(i, j, p, q, $a=x$, y, z, причем i, j, p, $q\neq a$). При этом $\chi^{(3)}_{xxxx}$, $\gamma^{(3)}_{xyxxz}$ (для кристаллов класса 23: $\gamma^{(3)}_{xyxxz}$ и $\gamma^{(3)}_{xxxyz}$) могут быть найдены из измерений нелинейного поглощения и нелинейного набега фазы.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ахманов С. А., Жариков В. И.//Письма в ЖЭТФ. 1967. 6, № 5. С. 644. [2] Ахманов С. А., Жданов Б. В., Желудев Н. И. и др.//Письма в ЖЭТФ. 1979. 29, № 5. С. 294. [3] Желудев Н. И., Петренко А. Д.//Кристаллография. 1984. 29, № 6. С. 1045. [4] Голубков А. А., Макаров В. А.//Опт. и спектр. 1986. 60, № 4. С. 869. [5] Голубков А. А., Макаров В. А.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1989. 30, № 2. С. 54. [6] Апанасевич С. П., Довченко Д. Н., Желудев Н. И.//Опт. и спектр. 1987. 62, № 3. С. 481. [7] Сиротин Ю. И., Шаскольская М. П. Основы кристаллофизики. М., 1975. [8] Maker P. D., Terhune R. W.//Phys. Rev. 1965. 137, N 3A. P. 801.

Поступила в редакцию
22.03.89

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1990. Т. 31, № 2

АКУСТИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

УДК 541.67; 546.212.221

СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ВОДЕ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СЛАБЫХ ПЕРЕМЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

В. Ф. Киселев, А. М. Салецкий, Л. П. Семихина

(кафедра общей физики для физического факультета)

Обнаружено изменение диэлектрических потерь, электропроводности, коэффициента теплопередачи и переохлаждения бидистиллированной воды после воздействия слабых переменных магнитных полей. Магнитное поле воздействует на заряженные протоны и протонсодержащие группировки в воде, а также на их ядерные спины, изменяя вероятности переходов этих частиц в цепочках водородных связей Бернала—Фаулера. После длительного воздействия поля происходят структурные изменения в сетке водородных связей. Новое квазиравновесное макроскопическое состояние воды крайне медленно (часы) релаксирует к исходному состоянию.

В работах [1—3] мы показали, что после длительного (часы) выдерживания чистой воды в геомагнитном поле, вертикальная слагающая которого H_G модулирована низкочастотными переменными магнитными полями $\vec{H}=H_0+H\cos 2\pi ft$ ($H_0=H_G=47$ А/м), при строго фиксированных соотношениях между H и f возникают экстремальные изменения тангенса угла диэлектрических потерь ($\mathrm{tg}\,\delta$), электропроводности ($\varkappa$), коэффициента теплопередачи (χ) и переохлаждения воды ΔT (по отношению к точке ее замерзания). Кроме того, изменяется светопропускание слабоконцентрированных водных растворов красителя Р6Ж и белка благодаря возникающим нарушениям сетки водородных связей [3]. С целью дальнейшего выяснения природы наблюдаемых магнитных эффектов в настоящей работе были проведены дополнительные исследования изменений $\mathrm{tg}\,\delta$ при существенном расширении диапазона амплитуд (H_0 и H) и частот (f) магнитных полей, а также области частот ν, в которой измерялись дисперсионные кривые $\mathrm{tg}\,\delta(\nu)$, до и после воздействия поля.

Методика измерения была та же, что и в работах [1—3]. Использовалась бидистиллированная вода с $\varkappa = 2 \cdot 10^{-6}$ Ом$^{-1}$·см$^{-1}$. Проведенные исследования привели к следующим новым результатам.

1. Существенно расширив по сравнению с [1—3] диапазон амплитуд переменного поля H от 0,08 до 212 А/м, мы обнаружили для H_2O 8 экстремумов tg δ, резонансные частоты которых f_{res} приведены в таблице. Часть экстремумов представлена на рис. 1. При тех же f_{res} в полях 0,08 и 12,3 А/м экстремально изменялись $\varkappa$, χ [1] и ΔD [3]. Заметные (~20%) изменения столь различных по природе параметров при одних и тех же f_{res} указывают на то, что они вызваны инициированными полем элементарными процессами в воде.

Значения напряженности модулирующего поля H и резонансных частот f_{res} при которых наблюдаются экстремумы tgδ

H, А/м	f_{res}, Гц				
	Типы экстремумов				
	I	II	III	IV	V
			H_2O		
0,08	$1,4 \cdot 10^{-2}$ (1)	$4 \cdot 10^{-2}$ (2)	$7,8 \cdot 10^{-2}$ (3)	1,54 (4)	4,4 (5)
12,3	2,2 (6)	—	—	156 (7)	—
212	2,5 (8)	—	—	—	—
			D_2O		
12,3	—	—	—	78 (9)	—
212	22,5 (10)	—	—	—	—

В скобках указан номер максимума.

