

ДЛЯ ФІЗИЧНИХ ФАКТОРІВ НА БІОЛОГІЧНІ ОБ'ЄКТИ

УДК 537.868 + 577.352.868

ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО И СВЧ ИЗЛУЧЕНИЙ НА РАДИОРЕЗИСТЕНТНОСТЬ БИООБЪЕКТОВ**Б. Г. Емец***Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4, Харьков, 61077, Украина*

Поступила в редакцию 2 ноября 2011 года

Принята 5 декабря 2011 года

Выполнен обзор литературных источников, рассматривающих один из способов повышения радиорезистентности живых организмов за счет предварительного их облучения электромагнитными волнами сверхвысоких частот (СВЧ). Сформулированы условия реализации повышения радиорезистентности живых организмов, в число которых входит стимулирование синтеза биогенного гистамина и его высвобождения. Показано, что увеличения содержания гистамина в организме можно достичь путем увеличения проницаемости цитоплазматических мембран (без их разрушения) с помощью микроволнового облучения. Продемонстрировано, что увеличения проницаемости цитоплазматических мембран без их деструкции можно достичь, используя микроволны, исключительно, низкой интенсивности (менее 10 мВт/см²). Вскрыты причины, из-за которых специалисты ряда исследовательских групп, используя предварительное микроволновое воздействие, вместо повышения радиорезистентности организмов, получили снижение их радиорезистентности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: радиорезистентность, мембрана, гистамин, СВЧ облучение, микроволны, ионизирующее облучение, интенсивность излучения.

ВПЛИВ КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ ІОНІЗУЮЧОГО ТА НВЧ ВИПРОМІНЮВАНЬ НА РАДІОРЕЗИСТЕНТНІСТЬ БІОБ'ЄКТІВ**Б. Г. Ємець***Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, Харків, 61077, Україна*

Виконано огляд літературних джерел з проблеми підвищення радіорезистентності живих організмів шляхом завчасного їх опромінювання електромагнітними хвилями надвисоких частот (НВЧ). Сформульовані умови реалізації підвищення радіорезистентності живих організмів, в які входить стимулювання синтезу біогенного гістаміну і його вивільнення. Показано, що підвищення вмісту гістаміну в організмі можна досягнути шляхом збільшення проникності цитоплазматичних мембран (без їх деструкції) за допомогою мікрохвильового опромінювання. Продемонстровано, що збільшення проникності цитоплазматичних мембран без їх деструкції можна досягнути, використовуючи мікрохвилі, виключно, низької інтенсивності (не більше 10 мВт/см²). Розкрито причини, що зумовили одержання спеціалістами ряду дослідницьких груп (застосувавши завчасне НВЧ опромінювання) замість підвищення радіорезистентності живих організмів, її зменшення.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: радіорезистентність, мембрана, гістамін, НВЧ опромінювання, мікрохвилі, іонізуюче опромінювання, інтенсивність випромінювання.

THE INFLUENCE OF THE COMBINED ACTION OF IONIZING AND MICROWAVE RADIATION ON RADIO-RESISTANCE OF BIOLOGICAL OBJECTS**B. G. Yemets***Kharkiv V. N. Karazin National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv 61077, Ukraine*

The scientific literature on the problem of modification of radio-resistance of organisms by their preliminary irradiation by microwaves is reviewed. The conditions necessary for radio-resistance stimulation are characterized. Among them are the stimulation of histamine synthesis and release. It is shown that the increase of histamine concentration may be achieved by the increase of membrane permeability by the means of microwave radiation exposure. It is shown that the increase of membrane permeability may result cell exposure to microwaves of low intensity (less than 10 mW/cm²). The causes of the inconsistency of results obtained by different research groups are elucidated.

KEY WORDS: radio-resistance, cell membrane, histamine, microwaves, ionizing radiation, radiation intensity.

