

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.2.4>

УДК 621.385.6:537.87

## МИКРОВОЛНЫ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ ПРОТИВ САРАНЧИ И ДРУГИХ ВРЕДНЫХ ЖИВОТНЫХ

В. Е. Запевалов

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Статья поступила в редакцию 2 февраля 2021 г.

**Аннотация.** Во всем мире существует множество фитофагов и других животных, вредных для сельского и лесного хозяйства. Конечной целью борьбы с саранчой и другими вредителями является использование профилактических методов, которые в наименьшей степени нарушают окружающую среду. Это сделало бы сельскохозяйственное производство более эффективным и безопасным во многих регионах, где выращивание сельскохозяйственных культур имеет жизненно-важное значение. Обсуждается возможность использования микроволновых систем для борьбы с вредными животными, вредителями сельского и лесного хозяйства

**Ключевые слова:** микроволны, магнетрон, клистрон, гиротрон, синхронизация, саранча, насекомые, окружающая среда, пестициды.

**Abstract.** There are a lot of phytophagous and harmful animals of agriculture and forestry in the entire world. The ultimate goal in locust control is the use of preventive and proactive methods that disrupt the environment to the least possible extent. This would make agricultural production easier and more secure in the many regions where growing crops is of vital importance. The possibility of using microwave systems to combat harmful animals, pests of agriculture and forestry is discussed

**Keywords:** microwaves, magnetron, klystron, gyrotron, synchronization, locusts, insects, environment, pesticides.

### Введение

Саранча, акридия - несколько видов насекомых настоящего семейства

саранчи (Acrididae), способных образовывать крупные стаи (до сотен миллионов особей), мигрирующих на значительные расстояния. Саранча может истребить все растения на своем пути, и ее нашествие было всегда всеобщим бедствием [1-5]. Особенностью биологии саранчи является наличие двух фаз - одиночной и стадной. Стадные и одиночные фазы, имеют существенные различия, как по внешнему виду, так и по физиологии и характеру поведения. Саранча одиночной фазы обычно имеет защитную окраску, четко определенный половой диморфизм и малоактивный уединенный образ жизни. Насекомые стадной фазы окрашены более ярко и контрастно, ведут себя гораздо активнее, практически нет полового диморфизма. Саранча имеет в своем жизненном цикле несколько стадий (рис.1): яйца (5), затем личинки (2-4), которые линяют 5 раз, и после – взрослые насекомые - имаго (1), у них уже есть крылья. Стадии одиночной фазы практически независимы у разных особей, в то время как для особей стадной фазы стадии в значительной степени синхронизованы. Это стадное поведение усиливается синхронизацией основных этапов жизненного цикла: спаривание, откладка яиц, отрождение, окрыление. Поэтому личинки из плотных залежей кубышек отрождаются одновременно и сразу же начинают образовывать кулиги. После окрыления неполовозрелые имаго формируют стаи.

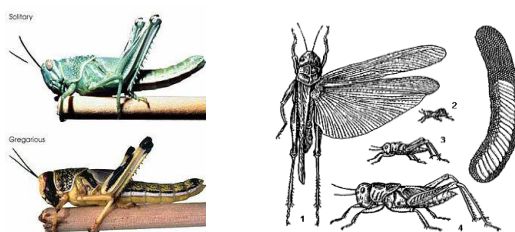


Рис. 1. Стадии развития саранчи.

Внешний вид и внутреннее строение саранчи показаны на рис. 2 и, в общих чертах аналогичное строение имеет большинство насекомых. Насекомые имеют внешний экоскелет (кутикулу) на основе хитина, и внутренние органы белковой природы. Отметим, что их жизненно важные органы находятся близко к поверхности, в отличие от млекопитающих.

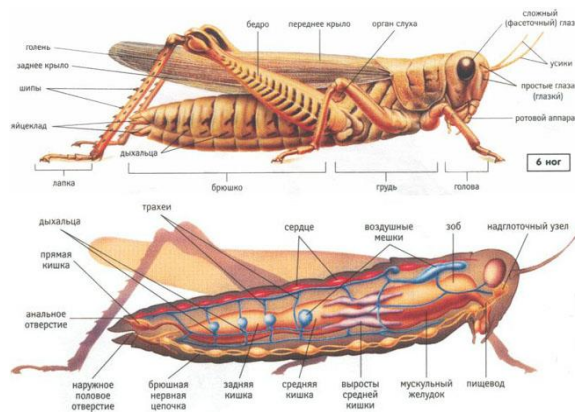


Рис. 2. Строение саранчи.

