

МИКРОВОЛНЫ ИЗМЕНЯЮТ СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ ПО ОТНОШЕНИЮ К ИОНИЗИРУЮЩЕЙ РАДИАЦИИ

Е. Б. Алмазова

Ассистент

Кафедра общей и экспериментальной физики
Национальный технический университет «Харьковский
политехнический институт»

ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

Контактный тел.: (0572) 52-37-45

Б. Г. Емец

Доктор физико-математических наук, профессор

Кафедра биологической и медицинской физики

Харьковский национальный университет

им. В.Н. Каразина

пл. Свободы, 4, г. Харьков, Украина, 61022

Контактный тел.: (057) 707-55-76

E-mail: Boris.G.Yemets@univer.kharkov.ua

Проаналізовано публікації з проблеми підвищення радіаційної стійкості організмів за рахунок попереднього їх опромінення мікрохвилями. Показано, що реалізуються протилежні результати, якщо використовуються мікрохвилі, чия інтенсивність менше або більше 10 мВт/см²

Ключові слова: іонізуюче опромінення, мікрохвилі, радіорезистентність, мембрана

Проанализированы публикации по проблеме повышения радиационной стойкости организмов за счет предварительного их облучения микроволнами. Показано, что реализуются противоположные результаты, если используются микроволны, чья интенсивность меньше или больше 10 мВт/см²

Ключевые слова: ионизирующее облучение, микроволны, радиорезистентность, мембрана

The publications about the problem of increasing radiation resistance of organisms due to prior exposure to microwaves are analyzed. Opposite results are realized when used microwaves, whose intensity is less than or greater than 10 mW/cm²

Keywords: ionizing radiation, microwaves, radio-resistance, membrane

Введение

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важнейшими научными и практическими задачами

Поиск новых средств профилактики и терапии радиационных поражений живых организмов является актуальной задачей. Это связано с возможными аварийными ситуациями на атомных станциях и других объектах атомной промышленности, а также с вероятностью терроризма различных масштабов, включая радиологические. Для профилактики вредных биологических последствий ионизирующей радиации перспективным является использование электромагнитных (волновых) технологий.

Анализ последних исследований и публикаций

Влияние электромагнитных волн СВЧ диапазона на сопротивляемость живого организма обсуждается в различных сообщениях [1-17]. Эти публикации делятся на две группы: в одних утверждается, что СВЧ колебания повышают радиационную стойкость организмов, в других сформулировано противоположное утверждение – микроволны понижают радиационную

устойчивость живых объектов. Имеется настоятельная необходимость разобраться в причинах столь разноречивых выводов.

Целью данной работы является биофизическое обоснование результатов работ [1-17] и установление условий, при которых СВЧ волны способствуют смягчению поражающего действия ионизирующей радиации. Установление указанных условий открывает возможности для формулирования практических рекомендаций по применению микроволн как средства, повышающего радиационную устойчивость биологических объектов.

Наблюдения радиопротекторного эффекта, обусловленного СВЧ облучением

В 1961 году А.С. Пресман и И.А. Левитина выполнили исследования по облучению лабораторных животных (крыс). Одну группу крыс (12 особей) ежедневно по 10 минут в течение 25 дней облучали СВЧ-волнами (длина волны $\lambda = 12$ см; интенсивность 10 мВт/см²), контрольную группу (12 особей) не подвергали микроволновому облучению. После этого обе группы получили однократное воздействие гамма-лучами в дозе 600 рентген. 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%) [1]. Аналогичные опыты были проведены S. Michaelson в США (1963 г.). Он получил, что предварительное облучение животных электромагнитными волнами сантиметрового диапазона низкой интенсивности в несколько раз уменьшает смертность от последующего ионизирующего облучения [2].

Исследователи под руководством Ю.Г. Григорьева изучали биологический ответ животных на ионизирующую радиацию [3,4]. Опытную группу (18 крыс) ежедневно по 30 минут в течение 8 суток подвергали облучению микроволнами (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 (тоже 18 особей) подвергали однократному общему гамма-облучению в суммарной дозе 5,5 Грэй (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.

