

О МЕХАНИЗМЕ СЕЛЕКТИВНОГО БИОЛОГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ МИКРОВОЛНОВОГО И ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.Б. Ошурко

Институт общей физики РАН им. А.М. Прохорова

vbo08@mail.ru

Поступила 24.03.2015

Кратко анализируются известные физические механизмы поглощения микроволнового и терагерцового излучения. Показано, что основным механизмом биологического действия может быть только простой равновесный нагрев среды. Однако, в случае неоднородных сред не исключен также эффект "пространственного селективности" (различный нагрев различных частей системы). Показано, что нелинейная (возрастающая) зависимость диэлектрических потерь в воде от температуры может обеспечить положительную обратную связь между температурой и коэффициентом поглощения излучения. Это положительная обратная связь может значительно усиливаться в областях, имеющих хоть немного больший коэффициент поглощения. Так, разница в 0,01% может приводить к различию температуры порядка десятка градусов. Такой эффект, в принципе, позволяет избирательно воздействовать отдельные клетки заданного сорта или внутриклеточные органеллы и, тем самым, обеспечивает возможность селективного контроля биологических систем.

УДК 539.938, 577.3

В настоящее время хорошо известно, что практически единственным возможным механизмом воздействия электромагнитного излучения таких частот (1 ГГц – 100 ТГц) чисто тепловой, иначе говоря – простой нагрев облучаемой области. Тепловые эффекты микроволнового излучения даже используются в медицине (например, в онкологии) как способ создания локальной «гипертермии», т.е. области повышенного нагрева. Вместе с тем, непрерывно появляются сообщения о некотором более «таинственном» действии такого высокочастотного излучения на человека. Даже если отбросить наивные журналистские измышления о якобы «страшном» вреде мобильных телефонов

или использовании излучения спецслужбами, остается большое количество вполне обоснованных научных сообщений со стороны биологов.

Так, например, в ряде случаев наблюдается усиленная пролиферация (размножение) клеток [1], усиленное производство ферментов или других белков [2], или же, наоборот, конформационные переходы в белках [3], либо при незначительном нагреве, либо при практически полном отсутствии заметного теплового эффекта. Здесь обычно очень важна постановка эксперимента. Как правило, выводы о нетепловом механизме действия излучения обосновываются следующим образом. При воздействии например, непрерывного микроволнового излучения просто регистрируется температура образца (суспензии клеток, пленки и т.п.) и наблюдается специфический выход какого-либо агента (белка) или какой-то специфический биологический эффект. Затем, в контрольном эксперименте образец нагревают с помощью внешнего источника до той же температуры и обнаруживают, что эффекта нет или же он очень мал. На основании такого сравнения делаются выводы о нетепловом механизме воздействия.

Но каким же может быть такой механизм? Достаточно ли обоснованы приведенные выводы о нетепловом механизме? Рассмотрим это подробнее. Собственно целью настоящей работы и является анализ таких возможностей.

Есть и еще одно странное обстоятельство. Как известно, в настоящее время (2012-2015) на Западе чрезвычайно популярны исследования в терагерцевом диапазоне частот – число работ растет лавинообразно. Однако, число работ, посвященных действию терагерцевого излучения на биологические объекты поразительно мало! Даже работ в области микроволн во много раз больше.

Молекулярные механизмы поглощения. Итак, рассмотрим возможные механизмы воздействия. Биологический объект – организм, клетка и т.п. – прежде всего молекулярная система, подчиняющаяся всем законам физики. Поэтому сначала рассмотрим все возможные физические механизмы поглощения излучения молекулами в таком диапазоне частот. Молекула – объект существенно квантовый и подчиняется законам квантовой механики. В соответствии с квантовой механикой, для того, чтобы произошло поглощение, энергия кванта излучения должна быть равна разнице между энергетическими уровнями молекулы. Иначе говоря, излучение должно быть резонансно какому-то типу внутримолекулярного движения со своей лестницей энергетических уровней. Какие виды движения известны в молекуле? Их три: вращения молекул, внутримолекулярные колебания и электронные движения, иначе называемые электронными переходами. Для этих движений давно установлен так называемый принцип Борна-Оппенгеймера. В соответствии с этим принципом, энергии соответствующих движений (а, значит, и разница между соседними уровнями) выстроены так: энергии электронных переходов много больше энергий колебательных движений, а энергии колебательных, в свою очередь, много больше энергий вращений. В шкале энергий это (грубо) выглядит следующим образом: электронные переходы: $1,0 \dots 10 \text{ эВ}$, колебания: $0,01 \dots 1,0 \text{ эВ}$, вращения: $0,01 \dots 10^{-6} \text{ эВ}$.

Теперь сравним: энергия кванта микроволнового излучения с частотой около 1 ГГц составляет несколько микроэлектронвольт (т.е. 10^{-6} эВ). Это важная информация для наших целей. Это означает, что микроволновое излучение в принципе не способно возбуждать непосредственно электронные переходы или молекулярные колебания. Химические реакции, практически всегда связаны с электронными переходами и/или колебаниями. Иначе говоря, никакие химические реакции (вопреки бытующему мнению!) таким излучением напрямую вызываться не могут: просто не хватит энергии.

Единственный вид движения, которому может быть резонансно такое излучение – молекулярные вращения. В самом деле, в газах, где молекулы практически не связаны друг с другом, наблюдают хорошо разрешенные линии вращательного поглощения. Но в конденсированных средах – к которым относятся биообъекты – ситуация

существенно иная. Сильное взаимодействие между близко расположенными молекулами приводит к тому, что энергии состояния зависят от ближайшего окружения и линии переходов сильно «размываются» – это так называемое неоднородное уширение. Для нас это означает лишь то, что получив квант возбуждения, молекула меньше, чем за период вращения передает часть энергии возбуждения соседям, они – дальше и т.п. В итоге, за короткое время (меньше периода вращения и даже периода колебания) вся энергия возбуждения перераспределяется по всем доступным степеням свободы системы в пропорциях, определяемых (грубо) Больцмановским распределением. Это и есть просто нагрев! Итак, резонансное поглощение, например, вращательными переходами может приводить только к нагреву системы.

