

12  
**Электретные процессы в неупорядоченных системах на основе жидкодисперсных сред**

© Л.А. Щербаченко,<sup>1</sup> Н.Т. Максимова,<sup>1</sup> Е.С. Комаров,<sup>1</sup> Л.И. Ружников,<sup>1</sup> В.А. Карнаков,<sup>1</sup>  
Е.С. Барышников,<sup>2</sup> Д.А. Краснов,<sup>1</sup> А.А. Трошев,<sup>1</sup> Д.С. Барышников,<sup>1</sup> Л.И. Ежова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет,  
664003 Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный медицинский университет,  
664003 Иркутск, Россия  
e-mail: Natmax\_2001@mail.ru

(Поступило в Редакцию 6 сентября 2011 г.)

Проведен электретно-термический анализ неупорядоченных систем на основе дисперсных сред. Показано, что метод термостимулированных токов позволяет оценить характер структурных изменений, происходящих в жидкодисперсной среде. Обнаружено проявление электретных свойств жидкой воды в свободном состоянии. Наблюдаемые множественные максимумы на кривой термостимулированного тока являются фактором, подтверждающим многокомпонентность системы „свободная вода“. Обсуждается механизм процессов, ведущих к возникновению электретного состояния в таких системах.

## Введение

Электретно-термический анализ является одним из наиболее информативных методов исследования дисперсных систем. Она дает возможность изучить процессы релаксации заряда, вызываемой нагреванием среды [1,2]. Форма и положение пиков в спектре термостимулированных токов позволяют выявить механизм удержания заряда электретом. В последнее время этот метод активно применяется для исследования органических систем, таких как кровь человека, синовиальная жидкость, белки, ферменты [3–5]. Характерными проявлениями электретного состояния таких веществ являются долговременно существующее электростатическое поле и наличие термостимулированных токов (ТСТ).

Для электретов биологического происхождения эффект „запоминания“ заряда и поляризация являются результатом предварительного воздействия слабых электрических и магнитных полей. Как показывает эксперимент, такие воздействия в биообъектах осуществляются через их водные среды в ходе структурных перестроек [5]. В результате исследования электретного эффекта, найденного в большинстве биополимеров, установлено, что непосредственно связанная с биополимером вода, находящаяся в структурированной форме, может быть приведена в электретное состояние [6].

При электретно-термическом исследовании дисперсных сред как органического, так и неорганического происхождения, включающих водную компоненту, прослеживается определенное подобие в характере спектра ТСТ. Во всех случаях таких наблюдений имеет место появление интенсивного пика в температурной области, близкой к температуре кипения воды [7–9]. Вещества, обладающие подобным спектром, характеризуются наличием структурированной воды, которая в тканях органи-

ческого происхождения может занимать значительную долю объема.

Вместе с тем результаты последних исследований свободной воды показали, что она неоднородна. Свободная вода представляет собой жидкодисперсную среду, состоящую из нанокластеров, погруженных в неупорядоченное хаотическое окружение [10]. Эксперимент, приведенный в работе [11], однозначно доказал, что нанокластеры воды обладают большими электрическими дипольными моментами. Установлено также, что такое состояние воды существует при всех температурах вплоть до температуры кипения [12]. В связи с этим фактом при проведении электретно-термического анализа веществ, в состав которых входят молекулы воды, возникает вопрос о ее роли как дисперсной структуры в составе гетерогенного образования.

Целью настоящей работы являлось исследование электретных свойств жидкодисперсных сред на основе природной воды и выявление факторов, влияющих на трансформацию и восстановление их структуры.

## Методика

В качестве основного объекта исследования была выбрана природная вода. Образцы были взяты из бассейна озера Байкал с глубины 1200 м. Вода подвергалась замораживанию и кипячению. В экспериментах сравнения использовалась дистиллированная вода. Кроме того, проводились сравнительные измерения с использованием венозной крови человека.