Группа во главе с Д. Ротковской изучала влияние микроволн на устойчивость мышей к воздействию ионизирующего излучения [5]. Авторы показали, что 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 исследовала влияние низкоинтенсивных импульсных электромагнитных полей СВЧ на характеристики протекания лучевой болезни у мышей-самцов (линия СВА; возраст 8-12 недель) [6]. Одну группу животных облучали ионизирующей радиацией (доза 7 Грэй). Другая группа мышей получила ту же дозу рентгеновского облучения, а спустя 24 часа их подвергали действию импульсного СВЧ поля. Средняя продолжительность жизни животных первой группы составила 8 суток, а у мышей второй группыв – 90 суток.

И.Г. Акоев с сотрудниками [7] облучали гамма-квантами белых мышей в дозе 8 Грэй, являвшейся абсолютно летальной: 50% мышей контрольной группы погибли уже в первые 5-10 суток после облучения. В опытной группе мыши, получив такую же дозу ионизирующей радиации, затем были подвергнуты длительному (около 23 часов) облучению СВЧ волнами (интенсивность 5 мкВт/см²) от генератора типа Я2Р-76, работающего в режиме качания частоты 8–18 ГГц (частота качания 12-14 Гц). В результате продолжительность жизни этих животных оказалась больше, чем в контроле: увеличение составило от 2,5 до 7 суток. В другой работе И.Г. Акоева с сотрудниками [8] белых мышей перед гамма-облучением в летальной дозе (5 Грэй) подвергали 23-часовому низкоинтенсивному (5 мкВт/см²) воздействию микроволн в режиме качания частоты (2-8 ГГц) от генератора типа Г4-194 (частота качания 12-14 Гц). В этой группе средние сроки жизни животных до

гибели оказались увеличенными на 2,8 – 4,2 суток по сравнению с контролем.

Е.А. Губкина с сотрудниками [9] исследовала эффекты комбинированного воздействия излучением миллиметрового диапазона дотепловой интенсивности и рентгеновскими лучами на организм крыс. Источником СВЧ волн был генератор типа Г4-141 (интенсивность 7 мВт/см²), работающий в режиме качания частоты, лежащей в диапазоне 38-53 ГГц. Животные получали рентгеновское воздействие в течение 8 дней; суммарная доза составила 24 рентгена. Облучение микроволнами начали за 15 дней до начала воздействия рентгеновскими лучами. В последующие 8 дней проводили комбинированное облучение в последовательности «микроволны – рентгеновские лучи». Оценивалось содержание глиального фибриллярного кислого белка (ГФКБ) в различных отделах мозга, а также концентрация глюкозы в сыворотке крови. Получено, что раздельное воздействие и рентгеновскими лучами и СВЧ-волнами снижает концентрацию этого белка. При комбинированном воздействии (СВЧ плюс рентгеновские лучи) концентрация ГФКБ увеличивается по отношению к таковой при рентгеновском облучении и достигает величин, зарегистрированных в контроле. Увеличение концентрации глюкозы реализуется только при воздействии, исключительно, рентгеновскими лучами. Комбинированное же облучение приводит к нормализации глюкозы в крови. Авторы делают вывод, что при сочетании рентгеновского излучения с СВЧ-воздействием происходит сглаживание эффектов ионизирующего излучения, как на клеточном, так и на системном уровнях.

Э.М. Аминова и Э.Ш. Исмаилов в работе [10] подтвердили возможность радиозащитного действия электромагнитных излучений СВЧ. Они считают целесообразным использование микроволн в практике медицинских радиологических отделений для профилактики и лечения лучевых реакций и повреждений. Авторы сообщают о выявлении радиопротекторных свойств у микроволн $\lambda = 5,6$ мм при облучении семян кукурузы, когда затем указанные семена были подвергнуты действию сравнительно больших доз гамма-радиации.

Г.И. Лавренчук и Я.И. Серкиз с сотрудниками [11] в работе, выполненной на асинхронной культуре клеток линии L₉₂₉ (трансформированные метилхолантеном фибробласты мышей), облучали клеточную популяцию гамма-квантами в дозе 10 Грэй. Выживаемость клеток уменьшилась на шестые сутки культивирования (до уровня 35% относительно необлученного контроля). Когда, после гамма-облучения в той же дозе на клетки подействовали микроволнами в диапазоне частот 37-44 ГГц (интенсивность 1 мВт/см²), выживаемость клеток возросла на 70% по сравнению с случаем гамма-облучения.

