

чение на этой стадии развития культуры может привести и к стимуляции роста водорослей, и к его угнетению, а может и не вызывать какого-либо эффекта [2]. Ранее было показано, что стимуляция роста культуры водорослей при КВЧ-воздействии возможна только в лаг-фазе, в самом начале формирования системных (популяционных) отношений. На других стадиях развития популяции происходит в разной степени ингибирование роста водорослей.

Несмотря на отсутствие повторяемости эффекта при облучении культуры в лаг-фазе, результат совместного воздействия ЛО и КВЧ-облучения определен. Оказалось, что наиболее отчетливо стимулирующий эффект воздействия облучений на рост одноклеточных проявляется в варианте КВЧ+ЛО.

Выводы

При совместном действии лазерного и КВЧ-облучения на развитие одноклеточных организмов определяющее значение имеет последовательность их применения. Особенно ярко это выявлено на простейших. Наиболее отчетливо эффект стимуляции роста одноклеточных организмов проявляется тогда, когда ЛО культуры следует после КВЧ-облучения. При этом ЛО либо снимает ингибирующий, либо усиливает стимулирующий эффект КВЧ-облучения.

Сравнение реагирования культур простейших и водорослей на электромагнитное облучение при выбранных условиях эксперимента позволяет говорить о большей чувствительности к облучению простейших, нежели водорослей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Девятков Н. Д. // Миллиметровые волны в биологии и медицине. М., 1989, С. 5 [2] Веселаго И. А., Гапочка Л. Д., Дрожжина Т. С. и др. // Миллиметровые волны в медицине. М., 1991. Т. 2. С. 293.

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1994. Т. 35, № 4

УДК 532.783+536

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КВЧ- И СВЧ-ДИАПАЗОНОВ НА ЖИДКУЮ ВОДУ

Л. Д. Гапочка, М. Г. Гапочка, А. Ф. Королев, А. И. Костиенко,
А. П. Сухоруков, И. В. Тимошкин

Исследуются нетепловые эффекты влияния микроволнового излучения на жидкую воду. Обнаружено увеличение оптической плотности в ближней УФ-области, смещение химического сдвига протона в сильное поле, увеличение времени спин-решеточной релаксации у облученной воды по сравнению с необлученной. Сохранение обнаруженных изменений в течение 2—3 сут указывает на образование в воде под действием микроволн метастабильных состояний и изменение ее структуры.

С помощью известного механизма теплового воздействия микроволнового излучения на воду невозможно объяснить все эффекты взаимодействия микроволн с водными средами.

Нами обнаружены и исследуются нетепловые резонансные явления взаимодействия микроволнового излучения с водными средами, возникновение в воде под действием определенного вида излучения долгоживущих метастабильных состояний, которые проявляются в из-

менении определенных физико-химических параметров водных сред, таких, как оптическая плотность, химический сдвиг протона ^1H , время спин-решеточной релаксации T_1 . Предполагается, что ответственная за данные явления прежде всего структура воды и водных растворов, включающая в себя помимо непрерывной сетки Н-связей и локальные кластерные и клатратные образования. Мы связываем изменения физических параметров воды под действием микроволнового излучения с изменением параметров слабых водородных связей (энергия связи порядка 0,1 эВ).

В настоящей работе проведены спектрофотометрические и ЯМР-исследования жидкой дистиллированной и бидистиллированной воды, подвергнутой микроволновому воздействию нескольких видов с различными характеристиками (табл. 1).

Таблица 1

Номер способа облучения	1	2	3	4
Характер микроволнового излучения	непрерывное	импульсное	импульсное	непрерывное
Частота, ГГц	2,45	2,71	0,9	40—60
Мощность	450 Вт	800 кВт	1000 кВт	10 МВт
Длительность импульса, мкс	—	1	8	—
Частота посылок импульсов, Гц	—	230	400	—
Режим волны	стоячая	бегущая, мода H_{10}	бегущая, мода H_{10}	бегущая
Время облучения	5 с	5 с	5 с	20 мин
Промежуток времени между облучением и лабораторным исследованием	1 сут	1 сут	2 сут	1 сут

В первом случае вода помещалась в камеру СВЧ-печи «Электроника», во втором и третьем образцы с водой располагались внутри волноводов, в четвертом случае вода облучалась в тефлоновом стакане, расположенном над выходным рупором микроволнового генератора.