Безусловно, эффективным методом лечения острой лучевой болезни является осуществление (в первые несколько часов после облучения) пересадки костного мозга. Технически эту процедуру очень трудно быстро осуществить, т.к. в короткое время необходимо успеть подобрать из имеющихся запасов кроветворных клеток именно те, которые показаны пациенту по ряду важных параметров, в том числе, и по соответствию биологической совместимости. Поэтому чрезвычайно актуальным является поиск других способов предупреждения развития или лечения лучевой патологии. В литературе имеются данные о применении СВЧ волн для профилактики лучевой болезни.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В 1958 году было обнаружено, что систематическое облучение людей низкоинтенсивными волнами СВЧ диапазона приводит к увеличению количества лейкоцитов – эффекту противоположному действию ионизирующих излучений, а также к повышению содержания гистамина в крови [1,2]. Отмеченные результаты побудили А.С. Пресмана и И.А. Левитину выполнить в 1961 году исследования по облучению крыс (нелинейные, масса – (125 ± 5) грамм) непрерывными микроволнами (длина волны $\lambda = 12$ см; интенсивность 10 мВт/см²). В этой группе животных (12 особей) провели 25 ежедневных облучений по 30 минут; контрольную группу (12 животных) не подвергали микроволновому облучению. После этого обе группы получили однократное воздействие гамма-лучами в дозе 600 рентген (летальная доза 50/30). Через тридцать дней в контрольной группе остались живыми шесть особей (50 %), тогда как в группе крыс, получивших и микроволновое и ионизирующее облучения, выжило десять особей (83 %) [3]. Аналогичные опыты были проведены С. Майкельсоном. Было показано, что предварительное облучение животных электромагнитными волнами сантиметрового диапазона низкой интенсивности в несколько раз уменьшает смертность от последующего ионизирующего облучения [4]. Группа исследователей под руководством Л.А. Севастьяновой изучала влияние предварительного облучения миллиметровыми электромагнитными волнами на радиорезистентность мышей ($C_{57}B1 \times CBA$)F₁ массой (32 ± 2) грамма [5]. С этой целью микроволны (длина волны $\lambda = 7,1$ мм; интенсивность 25 мВт/см²; продолжительность облучения – 1 час) подавались через рупорную антенну на бедро животного; площадь облучаемого участка – $1,8$ см². Использовалось рентгеновское облучение в дозах 700, 1400 и 2100 рентген; мощность дозы 630 р/мин. Животных – 195 мышей-самцов, объединяли в следующие группы: 1-ая группа – необлученные животные (контроль); 2-ая группа – животные, подвергнутые рентгеновскому облучению; 3-я группа – животные, облученные СВЧ с последующим рентгеновским облучением; 4-ая группа – животные, подвергнутые воздействию рентгеновской радиации с последующим облучением полем СВЧ. Облучению подвергали правое бедро. Исследовали общее число ядродержащих клеток, находящихся в костном мозгу правого облученного и левого необлученного бедра, через 3 и 6 часов, 1, 2, 3, 5 суток после воздействия. Вначале определяли среднее арифметическое из измерений количества клеток костного мозга на одно бедро в группе контрольных животных (N_0). Затем аналогично определяли среднее арифметическое (N) в остальных трех группах. Сравнивали отношение (N/N_0), получаемое через определенное время после прекращения локального рентгеновского облучения. Во второй группе, в случае, когда доза составила 700 рентген, спустя сутки отношение N/N_0 уменьшилось до 0,6 своей первоначальной величины. При предварительном воздействии СВЧ (3-я группа животных) количество клеток костного мозга уменьшается не так сильно: здесь $N/N_0 = 0,83$. С увеличением

дозы рентгеновского облучения величина N/N_0 падает более значительно, но и в этом случае предварительное воздействие полем СВЧ снижает эффект действия рентгеновского излучения. При облучении в дозах 1400 и 2100 рентген отношение N/N_0 составило, соответственно - 0,75 и 0,65. Если животное предварительно подвергалось воздействию СВЧ, то величина N/N_0 принимала значения 0,90 при дозе 1400 рентген и 0,84 при дозе 2100 рентген.

Л.А. Севастьянова и Р.Л. Виленская в [6] исследовали зависимость величины ослабления действия ионизирующей радиации от продолжительности предварительного облучения животных миллиметровыми волнами. Опыты проводились на 250 мышах той же линии, что и в [5], теми же были и условия СВЧ облучения. Доза рентгеновского облучения составила 700 рентген; мощность дозы 630 р/мин. У группы контрольных животных (не получавших никаких облучений) величина $N/N_0 = 1$. У группы мышей, подвергнутых только рентгеновскому облучению $N/N_0 = 0,5$. У третьей группы интервал между воздействием полем СВЧ и рентгеновским облучением составлял 5 минут. При экспозиции поля СВЧ менее 30 минут, ослабления эффекта ионизирующей радиации на клетки костного мозга, не обнаружено. При 30-минутной экспозиции отношение $N/N_0 = 0,7$; при 60-минутной экспозиции отношение $N/N_0 = 0,8$. Дальнейшее увеличение продолжительности СВЧ облучения не приводил к повышению величины N/N_0 .

