



TERRA INCOGNITA



ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СПЕКТРА

— И зачем нужны эти Ваши электромагнитные волны, господин Максвелл?

— Не знаю, быть может, когда-нибудь на основе этих волн будут делать игрушки.

Из научной дискуссии¹

Теория электромагнитных волн, разработанная выдающимся английским физиком **Джеймсом Клерком Максвеллом** (1831–1879) во 2-й половине XIX века, позволила единым образом подойти к описанию радиоволн, света, рентгеновских лучей и гамма-излучения. Оказалось, что это не излучения различной природы, а электромагнитные волны с различной длиной волны. Частота ν колебаний электрического и магнитного полей связана с длиной волны λ соотношением: $\nu = c / \lambda$, где c — скорость света. Радиоволны, инфракрасный, видимый и ультрафиолетовый свет, рентгеновские лучи и гамма-излучения

¹ Диалог, якобы произошедший между **Максвеллом** и одним из членов Королевского общества, несмотря на отсутствие документального свидетельства, вполне правдоподобен. Известно, что английский учёный с раннего детства был окружён различными «научными игрушками» (например, «магическим диском» — предшественником кинематографа, моделью небесной сферы, волчком-«дьяволом» и др.), что сыграло важную роль при выборе будущей профессии.

находят своё место в единой шкале (спектре) электромагнитных волн (рис.1). Имея общую природу, они характеризуются различными способами возбуждения и регистрации, по-разному взаимодействуют с веществом.

Освоение спектра частот электромагнитных колебаний происходило постепенно: открывались и совершенствовались источники и приёмники излучений, разрабатывались средства управления и передачи, выяснялись возможности практического применения. Каждый спектральный диапазон имеет свою историю, своих первооткрывателей, свои области применения. В разное время, в зависимости от успехов или неудач изобретателей и учёных, одним участкам спектра уделялось боль-

его пределах длины волн в вакууме составляют от 1 до 10 мм. Соответствующий диапазон частот (30–300 ГГц) называют *крайне высокими частотами* — **КВЧ**. Этот участок долгое время оставался слабо освоенным, и ещё в середине XX века многие учёные называли его «*terra incognita*» — неведомой землей электромагнитного спектра.

Впрочем, совсем без внимания миллиметровые волны не оставались никогда. Ещё на заре радиотехники, в начале XX века были изобретены устройства, позволявшие генерировать электромагнитные колебания с широким спектром, включающим в себя и миллиметровые волны.

Выдающегося успеха в исследовании электромагнитных волн

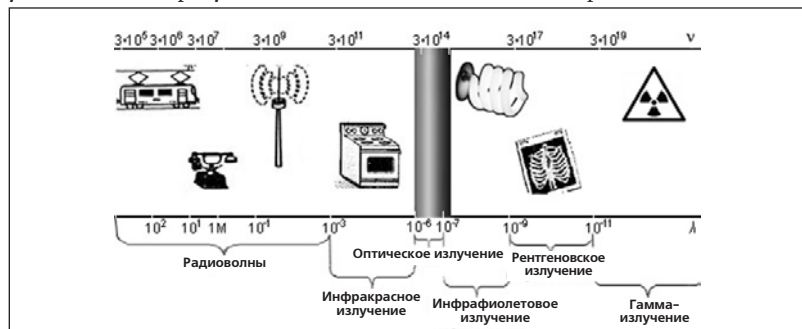


Рис. 1 Шкала электромагнитных волн: вверху показана частота в Герцах, внизу — длина волны в метрах

ше внимания, другим — меньше.