Дифференциальные спектры оптической плотности дистиллированной и бидистиллированной воды, облученной 2-м и 4-м способами, снимались в диапазоне 190—900 нм на спектрофотометре «Hitachi 557» (рис. 1, 2).

Микроволновое излучение не вызывает изменений оптической плотности в диапазоне 350—900 нм, а в диапазоне 350—190 нм (ближняя УФ-область) приводит к ее увеличению. При этом данные изменения носят одинаковый характер для воды, облученной как мощным импульсным излучением, так и низкоинтенсивным непрерывным. В случае облучения мощными микроволновыми импульсами (2-й способ, рис. 1)

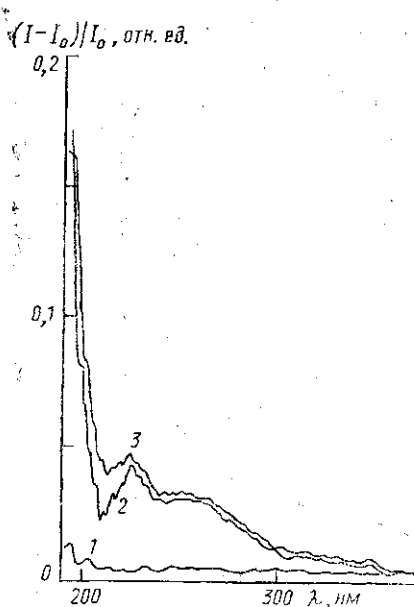


Рис. 1.

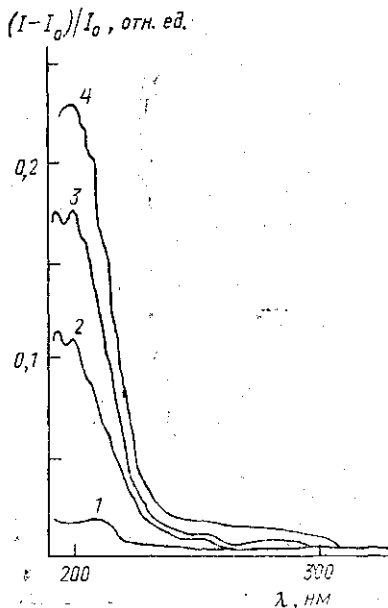


Рис. 2.

Рис. 1. Дифференциальные спектры оптической плотности воды: 1 — дистиллированной необлученной (контроль), 2 — дистиллированной, облученной 2-м способом, и 3 — бидистиллированной, облученной 2-м способом. Здесь и на рис. 2 по осям отложены длина волны светового пучка λ и величина $(I-I_0)/I_0$, где I_0 и I — интенсивности светового пучка, прошедшего соответственно через контрольный и облученный образцы воды

Рис. 2. Дифференциальные спектры оптической плотности дистиллированной воды: 1 — необлученной (контроль) и облученной 4-м способом с $\nu=45,55$ (2), 40,00 (3) и 53,55 ГГц (4)

на спектрах видно характерное возрастание оптической плотности облученной воды при уменьшении λ от 300 до 225 нм (пик) и далее ее уменьшение, особенно ярко выраженное в данном эксперименте у дистиллята при $\lambda=207$ нм. При дальнейшем уменьшении длины волны вплоть до 190 нм оптическая плотность резко возрастает. Для воды, облученной низкоинтенсивным непрерывным микроволновым излучением (4-й способ), также наблюдается рост оптической плотности в ближней УФ-области (характерные спектры приведены на рис. 2). Для контроля снимались дифференциальные спектры необлученной воды, изменений в которых практически не наблюдалось.

Увеличение оптической плотности воды в УФ-части спектра связано с возбуждением электронной конфигурации молекулы воды. Таким образом, полученные результаты позволяют говорить об изменениях в самой молекуле H_2O , вызванных микроволновым излучением. Данные изменения оказываются долгоживущими, так как спектры оптической плотности снимались через 2 сут после облучения.

ЯМР-исследования воды заключались в сравнении химического сдвига протона 1H и времени спин-решеточной релаксации T_1 облученных образцов с контрольными (необлученными). Химический сдвиг протона 1H измерялся по отношению к внутреннему стандарту — гексаметилдиоксану на спектрографе «Tesla-BS-497».

