

Введение

Действие КВЧ-излучения (электромагнитное излучение миллиметрового диапазона нетепловой интенсивности) интенсивно изучается в последние 25 лет на различных биологических объектах и модельных системах.

Основные особенности биологических эффектов миллиметровых волн таковы:

1. Биологические эффекты КВЧ-излучения практически не зависят от его интенсивности, начиная с некоторой небольшой «пороговой» величины вплоть до интенсивности, при которой становится заметным нагрев тканей.

2. Биологический эффект носит резонансный характер, т.е. наблюдается в узких интервалах частот, причем относительная ширина полос не превышает единиц процентов, а чаще составляет десятые и сотые доли процента от значения центральной частоты.

3. Наблюдается «запоминание» организмом КВЧ воздействия на более или менее длительное время.

4. При облучении экспериментальных животных эффект проявляется в физиологических системах и органах, непосредственно не связанных с зоной облучения (Зеленцов, Перельмутер, Ча, 2007).

Рассмотрим современные представления о механизмах воздействия низкоинтенсивных миллиметровых волн на биологические объекты.

Основные события, связанные с воздействием миллиметровых волн на живые клетки, происходят в клеточных мембранах. Считается, что именно плазматическая мембрана и мембранные процессы обуславливают высокую чувствительность биологических объектов к электромагнитным взаимодействиям ММ-волн (Бецкий, Кислов, Лебедев, 2004). Как известно, мембраны на 25-75% (по весу) состоят из липидов. Благодаря своему строению молекулы липидов способны к конформационным (пространственным) перестройкам, что и позволяет мембранным структурам

быть столь чувствительным к воздействию КВЧ-излучением. В мембранах клеток электромагнитная энергия преобразуется в энергию акустоэлектрических волн при сохранении частоты колебаний в КВЧ-диапазоне (Голант, 1991). Миллиметровые волны, воздействуя на плазматические мембраны клеток, могут возбудить в них, словно в диэлектрических резонаторах, акустоэлектрические колебания. Эту мысль можно пояснить с помощью рис.1, на котором показано сечение клетки.

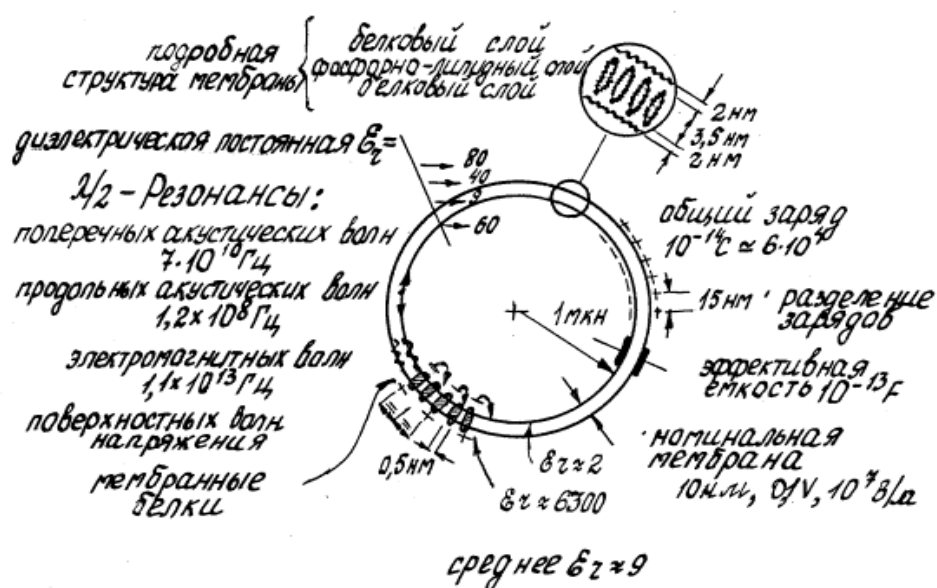


Рис. 1. Сечение клетки.

