

ДЕЙСТВИЕ КВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 5,6 ММ НА БИООБЪЕКТЫ *IN VITRO* И *IN VIVO*

Жорина Л.В., Матвеев И.Д., Анисеев В.Н.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)

ул. 2-я Бауманская, д. 5, к. 1, г. Москва, 105005, РФ; e-mail: larisa7777@li.ru

Поступила в редакцию 07.07.2022. DOI: 10.29039/rusjbpс.2022.0497

Аннотация. Терапевтическое воздействие КВЧ излучения с длиной волны 5,6 мм известно в физиотерапии более полувека. Однако причина такого лечебного действия до сих пор точно не установлена. В этой работе мы провели исследования на основе предположений других авторов. Тушение синглетного кислорода при воздействии КВЧ излучения было проверено на методе фотодинамического воздействия на суспензию эритроцитов. Инкубированная с фотосенсибилизатором Радахлорин в течение получаса суспензия эритроцитов затем одновременно облучалась КВЧ и излучением на 652 нм. Обнаружено, что доза начала фотодинамического эффекта при облучении только видимым излучением и одновременно и видимым излучением и КВЧ излучением совпадают в пределах погрешности измерения. Такой результат может быть вызван недостаточностью количества погашенного синглетного кислорода либо отсутствием эффекта тушения. Терапевтическое действие КВЧ излучения объясняют также расширением мелких сосудов кожи при КВЧ воздействии, что должно привести к повышению температуры поверхности кожи. Нами проведено наблюдение за изменением температуры ладоней правой и левой руки с помощью тепловизора при воздействии КВЧ излучением на акупунктурную точку ТВ5. Наблюдение проводилось в течение 35 минут, 15 из которых проводилось облучение. Обнаружен системный эффект изменения температуры синхронно на обеих ладонях. Повышение средней по площади температуры ладони до 1,5 К наблюдалось только в 41,7% случаев. Подъем температуры активирует иммунную систему, что, по-видимому, и приводит к лечебному действию КВЧ излучения. В то же время установлено, что действие КВЧ излучения на длине волны 5,6 мм существенно зависит от индивидуума и не имеет однозначного характера.

Ключевые слова: КВЧ излучение с длиной волны 5,6 мм, фотодинамическое воздействие, Радахлорин, эритроциты, тепловидение, температура кожи человека.

Терапевтическое воздействие КВЧ излучения с длиной волны 5,6 мм известно в физиотерапии более полувека. КВЧ излучение оказывает выраженное обезболивающее, спазмолитическое, иммуномодулирующее действие, широко применяется в разных областях медицины: гастроэнтерологии, урологии, гинекологии, пульмонологии, оториноларингологии, проктологии, кардиологии, хирургии, стоматологии, дерматологии, педиатрии, косметологии, ангиологии и др. Однако причина такого лечебного действия до сих пор точно не установлена. Имеется несколько версий [1]. Например, в работах [2,3] установлено тушение синглетного кислорода при воздействии КВЧ излучения на частоте 41,95 ГГц (длина волны 7,15 мм) плотностью мощности 50 мкВт/см² и в диапазоне частот 53,57...78,33 ГГц (диапазон длин волн 5,6...3,8 мм) мощностью 0,2...1,5 мкВт. Проведенные исследования показали, что при включении в комплексное лечение пневмоний КВЧ терапии достоверно уменьшается уровень гидроперекисей липидов, увеличивается суммарная антиокислительная активность сыворотки крови, уменьшается дисбаланс свободнорадикального перекисного гомеостаза [4]. В методе фотодинамического воздействия одним из результатов передачи энергии, поглощённой фотосенсибилизатором (ФС), является производство синглетного кислорода, в результате чего и происходит гибель клеток, накопивших ФС. Использование этого эффекта даёт возможность проверки факта тушения синглетного кислорода при КВЧ воздействии *in vitro*.

Терапевтическое действие КВЧ излучения объясняют также расширением мелких сосудов кожи при КВЧ воздействии [5]. Электромагнитное излучение КВЧ-диапазона оказывает положительное влияние на систему микроциркуляции и на состояние стенок артериол и венул, увеличивая скорость и интенсивность капиллярного кровотока, отмечается увеличение калибра артериол [4]. Такое влияние на систему микроциркуляции должно приводить к увеличению температуры поверхности тела [6,7].

Целью работы является проверка наличия эффекта тушения синглетного кислорода, выработанного в результате фотодинамического эффекта в суспензии эритроцитов, при облучении КВЧ излучением с длиной волны 5,6 мм, а также наблюдение изменения температуры поверхности кожи человека при точечном воздействии того же излучения.

МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ

Первый из поставленных опытов имел следующую схему. Суспензия эритроцитов в физрастворе (0,9% NaCl) была инкубирована в течение получаса с ФС, а затем одновременно облучалась КВЧ излучением и светодиодным матричным облучателем (рис. 1). Дополнительно проведены контрольные наблюдения

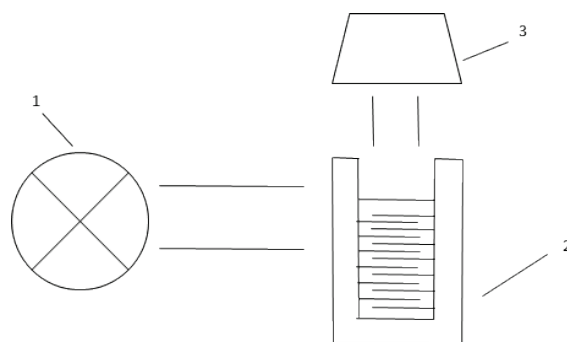


Рисунок 1. Схема облучения суспензии эритроцитов матричным облучателем и КВЧ облучателем: 1 – матричный облучатель; 2 – кювета с исследуемой жидкостью; 3 – КВЧ-облучатель

фотодинамического эффекта (ФДЭ) при облучении суспензии эритроцитов только светодиодным матричным облучателем и только КВЧ излучением.

В качестве фотосенсибилизатора использовался Радахлорин (РХ), предоставленный компанией «Рада-Фарма» (Россия), в форме, предназначенной для внутривенного введения. Первоначально препарат (3,5 мг/мл) разводили в 0,9% растворе NaCl (физиологический раствор) по инструкции фирмы «Рада-Фарма». В суспензии эритроцитов РХ был в четырёхсоткратном разведении. В качестве исследуемых образцов были использованы образцы крови с добавлением гепарина натрия для стабилизации свойств суспензии эритроцитов в ходе серии опытов (каждая серия измерений проводилась в течение одного рабочего дня в одинаковых условиях). Кровь можно рассматривать как взвесь эритроцитов в почти прозрачной среде. Изменение формы эритроцита приводит к изменению оптических характеристик взвеси. Суммарная экстинкция минимальна при полной сферуляции эритроцитов. Полный гемолиз крови приводит к резкому падению оптической плотности. За основу методики эксперимента взят тот факт, что в результате фотодинамического воздействия кровь из классической мутной среды превращается в раствор, близкий к коллоидному. Согласно приведенным выше рассуждениям, увеличение оптического пропускания образцов будет означать увеличение количества погибших клеток. Пропускание взвеси эритроцитов измеряли с помощью фотоколориметра КФК-2. Состояние эритроцитов контролировали визуально с помощью поляризационно-интерференционного микроскопа типа BIOLAR.

Для облучения образцов использовались следующие источники:

Облучение суспензии эритроцитов для фотодинамического воздействия проводилось с помощью светодиодной матрицы с длиной волны максимума излучения 652 нм, полушириной спектра излучения на полувысоте 14 нм и плотностью мощности 3,5 мВт/см².

При расчете дозы облучения для ФДЭ учитывали мощность излучателя, время облучения, площадь засветки и потери мощности на границе стекло-воздух кюветы, которая составляла около 4%. Дозой начала ФДЭ считалась такая доза облучения светодиодным матричным облучателем, при которой пропускание суспензии эритроцитов увеличивалось на 10%.

Источником КВЧ излучения служил прибор КВЧ-НД2, плотность мощности излучения которого на расстоянии 18 мм, измеренная прибором Narda NBM-550, составила 130 мкВт/см². Длина волны излучения 5,6 мм. Облучение суспензии эритроцитов проводилось в ближнем поле рупорной антенны, расположенной вертикально, суспензия находилась на расстоянии 1 см от открытого конца рупора, т.е. в ближней зоне антенны (рис. 1).

Суспензия эритроцитов в физрастворе (0,9% NaCl) была инкубирована в течение получаса с РХ, а затем одновременно облучалась КВЧ и светодиодным матричным облучателем. КВЧ излучение попадало непосредственно на суспензию эритроцитов (рис. 1). На выходе из суспензии эритроцитов плотность мощности КВЧ излучения составила 30 мкВт/см². Облучение образца проводилось в течение 1 минуты, затем измерялось пропускание образца. Облучение повторялось до полной гибели клеток.