О.П. Резункова [12] сравнивала скорость восстановления гемопоэза у белых мышей, подвергнутых рентгеновскому облучению (доза 4 Грэй), и тот же параметр, в случае пострadiационного воздействия (продолжительностью 1 час) миллиметровыми волнами (длина волны 7,1 мм; интенсивность 4 мВт/см²). Она получила, что, спустя 48 часов после пострadiационного СВЧ-воздействия, скорость восстановления

гемопоза оказалась выше, чем в контроле по миелодному ростку костного мозга на 25% и на 15% выше по количеству лимфоцитов в тимусе и селезенке.

Н.В. Тордия, исследуя влияние ионизирующей радиации на выживаемость дифференцированных клеток высшего водного растения *Elodea canadensis*, установил, что гибель клеток в случае воздействия гамма-квантами (источник - ^{60}Co) наблюдается при дозе 5460 Грэй. Если же листочки растения предварительно в течение 30 минут облучать импульсами СВЧ в диапазоне 50-70 ГГц (частота повторения импульсов 100 Гц; интенсивность облучения 10^{-5} мВт/см²), то гибель клеток наступает при дозе 5460 Грэй. Это дало основание автору заявить о радиопротекторном действии СВЧ энергии [13].

Понижение радиационной стойкости, вызванной облучением микроволнами

Вышеприведенные результаты свидетельствуют о том, что СВЧ облучение повышает радиорезистентность живых организмов. Однако есть публикации, из материалов которых следует противоположный вывод. К таким принадлежит работа Б.И. Давыдова с сотрудниками [14], где описываются опыты, выполненные на 2560 нелинейных мышах-самках. Животные подвергались СВЧ облучению ($\lambda = 12,6$ см) с интенсивностью 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-квантами изотопа ^{60}Co 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. Получено, что СПЖ мышей падала. Наименьшие изменения были при интенсивности микроволн 20 мВт/см², а наибольшие – при 100 мВт/см². Авторы делают логический вывод, что в условиях предварительного воздействия СВЧ поля имеет место синергизм с гамма-облучением. В работе [15], а также в обзоре [16] комбинированное действие СВЧ поля и ионизирующей радиации на животных оценивается, по итогам исследований, как аддитивное или синергичное, направленное на разрушение биоорганизмов.

К подобному выводу пришли и Г.А. Шальнова, Н.Н. Клемпарская с сотрудниками [17], выполнившие опыты на 933 мышах (СВА×С57В1/Ф₁), которых облучали гамма-квантами (от изотопа ^{137}Cs) в дозе 8 Грэй (летальная доза 80/30). Для облучения животных микроволнами (интенсивность 150 мВт/см²) использовали СВЧ источник линейного ускорителя. Авторами установлено, что при любом варианте чередования и последовательности однократных воздействий ионизирующего излучения (в летальных дозах) и микроволн имеет место отягощение течения лучевой болезни, вызванной гамма-квантами.

Сказанное требует установления причин, из-за которых и после предварительного и после пострадиационного СВЧ воздействия в серии работ [1-13] отмечено повышение радиорезистентности биообъектов, тогда как в работах [14-17] получено, что предварительное облучение микроволнами, напротив, снижает их радиоустойчивость. Ответ следует искать в деталях физического механизма взаимодействия электромагнитных волн с биологическими объектами. Формально, с точки зрения электродинамики, биологическая среда представляет собой жидкую матрицу, содержащую различные диэлектрические включения.

Микроволны и примембранный водный слой

Биологическая клетка является наименьшей структурной единицей живого вещества. Биологическую ткань (биосреду, биожидкость) можно, в определенном приближении, рассматривать как систему, состоящую из клеток и межклеточной жидкости. Оболочкой клетки является плазматическая мембрана. Из гидродинамики известно, что любое тело, погруженное в жидкость, имеет пограничный слой, составленный из молекул жидкости. Такой пограничный слой окружает и клеточную мембрану; его называют водным примембранным диффузионным слоем. Диффузионным его называют по той причине, что, будучи чрезвычайно крепко связанным с мембраной, слой этот является перемешиваемым; в нем не могут реализоваться условия для конвективного переноса частиц. Это означает, что частицы, движущиеся из межклеточной среды в клетку и в противоположном направлении, могут проходить через указанный водный слой, исключительно, по диффузионному механизму. Согласно [18], толщина примембранного слоя на несколько порядков больше толщины липидного слоя мембраны.