Акустоэлектрические колебания инициируют синтез белков и другие метаболические процессы внутри клетки, что приводит к нормализации жизнедеятельности клетки (Голант, 1989; Кузьменко, 1989; Девятков и др., 1991; Гончарова, Лукьянов, 1991; Девятков и др., 1994).

Кроме того, при воздействии ММ-излучения на рецепторы происходит увеличение гидратации белковых молекул, вследствие чего повышается активность рецепторных структур. В случае уменьшения гидратации белковых рецепторов часть молекул воды отрывается от белковой поверхности и переходит в околочлеточное пространство. При облучении ММ - волнами эти свободные молекулы воды поглощают энергию волн, и она переходит в дополнительную кинетическую энергию вращательного и поступательного движения молекул воды. При этом увеличивается

вероятность попадания молекул воды на вакантные центры на поверхности белковой молекулы, что и приводит к увеличению гидратации белка (увеличению активности рецептора).

В целом в последние годы появилось множество публикаций, в которых приводятся все новые данные о роли воды и водных растворов в реализации биологических механизмов ММ - волн. Впервые гипотеза о важной роли воды была высказана в 1979 г. в работе Ильина С.А., Бакаушина Г.Ф., Гайдук В. И. и др.

Новые результаты о свойствах воды, облучённой ММ - волнами, приводятся в следующих работах: Гапочка Л.Д., Гапочка М.Г., Королёв А.Ф. и др. 1994; Fesenko E.E., Geletyuk V.I., Kasachenko V.N., Chemeris N.K., 1995; Бецкий О.В. 1998; Синицын Н.И., Петросян В.И., Ёлкин В.А., Девятков Н.Д., Гуляев Ю.В., Бецкий О.В. 1999. Показано, что физический механизм формирования "памяти воды" связан с сеткой водородных связей. Водородная связь между двумя молекулами воды характеризуется тем, что атом водорода, находящийся между двумя атомами кислорода, имеет два равновероятных положения (рис.2)

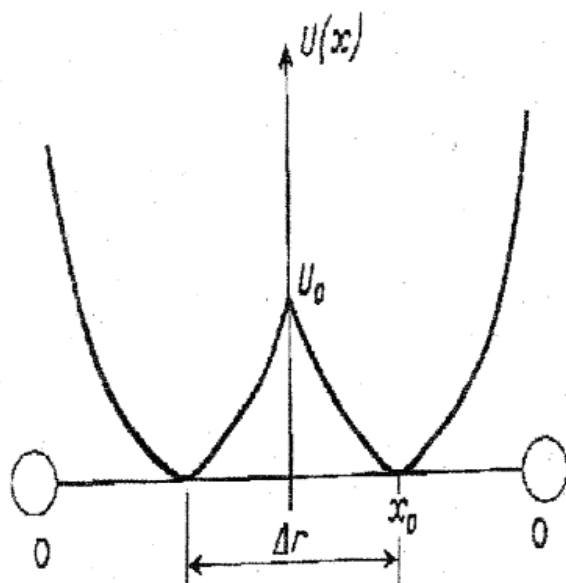


Рис.2. Модель двух потенциальных ям для протона в водородной связи (x_0 -положение минимума потенциальной энергии; Δr - расстояние между двумя минимумами) – Бецкий, Лебедева, 2000.

Этот протон можно рассматривать как частицу, туннелирующую между двумя потенциальными ямами. Возможность перехода через потенциальный барьер приводит к расщеплению энергетического уровня протона на два близких уровня с разницей энергий $D E_p$; тогда частота перехода протона через барьер равна $\omega_p = D E_p / \hbar$, где $\hbar$ - постоянная Планка. В кластерах и клатратных образованиях $\{(H_2O)_n \text{ при } n = 50-60\}$ частоты переходов лежат в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, что обуславливает резонансный характер поглощения ММ - излучения этими системами. Фесенко, Гелетюк, Казаченко и Чемерис (1995 г.) показали, что вода (или водный раствор) после облучения ММ - волнами способна сохранять информацию ("память") об этом длительное время (десятки минут). Эта информация проявляется в сохранении биохимической активности воды после прекращения облучения (Бецкий, Лебедева, 2001).