В спектрах зафиксировано смещение протонного пика облученных

образцов $\Delta\delta$ в сильное поле относительно контрольного образца (табл. 2), при этом $\Delta\delta$ вычислялось по формуле

$$\Delta\delta = \delta_1 - \delta_2, \quad (1)$$

где δ_1 и δ_2 — химический сдвиг необлученной и облученной воды соответственно.

Смещение сигнала ЯМР протона ^1H в сильное поле означает увеличение электронной плотности на протонах молекул воды, что обычно наблюдается при разрушении Н-связей $\text{O}_x - \text{H}_x \dots \text{O}_y$ между молекулами воды (например, в случае перехода молекул из жидкости в пар), так как водородная связь уменьшает постоянную экранирования протона по сравнению с изолированной молекулой H_2O . Химический сдвиг протона ^1H связан с расстоянием R между атомами H_x и O_y для воды следующим образом:

$$\delta = -20,5^3/R^3 \text{ [Гц]}. \quad (2)$$

Результаты расчета R для облученных образцов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Номер способа облучения	Контроль	1	2	3
$\Delta\delta$, Гц	—	32 ± 2	38 ± 2	34 ± 2
$R_{\text{H}_x - \text{O}_y}$, Å	$1,561 \pm 0,002$	$1,593 \pm 0,002$	$1,599 \pm 0,002$	$1,595 \pm 0,002$

Таким образом, микроволновое излучение приводит к сдвигу ЯМР-сигнала протона ^1H в сильное поле, что соответствует изменению параметров Н-связей, увеличению электронной плотности на протоне молекулы воды. Эти результаты, как и спектрофотометрические данные, позволяют предположить, что конфигурация электронной оболочки молекулы H_2O изменяется.

Результаты измерения времени спин-решеточной релаксации T_1 представлены в табл. 3. Для данных измерений вода облучалась 1-м и 2-м способами. Дегазация образцов не производилась. Время релаксации у контрольного образца измерялось до и по завершении работы с облученной водой. Время T_1 измерялось с помощью релаксометра «Minispec». Из результатов, приведенных в табл. 3, видно, что время

Таблица 3

Способ облучения образца (см. табл. 1)	Контроль	Непрерывный	Импульсный, $W = 800$ кВт	Контроль	
Время облучения образца, с	—	5	3	5	—
T_1 , с	$3,73 \pm 0,05$	$3,75 \pm 0,05$	$3,69 \pm 0,09$	$3,8 \pm 0,1$	$3,77 \pm 0,07$
Промежуток времени между облучением и измерением T_1	—	5 ч	2 сут	2 сут	2 сут

T_1 незначительно увеличилось у воды, облученной импульсным источником. В единичных случаях наблюдался выброс T_1 до 3,93 с у облученной воды (4-й столбец табл. 3).

Увеличение времени спин-решеточной релаксации протонов свидетельствует об уменьшении подвижности ядер водорода в молекуле H_2O , что является свидетельством изменения параметров Н-связей и самой молекулы воды.

Отличительной особенностью строения воды является наличие непрерывной сетки межмолекулярных водородных связей с локальными кластерными и клатратными образованиями, формирующимися также за счет Н-связей. Поэтому логично предположить ответственными за необычные свойства воды именно эти связи.

Водородная связь между двумя молекулами воды характеризуется тем, что при некоторых условиях (так называемых условиях Бернала—Фаулера) атом водорода оказывается связанным значительными силами притяжения с двумя соседними атомами кислорода ($O_x-H_x \dots O_y$). Согласно Полингу, атом водорода не фиксирован в строго определенном положении на линии $O_x \dots O_y$, а занимает два равновероятных положения $O_x-(1/2)H \dots (1/2)H \dots O_y$ (полупротонная модель Полинга), что подтверждается рентгеноструктурным анализом, проведенным для тяжелой воды D_2O [1]. Поэтому протон можно рассматривать как частицу, туннелирующую между двумя потенциальными ямами, соответствующими параболическому потенциалу (рис. 3). Возможность перехода протона через потенциальный барьер U_0 ($U_0=2\text{эВ}$) приводит к расщеплению энергетического уровня протона на два близких уровня [2]. Решая уравнения Шрёдингера для двух потенциальных ям параболического вида, получаем

$$\Delta E_p = \frac{\hbar\Omega}{\pi} \exp\left\{-\frac{m\Omega}{4\hbar} \Delta r^2\right\} \text{ (Дж)}, \quad (3)$$

