

О МЕХАНИЗМЕ ДЕЙСТВИЯ МИКРОВОЛН НА ЧЛЕНИСТОНОГИХ

© 2022 г. Б.Л. Ихлов, И.Л. Вольхин, А.Ю. Ощепков

Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614068, Пермь, ул. Букирева, 15

E-mail: okbmayak@psu.ru

Поступила в редакцию 17.09.2021 г.

После доработки 28.10.2021 г.

Принята к публикации 29.10.2021 г.

Целью работы было изучение воздействия слабых микроволн на жесткокрылых и паукообразных (жуки *Stegobium paniceum*, жуки *Nauphoeta cinerea* и клещи *Dermacentor silvarum*). Использовали высокочастотный генератор электромагнитного излучения, облучение проводили как при тепловом уровне плотности потока мощности (0.38 Вт/см^3), так и нетепловом уровне плотности потока мощности (0.25 мВт/см^3 и 0.17 Вт/см^3 , время экспозиции – от двух десятков секунд до суток. Обнаружено, что сверхвысокочастотное поле за время экспозиции гарантированно уничтожает *Stegobium paniceum*, *Nauphoeta cinerea* и *Dermacentor silvarum*, слабое сверхвысокочастотное поле оказывает на жесткокрылых угнетающее действие, некоторые частоты поля с плотностью потока мощности 0.17 Вт/см^3 затормаживают развитие личинок, действие электромагнитного поля резонансной частоты приводит к гибели жесткокрылых и паукообразных.

Ключевые слова: резонанс, ДНК, мощность, энцефалит, температура.

DOI: 10.31857/S0006302922020156

Воздействие электромагнитного поля (ЭМП) на живые организмы достаточно изучено, широко известны, например, работы А.С. Пресмана, Ю.А. Холодова, А.З. Смолянской, Н.Д. Девяткова и др., однако механизм нетеплового воздействия сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения еще слабо изучен. Неизвестно, например, почему одна и та же частота ЭМП действует на клещей, но не действует на насекомых. Так, установлено, что при облучении СВЧ ЭМП малых плотностей потока мощности (ППМ) в течение 5 с пчел, пораженных клещами *Varroa jacobsoni*, от 80 до 100% клещей осыпается с пчел [1]. То есть поле определенной частоты не действует на пчел, но негативно воздействует на клещей.

ЭМП в диапазоне частот 1–4 ГГц и с плотностью потока мощности $10\text{--}30 \text{ мВт/см}^2$ вызывает задержку отрождения личинок из облученных яйцекладок, снижение активности и выживаемости отродившихся особей клеща *Hyalomma asiaticum* [2, 3]. При этом летальное действие нетеплового ЭМП частотой, входящей в диапазон резонансной для воды (2.45 ГГц), отсутствует. Установлено [4], что слабое крайне высокочастотное (КВЧ) ЭМП оказывает как стимулирующее, так и тор-

мозящее воздействие, оно влияет на рост и развитие мучного хрущака *Tenebrio molitor*. Отмечено угнетающее действие низкоэнергетического модулированного СВЧ-излучения с несущими частотами 1 и 3 ГГц, а также широкополосного излучения с частотой 1–4 ГГц на клеща *Hyalomma asiaticum* [5]. СВЧ ЭМП влияет на обучение мучного хрущака [6].

Любопытно, что отдельная пчела реагирует на напряженность поля 1500 В/м , а группа из 100 насекомых – уже на 250 В/м [7].

Дрозофилы фруктовые располагаются по силовым линиям магнитного поля, а после замены гена *CryI* теряют чувствительность к магнитным полям [8].

В исследованиях на *Drosophila melanogaster* выявлено снижение плодовитости и рост смертности при увеличении времени экспозиции в поле волн миллиметрового диапазона [9].