Ближе к началу спектра — между радиоволнами и инфракрасным излучением — расположен весьма любопытный участок, который получил название *миллиметровый диапазон*, поскольку в

достиг русский физик **Петр Николаевич Лебедев** (1866–1912). В 1895 г. он получил с помощью усовершенствованного вибратора **Герца** волны длиной 6 мм, которые, как сам он писал, «...ближе к более длинным волнам теп-

лового спектра, чем к электрическим волнам, которыми вначале пользовался Герц...». С такими волнами Лебедев получил все «оптические» явления — интерференцию, поляризацию, отражение, преломление и даже двойное преломление в призме, вырезанной из кристаллической серы. Все устройства и приспособления, собственноручно сделанные Лебедевым для этих опытов, представляют собой замечательный образец экспериментального искусства своего времени (рис. 2).

Дальнейшие исследования показали, что электромагнитные волны миллиметрового диапазона существенно отличаются по своим свойствам от «соседей» — радиоволн и инфракрасного излучения. С этой спецификой связаны и технические сложности, возникавшие на пути учёных и изобретателей, осваивавших миллиметровый диапазон. Проблемы, прежде всего, связаны с передачей электрического сигнала на расстояние.

В обычной линии электропередачи, которая тянется от мачты к мачте через поля и леса, часть мощности тратится на излучение, но частота колебаний так мала (50 Гц), что эти потери почти незаметны.

На частотах чуть выше (порядка нескольких килогерц) излучение уже вполне заметно. Но его можно уменьшить, пользуясь двухжильной линией передачи, как это делается при телефонной связи. Однако при дальнейшем повышении частоты излучение вскоре снова становится слишком сильным. На частоте от нескольких килогерц до нескольких тысяч мегагерц электромагнитные сигналы и электромагнитная энергия обычно передаются по коаксиальным линиям, т.е. по проводу, помещённому внутри другого цилиндрического проводника.

При прохождении по коаксиальному кабелю сигналы также подвергаются ослаблению. Причин тому несколько. Это и диэлектрические потери в материале, не-

обходимом для поддержания внутреннего проводника; потери из-за сопротивления изоляции, обусловленные ограниченным диаметром внутреннего проводника и, наконец, потери на всё то же излучение, поскольку коаксиальный кабель действует как антенна. И опять же: все составляющие потерь возрастают с увеличением частоты сигнала. При правильном подборе сечений и материалов для изготовления кабеля можно добиться приемлемого уровня этих потерь, однако, кабели становятся всё более толстыми и жёсткими.

В конечном итоге, начиная с частот примерно 10^{10} Гц, приходится совсем отказаться от использования коаксиального кабеля и пустить сигнал через полую металлическую трубку, обычно прямоугольного сечения, называемую *волноводом*. Стоимость волноводов — из-за сложной технологии изготовления — значительно выше, чем кабеля, и иметь дело с ними весьма хлопотно. В отличие от кабеля, волноводы нельзя изгибать в произвольном направлении, необходимо использовать стандартные изогнутые секции. При монтаже схем применяются разнообразные волноводные элементы: тройники, мосты, ответвители. Волноводы соединяются торцами и крепятся специальными зажимами (рис.3).

Электромагнитная волна по волноводу распространяется без потерь лишь при условии: $\lambda/2 < a < \lambda$ и $b < \lambda/2$, где a и b — размеры широкой и узкой сторон прямоугольного сечения волновода, соответственно. Так что на каждый сравнительно узкий диапазон длин волн необходимо иметь свой комплект волноводных элементов.

Для генерации, приёма и усиления миллиметрового излучения используются весьма сложные приборы. Измерения на КВЧ требуют применения нестандартных методов, а также особо тщательного контроля параметров.

В сравнении с другими участками электромагнитного спектра,



Рис. 2. Элементы приборов П.Н. Лебедева



Рис.3. Волноводы для миллиметрового диапазона

миллиметровый диапазон осваивался медленнее, хотя всегда представлял несомненный интерес как для практического применения, так и для фундаментальной науки.

Весьма маленькая длина волны даёт возможность сформировать узкий пучок радиоволн при сравнительно небольших геометрических размерах антенн. Это позволяет осуществить направленную передачу сигналов с низким уровнем помех, большой дальностью, скрытностью передачи, высокой точностью радиолокационного определения координат объектов и др.