## 1. Современные методы борьбы с саранчой

Для борьбы с саранчой в настоящее время широко используются только пестициды и механические методы борьбы [1-5]. Массовые нашествия саранчи происходят с периодичностью порядка 10 лет, а зависимость их численности от времени качественно напоминает релаксационные колебания, но в отдельных регионах имеются свои отличия, разные виды саранчи, климатические и погодные условия. По причине большой опасности и причиняемого вреда необходимо держать десятки сельскохозяйственных самолетов в постоянной боевой готовности, хранить на складах тысячи тонн различных инсектицидов. Биологические пестициды также используются для уничтожения этих насекомых. Кроме того используются небольшие решетки, огнеметы, гигантские пылесосы. Все используемые методы негативно влияют на окружающую среду. Предлагается использовать мощные лазеры, высоковольтные и микроволновые ловушки, но все это на уровне проектов.

Растущая опасность нашествий саранчи в настоящее время обусловлена целым рядом факторов, среди которых надо отметить: заметные изменения климата (смещение области распространения саранчи на север), повышение ее резистивности к воздействию пестицидов и биологических продуктов, мутации и появление гибридов саранчи с новыми свойствами, политическая нестабильность в местах обитания насекомых, затрудняющая проведение противосаранчовых операций [5]. Все используемые сегодня методы оказывают крайне негативное воздействие на окружающую среду, население и домашних

и диких животных. Однако и все эти защитные меры вскоре могут оказаться бесполезными. По сообщениям средств массовой информации (СМИ) недавно обнаружены районы, загрязненные марокканской саранчой, с огромной плотностью укладки: на 1 м<sup>2</sup> было до 5 тысяч яиц, тогда как ранее высокой плотностью считалась уже 2-2,5 тысячи яиц на 1 м<sup>2</sup>. Но главное, как сообщалось, в СМИ, то, что обнаруженная саранча была устойчивой ко всем известным средствам химической защиты.

## **2. Использование мощных микроволн**

Задача борьбы с саранчой состоит из двух частей: обнаружение скоплений кладок, личинок или имаго и их последующее уничтожение. Так как температура скоплений активных насекомых заметно выше, чем подстилающей поверхности, то возможно дистанционное обнаружение саранчи по инфракрасному излучению. Радарные и визуальные методы также могут быть использованы. Рассмотрим возможность использования мощных микроволн для борьбы с саранчой и другими вредными животными. Предлагаемый метод не имеет негативных последствий для окружающей среды, населения, диких и домашних животных и растений, не происходит разрыва трофических цепочек и загрязнения местности ядовитыми веществами. Пораженная микроволнами саранча в соответствии с местными традициями может быть использована на корм людей и животных (это ценный источник белка) и как сырье для химической и фармацевтической промышленности. Важным вопросом являются выбор диапазона частот и требуемого уровня мощности для создания специализированных мобильных микроволновых комплексов. Эти условия определяются техническими и экономическими факторами (наличие и стоимость необходимых источников СВЧ-излучения, транспортировка (излучение и распространение) электромагнитных волн). Разумеется, во время непосредственного использования микроволнового излучения должна быть обеспечена надежная защита персонала, населения и с/х животных. Факторы, благоприятные для воздействия микроволн на насекомых, обусловлены тем,

что основной составляющей живых организмов является вода разной степени солености.

Биологическое действие сверхвысокочастотного поля (микроволн) обычно подразделяется на термическое (тепловое) и нетепловое [6-9]. Ограничимся, для начала, термическим воздействием микроволнового излучения, поскольку нетепловое воздействие до настоящего времени предмет дискуссионный, и для насекомых малоизученный. СВЧ-энергия - удобный источник генерации тепла, обладающий для ряда применений несомненными преимуществами перед другими источниками. Такой источник не вносит загрязнений при нагреве, позволяет получить очень высокие скорости нагрева. Для правильной оценки применимости микроволновой энергии в специальных процессах требуется детальное знание свойств материала на различных частотах и на всех стадиях процесса. Пока мы располагаем весьма ограниченными данными о свойствах «материала», но это не препятствует выполнению простых предварительных оценок. Поглощенная мощность и глубина, на которую эта мощность проникает, определяется диэлектрической проницаемостью, частотой и конфигурацией системы [6-10]. Диэлектрическая проницаемость материалов с потерями – это комплексная величина

$$\varepsilon_k = \varepsilon_0 * (\varepsilon - i * \varepsilon_1) = \varepsilon_0 * \varepsilon (1 - i * tg\delta), \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $tg\delta = \varepsilon_1 / \varepsilon$  - коэффициент диэлектрических потерь материала (или тангенс угла потерь).  $d$  – толщина скин-слоя, где поле спадает в  $e$  раз. При малой величине  $tg\delta$  глубина проникновения (в см) определяется простым выражением

$$d = 4.77 / (f * \varepsilon^{0.5} * tg\delta) = 4.77 * \varepsilon^{0.5} / (f * \varepsilon_1). \quad (2)$$