2. Измерения tg δ воды проводились при фиксированных частотах $\nu_1 = 160$ МГц (вблизи минимума потерь) и $\nu_2 = 70$ кГц в области обнаруженного в [4] максимума потерь. Оказалось, что наведенные полем изменения tg δ воды в области ν_2 по абсолютной величине больше, чем в высокочастотной области (ν_1). Помимо уменьшения амплитуды этого максимума после выключения поля H наблюдался его сдвиг в область высоких частот (рис. 2). Ширина максимумов tg δ и их положение на шкале частот f не зависят от области частот ν, в которых они измерялись (см., напр., максимум 4 на рис. 1).

3. Ряд ученых вообще отрицают возможность магнитных эффектов в чистой воде (см., напр., [5, 6]). М. В. Волькенштейн считает подобные исследования чуть ли не лженаукой [7]. Без каких-либо экспериментальных подтверждений эффекты в воде авторы работ [5, 7] объясняют действием поля на парамагнитные примеси, без указания механизма такого воздействия. Наши данные ([1—3] и рис. 1) не подтверждают эту точку зрения. Насыщение воды O_2 и CO_2, обезгаживание воды, введение хлоридов (до 1%) в полях $H = 12,3$ А/м и выше сопровождались некоторым уширением максимумов tg δ и их сдвигом на несколько процентов по шкале частот f [1—3]. При меньших полях, 0,08 А/м и ниже, влияние примесей находилось за пределами чувствительности методики. Сильным аргументом против примесной природы эффектов являются данные для льда, в котором подвижность

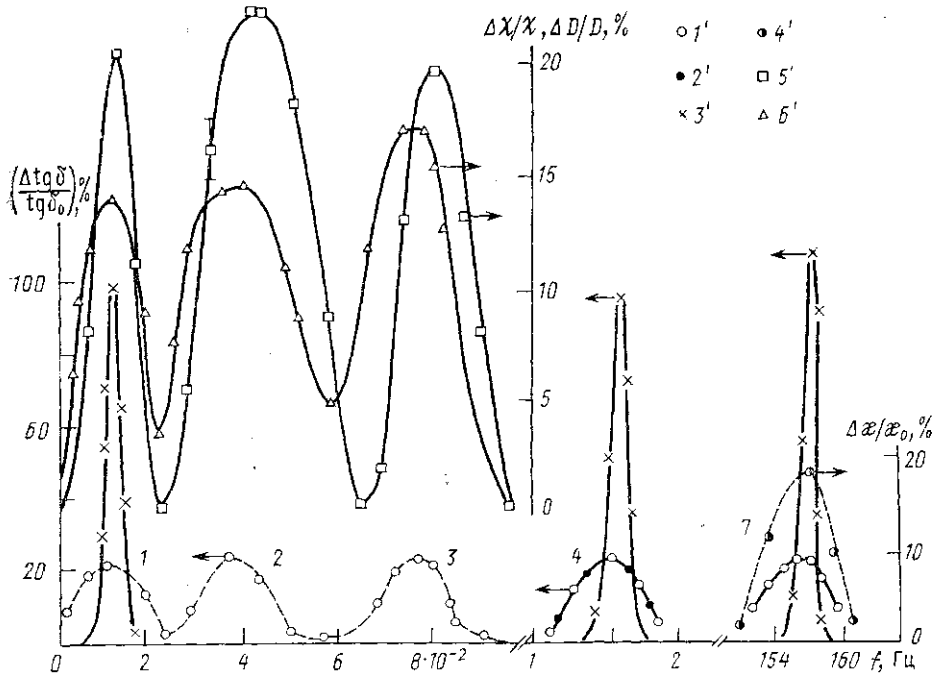

Рис. 1. Зависимость изменения tg δ воды на частоте $\nu_1 = 160$ МГц (*1'*); $\nu_2 = 70$ кГц (*2'*) и льда на частоте 20 МГц (*3'*); электропроводности воды $\varkappa$ (*4'*); коэффициента теплопередачи χ (*5'*); светопропускания ΔD растворов родамина 6Ж [3] (*6'*) после 6-часового воздействия поля $\tilde{H} = H_0 + H \cos 2\pi f t$ от частоты поля f при $H = 0{,}08$ А/м для максимумов 1—4 и $H = 12{,}3$ А/м — для максимума 7 (см. таблицу)