Очень популярна также идея о резонансном взаимодействии ЭМИ КВЧ с живыми системами (Смолянская, Гельвич, Голант, Махов, 1979, Grundler, Jentzsch, Keilmann, Putterlik, 1988). Изменение определённого биологического параметра (например, активности какого-то фермента) после воздействия на организм ЭМИ проявляется лишь в узких полосах реально воздействующих на него частот, составляющих нередко $10^{-3} - 10^{-4}$ средней частоты; данное явление получило название острорезонансного эффекта действия. Таких полос, чередующихся с полосами, в которых сколько-нибудь существенного изменения этого параметра не наблюдается, может быть довольно много (Grundler, Keilmann, 1983, Девятков, Голант, Реброва, 1982).

Характер острорезонансного биологического действия зависит от частоты колебаний: одни резонансные частоты влияют в большей степени на одни стороны биологической активности, другие – на другие. На разных резонансных частотах, зафиксированных по одной биологической реакции, характер изменения другой реакции может быть совершенно другим (Девятков, Голант, Бецкий, 1991).

Результаты опытов с заменой воздуха аргоном свидетельствуют также о важной роли кислорода, присутствие которого при КВЧ-облучении ответственно за дальнейшее образование и накопление радикальных и перекисных состояний и развитие автокаталитических реакций типа цепных, идущих в липидной фазе мембран. Это приводит к накоплению конечных продуктов, вызывающих изменения функционального состояния мембран и клеток. В отсутствие кислорода невозможны конформационные изменения белков мембран, а также окисление сульфгидрильных и иных групп, что может влиять на изменения проницаемости мембран.

Исследование влияния ММ волн на процессы перекисного окисления липидов (ПОЛ) в моделях биологических мембран (суспензия липосом в водном растворе) принесли важную информацию о механизмах действия КВЧ-излучения на биологические объекты. В работе Владимирова и Арчакова (1972 г.) для диапазона волн 4,0 – 7,1 мм обнаружено ускорение процессов ПОЛ в суспензии липосом при нетепловых мощностях излучения (не более 0,5 мВт/см² при $\lambda = 6,5$ мм). Объяснение эффекта ускорения ПОЛ общим нагревом препаратов, естественно, исключено. Так как скорость ПОЛ в мембранных системах сильно зависит от их структурного состояния (Казаринов, 1990), можно предположить, что эффект связан со структурными изменениями мембран липосом и окружающей их воды при поглощении КВЧ-излучения.

Принципиально важно несоответствие между малой величиной поглощенной энергии при однократном КВЧ-облучении и величиной "ответа", выражающейся, например, в ускорении роста, увеличении выхода биомассы в 2-2,5 раза, увеличения количества пигментов в клетке до 3,5 раз и уровня экскреции органических соединений в среду. Налицо изменения транспортной функции мембран, связанные с самоускоряющимися процессами в липидной фазе.

Очень интересен двухфазный характер транспорта иона натрия, выявленный при облучении культуры водоросли спиролины *Spirulina*

platensis. После облучения наблюдали изменения и в быстрой, и в медленной фазах кинетических кривых, отражающих транспорт натрия, что проявлялось на 10 сутки культивирования и зависело от параметров облучения. Определяющим для обоих типов транспорта является степень проницаемости поверхностной мембраны клетки (Тамбиев, Кирикова, Макарова, 1997). Эти данные подтверждают, что первичное действие КВЧ-излучения состоит в изменении проницаемости мембран и их транспортных свойств. Очень важно присутствие кислорода для изменений функционального состояния мембран, их проницаемости, и для развития реакций последствия по принципу самоускорения.

Подобные механизмы уже описывались ранее, например, при развитии первичных реакций на гамма-излучение, – это реакции цепного автокаталитического типа. В этом случае также отмечали несоизмеримость количества поглощенной энергии при действии гамма-излучения и ответной реакции организма. Это позволило еще в 50-х годах прошлого века сформулировать гипотезу о решающей роли цепного окисления липидов (Тарусов, 1962; Эмануэль, Зайков, Мицус, 1973).