Для простейших и достаточно грубых предварительных оценок можно не учитывать теплообмен с внешней средой, полагать, что вся мощность поглощается в скин-слое, не учитывать отражения и использовать упрощенное уравнение баланса мощностей

$$c * m * \Delta T = P * \Delta t, \quad (3)$$

где в левой части  $c$ -удельная теплоемкость,  $m$  - масса и  $\Delta T$  изменение (рост) температуры нагреваемой среды, а в правой части  $P$  - поглощаемая мощность и  $\Delta t$  время воздействия (экспозиция). Целесообразно рассматривать воздействие на единицу площади (кв.см), тогда  $m=d*\rho$ , ( $\rho$ –плотность,  $d$ -толщина скин слоя),  $p$ -(удельная) плотность поглощаемой мощности

$$c * d * \rho * \Delta T = p * \Delta t. \quad (4)$$

Естественно рассмотреть воздействие на частотах ISM ((ISM - Industrial, Scientific, Medical), а также на довольно часто используемой частоте 95 ГГц. ISM является частью радиочастотного спектра общего назначения, которая может быть использована без лицензирования. Единственное требование для разрабатываемых продуктов в ISM-диапазоне — это соответствие нормам, которые устанавливаются регулируемыми органами для данной части частотного спектра. Эти правила различаются в разных странах. В США нормы устанавливает Федеральная комиссия по связи (Federal Communication Commission, FCC), а в Европе — Европейский институт стандартов.

Основное поглощение СВЧ излучения происходит в водных растворах, главным образом в гемолимфе, которая, по электрическим свойствам, близка к соленой воде. Проводимость гемолимфы определяется, главным образом, наличием ионов натрия, калия, магния и хлора, но их содержание отличается для разных животных и меняется со временем. Разумеется, хотелось бы располагать надежными данными электрических свойств по гемолимфе и других тканях для разных животных, но для приближенных оценок это не критично. Величины  $c$  и  $\rho$  полагаем идентичными воде ( $c=4.2 \text{дж/г}^* \text{к}$  и  $\rho=1 \text{г/см}^3$ ). Зависимости  $\epsilon$  (Dielectric) и  $\epsilon_1$  (Dielectric loss) от частоты (и длины волны) для чистой воды хорошо известны [11], они описываются формулами Дебая и приведены на графике рис. 3 (сплошные линии) для разных температур. Для сравнения  $\epsilon$  и  $\epsilon_1$  в зависимости от частоты и для соленой воды приведены на графике рис. 3 (пунктир) для разных температур. Особо выделена хорошо освоенная «кухонная» частота 2,45 ГГц. На рис. 4 приведены  $\epsilon$  и  $\epsilon_1$  в

зависимости от температуры при разных уровнях солености для частоты 2,45 ГГц. Отметим, что зависимость  $\epsilon$  от температуры принципиально отличается на высоких и низких частотах. Наличие соли сравнительно слабо влияет на поведение  $\epsilon$  при разных температурах и частотах, а на поглощение (т. е.  $\epsilon_I$ ) влияние очень сильное, зависимости качественно меняются. С повышением частоты зависимость от уровня солености уменьшается, и при 100 ГГц и выше этой зависимостью можно пренебречь. В таблицах 1-3 приведены зависимости скин-слоя для разных частот с учетом данных рис. 3-4.

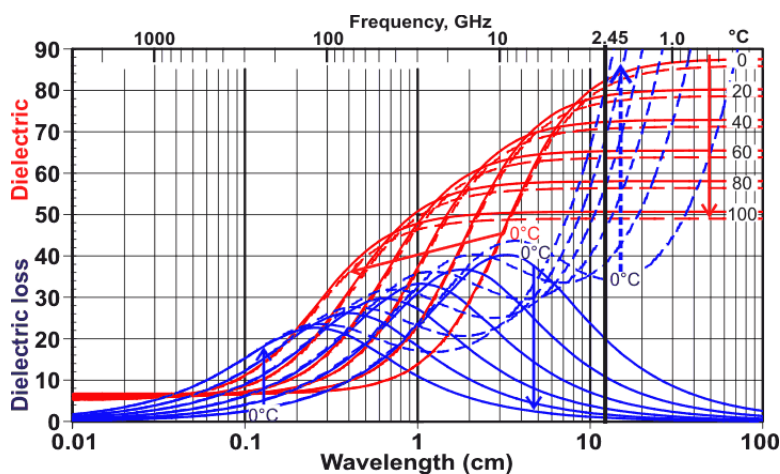


Рис. 3. Зависимости реальной и мнимой (поглощения) части диэлектрической восприимчивости воды от длины волны.  
(сплошные кривые - чистая вода, пунктир — с солью).