Высокая несущая частота сигналов делает возможной эффек-

тивную многоканальную телефонную связь и многоканальную передачу широкополосных телевизионных сигналов высокого качества за счёт увеличения полосы частот.

Проникновение волн части КВЧ диапазона сквозь толщу атмосферы Земли позволяет использовать этот диапазон для передачи информации через спутники, в астрономии и космонавтике.

Неудивительно, что значительная доля исследований в области миллиметровых волн имеет сугубо практическую направленность и проводится под эгидой военных ведомств. Публикации по этой тематике редко попадают в открытый доступ. Однако в данном направлении проводятся и фундаментальные научные исследования. Методами *микроволновой спектроскопии*, успешно изучаются важные свойства вещества. Так в миллиметровой области спектра расположены вращательные полосы молекул, спектры возбуждения квазичастиц в кристаллах, переходы электронно-го парамагнитного резонанса.

И всё же, исследования, связанные с изучением свойств миллиметровых волн, особенностями взаимодействия с веществом, а также их применением, долгое время оставались уделом ограниченного круга учёных и инженеров. Это направление считалось хотя и перспективным, но узкоспециальным.

Резкий всплеск интереса научной общественности к миллиметровым волнам неожиданно возник в середине 60-х годов XX века, когда две независимые группы исследователей в СССР и Канаде случайно открыли необычное свойство миллиметровых волн влиять на микроорганизмы. Об этом шла речь в статье «Реальная физика фантастических лучей» («Страна знаний» № 3, 2011 г.).

То, что электромагнитное излучение может влиять на живые системы, было известно давно. Тема «Электричество и Жизнь» берёт своё начало ещё с классических опытов Луиджи Гальвани. Мно-

гие знаменитые учёные изучали влияние на биологические объекты электрических полей, сначала постоянных, затем переменных. Переменные поля высокой напряжённости очевидным образом должны взаимодействовать с живой тканью, насыщенной полярными молекулами воды. Колебания напряжённости внешнего поля возбуждают колебания молекул, что приводит к нагреву ткани, иногда значительному (вспомните микроволновую печь!). Помимо нагрева, интенсивные поля, как переменные, так и постоянные, могут влиять на электрические процессы

Чтобы лучше понять сущность удивительного феномена, обратимся к легендарной кривой **Грундлера-Кальмана** — зависимости скорости роста клеток дрожжей от частоты действовавшего на них излучения (рис. 4). Этот график, отражающий результат многолетней кропотливой работы двух немецких биофизиков, представляет собой пример исключительно честного и беспристрастного исследования. Судите сами — скорость роста на каждой из 100 частот облучения измерялась, по меньшей мере, пять раз. В каждом отдельном эксперименте процесс

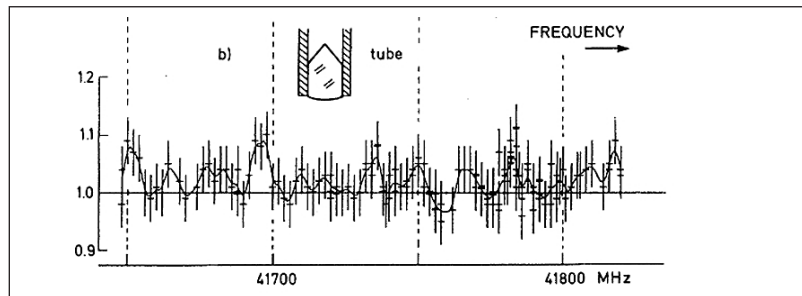


Рис.4 Зависимость скорости роста дрожжевых клеток от частоты излучения. (W.Grundler, F.Keilmann // «Phys.Rev.Letters», 1983, v.51, N 13).

нервной системы, транспорт ионов, кровотоков. Давно замечено, что обслуживающий персонал радиолокационных станций (РЛС) чаще обычного жалуется на самочувствие.