Для проведения исследований были созданы измерительные ячейки различной конструкции [13]. В основе конструкций — плоский конденсатор с двумя алюминиевыми электродами. Один из электродов дополнительно покрывался тонкой фторопластовой пленкой с высоким

омическим сопротивлением. ТСТ в интервале температур от 20°C до 140°C регистрировались с помощью цифрового вольтметра-электрометра В7-49 с погрешностью измерения тока  $10^{-15}$  А при линейном нагреве образца со скоростью, не превышающей 1 deg/min, и при отсутствии внешнего напряжения на электродах измерительной ячейки. Низкая скорость нагрева обеспечивала отсутствие градиентов температуры в образце, что являлось необходимым условием получения информативных и достоверных результатов. В связи с тем, что на электродах измерительной ячейки отсутствовало внешнее напряжение, динамика наблюдаемых спектров ТСТ зависела только от распределения собственных внутренних электрических полей, создаваемых локализованными носителями термоэлектретного заряда исследуемой системы. Полученные данные записывались в память ЭВМ и представлялись в виде временных диаграмм ТСТ и температуры образца. Проводился постоянный контроль стабильности начальной емкости для исследуемых образцов.

По результатам наблюдений рассчитывались основные электрофизические параметры носителей заряда. Так, энергия активации носителей  $U_n$  в окрестности максимума ТСТ характеризует вероятность выхода заряженных дефектов из потенциальных ловушек системы при данной температуре. Плотность термически освобожденного заряда  $\sigma_n$  позволяет оценить концентрацию структурных дефектов в указанных потенциальных ловушках. Время релаксации носителей заряда  $\tau_n$  соответствует времени разрушения электретного состояния системы.

Динамика деполяризации электрета характеризуется временем релаксации  $\tau$  носителей заряда и подчиняется закону Аррениуса [1]

$$\tau = \frac{1}{\omega_0} \exp\left(\frac{U}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $\omega_0$  — частотный фактор,  $U$  — энергия активации носителей заряда,  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K — постоянная Больцмана,  $T$  — температура системы. ТСТ достигает максимума при некоторой температуре  $T_{\max}$ , которая связана со временем релаксации  $\tau$

$$\tau = \frac{k}{\beta U} T_{\max}^2, \quad (2)$$

где  $\beta$  — скорость нагрева системы. Учитывая, что время релаксации  $\tau$  определяется по ширине максимума ТСТ  $\Delta T$ , взятой по уровню  $1/e$ , а также принимая во внимание соотношения (1) и (2), выражения для расчета основных релаксационных параметров имеют вид

$$\tau = \frac{\Delta T}{\beta} U = \frac{kT_{\max}^2}{\Delta T} \omega_0 = \frac{\beta}{\Delta T} \exp\left(\frac{T_{\max}}{\Delta T}\right), \quad (3)$$

где величины  $\Delta T$  и  $T_{\max}$  определены экспериментально. Энергия активации  $U_n$  определялась по температурному

положению  $T_{\max}^{(n)}$  и ширине  $\Delta T_n$  максимума тока в спектрах ТСТ:

$$U_n = \frac{k[T_{\max}^{(n)}]^2}{\Delta T_n}, \quad (4)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана. Плотность электретного заряда  $\sigma_n$  была вычислена по площади, заключенной под кривой термотока:

$$\sigma_n = \frac{1}{\beta S} \int_{T_n^{(1)}}^{T_n^{(2)}} I(T') dT', \quad (5)$$

где  $\beta = 1 \text{ deg/min}$  — скорость нагрева,  $T_n^{(1)}$  и  $T_n^{(2)}$  — нижняя и верхняя температурные границы релаксации носителей заряда  $n$ -го типа,  $S = 3.1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$  — площадь поверхности электродов ячейки.