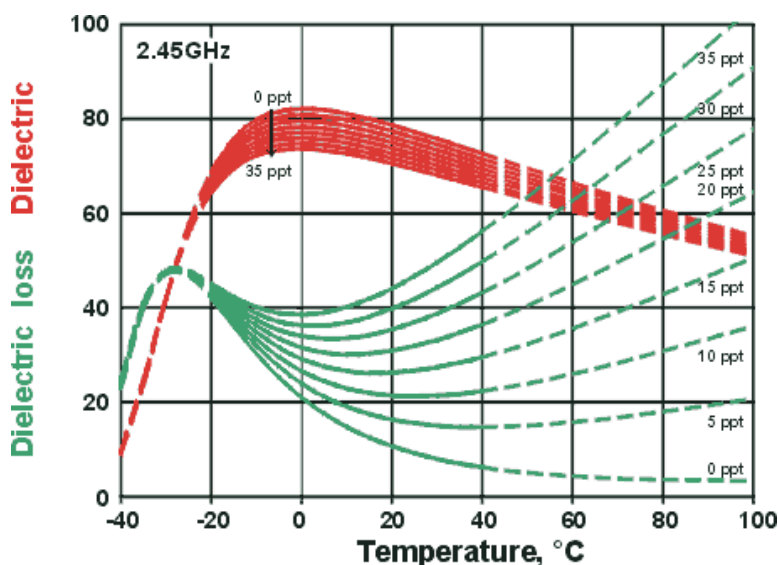


Рис.4. Зависимости реальной и мнимой (поглощения) части диэлектрической восприимчивости воды от температуры.  
(сплошные кривые - чистая вода, пунктир — с солью).

Таблица 1 ( $f=2.45$  ГГц)

$t, ^\circ\text{C}$	0	20	40	60	80	100
$\varepsilon$	83	78	73	65	58	51
$\varepsilon_1$ чистая	20	12	6	4	1.5	1
$\varepsilon_1$ соленая-10ppt	26	21	23	26	32	36
$\varepsilon_1$ соленая-25ppt	35	38	45	55	67	80
$d$ , чистая	0.9см	1.43	2.77	3.94	5.89	13.9
$d$ , соленая-10ppt	0,68см	0,82	0,72	0,49	0,46	0,39
$d$ , соленая-25ppt	0.51см	0.45	0.37	0.29	0.22	0.17

Таблица 2 ( $f=24.125$  ГГц)

$t, ^\circ\text{C}$	0	20	40	60	80	100
$\varepsilon$	15	26	36	51	53	48
$\varepsilon_1$ чистая	26	33	32	26	16	10
$\varepsilon_1$ соленая-25ppt	26	35	36	30	22	17
$d$ , чистая	0,0295см	0,0306	0,037	0,054	0,09	0,137
$d$ , соленая-25ppt	0,0295см	0,0288	0,033	0,048	0,0654	0,0806

Таблица 3 ( $f=95$  ГГц)

$t, ^\circ\text{C}$	0	20	40	60	80	100
$\varepsilon$	7	8	12	17	25	32
$\varepsilon_1$ чистая	7	12	18	24	26	22
$\varepsilon_1$ соленая-25ppt	8	13	18	25	24	23
$d$ , чистая	0.02см	0.012	0.0096	0.0086	0.0096	0.013
$d$ , соленая-25ppt	0.02см	0.012	0.0096	0.0086	0.0097	0.013



Оценим рост температуры и темп роста в скин-слое для разных частот (t=40°C, 10ppm)

$$\Delta T = p * \Delta t / c * d * \rho, \quad (5)$$

$$\Delta T / \Delta t = p / c * d * \rho = 0.24 * p / d. \quad (6)$$

Результаты приведены в таблице 4 ( $\Delta T / p * \Delta t$  темп нагрева в скин слое в градусах °C на (Вт/см<sup>2</sup>\*сек). (При этой грубой оценке не учитываются изменение электрических свойств с температурой, а также не учитывается отражение, зависящее от них.). При мощности от комплекса 100 кВт и апертуре 1 кв.м плотность мощности составит 10 Вт/см<sup>2</sup>. Соответствующие величины  $\Delta T / \Delta t$  приведены в таблице 4. При нагреве на 40°C от начальной 40°C происходит коагуляция белков, и насекомое быстро получает серьезное повреждение. Соответствующие величины  $\Delta t$  приведены в нижней строке таблицы. При температуре превышающей точку кипения происходит дополнительное повреждение от внутреннего давления, кавитации и ударных волн. На самом деле ситуация даже несколько лучше, поскольку имеет место нелинейный эффект «самопросветления» исследованный теоретически и экспериментально и описанный в [12]. Благодаря этому эффекту излучение проникает в жидкость зметно глубже, чем толщина скин слоя, рассчитанная по линейной теории. Дополнительные возможности для поражения насекомых предоставляет модуляция микроволнового излучения на ультразвуковой частоте [6].