В биологической ткани (в биожидкости) содержится растворенный воздух и воздух в пузырьках. Например, при 20°C объемная доля «пузырькового» воздуха в воде составляет $V_F = 5,8 \cdot 10^{-8}$; средний радиус пузырьков $R_{cp} \approx 20$ нанометров [19]. Пузырьки, находящиеся в биоткани, конечно, присутствуют и в диффузионном примембранном водном слое. Пузырьки перемещаются в поле силы тяжести (на них действует сила Архимеда; скорость движения конкретного пузырька в поле тяжести пропорциональна квадрату его радиуса) и в поле температурного градиента (реализуется т. н. термокапиллярный эффект; в этом поле скорость перемещения пузырька пропорциональна радиусу в первой степени) [20]. Двигаясь в примембранном диффузионном слое, пузырьки играют роль своеобразных «перемешивателей». В неоднородном электрическом поле СВЧ волны, распространяющейся в жидкости, на воздушный пузырек действует т.н. градиентная сила, пропорциональная разности между диэлектрической проницаемостью жидкости (воды) ϵ_w , в которой он взвешен, и диэлектрической проницаемостью газа (воздуха), заключенного в пузырек ϵ_g [21]. Благодаря действию указанной силы, воздушные пузырьки, оказавшись в поле электромагнитной волны, увеличиваются в раз-

мерах. Поскольку скорость перемещения пузырька большего радиуса в температурном и в гравитационном полях выше, чем скорость пузырька, обладающего меньшим радиусом, то выросшие пузырьки движутся в примембранном водном слое быстрее. Из-за этого реализуется более активное перемешивание указанного слоя; «эффективная толщина» его становится меньше, чем была до облучения волнами СВЧ. Поэтому процесс обмена веществ в системе «клетка - межклеточная среда» идет быстрее; можно сказать, что эффективная проницаемость системы «клеточная мембрана плюс примембранный водный слой» возросла. Последнее влечет за собой выход из клетки части низкомолекулярных органических субстратов и, следовательно, снижение их внутриклеточной концентрации.

Согласно работам [22-24], скорость биохимических процессов в клетках определяется рядом параметров, в том числе, уровнем ферментативной активности, которая, в свою очередь, зависит от присутствия в биосреде низкомолекулярных органических веществ: с ростом концентрации последних указанная активность снижается, и наоборот. Причина такой зависимости состоит в обратимой адсорбции лигандов на белковых молекулах ферментов, что затрудняет их конформационную подвижность, необходимую для совершения ферментативного акта. В норме активность всех ферментов снижена в той или иной степени, зависящей от состава лигандов, окружающих их молекулы. Когда в биожидкость попадает СВЧ волна, то увеличивается эффективная проницаемость системы «мембрана плюс примембранный водный слой» и, следовательно, уменьшается внутриклеточная концентрация низкомолекулярных органических соединений, вызывая, тем самым, повышение активности ферментов в клетке. Усиление ферментативной активности способствует ускорению ряда процессов, включая стимуляцию пролиферации. Если теперь клетки подвергнуть ионизирующей радиации, то возникающие радиационные повреждения будут успешнее (и быстрее) репарироваться, чем в случае, когда предварительное облучение СВЧ-волнами отсутствовало.

Различие биологических ответов на действие микроволн «тепловой» и «дотепловой» интенсивности

Почему же в работах [14-17] не наблюдалось профилактического эффекта СВЧ, а напротив, имела место аддитивность деструктивного действия микроволн и ионизирующей радиации? Для рассмотрения этого вопроса необходимо обратить внимание на величины интенсивностей микроволн, используемых авторами [14-17]. В работах [1-13] применялись СВЧ колебания низкого, т.н. дотеплового уровня интенсив-

ности, не превышающего 10 мВт/см^2 . (Установлено, что электромагнитные волны, имеющие интенсивность, меньше чем величина 10 мВт/см^2 , не вызывают даже местного нагрева тканей тела выше $0,1^\circ\text{C}$ [25].) Итак, хоть незначительно, но при интенсивностях выше 10 мВт/см^2 , начинается существенный подъем температуры биожидкости. Повышение температуры приводит к увеличению проницаемости не только плазматической мембраны, но и внутриклеточных мембран, ограничивающих различные ее компартменты. Внутриклеточные мембраны обеспечивают существование внутри клетки градиентов концентраций различных низкомолекулярных субстратов, достигающих в ряде случаев двух-трех порядков величины. Рост температуры клетки (вызванный облучением волнами СВЧ повышенной интенсивности) приводит к диффузионному расплыванию клеточных субстратов по ее объему и, как следствие, к ингибированию ферментативных реакций. В результате клетка функционирует в режиме, значительно отличающемся от нормального; ее ресурсы быстро исчерпываются.