Исследователи под руководством Ю.Г. Григорьева изучали биологический ответ на ионизирующую радиацию животных, предварительно, подвергнутых облучению микроволнами сантиметрового диапазона [7,8]. Исследования проведены на 54 белых беспородных крысах-самках с массой (155 ± 16) грамм. Опытную группу (18 крыс) ежедневно по 30 минут в течение 8 суток подвергали облучению электромагнитным полем (длина волны $\lambda = 3,2$ см; интенсивность $0,2$ мВт/см²). В последующем, на 9-е сутки после начала облучения микроволнами, животных опытной и контрольной групп подвергали однократному общему гамма-облучению в суммарной дозе 5,5 Грей (мощность дозы $0,01$ Гр/с). У крыс, предварительно облученных микроволнами, отмечалась отчетливая тенденция к повышению выживаемости по сравнению с таковой у контрольных, подвергшихся только гамма-облучению. Предварительное микроволновое облучение уменьшило смертность животных опытной группы (после воздействия ионизирующего излучения) более чем в 1,5 раза по сравнению с контролем. Получено, что среднее эффективное время, за которое погибло 50 % животных опытной группы, составило 26,6 суток (17,7 – 39,9 суток), тогда как у контрольных – 15,4 суток (12,2 – 19,4) суток.

В проведенных экспериментах авторы [7,8] одновременно оценивали иммунобиологический статус по двум показателям: реакции бласттрансформации лимфоцитов в культуре цельной крови в микромодификации и реакции образования аутобляшек по общепринятым методикам. При комбинированном воздействии микроволн и ионизирующего излучения было отмечено значительное увеличение индекса стимуляции в реакции бласттрансформации лимфоцитов (10,1) по сравнению с индексом (5,42) у группы, в которой животные не получали никаких облучений, а также по сравнению с индексом (3,13) у группы животных, получавших только ионизирующее облучение. Что касается числа аутобляшек, то этот показатель при комбинированном облучении увеличивался (по сравнению с необлученными животными) всего в 2 раза; тогда как у животных, подвергнутых исключительно ионизирующей радиации, он вырос в 5 раз. Авторы, отмечая хорошо известную радиочувствительность Т-лимфоцитов, указывают, что предварительное облучение микроволнами повышает их устойчивость к ионизирующему излучению. Являясь интегральным тестом в оценке

функционального состояния иммунокомпетентных клеток, динамика реакции бласттрансформации свидетельствует о способности организма под воздействием микроволн приобретать новую способность к ответной реакции на гамма-излучение, в чем авторы видят определенную специфичность биологического действия микроволн.

Д. Ротковска с сотрудниками изучала влияние микроволн на устойчивость мышей к воздействию ионизирующего излучения [9]. Авторы показали, что предварительное пятиминутное облучение мышей электромагнитными волнами $\lambda = 12,2$ см перед тем, как они были подвергнуты действию рентгеновских лучей, снижает смертность животных.

А.А. Цуцаева с сотрудниками исследовали влияние низкоинтенсивных импульсных электромагнитных полей СВЧ на характеристики протекания лучевой болезни у мышей–самцов (линия СВА; возраст 8-12 недель) [10]. Мыши были разделены на пять групп по 40 животных: группа «N» – нормальные животные, не получавшие никаких облучений; группа «R» - летально облученные животные (ионизирующая радиация, доза 7 Грей); группа «N+СВЧ» – нормальные животные, подвергавшиеся воздействию импульсного СВЧ-поля в течение 16 часов; группа «R+СВЧ» – животные, летально облученные, обработанные импульсным СВЧ полем сразу же после облучения; группа «R+24СВЧ» – летально облученные животные, которые подвергались действию импульсного СВЧ поля спустя 24 часа после ионизирующего облучения. Наблюдения за мышами велись в течение 260 суток. За этот период в группе «N» и в группе «N+СВЧ» гибели животных не было. Животные группы «R» начали гибнуть через 3 суток после облучения; их средняя продолжительность жизни составила 8 суток. У животных групп «R+СВЧ» и «R+24СВЧ» средняя продолжительность жизни составила 77 суток и 90 суток, соответственно.