Таблица 4

<i>f, GHz</i>	0.915	2.45	5.8	24.125	61.25	95
<i>λ, mm</i>	327,64	122,36	51,688	12,4265	4,895	3,156
<i>d, cm ; 10ppm</i>	1	0.72	0.344	0.038	0,012	0.01
$\Delta T / p * \Delta t$	0.24	0.33	0.7	6.3	20	24
$\Delta T / \Delta t$ (°C /c) <i>P=10w/cm<sup>2</sup></i>	2.4	3.3	7	63	(200), кипение 100C	(240) кипение 100C
<i>Δt до 80°C</i> (сек)	16,6	12	5.7	0.64	0.2	0.16

При **воздействии на стаю** при апертуре 1 кв.м и на дальности 1 км обрабатывается объем 1000 куб.м и при плотности особей  $n=1-10 \text{ м}^{-3}$  за 1 сек можно поразить  $1.5 \cdot 10^3 - 10^4$  шт. на 24,125 ГГц мощностью 100 кВт. Мощность порядка 50-100 кВт представляется оптимальной для создания мобильного комплекса, например, на базе транспортного средства типа «Камаза». Облучение особей происходит спереди и снизу, поражая органы насекомых вблизи скин-слоя. Для скорости стаи 10 м/с (36 км/час) стая пролетает 1 км за 100с, изменяя направление излучения можно поразить  $1.5 \cdot 10^5 - 10^6$  шт. Отраженная и рассеянная СВЧ мощность попадает на другие части стаи. (Поведение стаи в этой ситуации непредсказуемо, возможно она повернет назад, чтобы выйти из зоны воздействия). При использовании нескольких комплексов производительность растет пропорционально. Воздействуя сначала на внешний край стаи, а затем, постепенно уменьшая ее охват можно подавить значительную часть стаи.

Воздействие на **кулиги** производится аналогично, облучение сверху, а также спереди, сзади и с боков. Возможно применение более низкочастотных (т.е. более доступных и дешевых) систем. Плотность особей в этом случае выше, но требуются специальные аппликаторы (антенны) для приповерхностного воздействия с учетом подстилающей поверхности.

Для оценки возможности воздействия на **кубышки** в грунте необходимо рассмотреть возможности проникновения СВЧ в грунт. Для приближенной оценки толщины скин-слоя можно использовать следующую эмпирическую формулу:

$$d \text{ (мм)} = 16 * \rho^{0.5} \text{ (ом*м)} * f^{-0.5} \text{ (ГГц)}, \quad (7)$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление грунта. Типичные примеры удельного сопротивления грунта приведены в таблице 5. Использование высоких частот проблематично на некоторых грунтах (типа мокрой глины), однако экспозиция не является жестко лимитированной. Таким образом, можно рассмотреть использование сравнительно низких частот - 2.45 ГГц и ниже. Вследствие малого объема яиц в кубышках и более высокой проводимости их материала

(автор, к сожалению, не располагает количественными достоверными данными) должен иметь место избирательный нагрев содержимого кубышек. Представляет также интерес работа по мерзлому грунту, проводимость которого существенно ниже.

Таблица 5

Тип грунта	Удельное сопротивление, Ом*м
Графитовая крошка	0,1
Вода морская	0,2
Глина влажная	20
Солончак	20
Ил	30
Вода прудовая	40
Глина подсыхающая (полувлажная)	60
Мел	60
Торф	60
Чернозем	60
Бетон	100 - 1000
Влажный песок	130 - 400
Каменный уголь	150
Супесь	150
Гравий	300 - 800
Сухой песок	800 - 4000
Поверхностный	3000 - 5000
Щебень (мокрый - сухой)	3000 - 5000
Кварц	15000
Гранит	до 22000
Вечномерзлый суглинок	20000
Вечномерзлый песок	50000

Поглощение микроволн водой и другими составляющими биологических тканей приводит к их нагреву и коагуляции белков, что влияет на яйцевые капсулы, кулиги (личинки), стаи (имаго). Все жизненно важные органы насекомых находятся близко к поверхности (см. рис.2 и [1-3]), в пределах скин-слоя, в отличие от позвоночных, где 83% энергии СВЧ излучения поглощается верхним слоем кожи. Таким образом, на первый взгляд, предварительные оценки выглядят довольно оптимистично. Однако для более достоверных результатов необходимы дополнительные теоретические и экспериментальные исследования, которые желательно планировать и проводить в кооперации с квалифицированными специалистами по борьбе с насекомыми.

Поглощение микроволнового излучения в воздухе (атмосфере) при расстояниях порядка 100-1000 м не является существенным фактором, что

делает предпочтительным использование ISM (0,915, 2,45, 5,8, 24,125 ГГц и т. д.) частот, выделенных для промышленных, научных и медицинских приложений. Рассмотрим далее возможность использования некоторых микроволновых источников с высоким уровнем выходной мощности в непрерывном (CW) и длинно-импульсном режиме.

### **3. Промышленные магнетроны и клистроны, комплексы на их основе**

Магнетроны являются в настоящее время основными источниками микроволновой энергии в промышленных процессах [14-15]. Особенности микроволнового нагрева в значительной мере определяются глубиной проникновения поля в материал. Например, на частоте 2,45 ГГц в воде глубина -3-5 см, бетоне до 30 см, резине 5 - 10 см., металлах – 10 мкм.