Для изучения уровня микроциркуляции при «точечном» облучении человека КВЧ излучением нами проведено наблюдение за изменением температуры ладоней правой и левой руки с помощью тепловизора при воздействии КВЧ излучением на акупунктурную точку ТВ5 (Вай Гуан) на тыльной стороне правого предплечья. Акупунктурная точка выбрана, обращая внимание на отсутствие фатальных эффектов после воздействия. Точка Вай Гуань находится во впадине между лучевой и локтевой костями, на лучевой стороне сухожилий общего разгибателя пальцев. Человек, согласившийся принять участие в эксперименте, за 15-20 минут до воздействия закатывал рукав на правой руке, чтобы привыкнуть к температуре окружающей среды, и старался ничего не делать правой рукой. Затем человек находил точку Вай Гуань на расстоянии трех пальцев от запястья (рис. 2). Мы прижимали палец к найденной точке, человек двигал пальцами, и, если в этой точке мы не чувствовали движений сухожилий и мышц, значит, мы нашли нужную точку. Затем человек садился перед столом так, чтобы правая рука могла удобно лежать, а объектив тепловизора был направлен на раскрытую ладонь. В эксперименте принимало участие 12 человек обоих полов от 20 до 70 лет. Наблюдение проводилось в течение 35 минут, 15 из которых проводилось облучение.



Рисунок 2. Определение положения точки Вай Гуань

Для измерения температуры использовали тепловизор Thermal Expert™ TE-V1 (Республика Корея). Он имеет неохлаждаемый микроболометрический детектор с форматом матрицы 640×480 и шагом пикселя 17 мкм. Частота кадров меньше 9 Гц. Тепловая чувствительность (NETD) составляет около 50 мК, диапазон регистрируемых длин волн – 8...14 мкм, диапазон измеряемых температур – -10 °С...120 °С. Камера располагалась на штативе и была направлена на ладонь испытуемого. С помощью тепловизионной камеры фотографировали ладонь испытуемого в ходе эксперимента, воздействуя точечно КВЧ излучением на точку Вай Гуань. Снимали термограммы ладони правой руки, на которую производили воздействие, в течение 15 мин каждую минуту и после воздействия в течение 20 мин каждую минуту. Также одновременно каждую минуту снимали термограмму левой руки, на которую воздействие не производилось. Полученные термограммы обрабатывали в программе TE_Analyst 1.13. Среднюю температуру T_{cp} рассчитывали по площади ладони обнаженной руки с помощью той же программы. Стандартное отклонение рассчитанных параметров не превышало 0,5 К. Для описания наблюдаемых эффектов рассчитывали отклонение ΔT_{cp} средней температуры от исходного значения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При анализе результатов измерения увеличения оптического пропускания обнаружено, что доза начала ФДЭ при облучении только матричным облучателем ($4,04 \pm 0,23$ Дж) и одновременно и матричным облучателем, и КВЧ облучателем ($3,81 \pm 0,31$ Дж) совпадают в пределах погрешности измерения. Контрольные измерения оптического пропускания неинкубированной с РХ суспензии эритроцитов, облучённой только КВЧ излучением, показали отсутствие ФДЭ. Также было измерено изменение оптического пропускания образца, инкубированного с РХ в течение 60 минут и облучённого одновременно и матричным облучателем, и КВЧ облучателем. При этом в качестве подтверждения теории о накоплении РХ в клетках оказалось, что доза начала эффекта (3,48 Дж) ниже, чем для эритроцитов, инкубированных 30 минут, что означает накопление РХ в клетках в большем количестве и, как следствие, синглетного кислорода после облучения вырабатывается больше, доза начала эффекта снижается. Облучение КВЧ при этом никак не повлияло на ФДЭ.

Описанный результат совпадения доз начала ФДЭ может быть вызван недостаточностью количества потушенного синглетного кислорода либо отсутствием эффекта тушения как такового. В данном эксперименте на дозу начала ФДЭ не повлияло ни снижение жёсткости мембран, ни повышение прочности эритроцитов при воздействии КВЧ излучения [5].

Обратимся теперь к тепловизионным наблюдениям. Изменение температуры поверхностью кожи человека, измеренное с помощью термографии, однозначно коррелирует с уровнем микроциркуляции в коже [6,7]. При воздействии КВЧ излучением на акупунктурную точку ТВ5 (Вай Гуань) на тыльной стороне правого предплечья обнаружено, что изменение температуры происходило синхронно на обеих ладонях, что говорит о наличии системного эффекта. Повышение T_{cp} , соответствующее росту уровня микроциркуляции, наблюдалось только в 41,7% случаев. На обеих ладонях к 35 минуте наблюдения (20й минуте после окончания воздействия) оно составило около 1,5 К. Рост температуры на 1 К к 5 минуте после начала облучения, а затем постепенное падение до уровня на 0,4 К ниже первоначального значения к 35 минуте наблюдения отмечалось в 16,7% случаев. Вероятно, при воздействии КВЧ излучения возможна активация некоторых веществ, которые заставляют гипоталамус поднимать температуру тела. Подъём температуры на 1 градус в несколько раз активует иммунную систему. Стимуляция функциональной активности иммунокомпетентных клеток КВЧ излучением носит универсальный характер [4]. Это, по-видимому, и приводит к лечебному действию КВЧ излучения. В то же время установлено, что действие КВЧ излучения на длине волны 5,6 мм существенно зависит от индивидуума и не имеет однозначного характера.