Вышеприведенные результаты свидетельствуют о том, что СВЧ облучение повышает радиорезистентность животных. Однако, есть публикации, из материалов которых следует противоположный вывод. К таким принадлежит работа Б.И. Давыдова с сотрудниками [11], где описываются опыты на 2560 нелинейных мышах-самках. Животные подвергались СВЧ облучению (длина волны $\lambda = 12,6$ см) с интенсивностью 10, 20, 40 и 100 мВт/см² с экспозицией 40, 20, 10 и 4 минуты, соответственно. Таким образом интегральная величина P во всех группах составила ($P = \text{интенсивность} \cdot \text{экспозиция} = \text{const.}$) 400 мВт·мин·см⁻². Животные подвергались такому воздействию в течение 10 дней. Через 10 минут после последнего СВЧ облучения животных облучали гамма-лучами изотопа Co^{60} в дозах 400-900 рентген (мощность дозы 25 р/мин) и 1000-20000 рентген (мощность дозы 300 р/мин). Оценивание величины эффекта производилось по средней продолжительности жизни (СПЖ) облученного организма, поскольку, как известно, этот параметр является отражением скорости развития радиационных процессов в тех или иных биосистемах. Величину эффекта удобно наблюдать путем построения кривой зависимости «СПЖ – доза облучения» (кривая Б. Раевского). В работе получено, что предварительное воздействие СВЧ полем (перед гамма-облучением) интенсивностью 10 мВт/см² никак не влияло на СПЖ. А вот, начиная с интенсивности 20 мВт/см², средняя продолжительность жизни животных уменьшалась. Наибольшие изменения были при 100 мВт/см². С увеличением дозы гамма-облучения, микроволновое воздействие оказывало все меньший и меньший эффект. Авторы делают логический вывод, что в условиях предварительного воздействия СВЧ поля имеет место синергизм с гамма-облучением; он выявляется при дозах, смертельный исход которых обусловлен поражением кроветворной системы. В работе [12], а также в обзоре [13] комбинированное действие СВЧ поля и ионизирующей радиации на животных

оценивается, по итогам исследований как аддитивное или синергичное, направленное на разрушение.

Сказанное требует установления причин, из-за которых после предварительного СВЧ воздействия, в серии работ [1-10] отмечено повышение радиорезистентности животных, тогда как в работах [11-13] получено, что предварительное облучение микроволнами, наоборот, снижает радиустойчивость живых организмов. Ответ следует искать в деталях физического механизма взаимодействия электромагнитных волн с биологическими объектами.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ И ПРИМЕМБРАННЫЙ ВОДНЫЙ СЛОЙ

Биологическую ткань (биосреду, биожидкость) можно, в определенном приближении, рассматривать как систему, состоящую из клеток и межклеточной жидкости. Биожидкость (например, кровь) содержит достаточное количество растворенного воздуха (его объемная доля составляет $\sim 0,01$). Если в жидкости имеется растворенный воздух, то, естественно, присутствует и воздух в свободном состоянии, т. е. воздух, содержащийся в пузырьках. Например, при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ объемная доля “пузырькового” воздуха в воде составляет $V_F = 5,8 \cdot 10^{-8}$; средний радиус пузырьков $R_{cp} \approx 20$ нанометров [14]. Пузырьки, находящиеся в биоткани, конечно, присутствуют и в непосредственной близости к цитоплазматической мембране – в диффузионном примембранном водном слое. Этот слой принято называть диффузионным по той причине, что будучи чрезвычайно крепко связанным с мембраной, он является неперемешиваемым; в нем не могут реализоваться условия для конвективного переноса. Это означает, что частицы, движущиеся из межклеточной среды в клетку и в противоположном направлении, могут перемещаться через указанный водный слой, исключительно, по диффузионному механизму. Пузырьки перемещаются в гравитационном поле (на них действует сила Архимеда; скорость перемещения конкретного пузырька в поле тяжести пропорциональна квадрату его радиуса) и в поле температурного градиента (реализуется т. н. термокапиллярный эффект; в этом случае скорость перемещения пузырька пропорциональна радиусу в первой степени). Двигаясь в примембранном диффузионном слое, пузырьки играют роль своеобразных сверхминиатюрных «наноперемешивателей». Объективно, пузырьки в какой-то мере «разрыхляют» этот слой; чем активней они перемещаются, тем выше степень разрыхления примембранного диффузионного слоя, тем меньше его «эффективная» толщина. Согласно [15], толщина примембранного слоя на несколько порядков больше толщины липидного слоя мембраны. Поэтому время, требующееся частице для перемещения по диффузионному механизму из межклеточной жидкости в клетку (и в обратном направлении), в основном, затрачивается на преодоление примембранного водного слоя. Следовательно, толщина указанного слоя, в решающей мере, определяет скорость обмена веществ в системе «клетка – межклеточная жидкость», а значит и режим функционирования клетки.