Подчеркнем, что это не означает знака равенства в механизмах действия КВЧ-излучения и ионизирующей радиации, но некоторые внешние проявления сходны. Подобным действием обладает и ультрафиолетовое облучение, вызывающее образование свободных радикалов в биологических системах и накопление перекисей. Ряд авторов отмечает, что УФ-облучение приводит к изменению транспорта ионов через мембрану: перекисное окисление липидов в мембранах приводило к повышению их проницаемости при сравнительно небольших дозах УФ (Потапенко, Рощупкин, Коган, Владимиров, 1972). Известно, что перекисное окисление связано с потреблением кислорода, поэтому облучение биомолекулярных фосфолипидных мембран в атмосфере аргона значительно менее эффективно, чем в присутствии растворенного кислорода (Комиссаров, 1994).

Точно также стимулирующее действие КВЧ-излучения снимается при облучении цианобактерии *Spirulina platensis* в атмосфере аргона (Тамбиев, Кирикова, Лебедева, 1993). Это можно объяснить тем, что КВЧ-излучение меняет активность кислородзависимых реакций в клетке, либо в аэробных условиях образуются активные формы кислорода (АФК). Известно, что АФК в низких концентрациях могут оказывать многостороннее регуляторное действие на биосистемы. К АФК также относят перекись водорода, образуется она в клетке из супероксида под действием фермента супероксиддисмутазы. Величина образующихся концентраций перекиси водорода и других перекисных состояний определяет развитие тех или иных биологических эффектов от стимуляции до повреждения клетки (Скулачев, 1997).

Суммируя все сказанное о роли цепных реакций в клетке, можно предложить следующий механизм действия КВЧ-излучения на процессы жизнедеятельности (рис.3):

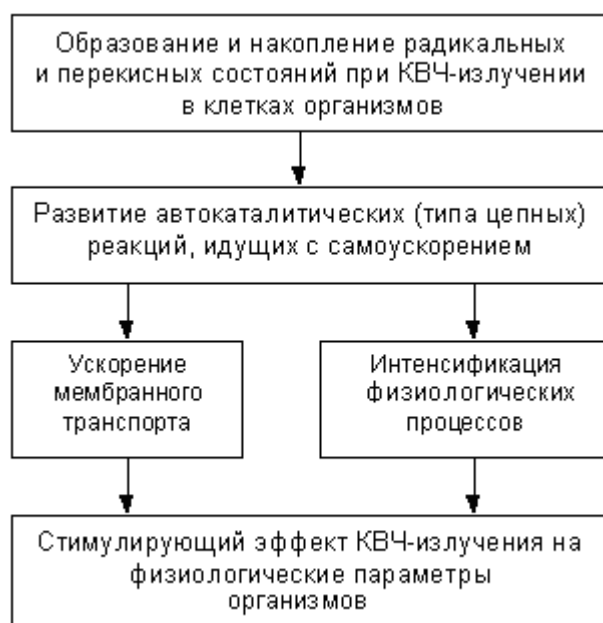


Рис.3 Механизм действия КВЧ - излучения на процессы жизнедеятельности (по: Синицын и др., 1999).

В целом результаты экспериментов по воздействию ЭМИ КВЧ на клетки конкретизируют представления о возможных путях его восприятия организмами. Полученные данные свидетельствуют о едином механизме

действия этого вида излучения на растительные и животные клетки. Открытие Н.И. Синицыным и др. (1998) у водных кластеров собственных резонансных частот в диапазоне 50–70 ГГц (50.3, 51.8, 64.5 и 65.5 ГГц) во многом объясняет высокую чувствительность биологических объектов к воздействиям ЭМИ КВЧ. Известно, что максимальный отклик организмов-гидробионтов наблюдается на частоте 65 ГГц при ППЭ 120 мкВт/см² и времени облучения 15 мин, что подтверждает роль водо-электрического эффекта и структуризации тонкого водосодержащего слоя. Первичной мишенью в этом случае при воздействии ЭМИ КВЧ на биологические системы являются молекулы примембранной воды. Это проиллюстрировано следующей схемой механизмов действия КВЧ-излучения на процессы жизнедеятельности клеток организмов (рис. 4):

