

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

Никулин Роман Николаевич
Волгоградский государственный технический университет
nikulin_rn@mail.ru

Биологическая клетка рассмотрена в виде эквивалентной электрической схемы замещения и резонатора. Определены резонансные частоты таких систем. Показано, что собственные частоты электромагнитных колебаний клетки лежат в сантиметровом, миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Приведены результаты экспериментального исследования влияния сверхвысокочастотного излучения низкой интенсивности на злаковые культуры. Объектом анализа выбраны семена пшеницы. Исследовался характер всхожести и роста в зависимости от частоты и времени экспозиции. Выявлены некоторые тенденции в отклике пшеницы на воздействие.

Установлено, что характерной особенностью воздействия ЭМИ на живые организмы является его «резонансный» характер – биологический эффект наблюдается в узких интервалах частот ЭМИ [1]. Живые организмы не гомогенны, а состоят из различных частей, выполняющих те или иные специальные функции. Структурной и функциональной единицей как у растений, так и у животных служит клетка [2,3]. Клетка представляет собой самостоятельную функциональную единицу, а протекающие в организме процессы слагаются из совокупности координированных функций его клеток [4]. Клетки, как и органы, имеют специфическую организацию: каждый вид клеток обладает характерными размерами и формой, по которым его можно распознать [5]. Клетки могут сильно различаться по своим размерам, форме и функциям [2]. Следовательно, частоты, соответствующие собственным резонансам клетки, могут быть различны и лежать в определенном диапазоне электромагнитного спектра.

Исходя из всего вышесказанного, вытекает задача о нахождении собственных частот электромагнитных колебаний различных структур биологических систем.

Поставленную задачу можно решить двумя способами. Во-первых, представить клетку (и группу клеток) в виде электрической схемы замещения, состоящей из сосредоточенных элементов в виде комбинации сопротивлений (R), электрических емкостей (C) и индуктивностей (L), и определить для такой системы резонансные частоты. Во-вторых, рассмотреть биологическую клетку как некоторый резонатор, заполненный диэлектриком, и с точки зрения электродинамики распределенных систем также определить собственные частоты электромагнитных колебаний.

Рассмотрим реализацию первого способа определения резонансных частот клеток с помощью электрической эквивалентной схемы замещения. Хотя такие схемы замещения биологических клеток и их мембран разработаны многими авторами [6 – 10], несмотря на это, практически ни один из авторов не сделал попытку проанализировать предложенную схему.

Клетка представляет собой сложное образование, заключенное в оболочку (мембрану). Приведём данные о значениях геометрических размеров клеток и их составляющих, опубликованные в научной литературе. Радиус клетки (r_c) составляет величину порядка $10^{-6} - 10^{-5}$ м [11 – 13], толщина мембраны $h_m \approx 7.5 - 8.0$ нм [11, 12, 14] и редко превышает величину 10 нм [7], ширина межклеточного пространства $\sim 1 \dots 2 \cdot 10^{-8}$ м, размер глобулярных белков: $2 \dots 10 \cdot 10^{-9}$ м, толщина фосфолипидного слоя: $3 \dots 6 \cdot 10^{-9}$ м [13].

Анализ литературных данных позволяет принять следующие допустимые пределы изменений параметров клетки и ее составляющих:

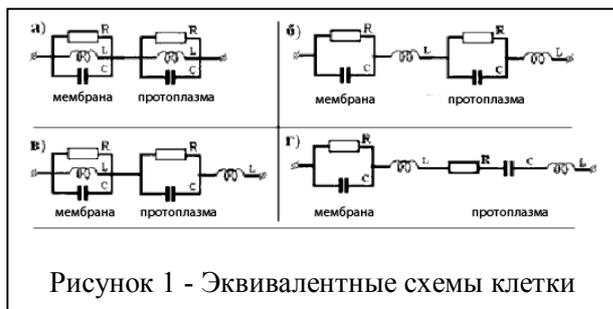
- диаметр клетки $d_c = 2 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-5}$ м,
- ёмкость клеточной мембраны $C_m = 10^{-14} - 2 \cdot 10^{-13}$ Ф,
- электрическое сопротивление мембраны $R_m = 10^6 - 10^{12} - 10^{18}$ Ом,
- электрическое сопротивление протоплазмы клетки $R_p = 10^3 - 10^5$ Ом,
- относительная диэлектрическая постоянная мембраны $\epsilon_m = 2 - 9$,

– относительная диэлектрическая постоянная протоплазмы $\epsilon_p = 40 - 80$.