Список литературы / References:

1. Drean Y., Mahamoud Y.S., Page Y., Habauzit D., Quément C., Zhadobov M., Sauleau R. State of knowledge on biological effects at 40–60 GHz. *Comptes Rendus Physique*, 2013, vol. 14, pp. 402-411, doi: 10.1016/j.crhy.2013.02.005.
2. Gareyev A.B., Yakushina V.S., Chemeris N.K., Fesenko E.E. Modification of production of reactive oxygen

species in mouse peritoneal neutrophils on exposure to low-intensity modulated millimeter wave radiation. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 1998, vol. 46, pp. 267-272.

3. Овощникова Л.В., Корягин А.С., Елисеева А.А. Влияние КВЧ-излучения на систему крови и перекисное окисление липидов при экспериментальной лучевой болезни. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Биология*, 2001, № 2, с. 31-36. [Ovoshnikova L.V., Koryagin A.S., Eliseeva A.A. Influence of EHF radiation on the blood system and lipid peroxidation in experimental radiation sickness. *Bulletin of the Nizhny Novgorod University. N.I. Lobachevsky. Series: Biology*, 2001, no. 2, pp. 31-36. (In Russ.)]

4. Истомина И.С. Квч-терапия в клинической практике (Часть II) *Физиотерапия, бальнеология и реабилитация*, 2012, № 6, с. 38-45. [Istomina I.S. EHF-therapy in clinical practice (Part II). *Physiotherapy, balneology and rehabilitation*, 2012, no. 6, pp. 38-45. (In Russ.)]

5. Чуян Е.Н., Трибрат Н.С. Влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высокой частоты на процессы микроциркуляции. *Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия: Биология, химия*, 2008, т. 21 (60), № 1, с. 156-166. [Chuyan E.N., Tribirat N.S. Influence of low-intensity electromagnetic radiation of extremely high frequency on microcirculation processes. *Scientific notes of the Taurida National University named after V.I. Vernadsky. Series: Biology, chemistry*, 2008, vol. 21 (60), no. 1, pp. 156-166. (In Russ.)]

6. Sagaidachnyi A.A., Volkov I.Y., Fomin A.V., Skripal A.V. Investigation of thermal wave propagation within the model of biological tissue and the possibility of thermal imaging of vasomotor activity of peripheral vessels. *Russian Journal of Biomechanics*, 2019, vol. 23, no. 2, pp. 209-217.

7. Sagaidachnyi A.A., Fomin A.V., Usanov D.A., Skripal A.V. Thermography-based blood flow imaging in human skin of the hands and feet: a spectral filtering approach. *Physiol Meas.*, 2017, vol. 38, no. 2, pp. 272-288, doi: 10.1088/1361-6579/aa4eaf.

THE EFFECT OF EHF RADIATION WITH A WAVELENGTH OF 5.6 MM ON BIOLOGICAL OBJECTS IN VITRO AND IN VIVO

Zhorina L.V., Matveev I.D., Anikeev V.N.

Bauman Moscow State Technical University

2nd Baumanskaya st., 5, build. 1, Moscow, 105005, Russia; e-mail: larisa7777@li.ru

Received 07.07.2022. DOI: 10.29039/rusjbpс.2022.0497

Abstract. The reason for therapeutic effect of EHF radiation with a wavelength of 5.6 mm has not been precisely established yet. In this work, we conducted research based on the assumptions of other authors. The quenching of singlet oxygen under the influence of EHF radiation was tested using the method of photodynamic action on a suspension of erythrocytes. The suspension of erythrocytes, incubated with the photosensitizer, was then simultaneously irradiated with EHF and radiation at 652 nm. It was found that the dose of the onset of the photodynamic effect when irradiated only with visible radiation and simultaneously with both visible radiation and EHF radiation coincides within the measurement error. Such a result can be caused by insufficient amount of quenched singlet oxygen or by the absence of the quenching effect. The therapeutic effect of EHF radiation is also explained by the expansion of small skin vessels during EHF exposure, which should lead to an increase in the temperature of the skin surface. We have observed the change in the temperature of the palms using a thermal imager when exposed to EHF radiation on the acupuncture point TB5. The observation was carried out for 35 minutes. The irradiation was during 15 minutes. A systemic effect of temperature change synchronously on both palms was found. An increase in the area-average temperature of the palm up to 1.5 K was observed only in 41.7% of cases. The rise in temperature activates the immune system, which, apparently, leads to the therapeutic effect of EHF radiation. At the same time, it has been established that the effect of EHF radiation at a wavelength of 5.6 mm significantly depends on the individual and is not unambiguous.

Key words: EHF radiation with a wavelength of 5.6 mm, photodynamic effect, Radachlorin, erythrocytes, thermal imaging, human skin temperature.