Однако биологические эффекты миллиметровых волн плохо укладывались в сложившиеся представления о возможных механизмах взаимодействия электромагнитных волн с живыми объектами. Во-первых, мощность этих полей составляла милливатты и меньше, так что о нагреве не могло быть и речи. Во-вторых, живые организмы достаточно быстро (в течение минут или часов) реагировали на воздействие, в отличие от, например, персонала РЛС, накапливающего свои проблемы годами. И главная, наиболее интригующая черта: **обнаружилась неожиданно сильная зависимость произведенного эффекта от длины волн.**

размножения дрожжей непрерывно фиксировался в течение нескольких часов (Для большей точности необходимо было проследить несколько циклов деления, а у дрожжей время одного цикла составляет около 90 минут). Данная зависимость показывает эффект, произведенный облучателем определенной формы. Другая — очень похожая кривая и примерно с тем же количеством точек — соответствует другой геометрии облучения.

Главной особенностью приведенной кривой является резкая зависимость скорости роста от частоты. Относительное изменение значения v всего на 0.01 % приводит к изменению знака эффекта. Сама зависимость в окрестности «активной» частоты напоминает кривую резонанса.

Ещё один важный результат немецких биофизиков — зависимость биологического эффекта от поглощённой мощности — де-

монстрирует существенную нелинейность. Реакция возникает при некотором, очень небольшом, значении мощности, и не меняется при дальнейшем её увеличении. Такое поведение характерно для электронных переключателей — триггеров — устройств, обладающих способностью длительно находиться в одном из двух устойчивых состояний и чередовать их под воздействием внешних сигналов.

«Триггер», «резонанс» — термины радиотехнические. Поэтому неудивительно, что первые модели, предлагавшиеся для объяснения феномена, основывались на аналогиях с радиотехническими системами. Так, предполагалось существование в живой системе некоего подобия приёмо-передающего радиоустройства, работающего в диапазоне КВЧ. Приёмником и передатчиком служат биологические мембраны, а встроенные в них белковые молекулы играют роль антенн. *«Резонанс» возникает в случае совпадения частоты внешнего переменного поля с собственной частотой колебательного контура клетки.*

Радиотехнические аналогии — не единственные, с помощью которых учёные пытались описать загадочный феномен. В другом подходе предлагался механизм по типу фотохимической реакции. Известно, что некоторые жизненно важные процессы (например, зрение) связаны с поглощением кванта энергии молекулой-пигментом. Возбуждённая молекула запускает химическую реакцию, чем приводит в действие сложную цепочку процессов, заканчивающуюся подачей нервного импульса на определённый участок мозга. Совсем непросто оказалось найти тип химических реакций, скоростью которых можно было бы управлять с помощью электромагнитного излучения КВЧ. Оценки показали, что, в принципе, такие реакции могут проходить с участием свободных радикалов либо крупных металлосодержащих белков.

Эти и другие модели давали только качественное объяснение наблюдаемым эффектам. Теоретические же расчёты показывали их несостоятельность. Камнем преткновения оказалась так называемая *«проблема kT »*, сущность которой сводится к следующему.

Энергия кванта излучения $h\nu$ в миллиметровом диапазоне гораздо меньше энергии теплового излучения kT (здесь k — постоянная Больцмана). Даже для длины волны $\lambda = 1$ мм $h\nu = 1.17 \cdot 10^{-5}$ эВ, тогда как при комнатной температуре $kT = 2.53 \cdot 10^{-2}$ эВ. Энергия кванта в рассматриваемом диапазоне частот оказывается существенно меньше не только энергии электронных переходов (1...20 эВ), но и колебательной энергии молекул (10^{-2} ... 10^{-1} эВ), а также энергии водородных связей (10^{-2} ... 10^{-1} эВ). Из приведенных оценок следует, что не существует простых процессов, способных объяснить заметное влияние миллиметровых волн на жизнедеятельность организмов. Любые из известных элементарных механизмов поглощения миллиметрового кванта энергии оказываются несущественными на фоне тепловых флуктуаций.