Приведенные данные позволяют произвести расчет электрических параметров клетки:

1) абсолютные диэлектрические проницаемости клеточной мембраны $\epsilon_{ma} = \epsilon_m \epsilon_0$ и протоплазмы $\epsilon_{pa} = \epsilon_p \epsilon_0$, где $\epsilon_0 = 10^{-9} / 36\pi$ Кл/(В·м);

2) электрическую емкость протоплазмы $C_p = 4\pi\epsilon_{pa} D_c / 2 = 2\pi\epsilon_{pa} D_c$; индуктивности клеточной мембраны и протоплазмы, соответственно, равны $L_m = \mu_0 C_m / \epsilon_0 \epsilon_m$, и $L_p = \mu_0 C_p / \epsilon_0 \epsilon_p$ или $L_p = (D_c / 2)^2 (\epsilon_p \epsilon_0 \mu_p \mu_0 / C_p x^2)$.



Эквивалентную схему замещения клетки можно получить путем последовательного соединения схем для мембраны и протоплазмы. На рис. 1 изображены некоторые эквивалентные схемы клетки. Для каждой из них были получены выражения для определения резонансных частот. Результаты анализа приведенных схем и полученные значения резонансных частот приведены в таблице 1.

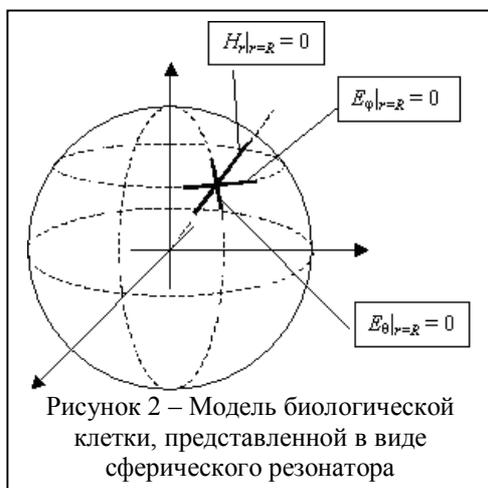
Таблица 1

Диапазон резонансных частот для схем, изображенных на рисунке 1

Схема	Частота ν , ГГц		Занимаемый диапазон
	Минимальная	Максимальная	
1 а	2.987	2204	см, мм и часть субмм
1 б	5.353	133.5	см и мм
1 в	4.258	11350	часть см, мм и субмм
1 г	5.353	133.5	см и мм
Все	2.987	11350	см, мм и субмм

Данные, представленные в таблице 1, показывают, что частоты колебаний клетки занимают сантиметровый, миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны длин волн. Очевидно, что именно воздействие на биологические системы электромагнитными излучениями в указанных диапазонах, окажется наиболее эффективным и приведет к максимальному биологическому отклику (эффекту). Основной вывод заключается в том, что сантиметровый диапазон длин волн (СВЧ – волны) и терагерцовые волны также играют биологическую роль, как и диапазон миллиметровых волн (КВЧ – волны).

Рассмотренное выше представление клетки в виде эквивалентной схемы позволило оценить диапазон частот, в котором могут лежать резонансные частоты. Однако можно ожидать, что более достоверные результаты можно получить, если использовать электродинамические методы расчета резонансных частот клетки. Так, например, в работе [6] биологическая клетка представляется в виде шара, заполненного цитоплазмой. Шар окружен тонкой стенкой, которая и является мембраной. Если рассматривать данную систему как резонатор, то вполне очевидно, что она обладает спектром резонансных частот.



Представим биологическую клетку в виде сферического резонатора (рис. 2), заполненного изотропным диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ϵ , лежащей в пределах от 1 до 81. Будем считать, что радиус клетки может принимать значения в диапазоне от 10^{-6} до 10^{-5} м.

Обоснуем возможность рассмотрения стенок (границ) биологической клетки в качестве проводящих поверхностей. Как отмечается в работах [15 – 19], данное предположение возможно исходя из следующих положений. Липидная мембрана имеет на обеих поверхностях электрический заряд, который обеспечивается полярными головками фосфолипидных молекул. По обеим сторонам мембраны сконцентрированы ионы различных веществ (Na^+ , K^+ , Cl^- и т. д.), которые могут переходить из внешней среды клетки во внутреннюю, и наоборот, создавая при этом электрический ток. Для упрощения теоретических выкладок не учитывались потери на диэлектрике и проводнике, а также не учитывалась анизотропная природа внутренней среды клетки. Следует отметить, что все вычисления проводились для радиуса мембраны 10^{-5} м. В случае, если радиус принять равным 10^{-6} м, то все длины волн уменьшатся в 10 раз. Численные результаты расчета показывают, что резонансные длины волн рассматриваемой системы лежат в интервале от сотых до десятых долей миллиметра, кроме того, резонансные длины волн для Е-колебаний и для Н-колебаний имеют одинаковый порядок. В некоторых работах [11, 20] отмечается, что критические длины волн биоклетки предположительно лежат в основном в миллиметровом, а также в субмиллиметровом диапазоне. Из упомянутых таблиц видно, что максимальные критические длины волн лежат в субмиллиметровом диапазоне. Таким образом, теоретически полученные значения достаточно близко лежат к описываемым в литературе экспериментальным данным. Различие значений на порядок имеет место, по-видимому, в связи с тем, что данная модель биоклетки сильно идеализирована: не учитывались потери на проводниках и диэлектрике, а также не учитывались анизотропные свойства протоплазмы.