Но может существовать какой-то более простой классический механизм поглощения такого излучения? Действительно, это – хорошо известное поглощение ионами. (Правда, также известно, что свободный заряд не может поглощать электромагнитное излучение в отсутствие третьего тела – не выполняются законы сохранения импульса и энергии одновременно. Однако, в конденсированных средах этой проблемы нет – третье тело всегда найдется). Несколько огрубляя, можно представить этот механизм следующим образом. Заряд, например, ион в растворе под действием излучения испытывает периодическое действие кулоновских сил со стороны электрической компоненты волны. В итоге, ион начинает совершать «колебания», приводящие к столкновению с окружающими молекулами. В столкновениях кинетическая энергия иона передается окружению, что означает, как и прежде, просто нагрев. Заметим, что молекула воды, обладающая большим дипольным моментом, в рамках этого механизма тоже может рассматриваться просто как два связанных иона, что тоже приводит к простому равновесному нагреву.

Таким образом, мы приходим к неизбежному заключению: единственным возможным механизмом воздействия на биологические объекты является чисто тепловой механизм.

Пространственная селективность. Но тогда получается, что должна быть какая-то методическая ошибка в биологических работах, констатирующих нетепловой характер воздействия. Так ли это? Сходная ситуация, как оказывается, уже была в другой области – в области т.н. «лазерной химии», популярной в семидесятых-восьмидесятых. Тогда также пытались выявить нетепловые химические процессы, вызываемые лазерным излучением. Традиционная постановка эксперимента была очень сходной – в эксперименте регистрировали температуру образца (чаще всего – термпарой), наблюдали получающиеся при лазерном воздействии химические продукты, а затем сравнивали с продуктами простого нагрева (пиролиза) при той же температуре. Продукты почти всегда оказывались разными из чего делался вывод о нетепловом характере лазерного воздействия. Однако, довольно быстро выяснилась причина разницы в продуктах химических реакций: как оказалось продукты чаще всего соответствовали пиролизу, но при значительно более высоких температурах. Тривиальная причина этого – формирование областей с повышенной температурой вследствие «неоднородностей» лазерного излучения во времени и пространстве (т.н. «горячие точки»). Сразу заметим, что никаких горячих точек в микроволновом излучении нет и с этой стороны подход биологов совершенно корректен. Тем не менее, эффект «горячих точек» позволил развить совсем нетривиальный подход в лазерной химии.

Дело в том, что «неоднородности» теплового поля могут быть вызваны не только горячими точками излучения, но и «пространственными неоднородностями» самого образца. Поставим теперь вопрос так: а зачем нужно (или чем интересно) именно нетепловое воздействие излучения? Ответ прост: для возможности управления протекающими процессами. Нетепловой процесс в самом общем случае означает

нетепловое, т. е. неравновесное («небольцмановское») распределение энергии по степеням свободы системы. Это значит, что у нас появляется возможность «селективного», т.е. избирательного воздействия на систему. В частности, становится возможным избирательно воздействовать на один объект не, затрагивая другой. Именно такие процессы были обнаружены группой, в которую входил автор этих строк, на примере инфракрасного лазерного стимулирования неравновесных химических реакций в нитрате целлюлозы в зависимости от надмолекулярной структуры (конформации) полимера. Суть явления состоит в том, что если есть какая-либо неоднородность структуры (кристаллический участок в клубковом полимере, микропримесь с иным сечением поглощения и т.п.), то нагрев такой структуры оказывается неравновесным – отличающимся от нагрева окружения.

Если предположить, что нечто подобное принципиально возможно и при микроволновом или терагерцевом воздействии на биообъекты, то открывается совершенно новый взгляд на возможность нетепловых *селективных* процессов в биообъектах, которые можно вызывать микроволновым излучением.

Надмолекулярное поглощение. Что же может быть такой «неоднородностью» в случае биологического объекта? Собственно, любой элемент – клетка, органелла клетки, большая макромолекула и т. п., имеющая коэффициент (сечение) поглощения, отличающийся от окружающей среды. Как показывают экспериментальные работы, в микроволновом диапазоне есть довольно сильные линии резонансного поглощения колебаниями крупных макромолекул или клетки в целом.

На рис.1 показан спектр микроволнового поглощения вируса *influenza A* в буферном растворе из работы [4]. Как можно видеть, при исключении спектра раствора, имеет место пик поглощения с частотой около 12 ГГц . Для примера сравним со спектром *энтеровируса 71* (рис. 2). Оба вируса отличаются прежде всего размером и формой. Как видно из рисунков, спектр энтеровируса обнаруживает широкий пик около 45 ГГц . Как видно из рис. 3, не только в области десятков гигагерц, но и в области единиц гигагерц обнаруживаются пики поглощения вирусов. На рисунке приведен спектр Мандельштам-Бриллюэновского рассеяния света на кристалле вируса *табачной мозаики*. Обращает на себя внимание тот факт, что и в этом случае наблюдается пик около 12 ГГц , хотя размеры вирусов существенно разные: вирус *influenza A* имеет грубо сферическую форму с диаметром $180\text{-}200 \text{ нм}$, тогда как вирус табачной мозаики ближе к цилиндрическому образованию длиной около 300 нм и диаметром $18\text{-}20 \text{ нм}$.

Тем не менее, природа поглощения здесь отличается от рассмотренных выше молекулярных механизмов. Из работ [5-6] ясно, что это – поглощение крупномасштабными «акустическими» колебаниями вирусов или их подсистем (макромолекул РНК или белковых оболочек) как целого. Из экспериментов ясно (рис. 1 - рис. 3), что крупномасштабное образование – например, вирус – может представлять собой «неоднородность» в водной среде, имеющую более высокий коэффициент (сечение) поглощения, нежели вода. Тем самым, такая неоднородность будет приводить к пространственно-неравновесному распределению температуры.