Вышесказанное относится к причинам, по которым в [14-17] не наблюдалось профилактического влияния микроволн, уменьшающего поражающее действие последующего ионизирующего облучения. Более того, в этих работах получена аддитивность (синергизм) этих двух видов воздействия. Это неудивительно, поскольку в [14] использовались интенсивности микроволн в интервале $20-100 \text{ мВт/см}^2$, в [15, 16] применялись интенсивности, большие 50 мВт/см^2 , а в [17] интенсивность равнялась 150 мВт/см^2 . (Все эти интенсивности гораздо больше «пограничного» значения 10 мВт/см^2). Конечно, повышение температуры тела, вызванное такими, сравнительно мощными микроволнами, способствует началу деструктивного процесса в тканях. В результате понижается радиационная стойкость организма. Последующее ионизирующее облучение, которому подвергаются живые системы, только добавляет свой разрушительный вклад в начатый мощными микроволнами процесс деградации биологических клеток.

Выводы

1. Микроволны дотеплового уровня интенсивности (менее 10 мВт/см^2) повышают радиационную стойкость биосистем.
2. Микроволны, имеющие уровень интенсивности выше 10 мВт/см^2 , понижают радиационную стойкость живых организмов.
3. Факт изменения радиационной стойкости биологических объектов с помощью микроволнового облучения обеспечивается процессами в клетке, стимулированными увеличением проницаемости плазматической мембраны.

Литература

1. Пресман, А.С. Влияние нетеплового микроволнового облучения на резистентность животных к гамма-облучению [Текст] / Пресман А.С., Левитина И.А. // Радиобиология. – 1962. – Том 2. - № 1. – С. 170-171.
2. Michaelson. S. The influence of microwaves on ionizing radiation exposure [Текст] / Michaelson S. // Aerospace Medicine. – 1963. – V. 34. –N 2. – P. 111-115.

