

ДІЯ ФІЗИЧНИХ ФАКТОРІВ

УДК 537.868+577.352.868

О ВОЗМОЖНЫХ ПРИЧИНАХ НАБЛЮДЕНИЯ “РЕЗОНАНСНОГО” ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ НА БИООБЪЕКТЫ

Б.Г.Емец

Харьковский государственный университет, 310077, Харьков, пл. Свободы, 4
Поступила в редакцию 11 мая 1998 г.

Предложен механизм появления реакции биологического объекта в ответ на облучение сверхвысокочастотными электромагнитными волнами “нетепловой” интенсивности. Показано, что биообъект, зафиксированный в ближней зоне излучателя, при облучении разными частотами получает разное количество электромагнитной энергии вследствие наличия пространственных нерегулярных осцилляций значений напряженности поля; при перестройке частоты последние смещаются в направлении распространения волны. В связи с этим, полученные в таких условиях зависимости показателя биологического ответа от частоты не рекомендуется называть “резонансными”.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: биологические клетки, биологические мембраны, электромагнитное поле, сверхвысокие частоты, миллиметровые волны, рупорная антенна, ближняя зона излучателя.

Известны работы, в которых сообщается о наблюдении биологических ответов, вызванных электромагнитным (ЭМ) облучением миллиметрового диапазона волн нетепловой интенсивности; незначительное перестраивание длины волны излучения ведет к резкому изменению показателя биологического ответа (резонансный эффект). (Принято считать нетепловым уровнем интенсивности ЭМ поля такое ее значение, при котором получасовое облучение образца жидкой воды объемом один миллилитр повышает его температуру не более, чем на 0,1 градуса Цельсия). Достаточно полный обзор работ по этой тематике содержится в [1]. Комментируя эти результаты, авторы [1] утверждают, что “ЭМ излучение – не случайный для живых организмов фактор, подобные сигналы вырабатываются и используются в определенных целях самим организмом, а внешнее облучение лишь имитирует вырабатываемые организмом сигналы”. Поэтому, по мнению авторов, “проникая в организм, монохроматическое излучение миллиметрового диапазона волн нетепловой интенсивности на определенных (резонансных) частотах трансформируется в информационные сигналы, осуществляющие управление и регулирование восстановительными или приспособительными процессами в организме”.

Нам представляется, что рассматриваемые экспериментальные результаты могут быть объяснены без привлечения постулата о выработке организмом сигналов

миллиметрового диапазона, об “информационном” механизме влияния микроволн. Наши утверждения основаны на факте существования физического механизма, реализующего заметный биологический эффект даже при столь низких интенсивностях, которые принято называть нетепловыми.

МОДЕЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Литературные источники сообщают, что резонансные эффекты проявления биологического ответа на ЭМ излучение миллиметрового диапазона удобно наблюдать в опытах с микроорганизмами, размещенными в чашке Петри [2,3]. Типичной схемой опыта является используемая в [3], где суспензия спор грибов в физиологическом растворе (толщина слоя 0,5 мм) помещалась под рупором, излучающим микроволны с плотностью потока мощности $0,25 \text{ мВт/см}^2$. Упростим рассмотрение, предложив смоделировать суспензию микроорганизмов как диэлектрические включения, содержащиеся в жидкой воде. Дополним нашу модель учетом наличия воздушных микропузырьков в воде. (Это дополнение является обоснованным, поскольку в воде всегда, помимо растворенного воздуха, присутствует также воздух в свободном состоянии (пузырьки) [4,5]).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что при попадании ЭМ излучения на открытую поверхность жидкой среды, последняя нагревается; создается температурный градиент по толщине. В поле температурного градиента на воздушный пузырек радиуса R действует сила, перемещающая его к более теплой области образца (термокапиллярный эффект) [6]:

$$F_T = -2\pi R^2 \nabla T \cdot d\sigma/dT .$$

(Здесь ∇T - температурный градиент, поддерживаемый вдали от пузырька, σ - коэффициент поверхностного натяжения). Благодаря этой силе, а также силе Архимеда, воздушные пузырьки всплывают и покидают жидкость. Расчет показывает, что для реализации эффективной дегазации воды достаточен незначительный температурный градиент, который легко создается низкоинтенсивным микроволновым облучением. Экспериментально получено, например, что получасовое воздействие трехсантиметровыми радиоволнами с плотностью потока мощности $0,3 \text{ мВт/см}^2$ на образец воды объемом $0,6 \text{ см}^3$ оставляет неизменной его температуру. (Во всяком случае, это подтверждают температурные измерения, выполненные с точностью $0,2$ градуса Цельсия). Тем не менее, это воздействие уменьшило газосодержание образца в 2 раза [7]. Этот факт еще раз подтверждает, что понятие “нетепловая интенсивность ЭМ излучения” не следует понимать слишком буквально. Оценки, выполненные в [7], показывают, что направленное движение воздушных пузырьков в воде может происходить и при температурном градиенте $0,05$ кельвина на метр.