Однако, как велика такая разница температур? Нетрудно оценить, что она определяется отношением коэффициентов поглощения неоднородности и среды. (Из приведенных рисунков нельзя вычислить эти коэффициенты, т.к. спектры нормированы на единицу и вычислены из спектров буферного раствора). В случае водной среды, такая разница не может быть большой. Дело в том, что в любом биообъекте, не только вирусе, но даже просто в белке имеется большое количество молекул воды. Количество молекул воды на единицу объема в белке мало отличается от окружающего раствора ($\sim 90\%$). Если основной поглотитель микроволнового излучения – ионы и дипольные молекулы воды (см. ионный механизм выше), то по оценкам, разница в нагреве должна составлять лишь единицы кельвинов.

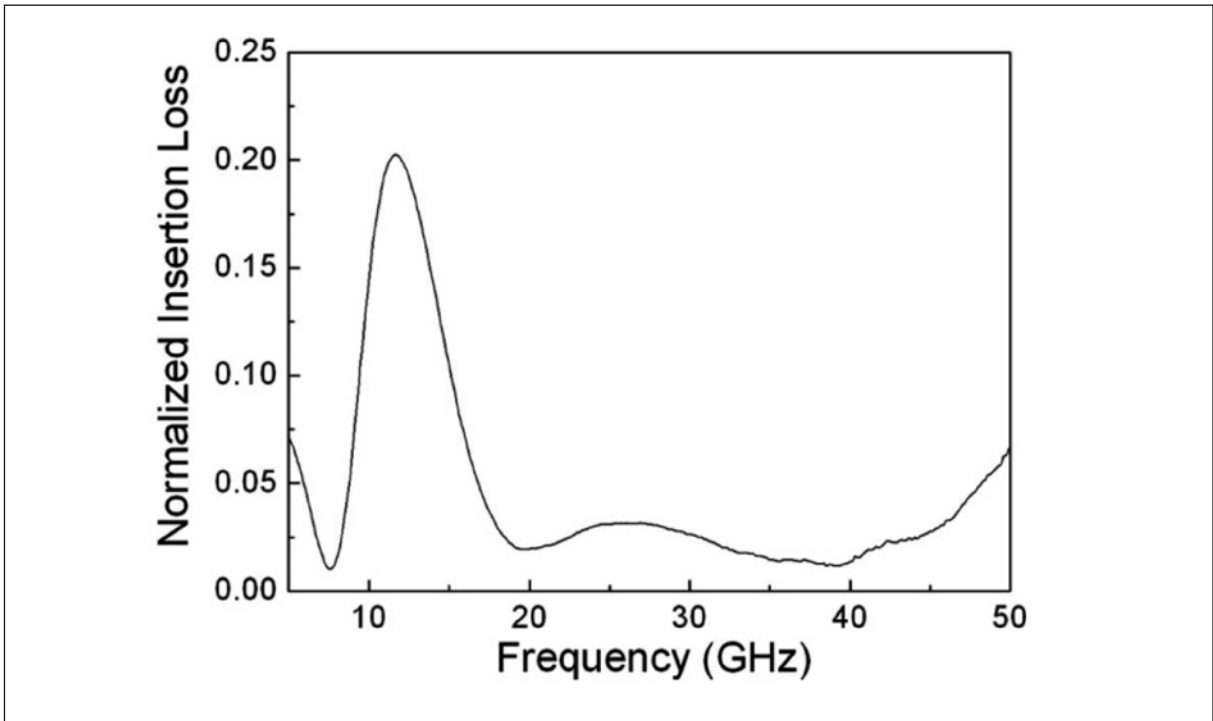


Рис. 1. Спектр микроволнового поглощения вируса influenza A в буферном растворе (спектр буферного раствора учтен) [4].