В работе [16] описываются проведенные в США по просьбе представителей ряда африканских стран лабораторные исследования по воздействию излучения магнетрона на насекомых. Описаны основные поражающие факторы: нагрев, кипение (генерация пара), кавитация и ударные волны при импульсном воздействии. Результаты исследований согласуются с приведенными выше теоретическими оценками и выглядят обнадеживающе. По итогам первоначальных исследований предлагалось использовать магнетрон мощностью 100 киловатт CW или импульсный с частотой повторения 5-10 Гц и установленный на вертолетах. Согласно оценкам, на расстоянии трех миль фокусная область будет примерно 4-5 метров. Предполагалось, что вес специального устройства в вертолете в основном будет равен весу генератора, который составляет от одной до двух тонн. Основная стоимость генератора линейно зависит от выходной мощности в киловаттах. При стоимости приблизительно 1000 долларов за киловатт, устройство на 100 киловатт будет стоить всего 100 000 долларов. Несколько вертолетов, по оценкам авторов, могли бы обработать одну квадратную милю примерно за 2-3 минуты с расстояния 2-3 мили. Работа была закрыта правительством США под воздействием ВПК и спецслужб.

За прошедшие годы использование микроволновых технологий существенно расширилось, а технические показатели источников улучшились при снижении их стоимости. Несмотря на это, ограничения в использовании микроволновой энергии в промышленных процессах все еще обусловлены ее высокой стоимостью: 1 кВт системы - 1-2 тысячи \$, а также технической сложностью. Решением проблемы является комбинация нескольких «печных» магнетронов мощностью 1-2 кВт. Стоимость компонентов такого комплекта для 1 кВт порядка 100 \$. Дополнительные аргументы за: повышение надежности, доступность и низкая стоимость компонентов, удобное управление мощностью, воздушное охлаждение, простота электропитания. Имеется возможность синхронизации и подстройки частоты магнетронов, например для использования ФАР.

До настоящего времени в качестве источника микроволновой энергии в промышленности применялись в основном магнетроны, но благодаря появлению высокоэффективных многолучевых клистронов (МЛК) ситуация стала меняться [13, 14, 17]. МЛК превосходят магнетроны по мощности (особенно в сантиметровом диапазоне), долговечности, надежности, характеристикам электромагнитной системы и при этом требуют более низких питающих напряжений. Кроме того они не уступают магнетронам по КПД и могут работать на рассогласованную нагрузку. Например, МЛК работающий на частоте 2.45 ГГц имеет выходную мощность на уровне 25 кВт при КПД более 65 %, анодном напряжении 8 кВ и долговечности более 20 тысяч часов [17]. Важным остается вопрос стоимости источников и вспомогательного оборудования.

Таким образом, мобильные магнетронные или клистронные комплексы (например, на частоты 0,95 и 2,45 ГГц) с полной мощностью порядка 100 кВт могут использоваться в мобильных комплексах против скоплений личинок и против стай имаго, однако в последнем случае предпочтительны более высокие частоты.

#### 4. Гиротроны и комплексы на их основе

Гиротрон представляет собой мощный электровакуумный прибор - источник электромагнитных волн на частотах от 5 до 1000 ГГц с типичными величинами выходной мощности от десятков Вт до 1-2 МВт [13, 14, 18, 19], и вполне пригодны для наших целей. Гиротронные комплексы с требуемыми параметрами уже существуют и их производство освоено рядом промышленных предприятий России, США, Японии и ЕС. Упомянем в этой связи 95 ГГц / 100 кВт / CW гиротрон (СРІ, США) для работы в специальном комплексе нелетального оружия совместно с магнитной системой на основе сухого (без криожидкостей «LHe-free») криомагнита с полем до 3,5 Тл. Комплекс является достаточно мобильным и компактным [19]. Очевидным препятствием для широкого использования таких систем против вредных животных является их высокая цена. Без большого ущерба для функциональности рабочая частота может быть снижена (например, до 24,125 ГГц) с существенным упрощением системы и уменьшением стоимости. При этом возможно использование обычных магнитных систем с жидкостным охлаждением или на основе постоянных магнитов [13, 18-22]. Пример подобной системы с частотой около 30 ГГц был недавно разработан в КНР.

Представляется перспективным использование в таких комплексах высокоэффективных гиротронов на гармониках циклотронной частоты [19-22]. На рис. 5 приведены фотография и зависимости выходной мощности и КПД от тока экспериментального 25 ГГц гиротрона на второй гармонике гирочастоты [21]. Построение на этой основе опытно-промышленного гиротрона с частотой 24.125 ГГц, мощностью непрерывного излучения порядка 100 кВт и магнитной системой с водяным охлаждением представляется вполне реальной задачей для электронной промышленности. Использование рекуперации остаточной энергии отработанного электронного пучка позволяет увеличить КПД гиротронов до 50% и более [13, 14, 18, 19], что особенно важно для мобильных систем.