Также исследовано действие ЭМП на Colorado жука (*Leptinotarsa decimlineata*) при мощности излучателя 20 Вт на частоте 2.45 ГГц [10]. Облучали имаго жука, которые были помещены в специальные картонные емкости. Время обработки составляло 4–7 мин с интервалом 1 мин при расстоянии до жуков 10 см . После обработки жуков высаживали на картофель. После 4 мин обработки выживаемость жуков составляла 100%, после 7 мин – 70–80%. Активность самок после

Сокращения: ЭМП – электромагнитное поле, СВЧ – сверхвысокочастотный, ППМ – плотность потока мощности, КВЧ – крайне высокочастотный.

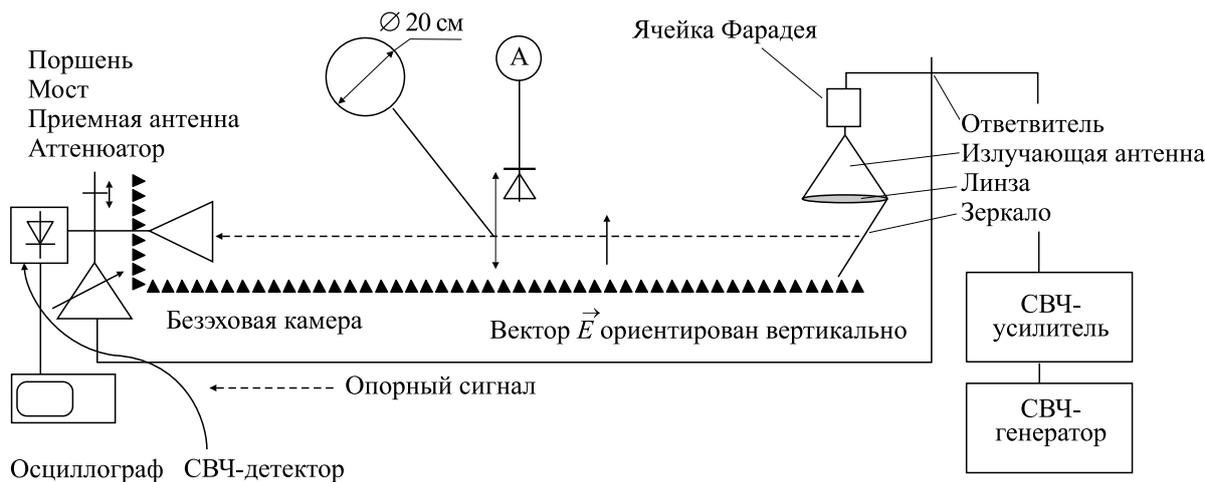


Схема экспериментальной установки.

4 мин обработки – 100%, после 7 мин – 50–80%, резко снижалась плодовитость самок. При температуре 40°C и низкой влажности в первые сутки после обработки СВЧ в течение 4 мин погибли 45% жуков, 5 мин – 45%, 6 мин – 55%, 7 мин – 60%. На вторые сутки погибли 100% при экспозиции 5, 6, 7 мин, при экспозиции 4 мин – 40%. После облучения вес жуков резко снижался (на 35–45%). Обработка самцов в течение 6–7 мин приводила к их полной стерильности.

Очевидно, что тепловой эффект играл роль, но не обязательно главную.

На сходном материале, долгоносики амбарном обыкновенном (*Sitophilus granarius*), был получен сходный результат в работе [10]. Авторы этой работы использовали ту же частоту (2.45 ГГц) и отмечают, что перегрев насекомых до 48–60°C приводит к гибели насекомых. Увеличение времени экспозиции зерна от 5 до 45–90 с повышало число погибших насекомых от 60 до 100%. Температура зерна при этом не превышала 45–50°C.

Авторы указывают, что «молекулярная структура носителей генетической информации представляет собой спиральный резонатор или цепочку большого количества сильно связанных колебательных контуров. В итоге воздействия ВЧ поля генетическая информация не может быть считана, что приводит к потере репродуктивной функции биологического объекта» ([10], сс. 130–131).