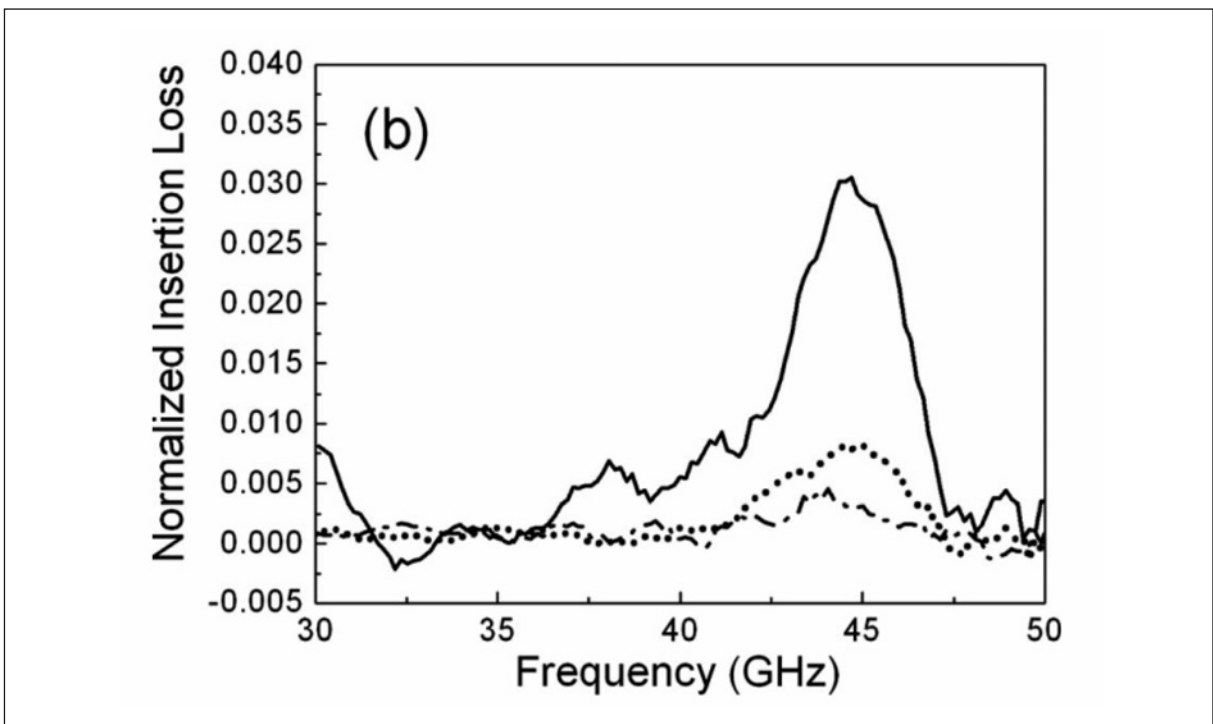


Рис. 2. Спектр микроволнового поглощения энтеровируса (Enterovirus 71) в буферном растворе (спектр буферного раствора учтен) [4].

И снова, очевидно, такой механизм тоже еще не подходит для объяснения биологических явлений. Но может быть все-таки существует какой-то сходный механизм, дающий относительно большую неравновесность?

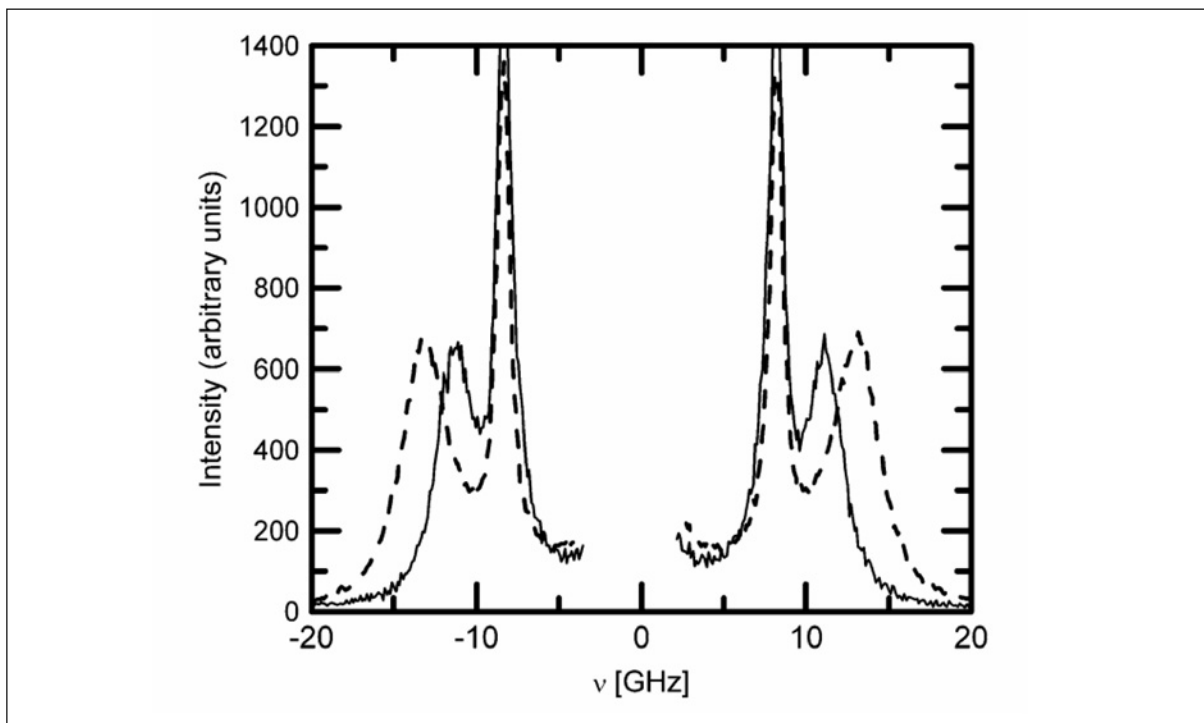


Рис. 3. Спектр Бриллюэновского рассеяния вируса табачной мозаики в виде кристалла [5].

Механизм неравновесности. Любопытно, но основу такого неравновесного механизма подсказывают особенности цитированных работ, отмеченные самими авторами. Так, часто упоминается о «нестабильности» наблюдаемых эффектов (при этом эффекты совсем не малы!); в ряде случаев результаты не подтверждались другими группами [3]; иногда знак эффекта менялся на обратный; относительно низкочастотная модуляция СВЧ излучения могла усилить или затормозить эффект и т. п. С точки зрения физики все это – черты резко нелинейной системы, такой, что малое изменение условий эксперимента приводит к кардинальному изменению фазовой траектории системы.

Такое поведение – «сверхчувствительность» к малым изменениям параметров особенно характерны для систем с положительной обратной связью. Какая же положительная обратная связь возможна при воздействии микроволнового излучения на биологический объект? Такая связь, как оказывается, не только возможна, более того – она очевидна!