## Эксперимент и его обсуждение

В спектрах ТСТ жидких сред на основе природной байкальской воды наблюдаются восемь выраженных пиков, располагающихся в области отрицательных токов, имеющих максимальное значение  $12 \cdot 10^{-8}$  А (рис. 1). Значительное изменение характера спектра обнаруживается после длительного (более 20 суток) хранения воды в неподвижном состоянии (рис. 2, *a*): величина тока уменьшается до  $0.6 \cdot 10^{-8}$  А. Кроме того, изменяется направление тока. Пики до температуры 75°C располагаются вверх, в то время как высокотемпературные (99°C и 125°C) — вниз. Изменения аналогичного характера наблюдаются и в образцах, подвергнутых предварительному кипячению (рис. 2, *b*) и дистилляции (рис. 2, *c*). Процесс рекристаллизации (замораживание образцов воды с последующим естественным плавлением при комнатной температуре) ведет к восстановлению исходной структуры (рис. 3). Характер восстановления зависит

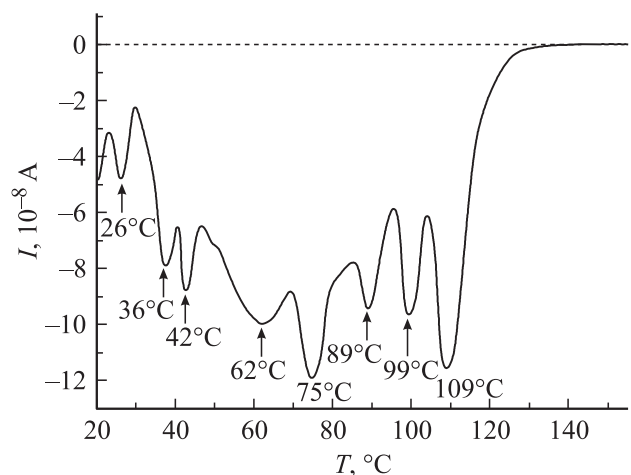
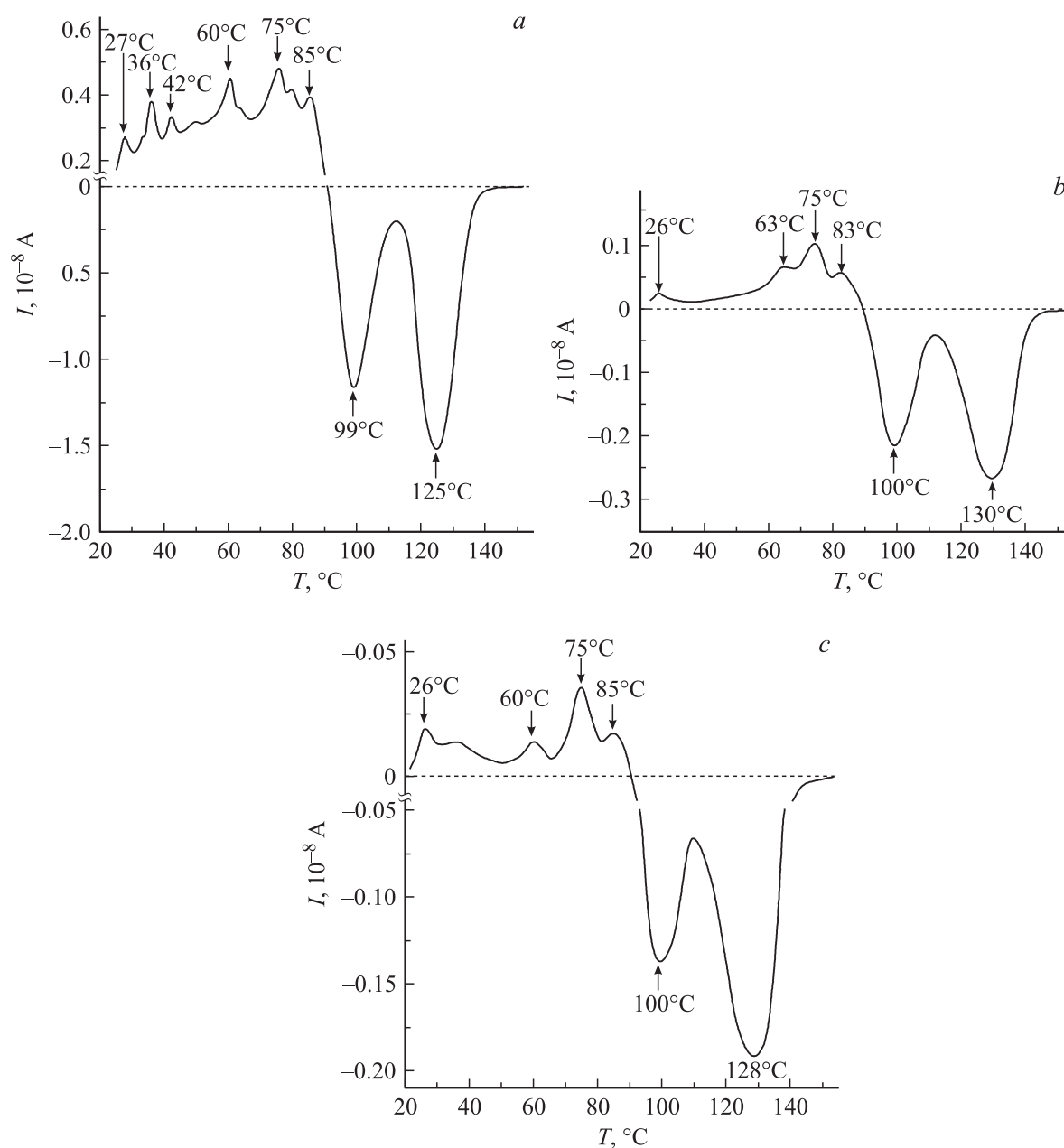