3. Григорьев, Ю.Г. Комбинированное действие ионизирующего и микроволнового излучений на крыс [Текст] / Григорьев Ю.Г., Степанов В.С., Батанов Г.В., Ватутин В.Д. // Радиобиология. – 1981. – Том 21. - № 2. – С. 289-293.
4. Григорьев, Ю.Г. Комбинированное действие микроволнового и ионизирующего излучений [Текст] / Григорьев Ю.Г., Степанов В.С., Батанов Г.В., Бесхлебнова Л.И. и др. // Космич. Биология и авиакосм. медицина. – 1987. – Т. 21. - № 4. С.4-9.
5. Ротковская, Д. Влияние микроволнового облучения на стволовые кроветворные клетки у мышей и его действие на устойчивость животных к ионизирующей радиации [Текст] / Ротковская Д., Вацек А., Бартоничкова А. // Радиобиология. – 1981. – Том 21. - № 4. – С. 558-562.
6. Цуцаева, А.А. Влияние нетепловых электромагнитных полей СВЧ на активность течения лучевой болезни у летально R-облученных животных [Текст] / Цуцаева А.А., Макаренко Б. И., Симонова Н.Я. и др. // Материалы 3-й Крымской конференции «СВЧ техника и спутниковый прием». – Севастополь. – «Вебер», 1993. – С. 563-566.
7. Акоев, И.Г. Модификация летального радиационного поражения мышей пострadiационным низкоинтенсивным радиочастотным излучением сантиметрового диапазона [Текст] / Акоев И.Г., Мельников В.М., Усачев А.В., Кожокару А.Ф. // Радиационная биология. Радиоэкология. – 1994.-Т.34. – № 4-5.- С. 671-674.
8. Акоев, И.Г. Радиопротекторное действие низкоинтенсивного радиочастотного излучения сантиметрового диапазона волн при смертельном гамма-облучении [Текст] / Акоев И.Г., Кожокару А.Ф., Мельников В.М., Усачев А.В. // Радиационная биология. Радиоэкология. – 1994.-Т.34. – № 4-5.- С. 675-676.
9. Губкина, Е.А. Воздействие НИ ЭМИ в диапазоне КВЧ на животный организм на фоне общего рентгеновского облучения в малых дозах [Текст] / Губкина Е.А., Кушнир А.Е., Березюк С.К., Потапов В.А., Лепехин Е.А. // Радиационная биология. Радиоэкология. – 1996.- Т.36. – № 5.- С. 722-726.
10. Аминова, Э.М. Возможность модификации лучевого поражения ЭМ излучением радиочастотного диапазона [Текст] / Аминова Э.М., Исмаилов Э.Ш. // Радиационная биология. Радиоэкология. – 1999.-Т.39. –№ 2-3.- С. 345-348.
11. Лавренчук, Г.И. Модифицирующее действие НИ электромагнитного излучения на облученные клетки [Текст] / Лавренчук Г.И., Серкиз Я.И., Рябченко Н.Н., Дудченко Т.Н. // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2001.-Т.41. – № 1.- С. 73-77.
12. Резункова, О.П. Радиация, КВЧ воздействие и кроветворение [Текст] / Резункова О.П., Резунков А.Г. // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 2003. - № 2. – С. 60-63.
13. Тордия, Н.В. Низкоинтенсивное электромагнитное излучение в диапазоне крайне высоких частот как фактор модификации выживаемости дифференцированных клеток растений [Текст] / Тордия Н.В. // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. - 2005. – № 3. – Ч. 2. – С. 150-153.
14. Давыдов, Б.И. Биологическое взаимодействие электромагнитных волн диапазона радиочастот и ионизирующей радиации [Текст] / Давыдов Б.И., Антипов В.В., Тихончук В.С. // Космические исследования. – 1974. – Т. 12. - № 1. – С. 129-133.
15. Thomson, R. The microwaves and ionizing radiation [Текст] / Thomson R., Michaelson S., Howland J. // Aerospace Medicine. – 1967. – V. 38. – P. 252-260.
16. Murrey, R.H. Combined effects of microwave and ionizing radiations [Текст] / Murrey R.H., McCally M. // Bioastronom. Book Date, NASA. – 1972. – P. 881-889.
17. Шальнова, Г.А. Синергизм и интерференция при сочетанном биологическом действии ионизирующих и СВЧ-излучений [Текст] / Шальнова Г.А., Клемпарская Н.Н., Сомова Е.П., Смирнова О.В., Исиченко И.Б., Шиходыров В.В. // Радиобиология. – 1993. – Т.33-№ 1. С. 128-132.
18. Котык, А. Мембранный транспорт [Текст] / Котык А., Яначек К. – Москва: Мир, 1980. – 341 с.
19. Емец, Б.Г. К оценке усредненных параметров усредненных стабильных пузырьков, содержащихся в воде [Текст] / Емец Б.Г. // Доповіді НАН України. – 1998. - № 5. – С. 75-78.
20. Левич, В. Г. Физико-химическая гидродинамика [Текст] / Левич В. Г. - Москва: Физматгиз, 1959. – 699 с.
21. Тамм, И. Е. Основы теории электричества. [Текст] / Тамм И. Е. - Москва: Наука, 1976. - 616 с.
22. Эйдус, Л.Х. Неспецифическая реакция клеток и радиочувствительность. [Текст] / Эйдус Л.Х. – М.: Атомиздат, 1977. – 151 с.
23. Эйдус, Л.Х. О едином механизме инициации различных эффектов малых доз ионизирующих излучений [Текст] / Эйдус Л.Х. // Радиационная биология. Радиоэкология. – 1996.-Т.36. – № 6.- С. 874-882.
24. Эйдус, Л.Х. Мембранный механизм биологического действия малых доз. Новый взгляд на проблему [Текст] / Эйдус Л.Х. – Пушино: ИТЭБ, 2001. – 161 с.
25. Крылов, В.А. Защита от электромагнитных излучений. [Текст] / Крылов В.А., Юченкова Т.В.- М. Сов. Радио, 1972. – 216 с.