Таким образом, можно сказать, что диапазон частот, в котором возможно воздействие электромагнитной энергии на клетку, достаточно широк. Естественно, что если клетки, относящиеся к различным биологическим объектам или его частям, отличаются, для достаточно точного определения диапазона частоты, необходимо знать электрические параметры внутреннего состава клетки и мембраны в отдельности.

Экспериментальная часть работы заключалась в исследовании воздействия СВЧ-излучения низкой интенсивности на зерна пшеницы. На первом этапе работы проводилось выявление характерных частот, на которых происходит резонансное поглощение СВЧ – излучения низкой интенсивности зернами пшеницы. Все измерения производились последовательно для следующих интервалов частот: 2 – 3 ГГц, 3 – 4 ГГц, 4 – 5 ГГц, 5 – 6 ГГц, 6 – 7 ГГц, 7 – 8 ГГц. В результате выявлены следующие характерные частоты: 6.74 ГГц, 6.84 ГГц, 6.91 ГГц, 7.01 ГГц, 7.27 ГГц, 7.44 ГГц. При облучении зерен пшеницы на этих частотах происходит резонансное поглощение энергии СВЧ – излучения. Облучение проводилось на экспериментальной установке, разработанной на базе генератора стандартных сигналов Г4-82, позволяющего получать на выходе калиброванную плотность потока мощности до 5 мВт/см^2 , в диапазоне 5.6 – 7.5 ГГц в любом режиме работы (непрерывной генерации или импульсной модуляции), открытого коаксиального волновода и термисторного измерителя мощности. В качестве объекта эксперимента выбраны непророщенные зерна пшеницы. Оценивалась зависимость показателей всхожести и интенсивности роста облученной пшеницы от частоты облучающего поля при фиксированной величине потока мощности.

В качестве регистрации отклика на воздействие выбрано отношение числа взошедших семян после облучения к числу посаженных семян (всхожесть). Всхожесть в контроле определяется отношением числа взошедших семян в обычных условиях к числу посаженных семян на десятый день после высадки. Так как всхожесть является случайной функцией, зависящей от многих внешних и внутренних факторов, результаты приводятся по отношению к количеству взошедших зерен в контрольной партии, соответствующей данному эксперименту.

Задачей экспериментального исследования являлась проверка базового положения, заключающегося в том, что нетепловые эффекты воздействия ЭМИ СВЧ имеют резонансный характер, т. е. существуют частоты, на которых может существовать как положительное, так и отрицательное воздействие. В результате установлено, что электромагнитное излучение сантиметрового диапазона оказывает на установленных резонансных частотах на зерна пшеницы как негативное (подавляющее всхожесть и интенсивность развития), так и

позитивное (ускоряющее всхожесть и развитие ростков) влияние. При этом биологический эффект проявляется спустя некоторое время после начала облучения.



На рис. 3 приведена гистограмма всхожести пшеницы облученной ЭМИ СВЧ на частоте 7.44 ГГц в % относительно контрольной партии. Такие же закономерности характерны и при воздействии электромагнитного излучения на частотах 6,91; 7,01 и 7,27 ГГц, также относящихся к «активным», хотя дни, когда наблюдается увеличение всхожести, отличаются от приведенных на рис. 3.

Представим в виде таблицы 2 данные о минимальном номере дня высадки семян после облучения ЭМИ для каждой частоты,

в результате которого наблюдалась всхожесть, превышающая всхожесть в контрольной партии на величину, превышающую статистическую погрешность. Анализ гистограмм и результатов, приведенных в таблице 2, показывает, что для каждой из выбранных частот «активного» ЭМИ характерны различные дни высадки, при которых впоследствии наблюдаются максимумы всхожести. Кроме того, можно отметить, что с повышением частоты воздействующего излучения максимум всхожести проявляется при высадке через меньшее количество дней после облучения (смещается влево на диаграммах при увеличении частоты).