Если в жидкости распространяется электромагнитная волна, то по мере прохождения в глубь, ее амплитуда уменьшается. Это уменьшение характеризуется величиной градиента напряженности электрического поля волны. Поскольку диэлектрическая проницаемость воздушного пузырька ϵ_g отличается от диэлектрической проницаемости жидкости (воды) ϵ_w , в которой он взвешен, то на пузырек в облучаемой жидкости действует т.н. градиентная сила. «Градиентная» сила действует на любое диэлектрическое включение, помещенное в неоднородное электрическое поле. Математическое выражение градиентной силы, действующей на диэлектрическую сферу радиуса R (диэлектрическая проницаемость ϵ_g),

локализованную в среде с диэлектрической проницаемостью ϵ_w , при наличии неоднородного электрического поля E_1 имеет вид [16]:

$$\mathbf{F}_{\text{град}} = 2 \pi \epsilon_0 \epsilon_w [(\epsilon_g - \epsilon_w) \cdot (\epsilon_g + 2 \epsilon_w)] R^3 \mathbf{grad} E_1^2. \quad (1)$$

(Здесь ϵ_0 – электрическая постоянная.) Если рассматриваемая сфера находится в переменном электрическом поле (например, в поле электрической компоненты волны) $E = E_0 \cdot \exp(i\omega t - ikr)$, то в выражении (1) вместо $\mathbf{grad} E_1^2$ необходимо записать $\mathbf{grad} (E^2)_{\text{ср}}$. (Здесь $(E^2)_{\text{ср}}$ – усредненное за период значение квадрата напряженности электрического поля волны.) Очевидно, что под действием градиентной силы диэлектрическая сфера втягивается в зону, где напряженность электрического поля больше, если $\epsilon_g > \epsilon_w$ и выталкивается из этой зоны, если $\epsilon_g < \epsilon_w$. В случае системы «воздушный пузырек – биожидкость (вода)» реализуется второе условие.

Распространяясь в жидкости, электромагнитная волна нагревает последнюю; при этом в жидкости реализуется температурный градиент. На воздушный пузырек действует термокапиллярная сила \mathbf{F}_T , обеспечивающая его перемещение в поле температурного градиента [17]

$$\mathbf{F}_T = - 2 \pi R^2 \mathbf{grad} T \, d\sigma / dT. \quad (2)$$

Очевидно, что силы $\mathbf{F}_{\text{град}}$ и \mathbf{F}_T направлены в противоположные стороны, поэтому пузырек будет неподвижным в той точке жидкого пространства, где эти силы друг друга уравнивают. Если в определенный момент произойдет флуктуация, смещающая пузырек в сторону возрастания градиента E_1^2 , то сразу же «градиентная» сила начнет выталкивать его на прежнее место. Однако термокапиллярная сила будет стремиться направлять его в противоположную сторону. В результате возникнет затухающее колебательное движение пузырька, которое будет возобновляться при каждой следующей флуктуации. Поскольку температурное поле жидкости все время флуктуирует, то, при наличии достаточно неоднородного пространственного распределения напряженности электромагнитного поля, в жидком объеме образца нет недостатка в колеблющихся пузырьках. Как известно, колеблющийся, т. е. попеременно сжимающийся и расширяющийся, пузырек может увеличиваться в объеме. При расширении пузырька концентрация газа в нем уменьшается и газ диффундирует из жидкости в пузырек. Выражение для диффузионного потока J молекул газа в пузырек через пограничный (припузырьковый) слой жидкости толщиной d имеет вид

$$J = D (C_\infty - C_R) S \, d^{-1}. \quad (3)$$

(Здесь D – коэффициент диффузии газовых молекул; S – поверхность пузырька. Направление диффузионного потока газовых молекул (внутри пузырька или из него – наружу) зависит от соотношения между концентрацией газа в жидкости вдали от пузырька C_∞ и концентрацией газа у поверхности пузырька C_R . Концентрация газа в жидкости у поверхности пузырька радиуса R_0 равна $C_R = C_0 [1 + 2 \sigma / (R_0 P_0)]$; (здесь σ – коэффициент поверхностного натяжения; P_0 – внешнее давление). При следующей фазе колебания пузырек сжимается и происходит диффузия газа из пузырька в жидкость. Количество продиффундировавшего газа пропорционально площади поверхности пузырька, которая в стадии расширения больше, чем в стадии сжатия. В силу этого, полной компенсации диффузионных потоков не происходит; масса газа,

заполнившая пузырек в процессе его расширения, превышает массу газа, ушедшего из пузырька при его сжатии, так что в целом за период количество газа в пузырьке возрастает. В итоге радиус пузырька увеличивается. Этот процесс подобен хорошо известному в ультразвуке явлению «односторонне направленной» диффузии, когда пузырек эффективно растет в поле переменного внешнего давления [18].