Ещё более осложняют ситуацию «резонансы» в спектрах биологического действия миллиметровых волн. Конечно же, некая изолированная молекула может теоретически иметь полосу поглощения нужной ширины, например, на вращательном переходе. Однако, в плотном окружении других молекул да ещё при комнатной температуре, спектральная полоса поглощения многократно расширится — любые признаки резонансов исчезнут. В микроволновой спектроскопии узкие резонансные полосы поглощения регистрируются только для разреженных газов или при очень низкой температуре.

Именно узкие «резонансы» привлекали самое пристальное внимание учёных. Как уже отмечалось, само использование термина

«резонанс» предполагает наличие у биологической системы неких собственных частот. Возникло ощущение, что эффекты миллиметровых волн выявили новое фундаментальное, внутренне присущее всему Живому, свойство. Так же, как и любой атом, имеющий свою собственную структуру энергетических уровней и свой неповторимый спектр, каждый живой объект, реагируя только на избранные длины волн, должен характеризоваться уникальной системой энергетических уровней и спектром собственных частот. Подобно *«Атласу спектральных линий химических элементов»*, в недалёкой перспективе виделось создание *«Атласа характеристических частот живых организмов, населяющих Землю»*...

Как показали дальнейшие исследования, к большому разочарованию учёных, резонансная реакция возникала далеко не всегда. Более того, результаты экспериментов, выполненных разными группами исследователей на одинаковых объектах, часто оказывались противоречивыми. В опытах с бактериями и другими одноклеточными организмами получались не только количественно, но и качественно различающиеся данные. Высказывалось обоснованное предположение, что резонансные эффекты миллиметровых волн на уровне изолированной клетки носят случайный, невоспроизводимый характер. Идею с «Атласом характеристических частот...» пришлось отложить на неопределённый срок.

В 90-х годах прошлого века, когда постсоветская наука пребывала в кризисе, создалась трагикомическая ситуация: представители учёного мира увидели в миллиметровых волнах своеобразную «палочку-выручалочку». Правдами и неправдами раздобыв заветный генератор, старшие и младшие научные сотрудники принимались облучать все доступные им объекты: воду, органические и неорганические

кие растворы, семена растений, бактерии, микробы, грибы, личинки, насекомых и т.п., с целью обнаружить хоть какой-нибудь эффект. Методике эксперимента и контролю параметров уделялось мало внимания. «*Terra incognita*» превратилась в мифическую *Страну Эльдорадо*, завоевание которой сулило научную славу и материальное благополучие. Именно на этот период приходится множество публикаций, отличающихся весьма невысоким научным уровнем. Как тут не вспомнить о немецкой скрупулезности **Грюндлера** и **Кальмана!** Множество разрозненных и непроверенных фактов породили не меньшее количество интерпретаций и толкований, что никак не добавило ясности в общую картину.

Впрочем, по мере усложнения организма ситуация выправлялась. На уровне человека эффекты миллиметровых волн проявлялись достаточно четко, настолько, что они послужили основой для разработки новых методов диагностики и терапии. Термин «характеристические частоты» в медицинской практике прижился.

В конечном итоге, на сегодняшний день не существует общепринятой физической модели, способной непротиворечиво объяснить всю совокупность проявлений действия миллиметровых волн на живые организмы. Что, впрочем, не мешает выдвигать всё новые и новые концепции относительно роли электромагнитных полей в нашей жизни.