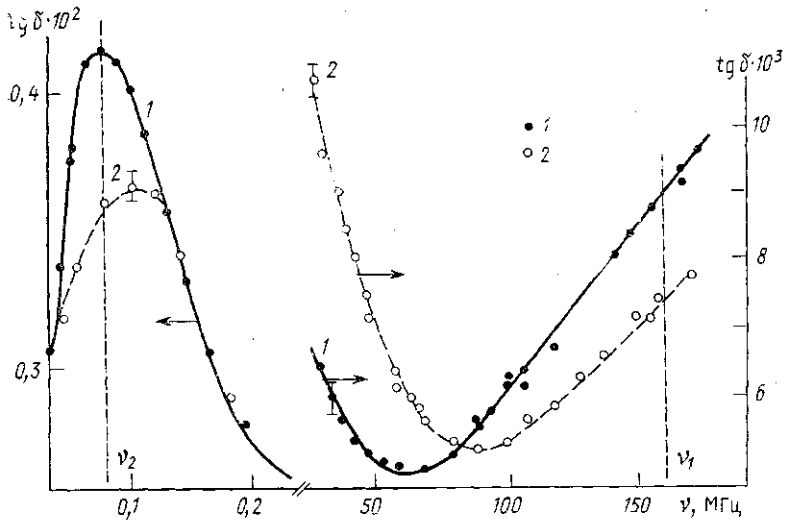

Рис. 2. Частотная зависимость tg δ(ν) бидистиллированной воды ($\varkappa = 2 \cdot 10^{-6}$ Ом$^{-1}$·см$^{-1}$) до (*1*) и после (*2*) воздействия переменного магнитного поля $H = 0{,}08$ А/м при $f_{res} = 4 \cdot 10^{-2}$ Гц

примесей намного ниже, чем в жидкой воде. Как видно на рис. 1, в случае льда [1, 2] наблюдаются значительные, большие по амплитуде, узкие экстремумы $\operatorname{tg}\delta$, совпадающие по шкале частот с широкими максимумами для воды. Наконец, примесями невозможно объяснить сильный изотопический сдвиг f_{res} для максимумов $\operatorname{tg}\delta$ при переходе от H_2O к D_2O (таблица).

4. В переменном поле существуют магнитная (H) и электрическая (E) компоненты. На оси соленоида, в котором помещается ампула с водой, $E=0$, E возрастает в направлении к стенкам катушки. При используемых размерах ампул максимально действующее на воду электрическое поле для максимума 1 (см. таблицу) составляло очень малую величину — $5\cdot10^{-12}$ В/м, для максимума 5 — $1{,}5\cdot10^{-9}$ В/м. Есть все основания считать, что за наблюдаемые эффекты ответственна магнитная составляющая поля. В пользу этого говорят отмеченные в [1—2] изменения $\operatorname{tg}\delta$ при частичной компенсации постоянного H_G.

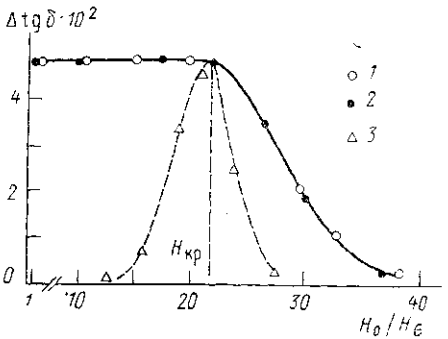

Рис. 3. Зависимость изменения $\Delta\operatorname{tg}\delta$ от постоянной составляющей поля H_0 для максимумов 1 (*1*), 4 (*2*) и 5 (*3*)

5. До сих пор мы воздействовали на воду магнитным полем $\tilde{H}$, варьируя только амплитуду модулирующего поля H и его частоту f. При этом $H_0=\text{const}=H_G$. Рассмотрим теперь влияние на изменения $\operatorname{tg}\delta$ постоянной слагающей H_0. Как видно из рис. 3 на примере максимумов *1* и *4* (см. таблицу), наведенные полем изменения $\operatorname{tg}\delta$ практически не изменяются при возрастании H_0 от H_G до некоторого $H_{cr}=21\,H_G$ и далее убывают до нуля при $H_0\geqslant40\,H_G$. Так же вели себя максимумы *6—8*. Из этой зависимости выпадает экстремум *5*. При полях $H_0>15$ Э все эффекты отсутствуют.