Это некорректно. Во-первых, если речь идет о токах в спирали ДНК, т.е. о паразитной емкости соленоида, то соответствующая частота, например, для ДНК человека составляет порядка 10^{24} Гц, что выходит далеко за пределы СВЧ-диапазона [11]. Во-вторых, если речь идет о каких-либо механических колебаниях ДНК жуков, то их частота для этой ДНК, занимающей по длине

промежуточное положение между ДНК бактерий и млекопитающих, далека от частоты 2.45 ГГц.

Объяснение механизмов действия СВЧ ЭМП на паукообразных и жесткокрылых актуально в связи с проблемой дезинсекции пищевых продуктов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для облучения хлебного точильщика использовали микроволновую печь (частота СВЧ ЭМП – 2.45 ГГц), облучение клещей и мраморных тараканов также осуществляли с помощью микроволновой печи (модель LG MW23R35G1B) и на специально созданной экспериментальной установке. Отбирали самок клещей, найденных 11.6.2021–18.6.2021 в лесу близ пос. Жебреи Пермского района.

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке. Источником излучения являлся СВЧ-генератор E82570 1 (Agilent Technologies, США), для усиления сигнала до 1 Вт использовали усилитель мощности 82006A (Agilent Technologies, США). Сигнал с выхода усилителя через направленный ответвитель, ячейку Фарадея и коническую рупорную антенну с диэлектрической линзой падал на СВЧ-зеркало. Использование СВЧ-линзы формировало слаборасходящийся СВЧ-луч, после его отражения от СВЧ-зеркала начиналась дальняя зона излучения. В коаксиальном кабеле с выхода усилителя мощности распространялась волна TEM, которая после коаксиально-волноводного перехода трансформировалась в волну H_{10} . Перед ячейкой Фарадея установлен переход с волновода прямоугольного сечения на волновод круглого сечения, в котором волна H_{10} преобразовывалась в волну H_{11} . Изменяя ток через обмотку соленоида ячейки Фарадея, можно

Таблица 1. Выживаемость *Stegobium paniceum* при облучении СВЧ ЭМП

Среда	В муке ♂	В хлебных изделиях ♀, ♂	В пробирке ♂
Число экспериментов	3	2	1
Число жуков	11	6	4
Время экспозиции, с	20	20	20
Наблюдаемый эффект: гибель, %	100	100	100

было изменять ориентацию вектора напряженности электрического поля внутри безэховой камеры. В экспериментах его ориентация была установлена вертикально. С помощью ориентации СВЧ-зеркала ось распространения СВЧ-луча установили горизонтально вдоль безэховой СВЧ-камеры.

Распределение СВЧ-мощности в вертикальной и горизонтальной плоскости было измерено в дополнительном эксперименте. СВЧ-диод, расположенный на тонком щупе, перемещали в вертикальной и горизонтальной плоскостях внутри безэховой СВЧ-камеры. При малой мощности СВЧ-сигнала детектор работал на квадратичном участке вольтамперной характеристики, и измеряемый ток был пропорционален мощности СВЧ-излучения в точке приема. Установлено, что распространяющийся вдоль безэховой камеры СВЧ-луч имел в сечении форму гауссова пучка. Его сечение на уровне половинной мощности было близко к кругу, диаметр которого составлял 20 см.

В эксперименте мощность излучения СВЧ-генератора составляла 0 дБм, что соответствует 1 мВт. Усиление усилителя мощности 30 дБ, таким образом мощность сигнала на выходе усилителя составляла 1 Вт. С учетом потерь в соединительных кабелях, волноводных переходах, 10% мощности, отведенной с направленного ответвителя, потерь в ячейке Фарадея, антенне, линзе, зеркале и выходе части излучения за пределы сечения луча на уровне половинной мощности плотность потока мощности СВЧ-излучения составляла примерно 2.5 мВт/см^2 . В указанном сечении вектор напряженности электрического поля был ориентирован вертикально, его горизонтальная составляющая была менее 3%, поэтому в этой области СВЧ-излучение представляло волну H_{10} . Приемная пирамидальная СВЧ-антенна, используемая для контроля мощности, была сориентирована соосно СВЧ-лучу на прием вертикально поляризованной СВЧ-волны. Была использована мостовая схема измерения (опорный сигнал, аттенюатор, мост, поршень в проведенных исследованиях не использовали. Они были задействованы для обоснования расчетов плот-

ности потока СВЧ-излучения в пределах сечения пучка половинной мощности).