На рис. 1 приведены зависимости диэлектрических потерь в воде при различных температурах. (Данные взяты с сайта www.lsbu.ac.uk, хотя эти данные есть в любом соответствующем справочнике). Как известно, диэлектрические потери напрямую связаны с коэффициентом поглощения простой формулой

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda\sqrt{\varepsilon}} L \quad (1)$$

где L – коэффициент диэлектрических потерь, приведенный на рис. 4-6, λ – длина волны излучения и ε – диэлектрическая проницаемость. (Здесь коэффициент поглощения есть величина, обратная глубине проникновения излучения). Как можно видеть, с ростом температуры широкая полоса диэлектрических потерь в воде – полоса поглощения смещается в низкочастотную сторону с ростом температуры. Это значит, что если выбрать частоту излучения, так, что с ростом температуры поглощение

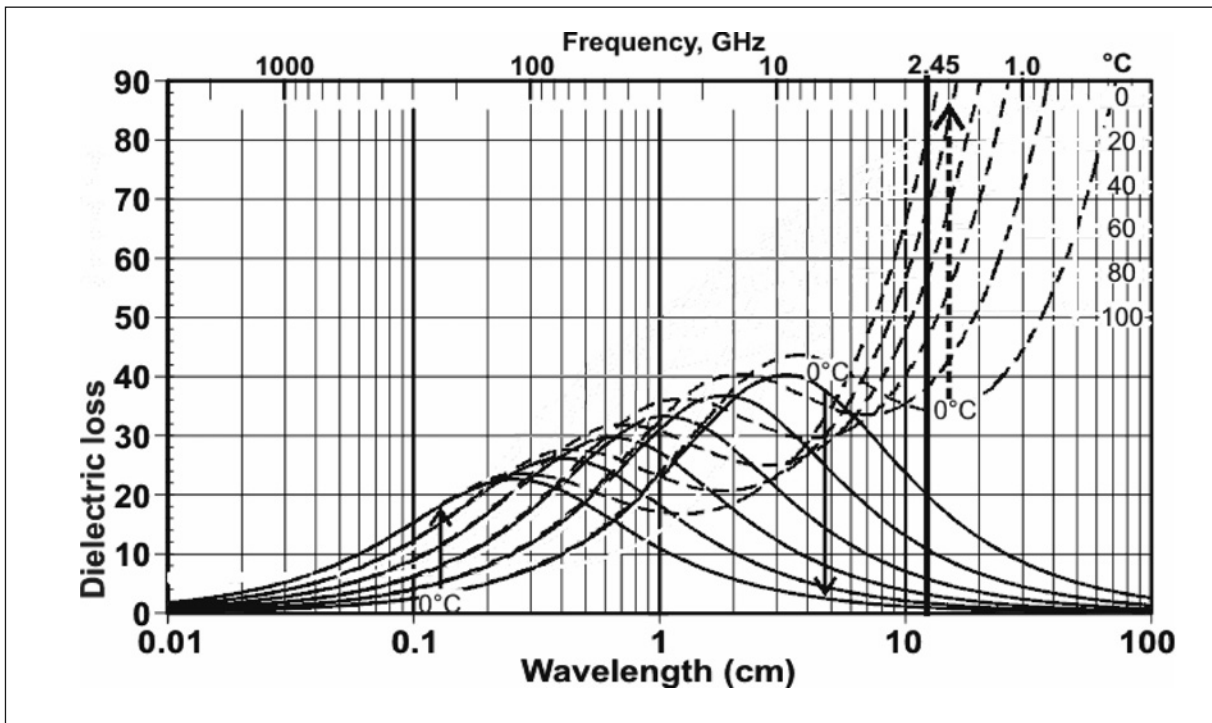


Рис. 4. Зависимость диэлектрических потерь (поглощения) в дистиллированной воде (сплошные кривые) и растворе соли (20 ppt, пунктир) от частоты излучения при различных температурах. Взято из [7].

усиливается (см. рис. 1), то увеличение поглощения вызывает увеличение температуры, которое, в свою очередь ведет к росту нагрева. Таким образом, получаем систему с положительной обратной связью – «поглощение \rightarrow температура \rightarrow поглощение \rightarrow ...». Как видно из рис. 2, этот эффект положительной обратной связи многократно усиливается в присутствии ионов в растворе – а ионы – обязательный элемент любой биосистемы. Более того, видно, что в присутствии ионов почти нет нужды в выборе частоты – излучение с практически любой частотой в области 1- 5 ГГц (см. рис. 4) будет вызывать эту обратную связь. Наконец, на рис. 5 явно приведена кривая зависимости диэлектрических потерь в растворе с концентрацией $NaCl$ 10 ppt от температуры. В области температур 20 C – 100 C, кривая поглощения, как видим, нелинейно, почти экспоненциально растет с ростом температуры.

Итак, неравновесный механизм таков. И в воде, и в биообъекте (например вирусе, клетке и т.п.) возникает нагрев, нелинейно усиливающийся во времени за счет положительной обратной связи *поглощение \rightarrow температура \rightarrow поглощение \rightarrow ...*. Но если сечение (и коэффициент) поглощения биообъекта хоть немного выше, чем окружения, то *скорость* роста его температуры будет выше, чем у раствора и по прошествии времени температура объекта может очень сильно отличаться от температуры среды.

Тогда возникает вопрос: как сильно должны отличаться коэффициенты поглощения для обеспечения разницы хотя бы в десятки кельвинов при известном поглощении воды (рис. 5)? Достаточно ли известной (показанной на рис. 6) нелинейности для такого эффекта?

Для ответа на эти вопросы построим простую математическую модель на основе уравнения теплопроводности:

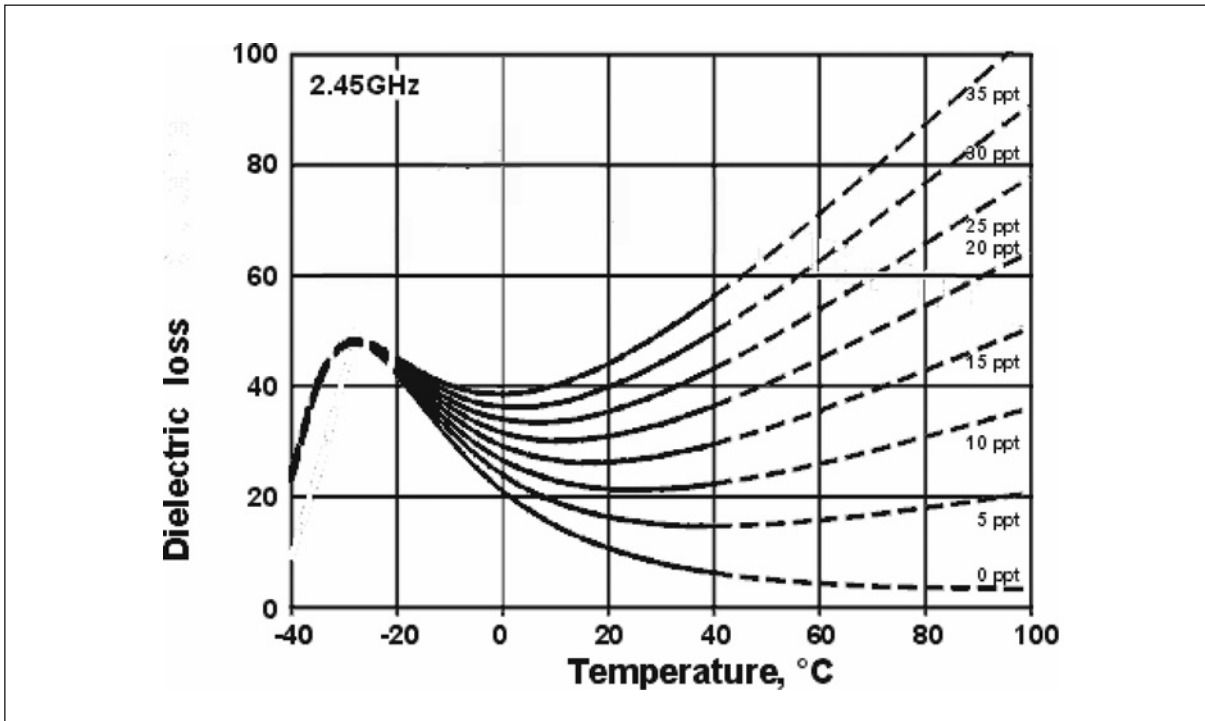


Рис. 5. Зависимость диэлектрических потерь (поглощения) в растворе соли от температуры на частоте 2,45 ГГц при различных концентрациях. Взято из [8].

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + Q - \beta(T - T_0) \quad (2)$$

Здесь $T(x,t)$ – распределение температуры во времени и пространстве, χ – теплопроводность, Q – источники тепла, T_0 – температура холодильника, β – коэффициент холодильника. Последний член описывает отток тепла к холодильнику (термостату). Для простоты мы рассматриваем одномерное уравнение теплопроводности. В это уравнение в качестве источников тепла Q входит член, описывающий поглощение излучения

$$Q = \frac{dT}{dt} = \frac{I_0 k(T, x)}{C_p \rho} \quad (3)$$

где в левой части уравнения стоит скорость «продукции» температуры за счет поглощения излучения, I_0 – интенсивность излучения, C_p – теплоемкость, ρ – плотность. (Это – обычное выражение для источников тепла в лазерной физике).

Заметим, что здесь коэффициент поглощения является функцией температуры, определяемой кривой диэлектрических потерь (рис. 6). Это значит, что важно правильно аппроксимировать эту кривую какой-либо подходящей функцией. Возьмем, например, в качестве аппроксимации функцию

$$k(T) = k_0 \exp(aT) \quad (4)$$

где k_0 и a – подбираемые параметры.

Расположим теперь в районе нуля $x = 0$ «объект», т.е. область от $-R$ до R , где коэффициент поглощения k_l хотя и близок к k_0 , но несколько отличается от него, $k_l > k_0$. Иначе говоря,