6. Даже в самой чистой воде всегда присутствуют два типа центров, на которые может действовать магнитное поле: 1) H^+ и OH^-, возникающие в результате термической диссоциации молекул $H_2O\rightleftarrows H^++OH^-$, а также продукты их взаимодействия с нейтральными молекулами: H_3O, $2H_2O+H^+$, $6H_2O+H^+$ и др.; 2) ядерные спины протонов (дейтронов). В [8] было доказано, что четверть всех молекул воды составляют диамагнитные молекулы пара-H_2O (спины протонов антипараллельны) и три четверти — орто-H_2O (спины параллельны). В D_2O соотношение иное. Магнитное поле влияет на динамическую протонную подсистему воды. Как видно из рис. 1, электропроводность воды $\varkappa$ возрастала на 20%. Величина pH в этой области, определяющая равновесную концентрацию H^+ и OH^-, при этом возрастала примерно на 0,4, что соответствует уменьшению концентрации H^+ в 2,5 раза. Рост $\varkappa$ связан с увеличением подвижности протонов в результате изменения структуры воды после воздействия $\tilde{H}$.

В случае самого слабого поля (0,08 А/м), в котором примеси практически не влияют на параметры максимумов $\operatorname{tg}\delta$, отношение обратных величин резонансных частот f_{res} для максимумов 1—4 (см. таблицу) не сильно отличается от отношения масс (M) следующих комплексов (в скобках): $1/f^4_{res}$; $1/f^3_{res}$; $1/f^2_{res}$; $1/f^1_{res}\approx M_{IV}(H^+):M_{III}(H_3O)$; $M_{II}(2H_2O+H^+)$; $M_I(6H_2O+H^+)$. При больших полях (частотах) это соотношение выполняется хуже. Не придавая окончательного значения

этим соотношениям, мы условно распределили все экстремумы таблицы на пять типов. При переходе от H_2O к D_2O отношение f_{res} для поля 12,3 А/м равно отношению масс H^+/D^+, для максимума типа I оно близко к отношению M_I простых и дейтерированных комплексов. Отношение амплитуд $\operatorname{tg}\delta$ для H_2O и D_2O не сильно отличается от соотношения концентраций пара- и ортомолекул в H_2 и в D_2O [8].

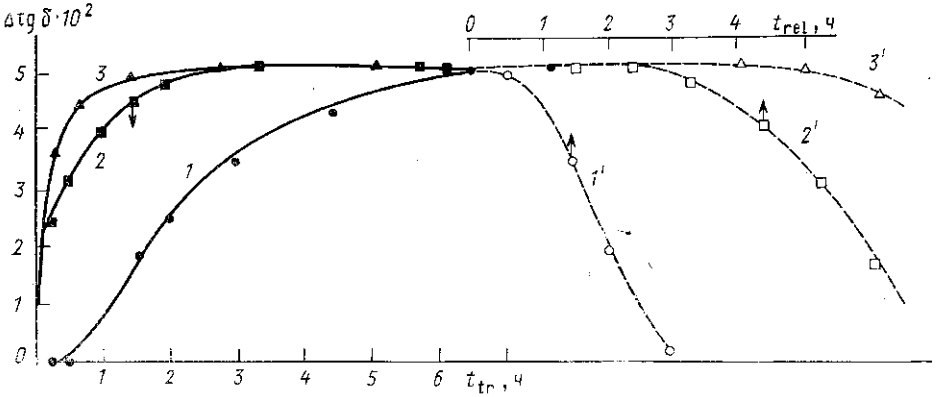

Рис. 4. Зависимость изменения $\operatorname{tg}\delta$ от t_{tr} (*1—3*) и t_{rel} (*1'—3'*) при $H_0=H_G$ — максимум 4 (*1, 1'*); $H_0=H_{cr}$ — максимум 4 (*2, 2'*); $H_0=H_{cr}$ — максимум 5 (*3, 3'*)

7. В модулированном поле $\tilde{H}$ сила Лоренца приводит к нутации орбиты H^+ и изменяет вероятность его переходов вдоль цепочки водородных связей. Его движение слабо зависит от H и f_{res} в отдельности, но определяется их отношением H/f_{res}, что для низких частот качественно согласуется с таблицей. В конденсированной среде протон испытывает массу соударений и взаимодействует с электромагнитными полями других заряженных частиц.

Рассмотренный механизм не объясняет существования предельного поля H_{cr} (см. рис. 3). В [3] мы предположили, что это связано со спиновыми запретами при переходах протонов вдоль цепочки. Оказалось, что H_{cr} практически совпадает с постоянной расщепления спинов протонов в изолированной молекуле H_2O (10,8 Э), что является подтверждением участия спинов в наблюдаемых эффектах. При $H<H_{cr}$ коррелированная спиновая система молекул не зависит от H_0, максимумы типа I—IV не изменяются (см. рис. 3). Согласно [4] такая ситуация напоминает эффект Ханле при параметрическом резонансе атомных магнитных моментов. Иначе ведет себя максимум типа V при H_{cr} (см. рис. 3), когда корреляция между спинами молекул разрушается. По-видимому, в этом случае имеет место резонансная прецессия спинов.