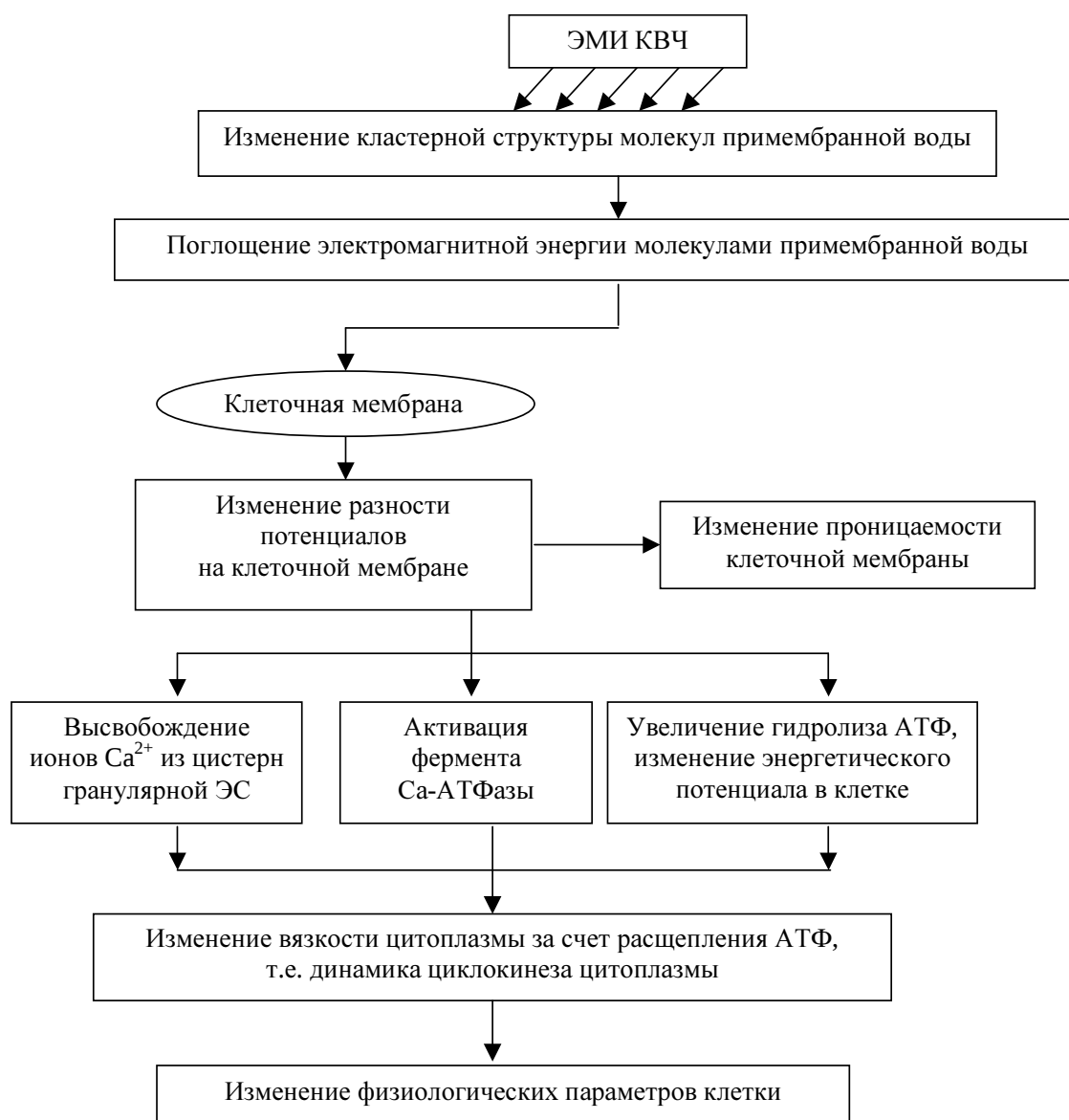


Рис.4 Схема возможного механизма действия ЭМИ КВЧ на клетки (Синицын и др., 1999).