Как видно, необходимым условием роста пузырьков в жидкости является наличие градиента интенсивности электромагнитного поля. Поэтому такой специфический механизм роста газовых включений в жидкости называется «градиент-полевым» механизмом. Поскольку скорость движения пузырька в поле тяжести ($v_{\text{APX}} \sim R^2$), а в поле температурного градиента ($v_T \sim R$), то выросшие пузырьки движутся с большими скоростями, обеспечивая лучшее разрыхление примембранного водного слоя (чем тогда, когда их радиусы были меньшими), сильнее уменьшая его «эффективную» толщину, а значит, увеличивая проницаемость системы «биомембрана плюс примембранный водный слой». Естественно, при этом изменяется стандартный режим функционирования клетки. Нами получено, что 30-минутное облучение крови человека (*in vitro*) низкоинтенсивными (4 мВт) волнами СВЧ ($\lambda = 6$ мм) уменьшило «эффективную» толщину примембранного водного слоя на 11 %. Подчеркнем, что кванты диапазона СВЧ не обладают энергией, достаточной для повреждения собственно мембраны, ее липидного бислоя. Следовательно, низкоинтенсивные волны СВЧ избирательно уменьшают «эффективную» толщину примембранного водного слоя, оставляя собственно мембрану «в неприкосновенности».

Хорошо известно, что одним из первичных процессов при действии ионизирующей радиации на клетку является активизация перекисного окисления липидов (ПОЛ) биомембран. При этом в облученных клетках накапливаются продукты окисления, главным образом, гидроперекиси ненасыщенных жирных кислот, способные поражать мембраносвязанные белки и вызывать деструктивные изменения в мембранах. Это приводит к развитию лучевого токсического эффекта и сенсibiliзирует клетки к действию радиации [19]. Снижение уровня поражающего действия радиации достигается с помощью радиопротекторов. Е.Н. Гончаренко и Ю.Б. Кудряшов высказали мнение, что радиозащитный эффект радиопротекторов, присутствующих в организме, реализуется за счет синтеза и высвобождения комплекса биогенных аминов, обладающих противолучевыми свойствами [20]. Они получили экспериментальные доказательства прямого действия биогенных аминов на липидные перекиси и процессы перекисного окисления. В их опытах (*in vitro*) показано, что инкубация биогенных аминов с продуктами ПОЛ приводит к одновременному уменьшению в реакционной смеси как количества перекисей, так и аминов. При этом найдены продукты взаимодействия аминов с липидами. Обнаружено, что деструктивные изменения в мембранах (в том числе, и вызванные ионизирующей радиацией) влекут за собой повышение их проницаемости. Это обстоятельство приводит к увеличению поступления внеклеточных ионов, которые, в свою очередь, способствуют высвобождению гистамина из связанного состояния. Большая часть гистамина синтезируется в клетках организма путем декарбоксилирования гистидина тканевой гистидиндекарбоксилазой. Гистамин, образованный в клетках, называют эндогенным гистамином.

В [3] отмечалось, что систематическое облучение людей микроволнами низкой интенсивности вызывает повышение концентрации гистамина в крови. Повидимому, высвобождение гистамина – это ответная физиологическая реакция на факт повышения проницаемости плазматической мембраны (возникающей из-за уменьшения «эффективной» толщины примембранного водного слоя), призванная восстановить

прежнюю проницаемость, необходимую для нормального режима функционирования клетки. Однако уменьшение «эффективной» толщины, практически, не влияет на уровень ПОЛ, поэтому далеко не весь объем высвободившегося гистамина расходуется для взаимодействия с перекисями. В результате происходит его накопление в организме с тем, чтобы в будущем когда возникнет действительно серьезная опасность - резкая активизация ПОЛ, вызванная ионизирующей радиацией, накопленного гистамина оказалось достаточно для противодействия деструктивным процессам в клетке.