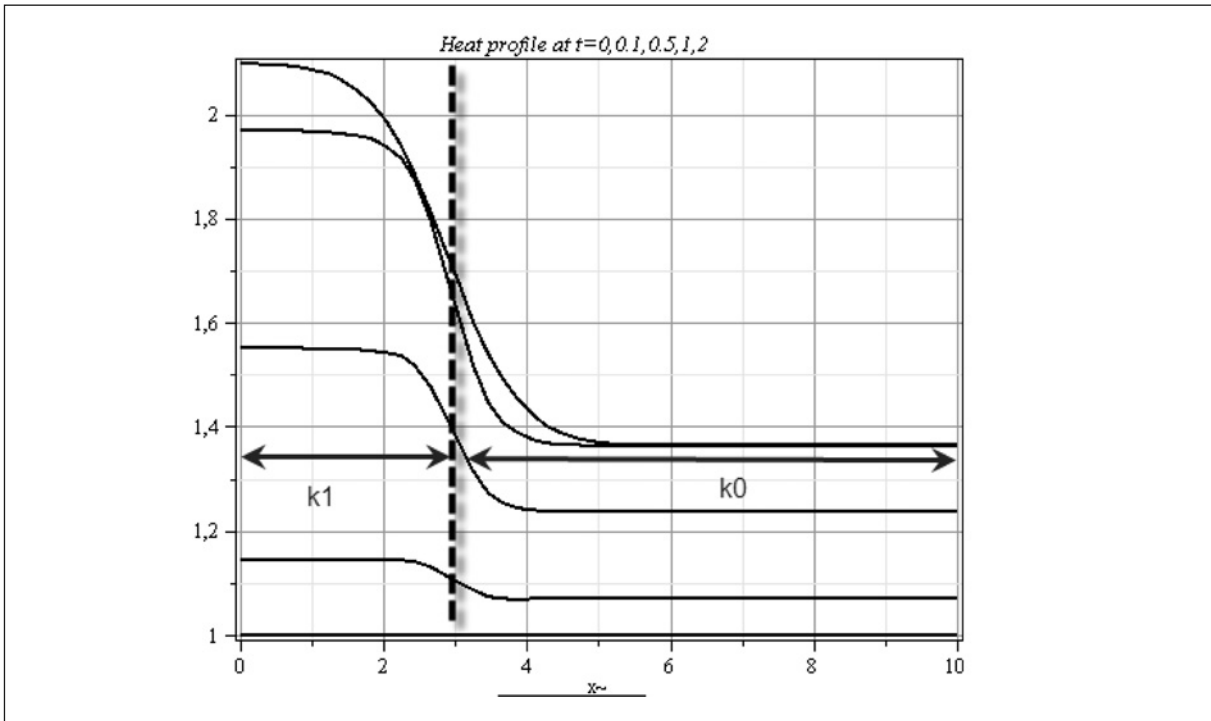


Рис. 6. Относительные профили пространственного распределения температуры в различные моменты времени согласно модели (см. текст). Область от 0 до 3,0 принадлежит «объекту» с коэффициентом поглощения k_1 , от 3,0 до 10,0 - окружающей среде с коэффициентом поглощения k_0 . Разница между k_1 и k_0 - всего 0,01% ($k_1 = 1.0001 k_0$).

$$k(T) = k_1 \exp(aT) \cdot \theta(R - x) + k_0 \exp(aT) \cdot \theta(x - R) \quad (5)$$

где θ - ступенчатая функция Хевисайда. В начальный момент времени считаем температуру везде одинаковой ($T_0 = 300 K$).

Рассмотрим теперь динамику распределения температуры во времени в такой модели. Пусть коэффициент поглощения k_1 объекта («вируса»), находящегося в резонансе с излучением отличается от коэффициента поглощения окружающей среды («воды») k_0 на очень малую величину $\sim 0.01\%$ (т.е. $k_1 / k_0 = 1.0001$). Будем считать, что скорость отвода тепла β много меньше, чем скорость нагрева излучением - это практически всегда так для биообъектов). Результаты численного решения такой задачи (4)-(7) с функцией «обратной связи» вида (4) и $k_1 / k_0 = 1.0001$ приведены на рис. 9-10.

(Заметим, что если кривую обратной связи $k(T)$ аппроксимировать квадратичной функцией, а не экспонентой, то задача может быть решена аналитически. Однако, для дальнейших выводов это несущественно).

Как можно видеть, несмотря на ничтожно малую разницу в поглощении, по прошествии некоторого времени температура резонансного объекта может быть в несколько раз больше, чем температура среды! (На рис. 6. температура объекта с k_1 - область 0..3 в 1.7 раза выше, чем среды).

На рис. 7 хорошо видна динамика такого неравновесного нагрева: скорость нагрева объекта значительно выше, чем среды, а при выключении излучения ($t = 3$) отток тепла начинает снижать и выравнивать температуру.

В данной модели эта динамика, очевидно, такова, что если просто продолжать нагрев, то формально можно довести разницу температур до любого значения! Ясны

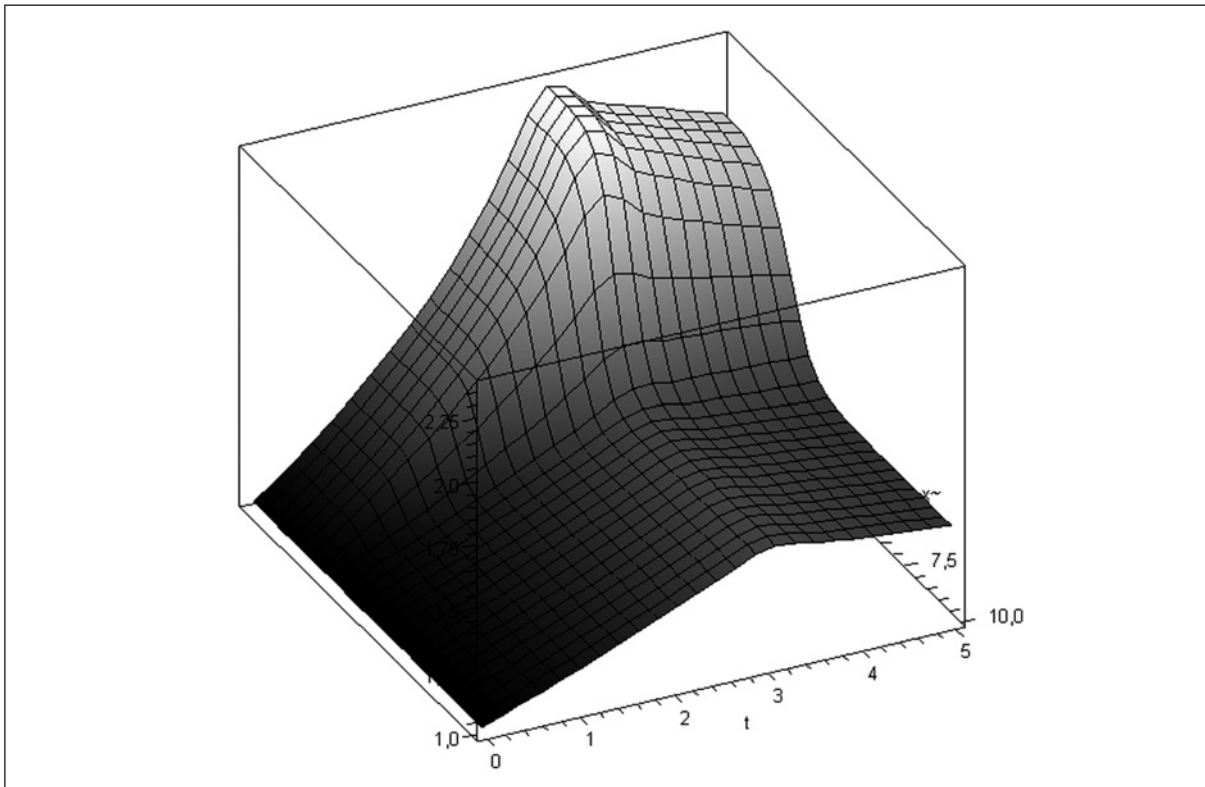


Рис. 7. Пространственно-временное распределение температуры вокруг «резонансного» биообъекта с учетом обратной связи в поглощении. Область по X от 0 до 3,0 принадлежит «объекту» с коэффициентом поглощения k_1 , от 3,0 до 10,0 - окружающей среде с коэффициентом поглощения k_0 . (Разница между k_1 и k_0 - всего 0,01% ($k_1 = 1.0001 k_0$)). Излучение выключается при $t = 3$.