Воздействие ЭМИ КВЧ на тонкий структурированный водных слой приводит к диссоциации молекул воды на противоположно заряженные ионы H^+ и OH^- . Энергия волны преобразуется в кинетическую энергию молекул. В результате появляются кластеры с нехарактерным для чистой воды размером. Такие молекулы воды играют принципиальную роль в гидратации белковых молекул биологических мембран, переводя их из функционально пассивного в активное состояние. Далее срабатывают механизмы, запускающие биохимические реакции, за которые отвечают белковые молекулы. При этом происходит увеличение проницаемости биологических мембран, что приводит к усилению транспорта веществ из окружающей среды в клетку и, как следствие, изменению биологической активности. Эффективность действия ЭМИ КВЧ на биологические системы зависит от функционального состояния клеток (в частности, от уровня ионов Ca^{2+}) и физических параметров излучения – ППЭ, частоты и др. Стимул усиливает выделение энергии в клетке за счет дополнительного гидролиза АТФ, который регулируется активностью Ca^{2+} .

Таким образом, нарушение кластерной структуры воды приводит к изменению биологической активности клетки (кинеза у инфузорий, размножение клеток водорослей и фотосинтетической активности) за счет изменения транспортной активности Са-АТФазы и, как следствие, энергетического ее потенциала. Реакция системы определяется величиной скорости генерации энтропии в системе, испытывающей воздействие. Наличие жесткой клеточной оболочки в растительных клетках приводит к более медленному вовлечению электромагнитных волн через молекулы воды в основные процессы их жизнедеятельности. Согласно результатам биотестирования на дафниях *D. magna*, в первые часы эксперимента наблюдалось их всплытие к поверхности воды. Изменения физиологических показателей многоклеточного организма происходит при хроническом

воздействии ЭМИ КВЧ, что проявляется в задержке закладки и развитии партеногенетических яиц, появлении абортивных яиц и нежизнеспособной молоди (Синицын и др. 1999).

Вопросы пролонгированности действия КВЧ-излучения многократно обсуждались в литературе, но не получили окончательного толкования. Их пробовали связывать как с "памятью воды", так и с некими неизвестными свойствами клетки.

В работе Искина и др., 1987 г., отмечается, что время "памяти" воздействия КВЧ-излучения на микроорганизмы даже при их постоянных пересевах может достигать нескольких месяцев, причем возвращение к исходным свойствам совершается постоянно. Наблюдается, по мнению авторов, "запоминание" организмом воздействий КВЧ на более или менее длительное время (Девятков и др., 1981; Поцелуева и др., 1998).

Вряд ли пролонгированный характер действия однократного КВЧ-облучения можно связывать с его мутагенным действием, которое исследовалось, но не подтвердилось у других объектов, и что можно объяснить низкой поглощаемой энергией миллиметровых волн. Также не наблюдалось каких-либо морфологических изменений в клетках облученных культур.

Пролонгирование можно было бы объяснить, по нашему мнению, с одной стороны, - затуханием самоускоряющихся механизмов развития стимуляции, а с другой - возвращением к норме функционального состояния мембран клеток.