Рис. 1. Спектр ТСТ исходного образца природной воды.

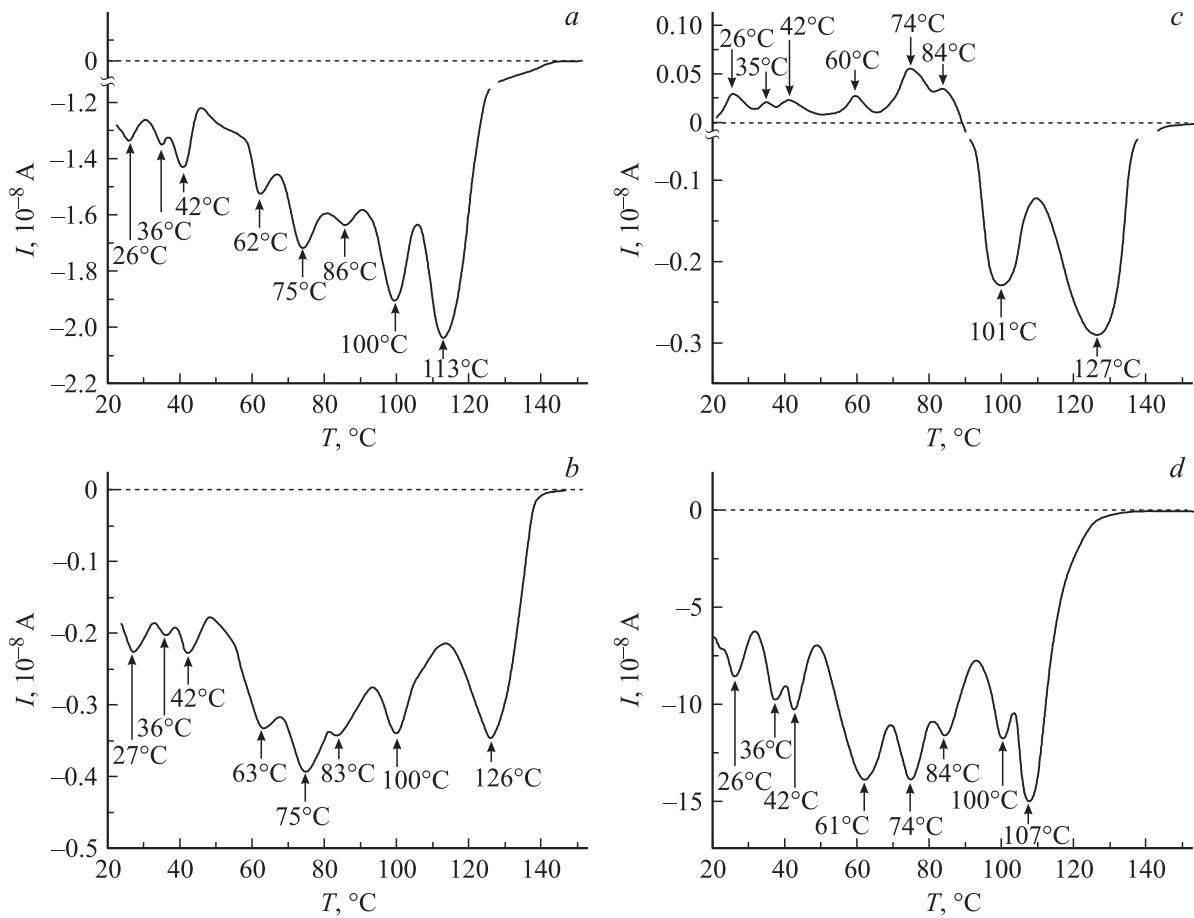


**Рис. 2.** Спектры ТСТ природной воды. Образцы получены в результате *a* — старения, *b* — кипячения, *c* — дистилляции.

от степени предварительного воздействия на образец. Восстановления первоначального спектра не происходит в образце, предварительно подвергнутом дистилляции.

В системе „жидкая вода“, являющейся полярной средой, электретный заряд может быть сформирован в результате ориентации имеющихся диполей, а также накопления зарядов вблизи неоднородностей. Такими неоднородностями могут быть границы между аморфной и кристаллической областями, о существовании которых сообщалось авторами [14,15]. Электрофизические параметры носителей заряда для основных исследуемых типов образцов представлены в табл. 1 и 2.

Во всех исследованных объектах имеется пик термотока в интервале температур 23–27°C, который может быть вызван термически стимулированным движением свободных гетерозарядов, накопленных вблизи электроконтактных границ раздела разнородных фаз под действием внутреннего поля системы [16]. Интенсивность релаксации в пределах этого максимума не очень велика и свидетельствует о слабом проявлении поляризационных процессов в образце в данном диапазоне температур. Термический пик при 35–36°C, вероятно, вызван релаксацией свободного межфазного заряда, накопленного на границах раздела поверхностно активных



**Рис. 3.** Спектры ТСТ перекристаллизованной „талой“ воды: *a* — „старая“, *b* — кипяченая, *c* — дистиллированная, *d* — „свежая“.

кристаллических водных структур и полярной свободной воды. Источником таких зарядов являются процессы ионизации, в ходе которых молекулы воды распадаются на ионы. Согласно теории Пула–Френкеля [17], диссоциация молекул жидкости в окрестности 35–36°C осуществляется преимущественно под действием внутреннего электрического поля, поскольку энергии теплового движения молекул для их ионизации недостаточно.

Выше 36°C упорядоченная структура полярной жидкой воды постепенно разрушается под действием теплового движения, что приводит к ослаблению связей между молекулами. При некоторой критической температуре и достаточной энергии активации носители заряда покидают потенциальные ловушки, при этом происходит разрушение дефектов определенного вида и выход освобожденных зарядов в каналы ионной проводимости.