В экспериментах пластиковый контейнер с облучаемыми клещами, прозрачный для СВЧ-излучения, размещали вместо щупа с диодом в центре пучка СВЧ-излучения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Воздействие СВЧ ЭМП на имаго хлебного точильщика *Stegobium paniceum* СВЧ ЭМП с частотой 2.45 ГГц и нетепловой ППМ 0.17 Вт/см^3 , как показано в табл. 1, приводит к гибели жуков.

Другой тип жесткокрылых, мраморных тараканов *Nauphoeta cinerea*, облучали полем той же частоты при экспозиции 20 с при вариации объемной средней ППМ ЭМП.

Как видно из табл. 2, снижение подвижности жуков наблюдалось при достаточно низкой ППМ.

При увеличении ППМ до 0.38 Вт/см^3 при облучении в течение 20 с наблюдали гибель жуков вследствие теплового эффекта.

Для облучения ЭМП более высоких частот использовали вышеописанную экспериментальную установку. Плотность потока мощности устанавливали десятикратно меньше тепловой, 0.25 мВт/см^2 . Жуков и клещей помещали в прозрачные пластиковые контейнеры с доступом воздуха. Время экспозиции составляло 24 ч. Температура в комнате – $20\text{--}23^\circ\text{C}$, во время эксперимента температура в контейнерах не отклонялась от комнатной. Изменения фиксировали через 20 суток наблюдений.

Таким образом, как видно из табл. 3 и 4, эффект воздействия и на клещей, и на мраморных тараканов резко усиливался при приближении к частоте 8.054 ГГц.

ОБСУЖДЕНИЕ

Очевидно, что в экспериментах при частоте 2.45 ГГц поле воздействует на кластеры воды в организмах жесткокрылых и паукообразных. Однако за 20 с водосодержащие фрагменты *Stegobium paniceum* и *Nauphoeta cinerea* не могут разогреться

Таблица 2. Реакция *Nauphoeta cinerea* на действие СВЧ ЭМП

Стадия развития	Имаго ♀	Имаго ♂	Личинка начальной стадии	Личинка промежуточной стадии
Число жуков	1	1	2	3
ППМ, Вт/см ³	0.038	0.038	0.038	0.038
Число жуков	1	1	2	3
Наблюдаемый эффект: гибель, %	100	100	100	100
ППМ, Вт/см ³	0.01	0.01 Вт/см ³	0.01 Вт/см ³	0.01
Число жуков	1	2	1	5
Наблюдаемый эффект: снижение подвижности, %	100	100	100	100

до летальной температуры. С другой стороны, вода в организмах насекомых или клещей не содержится в чистом виде, она является составной частью гемолимфы. Гемолимфа или жировое тело не могут реагировать на поле с частотой 2.45 ГГц, резонансная частота для них ниже, потому, например, рыжие тараканы или мухи не погибают в микроволновых печах (но, разумеется, не потому, что якобы выбирают точки с минимумом поля). Следовательно, при низких плотностях мощности воздействие является существенно нетепловым.

Тепловой эффект при воздействии СВЧ ЭМП на *Nauphoeta cinerea* имеет место лишь при высокой интенсивности излучения и при достаточном времени экспозиции. При низкой плотности потока мощности и при малом времени экспозиции тепловой эффект отсутствует, однако имеют ме-

сто как летальный результат, так и резкая потеря подвижности.

