONA, Президент КАРМ, г.Алматы, Казахстан

e-mail: v_lokshin@persona-ivf.kz

<https://orcid.org/0000-002-4792-5380>

Д.Н. Султанова – стажер-исследователь кафедры биоразнообразия и биоресурсов Каз НУ им.Аль-Фараби,

г. Алматы, Казахстан

e-mail: daniya-99@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7063-0727>

И.М. Ким – стажер-исследователь кафедры биоразнообразия и биоресурсов Каз НУ им.Аль-Фараби,

г. Алматы, Казахстан

e-mail: muhamediyar_i@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8561-4324>

М.И. Пак – кафедры биоразнообразия и биоресурсов Каз НУ им.Аль-Фараби,

г. Алматы, Казахстан

e-mail: Parkmrb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3424-1457>

Е.К. Килина – стажер-исследователь кафедры молекулярной биологии Каз НУ им.Аль-Фараби,

г. Алматы, Казахстан

e-mail: kilina-111@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4674-1229>

В.А. Голиченков – д.б.н., профессор кафедры эмбриологии МГУ им. М.В.Ломоносова,

e-mail: av_bioem@mail.ru