8. На примере максимума I при $H_0=H_G$ время достижения квазиравновесного значения $\operatorname{tg}\delta$ составляет $t_{tr}=6$ ч, время релаксации к исходному значению $t_{rel}\sim 3$ ч. С увеличением постоянной слагающей H_0 до H_{cr} времена t_{tr} уменьшаются, а t_{rel} увеличиваются, растет время памяти воды к воздействию поля. Наиболее быстро устанавливается равновесие для максимума типа V (по-видимому, чисто спиновые эффекты). Этому случаю отвечает самая долговременная память системы — часы вместо 10^{-11} с (время релаксации спинов отдельной молекулы). Последнее вызывает основные возражения противников «магнитных эффектов» в воде [5—7]. Столь большие различия в характеристичес-

ких микро- и макроскопических временах мы связываем с кластерской структурой воды, наличием в ней большого числа межфазных границ и локальных нарушений сетки водородных связей [3]. Следует учитывать и магнитную гетерогенность воды (пара- и ортовода). Согласно [9] в таких системах даже при отсутствии сильных экзотермических возмущений могут возникать длинновременные атермические флуктуации, типа фликкер-шума. Накапливаясь, эти флуктуации будут способствовать перестройке всей ажурной сетки водородных связей и переходу воды в новое квазиравновесное состояние (рис. 4). В [10] мы наблюдали флуктуации светорассеяния воды с периодами порядка минут. После воздействия поля H ($H=12{,}3$ А/м и $t_{tr}=6$ ч) эти флуктуации смещались в область малых времен.

Резонансные магнитные поля, воздействуя на спиновую систему воды, смещают величину pH. Последняя, по-видимому, определяется не только P и T системы, но в силу магнитной гетерогенности воды зависит от соотношения концентраций пара- и ортомолекул. Несмотря на малость по энергии магнитных эффектов, вызванные ими сдвиги pH могут сопровождаться значительными изменениями энтропии [11], т. е. упорядочением структур воды.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Семихина Л. П., Киселев В. Ф., Любимов Ю. А. Препринт физ. ф-та МГУ. 1986, № 22. [2] Семихина Л. П., Киселев В. Ф.//Изв. вузов. Физика. 1988. № 5. С. 13. [3] Киселев В. Ф., Салецкий А. М., Семихина Л. П.//Теор. и эксперимент. химия. 1988. № 3. С. 330. [4] Семихина Л. П. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М. (МГУ), 1989. [5] Левич В. Г.//УФН. 1966. 88. С. 789. [6] Зельдович Я. Б., Бучаченко А. Л.,Франкевич Е. Л.//УФН. 1988. 155, № 1. С. 1. [7] Волькенштейн М. В.//Природа. 1983. № 11. С. 96. [8] Конюхов В. К., Прохоров А. М. и др.//Тр. ИОФАН. 1988. 12. С. 100. [9] Тимашев С. Ф.//ДАН СССР. 1985. 281, № 1. С. 118. [10] Березин М. В., Ляпин Р. Р., Салецкий А. М. Препринт физ. ф-та МГУ. 1988, № 21. [11] Robinson G. W., Lee J.//J. Chem. Soc. Favad. Trans 2. 1986. 82. P. 2351.

Поступила в редакцию
20.03.89

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1990. Т. 31, № 2

УДК 534.83; 534.88

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ДВИЖУЩЕГОСЯ В ВОДЕ ЦИЛИНДРА

Ф. В. Рожин, О. С. Тонаканов, С. Г. Михайлов

(кафедра акустики)

Экспериментально изучены функции взаимной корреляции пульсаций давления на поверхности обтекаемого водой цилиндра при скорости течения 0,5 м/с. Показано, что при разнесении вдоль набегающего потока двух малых приемников взаимная корреляция пульсаций давления убывает по экспоненциальному закону. Предложен закон аппроксимации опытных данных, показано отличие от плоского случая.

Экспериментальные работы по изучению пространственной корреляции пульсаций давления на поверхности цилиндра, обтекаемого потоком жидкости перпендикулярно его оси, относятся к сравнительно узкому диапазону частот, прилегающему к частоте Струхаля [1]. В то же время для исследования шумов обтекания, возникающих при обтекании цилиндрического гидрофона (одна из традиционных его форм) по-