Ещё в середине XX века, в первую очередь, благодаря запросам радиолокации, с высокой точностью был измерен спектр поглощения земной атмосферы. Оказалось, что в миллиметровом диапазоне спектра имеются две узкие полосы с максимумами 5 мм и 2,5 мм (60 и 120 ГГц, соответственно), обусловленные поглощением молекул кислорода (рис.5). Т.е., электромагнитное излучение соответствующих длин волн внеземного происхождения (например, длинноволновой

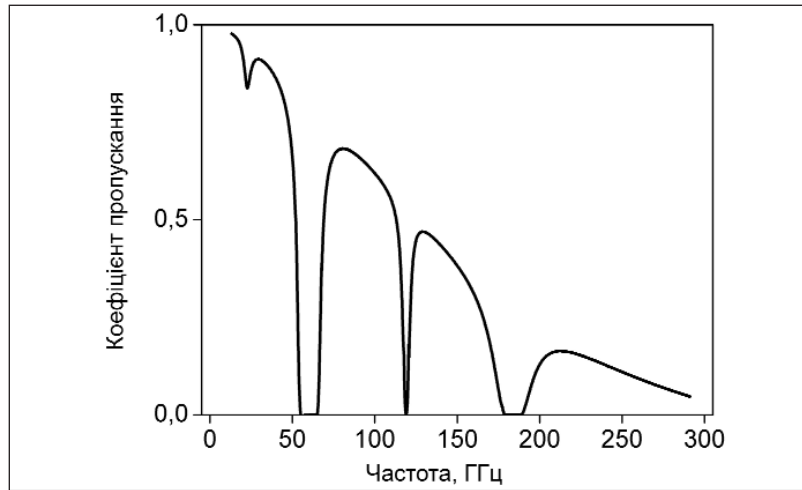


Рис.5 Вертикальное пропускание земной атмосферы в диапазоне КВЧ

части теплового излучения Солнца) не достигает поверхности Земли. Поэтому живые организмы в процессе эволюции не приобрели естественные механизмы приспособления к электромагнитным колебаниям в этом диапазоне, обусловленным внешними причинами. С другой стороны, полное отсутствие в окружающей среде волн некоторых частот могло эволюционно привести к возникновению «выделенного канала» связи для живых организмов или их клеток. Поэтому искусственное облучение миллиметровыми волнами организмов как бы имитирует некий, понятный им сигнал. На этих соображениях выстроена концепция «информационного воздействия излучения на живой организм».

Миллиметровый диапазон давно перестал быть «неведомой землей» электромагнитного спектра. В последние годы миллиметровые волны находят всё более широкое применение в системах связи наземных пунктов с искусственными спутниками Земли, в системах межспутниковой связи. Рабочие частоты мобильных телефонов неумолимо приближаются к диапазону КВЧ. В связи с качественным изменением нашего электромагнитного окружения возникает естественное беспокойство. Как отреагирует живой организм на поступающие к нему со всех сторон сигналы? Какой сигнал — «положительный» или «отрицательный» он выберет из общего потока, и будет руковод-

ствоваться им в процессе жизнедеятельности? На эти и другие вопросы мы попытаемся ответить в наших последующих публикациях.

PS. Может показаться удивительным, но обнаружить эффект воздействия миллиметровых волн на живые клетки (например, дрожжи) совсем нетрудно. Причём для этого не нужен промышленный генератор КВЧ. Воспользовавшись идеями П.Н.Лебедева, можно смастерить необходимый прибор самостоятельно. Для этого следует поместить искровой разрядник внутри короткого отрезка волновода или просто металлической трубки нужного сечения. Искровой разряд, получающий энергию от обычной батарейки, генерирует электромагнитные волны в очень широком диапазоне частот. В этом можно убедиться по характерному потрескиванию радиоприёмника, вблизи которого возникает электрическая искра. Волновод выполняет функцию фильтра, выделяющего волны только определённой длины. Конечно, мощность таких волн будет слишком низкой для приборной регистрации, но живые клетки могут их ощутить и отреагировать, например, небольшим замедлением скорости деления.

А.В. Якунов,

кандидат физико-математических наук
доцент кафедры оптики
физического факультета
КНУ имени Тараса Шевченко
E-mail: yakunov@univ.kiev.ua