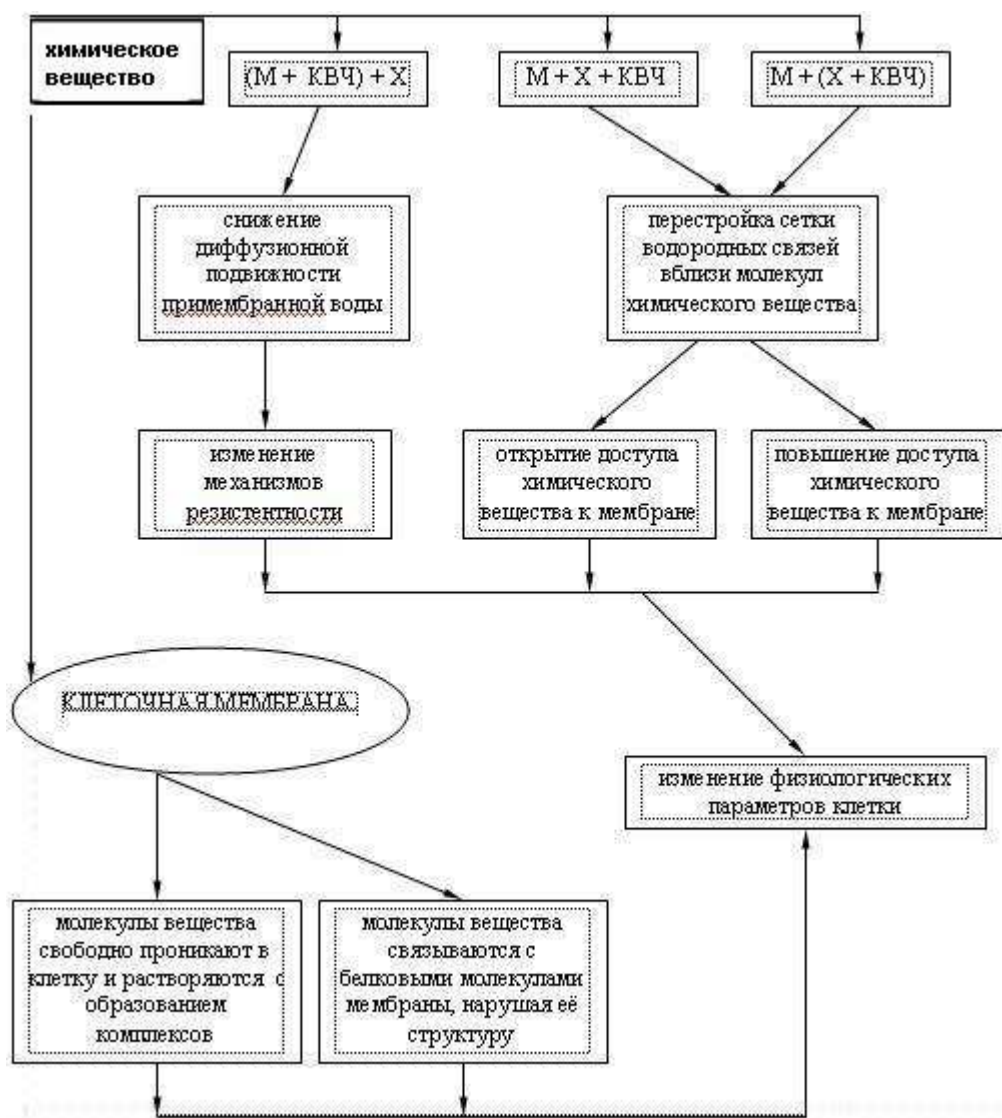
Относительно "памяти воды" высказывалось мнение, что она сохраняется после облучения электромагнитным излучением в течение нескольких суток (Гапочка и др., 1994). Такой же пролонгированный характер действия КВЧ-излучения наблюдался на гетеротрофных микроорганизмах – бактерии *E.coli*, дрожжеподобном грибе *Endomyces fibuliger*, спиртовых и пивоваренных дрожжах (Реброва, 1992).

Итак, проявление различных эффектов ЭМИ КВЧ, а в отдельных случаях и полное их отсутствие, можно объяснить кластерной структурой воды, вступающей во взаимодействие с факторами среды и организмами. С увеличением времени и частоты ЭМИ КВЧ увеличивается количество энергии, поглощенное исследуемой культурой. Восприятие электромагнитной энергии осуществляется молекулами свободной и связанной воды, входящей в состав биологических мембран. При этом происходит изменение структуры воды и увеличение проницаемости биологических мембран, что приводит к усилению транспорта веществ из окружающей среды в клетку и, как следствие, изменению биологической активности. Очевидно, вода обладает «памятью на облучение», что в свою очередь действует на микроорганизмы. Весьма вероятно, что во взаимодействие организмов с физическими и химическими факторами среды вступает вода. В связи с этим любое воздействие на структуру воды сказывается на биохимических процессах и функциональной активности микробной клетки.