Таким образом, вопрос о механизме воздействия СВЧ ЭМП с частотой 2.45 ГГц низких плотностей потока мощности на членистоногих остается открытым. Ясно, что эффект проявляется на всех уровнях: молекулярном (генетическом), клеточном, системном (тканевом) и популяционном. Очевиден лишь результат нетеплового воздействия на *Stegobium paniceum* и *Nauphoeta cinerea*.

В случае более высоких частот воздействие СВЧ ЭМП, скорее всего, имеет резонансный характер.

В [12, 13] показано, что СВЧ ЭМП резко снижает выживаемость *E. coli*, *M. avium* и *Mycobacterium tuberculosis* на частотах, резонансных собственным частотам крутильных коле-

Таблица 3. Действие на *Nauphoeta cinerea* СВЧ ЭМП

	Контроль	Эксперимент
Частота, ГГц	–	10
Число жуков	5	7
Изменения, %	0	0
Частота, ГГц	–	9
Число жуков	6	6
Изменения, %	0	0
Частота, ГГц	–	8
Число жуков	8	9
Наблюдаемый эффект: прекращение роста, %	0	100
Частота, ГГц	–	8.054
Число жуков	7	7
Наблюдаемый эффект: гибель, %	0	86

Таблица 4. Действие на *Dermacentor silvarum* СВЧ ЭМП

	Контроль	Эксперимент
Частота, ГГц	–	10
Число клещей	5	5
Изменения, %	0	0
Частота, ГГц	–	9
Число клещей	4	4
Изменения	0	0
Частота, ГГц	–	8
Число клещей	6	6
Наблюдаемый эффект: снижение подвижности, %	0	100
Частота, ГГц	–	8.054
Число клещей	7	7
Наблюдаемый эффект: гибель, %	0	100

баний спирали ДНК бактерий, которые определяются по формуле

$$\omega = 21.75 / \sqrt{BP}, \text{ ТГц}, \quad (1)$$

где BP – число пар нуклеотидов [13].

Прямой эксперимент по поглощению молекулами ДНК бактерий *E. coli* M17 показывает, что максимальное поглощение (7.2%) происходит при частоте генератора, равной собственной частоте крутильных колебаний данных ДНК (10.27 ГГц), рассчитанной по формуле (1). Эти результаты составят предмет отдельного сообщения.

Возбуждение крутильных колебаний в ДНК резко увеличивает число одонитиевых разрывов [14], а также препятствует репликации ДНК, что ведет к гибели клетки.

В состав гемолимфы членистоногих входят аналоги лимфоцитов – амебоциты. СВЧ излучение свободно проникает сквозь хитиновый (или волосяной) покров. Для низких частот гемолимфа насекомых представляет собой проводящую среду, которая поглощает излучение, но для СВЧ гемолимфа (и кровь человека) ведет себя как диэлектрик, поэтому излучение свободно проходит через гемолимфу. В живых клетках отсутствуют молекулы, в спектре которых содержатся СВЧ-линии, единственным агентом, способным поглощать СВЧ ЭМП, являются макромолекулы ДНК. Спектр молекул ДНК складывается из крутильных колебаний ее спирали (что обнаружено группой М.Д. Франк-Каменецкого в конце 1960-х), изгибных и продольных колебаний. Изгибные колебания не могут возбуждаться внешним ЭМП, так как участки молекулы нейтраль-

ны. Частота продольных колебаний лежит в мегагерцовом диапазоне, и только для крутильных колебаний ДНК собственными частотами являются частоты, лежащие в диапазоне СВЧ. Таким образом, поглощение СВЧ ЭМП происходит лишь в молекулах ДНК амебоцитов гемолимфы членистоногих.

Длины ДНК данных клеток колеблются от 500 до 13000 п.о. Собственные частоты крутильных колебаний такой ДНК лежат в диапазоне КВЧ. Однако частота внешнего воздействия, лежащая в диапазоне СВЧ, тоже является резонансной, если частота КВЧ кратна частоте СВЧ. Лежащая в диапазоне КВЧ частота 298 ГГц, соответствующая длине ДНК 5330 п.о., была, как видно из табл. 4 и 5, найдена путем подбора, она с высокой степенью точности кратна частоте 8.054 ГГц.