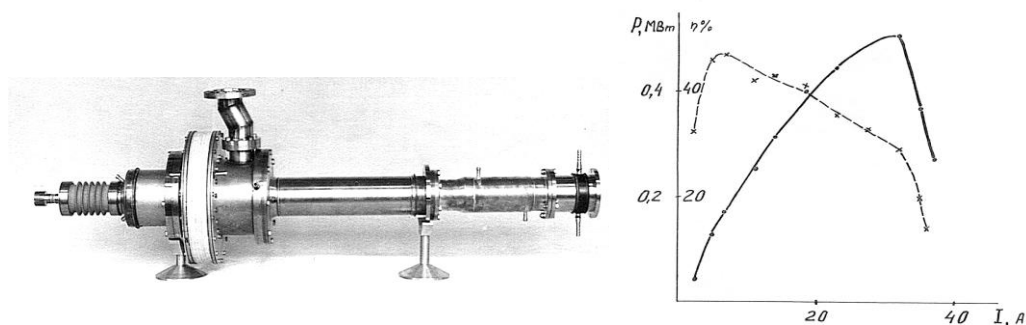


Рис. 5. Фотография и зависимости выходной мощности и КПД гиротрона от тока пучка.

Использование новых технических решений и материалов, разработка и использование новых магнитных систем создает предпосылки для успешного применения гироскопов в мобильных наземных и авиационных комплексах.

### Заключение

Средства массовой информации в последнее время сообщают о назревающих вспышках саранчи в Индии, центральной и южной Африке и других регионах, которые могут привести к нехватке продовольствия для миллионов жителей. В конце февраля 2020 года ООН предупредила о повышенном количестве пустынной саранчи, которая распространяется по Восточной Африке и Южной Азии. Это нашествие - крупнейшее за последние 25 лет. Насекомые уже уничтожили урожаи в Сомали, Эфиопии и Кении - странах, которые особенно сильно зависят от сельского хозяйства. Проблема не ограничивается Африкой: стаи саранчи встречаются также в Саудовской Аравии и Пакистане. Отдельные вспышки имеют место в южных регионах России, средней Азии и Казахстана. Для борьбы с этим бедствием (и последствиями этой борьбы для окружающей среды) выделяются огромные средства правительствами стран в этих регионах и международными организациями. В этой связи необходимо отметить, что:

1. Использование мощных микроволн - перспективное средство борьбы с саранчой и другими вредными животными.
2. Для воздействия на яйца и личинки целесообразно использовать высокоэффективные магнетроны, клистроны и гиротроны на ISM

частотах. На стадии имаго явные преимущества имеют гиротронные системы.

3. Мобильные российские и международные силы, оснащенные современным микроволновым оборудованием, могут решать проблему борьбы с саранчой и другими вредными животными в глобальном масштабе без ущерба для окружающей среды.
4. Микроволновые системы могут использоваться и против других фитофагов вредителей сельского и лесного хозяйства (огневки, короеды, древесные черви, термиты, тропические муравьи и т. д. [2]).
5. Микроволновые системы также могут использоваться для отпугивания птиц и млекопитающих (мышей, крыс, волков и т. д.) из нежелательных мест (аэропортов, зернохранилищ, складов и т. д.).

Статья написана по материалам лекции, прочитанной на XVII Международной зимней школе-семинаре по радиофизике и электронике сверхвысоких частот», Саратов, 5–10 февраля 2018 [23], и докладов: на Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, 2017 [24], на 10-м международном симпозиуме «Сильные микроволны и терагерцовые волны: источники и приложения» ("Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications"), Нижний Новгород - Москва, 17-22 июля 2017 г.), на 28й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Россия, 9-15 сентября 2018г. [25], 3rd International Conference Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications. October 22 - 25, 2018· Nizhny Novgorod, Russia [26]. Обсуждение этого материала выявило перспективные возможности сочетания микроволнового воздействия с микробиологическими методами борьбы с насекомыми и поставило на повестку дня ряд новых задач в области радиофизики, СВЧ-электроники и микроволновой биофизики.

### **Благодарности**

Автор признателен А.М.Сергееву, М.Ю.Глявину, М.С.Гитлину (ИПФ РАН), Д.И.Трубецкову (СГУ), А.С.Совлукову (ИПУ РАН), В.П.Бессчетнову (НГСХА),



Я.П.Лобачевскому, И.Г.Смирнову (ВИМ), А.К.Лысову (ВИЗР), Е.М.Купрееву (Минсельхоз РФ), Шиваму Шарма (Dr. Shivam Sharma, Минсельхоз Индии) за внимание к работе и конструктивную критику.

### Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-79-30071).