управляющие параметры: полученный сценарий всегда реализуется, если константа α в (4), характеризующая экспоненту положительной обратной связи (рис. 5) превосходит скорости отвода тепла β и теплопроводность χ (релаксацию к полному равновесию).

Итак, из приведенной простой модели ясно, что даже ничтожно малая разница в поглощении, может вызывать большую разницу в результирующей температуре, т. е. сильно неравновесный нагрев.

Селективное воздействие на биообъекты. Как же можно это использовать для селективного (избирательного) воздействия на биообъекты? Ответ достаточно очевиден. Предположим, что у нас имеется в растворе два биологических объекта, качественно отличающиеся, например, только размером и формой. Вирусы или бактерии – хороший пример этого: какие-либо макроскопические химические различия между различными вирусами, клетками и т. п. фактически отсутствуют (химически биообъекты созданы из одних и тех веществ). Это означает, что невозможно различить такие объекты просто спектральными методами (спектры поглощения и испускания в инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой областях будут практически неотличимы (если только не применять специфические красители и т. п., что не всегда возможно). Однако, если размер и форма объектов такова, что один объект имеет пик поглощения на частоте излучения (т. е. в резонансе с излучением), а другой -нет, то, очевидно, выбирая длину волны излучения мы можем избирательно «перегреть» либо один, либо другой вирус.

Другой вариант – белки, например белки-прионы или ферменты. Аналогично, выбор длины волны и интенсивности излучения, как видим, может приводить к избирательной денатурации, например, прионов заданного типа, не трогая других.

Еще более тонко такой механизм может позволить управлять ферментативными реакциями. Известно, белки-ферменты активны только в довольно узком диапазоне температур. Например, нагрев до 30-40 °C приводит к увеличению числа оборотов (скорости) ферментативной реакции, а более 60 °C – к денатурации фермента. Это означает, что некоторой интенсивности можно стимулировать активность только (резонансного) заданного фермента, а при более высокой – подавлять ее.

Заметим, что микроволновая гипертермия уже применяется для лечения раковых опухолей. Из приведенной модели ясно, что тонкий подбор частоты и, главное, интенсивности излучения, в принципе, может приводить к избирательному уничтожению только раковых клеток.

Таким образом, как видим принципиально все-таки существует связанный с водой нелинейный механизм биологического действия микроволнового/терагерцевого излучения, который может приводить к неравновесному распределению возбуждения и быть основой для селективного (избирательного) управления процессами в биологических объектах.

Литература

1. C. Pérez-Castejón, R.N. Pérez-Bruzón, M. Llorente, N. Pes, C. Lacasa, T. Figols, M. Lahoz, C. Maestú, A. Vera-Gill, A. del Moral and M.J. Azanza, “Exposure to ELF-pulse modulated X band microwaves increases in vitro human astrocytoma cell proliferation” // *Histology and Histopathology*, 2009, **24**, 1551-1561.
2. Birendra N., Pramanik, Urooj A. Mirza, Yao Hain Ing, Yan-Hui Liu, Peter L. Bartner, Patricia C. Weber and Ajay K. Bose, “Microwave-enhanced enzyme reaction for protein mapping by mass spectrometry: A new approach to protein digestion in minutes”// *Protein Science*, 2002, **11**, 2676–2687.
3. David I. de Pomerai, Brette Smitha, Adam Dawea, Kate Northa, Tim Smitha, David B. Archera, Ian R. Ducea, Donald Jonesb, E. Peter M. Candido, “Microwave radiation can alter protein conformation without bulk heating” // *European Biochemical Societies Letters*, 2003, **543**, 93-97.
4. Tzu-Ming Liu, Hung-Ping Chen, Li-Tzu Wang, Jen-Ren Wang, Tang-Nian Luo, Yi-Jan Chen, Shen-Iuan Liu, and Chi-Kuang Sun, “Microwave resonant absorption of viruses through dipolar coupling with confined acoustic vibrations” // 2009, *Applied Physics Letters*, **94**, 043902.
5. B. Stephanidis, S.Adichtchev, P.Gouet, A. McPherson, A.Mermet, “Elastic Properties of Viruses” // *Biophysical Journal*, 2007, **93**, 1354–1359.
6. V. N. Blinov and V. L. Golo, “Acoustic spectroscopy of DNA in the gigahertz range” // *Physical Review E*, 2011, **83**, 021904.
7. <http://www1.lsbu.ac.uk/water>
8. P. O. Risman and B. Wäppling-Raaholt, “Retro-modelling of a dual resonant applicator and accurate dielectric properties of liquid water from –20 °C to +100 °C” // *Meas. Sci. Technol.*, 2007, **18**, 959-966.

ON THE MECHANISM OF BIOLOGICAL ACTION OF MICROWAVE AND TERAHERTZ RADIATION

V.B. Oshurko

Prokhorov General Physics institute of Russian Academy of Sciences

vbo08@mail.ru

Received 24.03.2015

All known physical mechanisms of microwave and terahertz radiation absorption are briefly analyzed. It is shown that basic mechanism of biological action is just an equilibrium heating of media. However, in case of non-homogeneous media the effect of "spatial selectivity" (e.g. different heating of different parts) is also possible. It was shown that nonlinear (increasing) dependence of dielectric loss in water on temperature can provide positive feedback between temperature and absorption of radiation. This positive feedback can greatly amplify the effect of spatial selectivity and provides a possibility of selective control of biological systems.