Рассмотрим нашу модельную систему – расположенный на дне чашки Петри тонкий ($0,5 \text{ мм}$) слой воды с диэлектрическими включениями; облучение ведется сверху миллиметровыми волнами с плотностью потока мощности $0,25 \text{ мВт/см}^2$. Такая схема опыта реализована в работах [2,3], где облучение проводилось рупорной антенной с близкого расстояния. Поскольку в миллиметровом диапазоне вода

нагревается сильнее, чем стекло (потери в воде больше), то возникает температурный градиент и, соответственно, движение пузырьков в поле этого градиента. Оценки показывают, что это движение ощутимо и при меньших интенсивностях облучения. Проанализируем, будут ли меняться условия дегазации воды, если перестраивать частоту облучения. Изображение взаимного расположения рупора и объекта в [2,3] демонстрирует, что облучаемый объект находится в т.н. ближней зоне излучения антенны. Эта зона в случае прямоугольного раскрытия $5\lambda \times 10\lambda$ (λ - длина волны) простирается от края излучателя на 25λ [8], что в случае длин волн, используемых в [2,3], составляет около 170 мм. Необходимо заметить, что, согласно электродинамике антенн, ближняя зона характеризуется наличием нерегулярных осцилляций амплитуд напряженности электромагнитного поля (т.н. "тонкая структура") [9]. Результаты соответствующего компьютерного расчета пространственного распределения напряженности ЭМ поля приведены в [8]. Согласно им, изменение частоты излучения приводит к смещению локализации упомянутых максимумов тонкой структуры. Наши расчеты показывают, что если, например, при $\lambda = 6,00$ мм на слой воды в чашке Петри, размещенный на расстоянии 60,0 мм попадает один из максимумов тонкой структуры поля (и нагревает этот слой), то при перестройке длины волны к $\lambda = 6,03$ мм, этот максимум смещается вперед по направлению распространения излучения на 0,3 мм. Поскольку толщина слоя воды составляет 0,5 мм, то такое смещение приводит к резкому уменьшению степени нагревания слоя.

Если в такой схеме опыта снимать зависимость изменения температуры воды от частоты облучения, то при перестройке длины волны оказывается, что в место локализации водного образца будет попадать (из-за передвижения "частотола" максимумов тонкой структуры поля) либо какой-то конкретный максимум, либо "провал" между максимумами. Рассмотрение графика соответствующей частотной зависимости изменения температуры образца может создать иллюзию существования "резонансных" частот, т.е. частот, облучение на которых осуществляет эффективный нагрев. Методически правильно было бы снимать частотную зависимость эффекта, расположив облучаемый объект в промежуточной или в дальней зоне, т.е. там, где напряженность поля не осциллирует, а монотонно спадает с расстоянием от излучателя. Для этого требуется поместить образец на удалении от рупора, превышающем 25 длин волн [8]. К сожалению, в работах [2,3] это условие не выполнено.

Рассмотрим, к каким последствиям для биологических включений, содержащихся в воде, приводит даже незначительное нагревание последней. Для упрощения, в качестве включений рассмотрим клетки. Клетка имеет плазматическую мембрану, через которую осуществляется перенос веществ. Из теории трансмембранного переноса следует, что по обе стороны мембраны расположены довольно тонкие слои неперемешиваемой жидкости (в нашем случае - воды), преодолеть которые обменивающиеся вещества могут лишь по диффузионному механизму [10]. К такому слою, находящемуся снаружи мембраны, непосредственно примыкает слой не столь плотно упакованной воды; его принято называть примыкающим слоем. Если в примыкающем слое отсутствуют гидродинамические возмущения, вещества проходят сквозь него достаточно медленно, по диффузионному механизму. Если же в нем имеются микропотоки, то перенос веществ осуществляется гораздо быстрее. Создателями микропотоков, "перемешивателями" могут выступать воздушные пузырьки, которые начинают двигаться, как только они оказываются в поле температурного градиента. Очевидно,

что чем меньше размеры пузырьков, тем ближе к перемешиваемому слою они могут быть локализованы, тем эффективнее может быть их гидродинамическое влияние в глубине примыкающего слоя, приводящее, в итоге, к повышению скорости трансмембранного переноса веществ. (То обстоятельство, что в воде могут содержаться достаточно миниатюрные пузырьки, подтверждено в работе [5], где сообщено об обнаружении пузырьков радиуса $2 \cdot 10^{-7}$ см).