Почему же в работах [11-13] не наблюдалось профилактического эффекта СВЧ, а напротив, имела место аддитивность деструктивного действия микроволн и ионизирующей радиации? Для рассмотрения этого вопроса необходимо обратить внимание на то, какими были интенсивности используемых микроволн. В работах [1-10] применялись СВЧ колебания низкой, т.н. «дотепловой интенсивности, не превышающей 10 мВт/см^2 . «Дотепловой» ее принято называть потому, что такая интенсивность не вызывает даже местного нагрева тканей тела выше $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ [21]. Нами были выполнены исследования для получения зависимости увеличения содержания «пузырькового» воздуха в дистиллированной воде от интенсивности облучающих волн ($\lambda = 3,2 \text{ см}$). Получено, что при увеличении интенсивности от «нуля» содержание «пузырькового» воздуха монотонно возрастает, достигает максимума при величинах, порядка 10 мВт/см^2 , а затем начинает уменьшаться. Такой результат объясняется тем, что хоть незначительно, но при интенсивностях выше 10 мВт/см^2 , начинается существенный подъем температуры жидкости. Теплофизические процессы обеспечивают выравнивание температуры по всему объему. Результатом является уменьшение температурного градиента ($\text{grad } T$) и, вместе с ним, термокапиллярной силы ($F_T \sim \text{grad } T$), ответственной за реализацию колебательных движений воздушных пузырьков. Выравнивание температуры приводит также к тому, что разность между концентрацией газа вдали от пузырька и у его поверхности ($C_\infty - C_R$) уменьшается. Поскольку поток газа в пузырек из жидкости $J \sim (C_\infty - C_R)$, то радиус пузырька теперь увеличивается на меньшую величину. Следовательно и скорости движения пузырьков в поле тяжести ($v_{\text{ДРХ}} \sim R^2$) и в поле температурного градиента ($v_T \sim R$) не достигают тех значений, которые реализовались при низкоинтенсивном СВЧ облучении. В итоге, при интенсивностях порядка $20 - 100 \text{ мВт/см}^2$, которые применялись в работах [11-13], становится недостижимой та степень разрыхления примембранного водного слоя (и тот уровень проницаемости биомембраны), который осуществлялся при $I < 10 \text{ мВт/см}^2$, в работах [1-10]. Соответственно, при условиях [11-13], повидимому, не достигалось высвобождения того количества гистамина, которое высвобождалось в случае использования микроволн не столь высоких интенсивностей.

Вышесказанное относится к причинам, по которым в [11-13] не наблюдалось профилактического влияния микроволн, уменьшающего поражающее действие последующего ионизирующего облучения. В [11-13] указывается на аддитивность (синергизм) этих двух видов воздействия. Обратим внимание на то, что в [11] уровень проявления отмеченной аддитивности растет с увеличением интенсивности СВЧ колебаний (длина волны $\lambda = 12,6 \text{ см}$), принимая максимальное значение в случае использованной максимальной интенсивности, равной 100 мВт/см^2 . Такая интенсивность излучения ($\lambda = 12,6 \text{ см}$) вызывает существенный нагрев водных растворов. (На этой же длине волны работают бытовые СВЧ печи для приготовления пищи.) Повышение температуры живого организма (за счет СВЧ облучения) способствует усилению процессов ПОЛ биомембран (и их последующей деструкции) в столь больших размерах, что высвободившееся количество гистамина оказывается

совершенно недостаточным для противодействия этому. Последующее ионизирующее облучение, которому подвергается живой организм, только добавляет свой вклад в начатый мощными микроволнами процесс разрушения биологических клеток. Поэтому и реализуется более высокий уровень летальности животных.

ВЫВОДЫ

1. Для осуществления повышения радиорезистентности живого организма необходимо добиться увеличения содержания в нем биогенных аминов, в частности, гистамина.

2. Использование СВЧ облучения позволяет увеличить проницаемость цитоплазматических мембран без их деструкции (за счет разрыхления примембранного водного диффузионного слоя). Это увеличение проницаемости является сигналом для немедленного синтеза биогенного гистамина и его высвобождения.

3. Увеличения проницаемости цитоплазматических мембран без их деструкции можно достичь, используя микроволны, исключительно, низкой интенсивности (менее 10 мВт/см²).