Максимум при 60°C свидетельствует о структурном переходе связанной воды в свободное состояние, что сопровождается приобретением молекулами дополнительных степеней свободы за счет увеличения энергии тепловых колебаний с ростом температуры системы. Эффекты перехода молекул связанной воды в объемное состояние наблюдались при аналогичных температурах

и в других неорганических и органических средах. При этой температуре происходит тепловое разрушение упорядоченной структуры связанных слоев воды. Создаваемое ими электрическое поле существенно ослабляется, что сопровождается значительным уменьшением потенциального барьера для рассматриваемых носителей заряда и реализуется в виде интенсивного максимума тока в спектре ТСТ.

Пик при 75°C характеризуется заметно возросшей амплитудой по сравнению с отмеченными ранее максимумами в низкотемпературной области. При этой температуре, как правило, величина тока увеличивается на порядок, что свидетельствует об эффективном процессе разрушения большого числа достаточно прочных структурных комплексов. Релаксационные процессы в области температур 18–75°C имеют, как правило, низкую интенсивность. В этой области температур реализуются преимущественно перескоки электронных носителей из одного дефектного узла на другой. Релаксация низкотемпературного участка, вероятно, может быть объяснена наличием микроскопических областей, в которых поляризация осуществляется на локальных заряженных центрах.

Таким образом, низкотемпературные максимумы тока связываются с накоплением межфазных гетерозарядов под действием внутреннего электрического поля, а также с особенностями структуры водной компоненты. Как показывает эксперимент, температурное положение таких максимумов не зависит от вида образцов воды и срока хранения (рис. 1–3). Такие максимумы токов характерны как для неорганических, так и для органических дисперсных неупорядоченных систем, имеющих водную компоненту [3,8,9].

При более высоких температурах увеличение термостимулированного тока сопровождается ростом концентрации и подвижности соответствующих носителей заряда. В интервале 85–140°C каналы ионной проводимости расширяются и способны пронизывать весь объем образца, обеспечивая транспорт значительно большей части термически освобожденных заряженных компонентов до электродов ячейки. В этом диапазоне максимумы тока в отличие от низкотемпературных проявляют зависимость от вида исследуемых образцов и длительности их хранения. Появление пиков тока, вероятно, связано с термическим освобождением ионов из дефектных областей сложных ассоциатов, находящихся в объеме системы. Амплитуда пика в области 100°C, более чем на порядок выше остальных пиков, что свидетельствует

**Таблица 1.** Параметры основных релаксаторов электретного состояния жидкодисперсных сред

$T_{\max}, ^\circ\text{C}$	$U_n, \text{eV}$	$\sigma_n, \text{C/m}^2$	$\tau_n, \text{s}$
Свежий образец			
26	0.82	1.0048	390.7
36	2.68	0.2611	158.8
42	1.86	0.6445	256.8
61	0.77	2.9621	688.9
74	2.38	0.6587	245.1
84	2.01	0.7829	294.4
100	0.86	2.6413	762.8
107	3.74	0.3575	186.3
Кипячение			
27	0.90	0.0223	324.5
36	0.99	0.0017	540.0
42	1.03	0.0290	463.5
63	0.85	0.0627	608.2
75	2.06	0.0181	275.7
83	1.80	0.0206	330.0
100	0.75	0.0874	873.8
126	1.59	0.0471	456.4
Дистилляция			
26	0.95	0.0034	348.4
35	1.01	0.0030	436.4
42	1.07	0.0033	437.5
60	1.17	0.0038	439.3
74	1.29	0.0077	439.3
84	1.40	0.0049	445.7
100	1.49	0.0320	440.9
127	1.55	0.0607	662.5