### Литература

1. Бей-Биенко Г.Я., Мищенко Л.Л. *Саранчевые фауны СССР и сопредельных стран*. В 2-х ч. Москва, Ленинград, изд-во АН СССР. 1951.
2. Resh V.H., Carde R.T., ed. *Encyclopedia of Insects*. Academic Press. 2009. 1169 p.
3. Steedman A., ed. *Locust Handbook* (3rd edition). Chatham: Natural Resources Institute. 1990. 204 p.
4. Uvarov B. *Grasshoppers and locusts, Volume I*. Cambridge: University Press. 1966. 481 p.
5. Sharma A. Locust Control Management: Moving from Traditional to New Technologies – An Empirical Analysis. *Entomol Ornithol Herpetol*. 2014. Vol.4. No.1. P.1000141. <https://doi.org/10.4172/2161-0983.1000141>
6. Макаров П.А., ред. *Лекции по биофизике*. Изд. Ленинградского университета. 1968. 478 с.
7. Пресман А.С. Действие микроволн на живые организмы и биологические структуры. *Успехи физических наук*. 1965. Т.86. Вып.2. С.264-302.
8. Девятков Н.Д. Применение электроники в медицине и биологии. *Электронная техника*. Сер. СВЧ-техника. 1993. №1(455). С.66–76.
9. Miklavcic D., Pavselj N., Hart F.X. *Electric Properties of Tissues*. Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering. John Wiley & Sons. 2006. P.1-12.
10. Bykov Yu.V., Rybakov K.I., Semenov V.E. High-temperature microwave processing of materials. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2001. Vol.34. R55-R75.
11. Hasted J.B. Liquid water: Dielectric properties. In: *Water. A comprehensive*

- treatise*. Vol. 1, ed. by Frank F. New York, Plenum Press. 1972. P.255-309.
12. Князев В.Ю., Косый И.А., Малых Н.И., Ямпольский Е.С. Проникновение микроволнового излучения в воду (эффект «самопросветления»). *ЖТФ*. 2003. Т.73. №11. С.133-136.
13. Tsimring Sh.E. *Electron beams and microwave vacuum electronics*. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2007.
14. Цимринг Ш.Е. *Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков*. Нижний Новгород, ИПФ РАН. 2012. 576 с.
15. Старец Я.А. Перспективы развития генераторов магнетронного типа и их применение. *Вакуумная СВЧ электроника: сборник обзоров*. Нижний Новгород, Институт прикладной физики РАН. 2002. 160 с. С.36-38.
16. Warren J. Hamerman. Electromagnetic pulsed waves can kill locust swarms. *EIR Science & Technology*. 1998. Vol.15. No.16. P.26-29.
17. Гельвич Э.А., Жарый Е.В., Закурдаев А.Д., Пугнин В.И. Многолучевые клистроны. Тенденции развития. *Вакуумная СВЧ электроника: сборник обзоров*. Нижний Новгород, Институт прикладной физики РАН. 2002. 160 с. С.54-61.
18. Thumm M. *State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers*. KIT Scientific Publishing. 2015.
19. Запевалов В.Е. Эволюция гиротронов. *Изв. Вузов. Радиофизика*. 2011. Т.LIV. №8-9. С.559-572.
20. Запевалов В.Е., Малыгин С.А., Цимринг Ш.Е. Гиротроны на второй гармонике циклотронной частоты. В книге: *Гиротроны*. Горький, ИПФ. 1980. С.171-187.
21. Запевалов В.Е., Малыгин С.А., Цимринг Ш.Е. Мощные гиротроны на второй гармонике циклотронной частоты. *Изв. Вузов. Радиофизика*. 1993. Т.XXXIII. №6. С.543-551.
22. Kuftin A.N., Flyagin V.A., Lygin V.K., et al. 5.8-62 GHz cw gyrotrons with warm and permanent magnets for technological application. *Proc. of Int. Workshop "Strong Microwaves in Plasmas"*, August 2-9, 1999. N. Novgorod, 2000. P.671-

676.

23. Запевалов В.Е. Микроволны высокой мощности против саранчи и других вредных животных. *Материалы 17 Международной зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот*. Саратов, 5-10 февраля 2018. С.78.
24. Крапивницкая Т.О., Глявин М.Ю., Песков Н.Ю., и др. Перспективные приложения мощного СВЧ излучения в задачах воздействия на органические материалы и биологические объекты. *Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ»*. Санкт-Петербург 28-31 мая 2018 г. С.133-135. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29680038>
25. Zapevalov V.E. Strong microwaves against locust and other harmful animals. *EPJ Web Conf. 10th International Workshop 2017 “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications”*. 2017. Vol.149. No.149/1. P.119-120. <https://doi.org/10.1109/TED.2017.2664106>
26. Zapevalov V.E. Strong microwaves against locust and other harmful animals. *Proceedings of the 27th International Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2017)*. Sevastopol, Russian Federation, September 10—16, 2017. P.1459-1465.
27. Zapevalov V.E. Strong microwaves against locust and other harmful animals. *3rd International Conference Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications (TERA-2018)*. Nizhny Novgorod, October 22 - 25, 2018. EPJ Web Conference. 2018. Vol.195. P.10015. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201819510015>

**Для цитирования:**

Запевалов В.Е. Микроволны высокой мощности против саранчи и других вредных животных. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.2.4>