4. В случае предварительного облучения микроволнами с интенсивностью свыше 10 мВт/см² возможно получение не повышения, а снижения радиорезистентности организма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barron C.I. The microwaves in radiation medicine / C.I. Barron, A.A. Bacaff // J. Amer. Med. Assoc. – 1958. – V. 168. – P.1104-1107.
2. Gel'fon I.L. Stimuljacija mikrovolnovym oblucheniem produkcirovanija gistamina v obluchaemom organizme / I.L. Gel'fon, M.N. Sadchikova // Trudy In-ta gigieny truda i profzabolevanij AMN SSSR. – 1960. – Tom 1. – S. 46-49.
3. Presman A.S. Vlijanie neteplovogo mikrovolnovogo obluchenija na rezistentnost' zhivotnyh k gamma-oblucheniju / A.S. Presman, I.A. Levitina // Radiobiologija. – 1962. – Tom 2. - № 1. – S. 170-171.
4. Michaelson S. The influence of microwaves on ionizing radiation exposure / S. Michaelson // Aerospace Medicine. – 1963. – V. 34. – N 2. - P. 111-115.
5. Kombinirovannoe vozdejstvie rentgenovskogo i sverhvysochastotnogo izluchenija na kostnyj mozg / L.A. Sevast'janova, S.L. Potapov, V.G. Adamenko, R.L. Vilenskaja // Biologicheskie nauki. – 1969. – № 6. – S. 46-48.
6. Sevast'janova L.A. Reakcija kostnogo mozga myshej na izmenenie parametrov obluchajuwej sverhvysochastotnoj radiacii millimetrovogo diapazona / L.A. Sevast'janova, R.L. Vilenskaja // Biologicheskie nauki. – 1974. – № 6. – S. 48-49.
7. Kombinirovannoe dejstvie ionizirujuwego i mikrovolnovogo izluchenij na krys / Ju.G. Grigor'ev, V.S. Stepanov, G.V. Batanov, V.D. Vatutin // Radiobiologija. – 1981. – Tom 21. - № 2. – S. 289-293.
8. Kombinirovannoe dejstvie mikrovolnovogo i ionizirujuwego izluchenij / Ju.G. Grigor'ev, V.S. Stepanov, G.V. Batanov, [i dr.] // Kosmich. biologija i aviakosm. medicina. – 1987.–T. 21. - № 4. S.4-9.
9. Rotkovska D. Vlijanie mikrovolnovogo obluchenija na stvolovye krovetvornye kletki u myshej i ego dejstvie na ustojchivost' zhivotnyh k ionizirujuwej radiacii / D. Rotkovska, A. Vacek, A. Bartonichkova // Radiobiologija. – 1981. – Tom 21. - № 4. – S. 558-562.
10. Vlijanie neteplovyh jelektromagnitnyh polej SVCh na aktivnost' techenija luchevoj bolezni u letal'no R-obluchennyh zhivotnyh / A.A. Cuaeva, B.I. Makarenko, N.Ja. Simonova, [i dr.] // Materialy 3-j Krymskoj konferencii «SVCh tehnika i sputnikovyy priem». – Sevastopol'. – «Veber», 1993. – S. 563-566.
11. Davydov B.I. Biologicheskoe vzaimodejstvie jelektromagnitnyh voln diapazona radiochastot i ionizirujuwej radiacii / B.I. Davydov, V.V. Antipov, V.S. Tihonchuk // Kosmicheskie issledovanija. – 1974. – T. 12. - № 1. – S. 129-133.
12. Thomson R., Michaelson S., Howland J. The microwaves and ionizing radiation // Aerospace Medicine. – 1967. – V. 38. - P. 252-260.
13. Murrey R.H. ,McCally M. Combined effects of microwave and ionizing radiations // Bioastronom. Book Date, NASA. – 1972. – P. 881-889.
14. Eмец B.G. K ocenke usrednennyh parametrov usrednennyh stabil'nyh puzyr'kov, sodержawihjsja v vode / B.G. Eмец // Dopovidi NAN Ukraїny. – 1998. - № 5. – S. 75-78.

15. Kotyk A. Membrannyj transport: Per. s angl. / A. Kotyk, K. Janacek. – Moskva: Mir, 1980. – 341 s.
16. Tamm I.I. Osnovy teorii jelektrichestva. / I.I. Tamm. – Moskva: Nauka, 1976. – 616 s.
17. Levich V. G. Fiziko-himicheskaja gidrodinamika. / V. G. Levich. Moskva: Fizmatgiz, 1959. - 699 s.
18. Naugol'nyh K.A. Kavitacija / K.A. Naugol'nyh // Ul'trazvuk. Malen'kaja jenciklopedija (Red. Goljamina I. P.). Moskva: Sovetskaja jenciklopedija, 1979. - S. 156-161.
19. Kudrjashov Ju.B. Osnovy radiacionnoj biofiziki. / Ju.B. Kudrjashov, B.S. Berenfel'd. – Moskva: Izd-vo Mosk. un-ta, 1980. – 264 s.
20. Goncharenko E.N. Gipoteza jendogenogo fona radiorezistentnosti. / E.N. Goncharenko, Ju.B. Kudrjashov. – M.: MGU, 1980. – 264 s.
21. Obuhan K.I. Ocinka porogovyh rivniv biologichnoi' dii' vyprominjuvannja na klitynni systemy. / K.I. Obuhan. – Kyi'v: Pravda Jaroslavychiv, 1998. – 168 s.