Таблица 2

№	Частота ЭМИ, ГГц	Номер дня высадки	Превышение всхожести над контролем, %
1	6.91	6	53,79
2	7.01	5	37,14
3	7.27	3	49,22
4	7.44	3	33,12

В связи с этим возникает предположение о том, что большему кванту энергии (hν) требуется меньше времени для активации биохимических процессов, протекающих в зернах пшеницы. Анализ диаграммы (рис. 3) показывает, что через 3 дня после первого дня высадки, при котором впоследствии наблюдаются максимум всхожести для каждой частоты, следует еще такой же день – номер 7. Такой же эффект наблюдается и на частоте 7,27 ГГц.

Результаты проведенных экспериментов могут служить косвенным подтверждением наличия «памяти» у биологических объектов (в частности, у зерен пшеницы). В случае, если эффект памяти действительно имеет место, то он обязательно будет частотнозависимым.

ЛИТЕРАТУРА

1. Девятков Н.Д., Голант М.Б., Тагер А.С. Роль синхронизации в воздействии слабых сигналов миллиметрового диапазона волн на живые организмы // Эффекты нетеплового воздействия миллиметрового излучения на биологические объекты / Под. ред. академика Девяткова Н.Д. – М., ИРЭ АН СССР, 1983. – С. 7 – 17.
2. Вилли К., Детье В. Биология (Биологические процессы и законы): Перевод с английского/ Н.М. Баевской, Ю.И. Лашкевича, Н.В. Обручевой. – М., Мир, 1975. – 824 с.
3. Васильев Ю.М. Клетка как архитектурное чудо. Ч. I. Живые нити // Соросовский образовательный журнал. Биология. – 1996. – №2. – С. 36 – 43.
4. Васильев Ю.М. Клетка как архитектурное чудо. Ч. II. Цитоскелет, способный чувствовать и помнить // Соросовский образовательный журнал. Биология. – 1996. – №4. – С. 4 – 10.
5. Васильев Ю.М. Клетка как архитектурное чудо. Ч. III. Клетка единая, но делимая // Соросовский образовательный журнал. Биология. – 1999. – №8. – С. 18 – 23.
6. Пресман А.С. Электромагнитные поля и живая природа. – М.: Наука, 1968. – 256 с.

7. Рубин А.Б. Биофизика: В 2-х кн.: Учеб. для биолог. спец. вузов. Кн. 2. М.: Высш. шк. 1987. – 303 с.
8. Чайлахян Л.М. Электрическая структура возбуждаемых тканей и механизм проведения нервного импульса. – Биофизика, 1962, т. 7, вып. 5.
9. Марха К., Мусил Я. Клетка как электрический контур. – Биофизика, 1977, т. 22, вып. 5.
10. Либерман Е.А., Чайлахян Л.М. О природе потенциала действия. – Биофизика, 1959, т. 4, вып. 5.
11. Бецкий О.В., Девятков Н.Д., Кислов В.В. Миллиметровые волны низкой интенсивности в медицине и биологии // Вопросы физической метрологии. Вестн. Поволжск. отдел. метрол. акад. России. Вып. 1. 1999. – С. 44 – 81.
12. Бецкий О.В., Лебедева Н.Н. Современные представления о механизмах воздействия низкоинтенсивных миллиметровых волн на биологические объекты // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 2001. – №3. – С. 5 – 19.
13. Жулев В.И., Ушаков И.А. Исследование электрических процессов в клеточных структурах // Биомедицинская электроника. – 2001. – №7. – С. 30 – 37.
14. Волькенштейн М.В. Молекулы и жизнь. Введение в молекулярную биофизику. – М.: Наука, 1965, – 504 с.
15. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М., Наука, 1989. – 544 с.
16. Опритов В.А. Электричество в жизни животных и растений // Соросовский образовательный журнал. Биология. – 1996. – №9. – С. 40 – 46.
17. Рубин А.Б. Биофизика: В 2-х кн.: Учеб. для биолог. спец. вузов. Кн. 2. М.: Высш. шк. 1987. – 303 с.
18. Чизмаджев Ю.А. Мембранная биология: от липидных бислоев до молекулярных машин // Соросовский образовательный журнал. Биология. – 2000. – Т. 6. – №8 – С. 12 – 17.
19. Чиркова Т.В. Клеточные мембраны и устойчивость растений к стрессовым воздействиям // Соросовский образовательный журнал. Биология. – 1997. – №9 – С. 12 – 17.
20. Бецкий О.В., Голант М.Б., Девятков Н.Д. Миллиметровые волны в биологии. – М.: Знание, 1988. – 64 с. – (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Физика»; № 6).