Действие химических веществ на биообъекты основано на изменении разности потенциалов на цитоплазматической мембране, что играет основополагающую роль в резистентности и адаптации клеток к неблагоприятным воздействиям. Независимо от химической природы первым звеном воздействия химических факторов является мембраноповреждающий эффект – связывание с клеточными рецепторами и с последующей мобилизацией универсальных внутриклеточных механизмов регуляции. Большинство внутриклеточных процессов стимулируется повышением концентрации кальция посредством кальмодулинзависимых протеинкиназ. Длительное действие химических веществ и их высокие концентрации приводят к снижению резистентности клеток.

При воздействии токсических веществ на биологические системы, ответственными за восприятие ЭМИ КВЧ становятся не молекулы воды, а водные растворы соответствующих веществ (см. рис.5).

Схема возможного механизма комбинированного действия ЭМИ КВЧ и химических веществ на клетки микроорганизмов (© Кряжев Д.В., 2009)



М — микроорганизм; X — химическое вещество

Практическое применение электромагнитных излучений миллиметрового диапазона.

Все более перспективным представляется использование миллиметровых волн в областях связанных с сельским хозяйством и биотехнологией (Бецкий др., 2000; Тамбиев, Кирикова, 1997). В настоящее время обнаружена и экспериментально подтверждена возможность одновременного получения эффектов биостимуляции, дезинфекции и дезинсекции при микроволновом воздействии на семена различных сельскохозяйственных культур. Последние результаты в этой области способны помочь созданию новых микроволновых технологий предпосевной обработки зерна и обеззараживания сельскохозяйственной продукции, а также оборудования для их практического применения. Ожидаемые эффекты – увеличение биомассы урожая с сохранением качеств продукции, сокращение сроков денофаз, уничтожение насекомых-вредителей, обеззараживание продукции.

В комплексе возбудителей болезней, поражающих культуры пшеницы, тритикале и злаковых трав одними из наиболее вредоносных являются возбудители корневых гнилей рода *Fusarium* и альтернариоза рода *Alternaria*. Грибы этих родов вызывают болезни проростков, корневые гнили, деструктивные изменения и интоксикацию семян. Они снижают посевные качества семян, развиваются при хранении и перезаражают семена, вызывая их порчу. Изучалось влияние КВЧ-излучения на данные возбудители болезней. Как показали эксперименты, обработка семян КВЧ-излучением оказывала достоверно стимулирующий эффект, всхожесть семян повышалась, снижалась инфицированность семян (Васко, Ермолович, Карпович, Михаленко, Новикова, 2004).

Целенаправленное воздействие КВЧ-излучений на организм позволит управлять многими процессами жизнедеятельности, влиять на параметры роста и развития растений и животных, бороться с болезнями и т.д. (Тамбиев и др., 1987). В пионерских работах отечественных ученых с

фотосинтезирующими объектами (цианобактерии, водоросли, проростки огурцов) выявлена важная роль КВЧ-излучений в растениеводстве: зарегистрированы увеличение показателей роста, биомассы, количество пигментов, экскреции органических соединений, указано на оптимизацию показателей фотодыхания, биоэлектрической активности, интенсивностей поглощения (выделения) ионов K^+ , Na^+ , Cl^- и т.д. (Тамбиев и др., 2000). В итоге появились оригинальные представления о причинах формирования стимулирующих эффектов миллиметровых волн на фотосинтезирующие организмы. Биологическая активность ЭМП будет различной в отношении биосистем, обладающих различной устойчивостью (толерантностью) к действию этого фактора. Известно, что существуют природные биосистемы с очень хрупкой организацией, когда малейшее вмешательство вызывает серьезные нарушения в их функционировании, и на восстановление гомеостаза требуется длительное время. Наряду с внешним воздействием в организме присутствуют внутренние ЭМП, обеспечивая функционирование клеток, межклеточные взаимодействия и функционирование целостного живого организма.