Как предполагается, воздействие на ДНК амебоцитов резонансной частотой и приводит к гибели паукообразных и жесткокрылых.

Полученные результаты свидетельствуют в пользу того, что при помощи нетеплового электромагнитного излучения возможно не только осуществлять дезинсекцию зерновых, пищевых продуктов или прецизионной техники нетепловым СВЧ-полем, но и подавлять рост численности переносчиков клещевого энцефалита *Dermacentor silvarum* без применения инсектицидов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят за помощь в работе сотрудника ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Пермском крае» к.б.н. Л.М. Львовского.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая работа не содержит описания исследований с использованием людей и животных в качестве объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Р. Д. Риб, *Матководство* (Усть-Каменогорск, 2004).
2. М. С. Буренков, Л. А. Буренкова, Ю. С. Коротков и др., *Радиационная биология. Радиоэкология* **36** (5), 681 (1996).
3. М. С. Буренков, *Радиационная биология. Радиоэкология*. **36** (5), 786 (1996).
4. М. Ф. Шкутин, Дисс. ... канд. биол. наук (ПушГУ, ИБК РАН, Пушино, 2004).
5. В. Г. Каплин и Э. Н. Савельева, *Изв. Самарского научного центра РАН* **13** (1), 251 (2011).
6. И. М. Шейман и М. Ф. Шкутин, *Журнал высш. нерв. деятельности им. И.П. Павлова* **53** (6), 775 (2003).
7. Е. К. Еськов и А. М. Сапожников, *Зоологич. журн.* **5**, 800 (1974).
8. S. J. vanVickle-Chavez and R. N. vanGelder, *J. Biol. Chem.* **282** (14), 10561 (2007). DOI: 10.1074/jbc.M609314200
9. Е. Г. Васильева, *Вестн. Астраханского гос. тех. ун-та* **3**, 182 (2008).
10. В. А. Кutowой, Б. И. Рудяк, Л. А. Базыма и др., *Вопр. атомной науки и техники* **4** (80), 129 (2001).
11. Б. Л. Ихлов, *Вестн. новых мед. технологий* **25** (2), 121 (2018).
12. Б. Л. Ихлов, А. В. Мельниченко и А. Ю. Ошепков, *Вестн. новых мед. технологий* **24** (2), 141 (2017).
13. Б. Л. Ихлов, А. А. Шурыгин и В. А. Дробкова, *Туберкулез и болезни легких* **97** (1), 25 (2019). DOI: 10.21292/2075-1230-2019-97-1-25-27
14. Е. Е. Текуцкая и Р. В. Василиади, *Экология человека* **2**, 9 (2017).

On the Mechanism of Action of Microwaves on Arthropods

B.L. Ikhlov, I.L. Volkhin, and A.Yu. Oshchepkov

Perm State National Research University; ul. Bukireva 15, Perm, 614068 Russia

The aim of this work was to study the effect of weak microwaves on coleoptera and arachnids (*Stegobium paniceum* beetles, *Nauphoeta cinerea* beetles and *Dermacentor silvarum* ticks). A high-frequency generator of electromagnetic radiation was used, irradiation was carried out both at the thermal level of the power flux density (0.38 W/cm^3) and at the non-thermal level of the power flux density (0.25 mW/cm^3 and 0.17 W/cm^3 , the exposure time was from two tens of seconds to a day. It was found that exposure to ultrahigh-frequency field disrupts *Stegobium paniceum*, *Nauphoeta cinerea*, and *Dermacentor silvarum*, a weak ultrahigh-frequency field suppresses coleopterans, some field frequencies with the power flux density of 0.17 W/cm^3 inhibit the development of larvae, and an electromagnetic field exposure to an electromagnetic field resonance frequency is lethal for coleoptera and arachnids.

Keywords: resonance, DNA, power, encephalitis, temperature