Как отмечалось выше, в модельном эксперименте [7] незначительный нагрев воды низкоинтенсивными микроволнами приводил к ее эффективной дегазации. В случае, если в воде присутствуют клетки, уменьшение количества микропузырьков, обусловленное дегазацией, изменяет эффективность перемешивания примыкающего слоя и, соответственно, скорость трансмембранного переноса веществ. Это, в конечном счете, приводит к изменениям физиологического функционирования клетки, что может быть наблюдено как биологический ответ на микроволновое облучение.

Незначительный нагрев поверхности жидкости обеспечивает всплывание пузырьков в стоксовом режиме, т.е. достаточно медленно. (Нетрудно показать, что скорость движения пузырька радиуса R при этом равна

$$V = -\nabla T \cdot d\sigma/dT \cdot R/3\eta ;$$

здесь η - вязкость жидкости). Это означает, что процесс дегазации, а, следовательно, и процесс формирования биологического ответа требует достаточно продолжительного времени. Из этих соображений становится понятным отсутствие биологического ответа (изменения коэффициента индукции синтеза колицина) в опытах [2] при 30-минутном облучении низкоинтенсивными микроволнами бактериальных клеток, монотонное возрастание этого показателя при часовой и двухчасовой экспозиции, и выход "на насыщение" при дальнейшем увеличении продолжительности облучения. (Выход на насыщение, по видимому, связан с завершением процесса дегазации по пузырьковому механизму). Этот опыт проводился при температуре 20 °С. Когда же авторы [2] изменили температуру проведения опыта, установив 37 °С, то и 30-минутное облучение обеспечило наблюдение эффекта. В рамках излагаемого здесь механизма это объясняется понижением вязкости жидкой среды при повышении температуры, что увеличивает скорость всплывания пузырьков (скорость дегазации), а, следовательно, сокращает время формирования биологического ответа на ЭМ облучение.

Из вышеизложенного следует, что концепция дегазации водной среды по пузырьковому механизму при облучении может быть использована в качестве основы для объяснения известных в литературе данных относительно наблюдения биологических ответов на воздействие низкоинтенсивными микроволнами.

ВЫВОДЫ

1. Облучение водной суспензии клеток низкоинтенсивными микроволнами приводит к возникновению температурного градиента, что, в свою очередь, обуславливает ее дегазацию по пузырьковому механизму. Дегазация создает возможность формирования биологического ответа на облучение.
2. При облучении жидкого образца в ближней зоне важно наличие совпадения локализации одного из максимумов тонкой структуры распределения напряженности поля с локализацией жидкого образца. Изменение частоты

излучения влечет за собой перемещение локализаций максимумов указанной тонкой структуры; при несовпадении локализации максимума поля с локализацией образца резко уменьшается количество попадающей на образец ЭМ энергии. Поэтому частоты, на которых наблюдаются биологические ответы образца, помещенного в ближней зоне, не могут быть интерпретированы как "резонансные". Говорить о резонансе возможно, если соответствующая частотная зависимость биологического ответа наблюдается на образце, находившемся в промежуточной или в дальней зоне облучателя; здесь напряженность поля не имеет осцилляций, монотонно спадая с расстоянием от антенны. Публикации о таких наблюдениях автору неизвестны.

Автор благодарит Н.Н. Горобца за обсуждение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Девятков Н.Д., Голант М.Б., Бецкий О.В. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности. М. Радио и связь, 1991. 168 с.
2. Смолянская А.З., Виленская Р.Л. // Успехи физических наук. 1973. Т. 110. № 3. С. 458-460.
3. Голант М. Б., Брюхова А.К., Двадцатова Е.А. и др. // Эффекты нетеплового воздействия миллиметрового излучения на биологические объекты (под ред. акад. Н.Д. Девяткова). М. ИРЭ АН СССР, 1983. С. 115-122.
4. Сиротюк М.Г. // Акустический журнал. 1970. Т. 14. № 2. С. 286-290.
5. Бункин Н.Ф., Виноградова О.И., Куклин А.И. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1995. Т. 62. № 8. С. 659-662.
6. Кузнецов В.М., Луговцов Б.А., Шер Е.И. // Журнал прикладной математики и технической физики. 1966. № 1. С. 124-126.
7. Емец Б.Г. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. № 8. С. 22-24.
8. Горобец Н.Н. // Вестник Харьковского университета. Радиопизика и электроника. 1980. № 9. С. 26-34.
9. Уолтер К. Антенны бегущей волны. М. Энергия, 1970. 392 с.
10. Николаев Н.И. Диффузия в мембранах. М. Химия, 1980. 232 с.