где Ω — собственная частота колебаний протона в потенциальной яме, m — масса протона. Отсюда можно найти частоту перехода протона через барьер ω_p :

$$\omega_p = \frac{\Delta E_p}{\hbar} \text{ (Гц)}.$$

Согласно нашим расчетам, частота перехода протона для жидкой воды составляет $\omega_p \approx 178$ ГГц. Аналогичная частота для льда D_2O составила приблизительно 20 ГГц. В работе [3] представлен график отношения коэффициентов поглощения жидкой воды и водяного пара ($\alpha_{\text{лиq}}/\alpha_{\text{vap}}$) в зависимости от частоты. Так как жидкая вода намного более насыщена водородными связями, чем пар, то ответственными за увеличение коэффициента ($\alpha_{\text{лиq}}/\alpha_{\text{vap}}$) можно считать Н-связи. Один из пиков этого графика соответствует частоте 160 ГГц, что может служить экспериментальным подтверждением наших расчетов.

Роль кластерных и клатратных конгломератов $(H_2O)_n$, где n предположительно может принимать значения от 2 до 140, не объяснена. Образованные посредством искаженных водородных связей и стабилизированные за счет транспорта протона структуры типа нейтральных $(H_2O)_n$ и заряженных $H^+(H_2O)_n$ имеют локальные свойства, отличные от глобальных свойств окружающей сетки Н-связей. Так, мо-

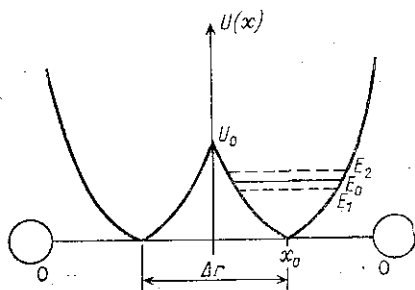


Рис. 3. Модель двух потенциальных ям для протона в водородной связи (x_0 — положение минимума потенциальной энергии, Δr — расстояние между двумя минимумами)

делирование 57 и 60 молекулярных водных кластеров показало, что спектр собственных частот этих образований находится в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах [4], что позволяет предположить резонансное поглощение микроволнового излучения данными образованиями.

Возможное объяснение нетеплового эффекта воздействия микроволн на воду заключается в следующем. Резонансное взаимодействие микроволнового излучения с протоном и кластерными структурами вызывает разрушение последних и последующее восстановление в другом виде, что ведет к изменению водородных связей между молекулами воды, а в конечном итоге и в самой молекуле H_2O (например, вызывая ее переход со связывающей на разрыхляющую орбиталь). Эти изменения в структуре воды и проявляются в спектрах оптической плотности и ЯМР-спектрах.

Основные результаты и выводы

1. Обнаружены нетепловые эффекты воздействия микроволн на воду: увеличение оптической плотности в ближней УФ-области, сдвиг сигнала ЯМР протона 1H в сильное поле, незначительное увеличение времени T_1 у облученной воды.

2. На основании экспериментальных данных можно говорить о том, что микроволновое излучение приводит к изменению электронной конфигурации молекулы воды и межмолекулярной структуры H_2O .

3. Данные изменения наблюдаются в течение 2—3 сут, что свидетельствует о наличии устойчивых метастабильных состояний жидкой воды, возникающих под действием микроволн.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Маэно Н. Наука о льде. М., 1988. [2] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М., 1989. [3] Carlon H. R. // Appl. Opt. 1978. 17. P. 3192. [4] Vyfey I. P., Brown W. B., Gebbie H. A. // Chem. Phys. Lett. 1984. 148, N 4. P. 67.

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1994. Т. 35, № 4.

РАДИОСПЕКТРОСКОПИЯ И СВЯЗЬ

УДК 535:543.46

ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ СУБМИЛЛИМЕТРОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Г. В. Козлов *)

Дан краткий обзор новых экспериментальных методик в субмиллиметровой спектроскопии. Основное внимание уделено методам временного разрешения, базирующимся на фемтосекундной технике. Обсуждаются возможности повышения точности измерений спектров проводимости и диэлектрических потерь в материалах путем использования многолучевых резонансных систем.

1. Введение

В последние годы наблюдается значительное увеличение активности исследований в области субмиллиметровой радиофизики и спект-

*) Институт общей физики РАН, г. Москва.