**Таблица 2.** Параметры основных релаксаторов электретного состояния жидкодисперсных сред после рекристаллизации

$T_{\max}, ^\circ\text{C}$	$U_n, \text{eV}$	$\sigma_n, \text{C/m}^2$	$\tau_n, \text{s}$
Свежий образец			
26	2.97	0.16	148.7
36	2.91	0.24	152.7
42	4.03	0.16	118.2
62	0.52	3.15	1036.1
75	2.32	0.43	238.3
89	1.42	1.03	429.2
100	4.09	0.41	162.3
109	2.21	1.12	306.6
Кипячение			
26	2.14	0.0013	175.0
63	1.21	0.0067	443.8
75	3.65	0.0023	144.0
83	0.75	0.0157	808.1
100	1.49	0.0317	435.2
130	1.58	0.0425	481.9
Дистилляция			
26	1.37	0.0013	221.1
60	1.23	0.0023	400.0
75	1.40	0.0055	402.3
85	1.46	0.0027	414.3
100	1.69	0.0209	413.0
128	1.80	0.0291	411.5

о значительно возросшей концентрации разрушающихся структур, являющихся, по всей видимости, свободными молекулами и ионами воды. В области 109–136°C имеется пик, свидетельствующий о разрушении наиболее прочных структур. Появление этого пика предположительно связано с разрушением гидратированных ионов  $\text{H}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{H}_3\text{O}_2^+$  [18].

Значительная амплитуда релаксационных максимумов тока в области выше 100°C свидетельствует о большой концентрации накопленных зарядов на межфазных границах.

В интервале температур 100–140°C наблюдается смещение положения максимумов тока, связанное со временем хранения и видом образцов. Этот экспериментальный результат предполагает следующее объяснение. Энергия активации заряженных дефектов, находящихся на активной поверхности кристаллических ассоциатов и в объеме водной компоненты, является результирующей функцией энергии электрического и теплового полей. Экспериментально выявлено, что электрическая внутренняя энергия „свежих“ образцов воды больше, чем для „старых“ образцов (с длительным временем хранения). Следовательно, вклад электрической составляющей для „свежих“ образцов возрастает, и суммарное собственное электрическое поле системы способствует уменьшению энергии активации заряженных дефектов кристаллической фазы. Тем самым облегчается их выход

с поверхности и объема твердых включений в каналы ионной проводимости. Как следствие облегченный электрическим полем выход ионов с поверхности и из объема кристаллических ассоциатов осуществляется при более низких температурах. Так, для „свежего“ водного образца максимум высокотемпературного пика проявляется при температуре  $T_1 = 109^\circ\text{C}$  (рис. 1), а для „старого“ образца (время хранения более 20 суток) температура аналогичного пика составляет  $136^\circ\text{C}$ .

В окрестности температуры  $100^\circ\text{C}$  пик ТСТ всегда имеет отрицательную полярность (рис. 1–3). Смена направления тока свидетельствует об изменении направления напряженности собственного электрического поля в системе. Источниками электрического поля дисперсной водной системы являются, с одной стороны, заряды, расположенные на активной кристаллической льдоподобной поверхности [10,11], и, с другой — полярные молекулы и ионы водной компоненты. С ростом температуры концентрация ионов заметно увеличивается, в то время как напряженность твердой фазы остается неизменной. Носители заряда полярной компоненты образуются не только при диссоциации полярных молекул жидкости, но и в результате термической ионизации структурных дефектов твердокристаллической фазы. При термическом распаде основных структурных элементов системы образованные заряды попадают в каналы ионной проводимости и под действием градиентов потенциала внутреннего поля аккумулируют электрический ток. Таким образом, происходит усиление вклада напряженности внутреннего поля, создаваемого ионами и молекулами полярной жидкой фазы. Отсюда можно сделать вывод о вероятности изменения не только направления, но и модуля внутреннего электрического поля. Действительно, отрицательный максимум характеризуется значительно возросшей амплитудой тока (рис. 2).

В отличие от наведенных искусственных электретов природная вода, вероятно, обладает свойствами естественного электрета, в котором направленный транспорт ионов обусловлен наличием внутренних электрических полей. Формирование доминирующих максимумов в спектрах ТСТ вызвано преобразованием поляризованных заряженных дефектов до начала процесса термической активации входивших в состав структуры исследуемой системы. Спектры образцов, представленные на рисунках 1–3, свидетельствуют о неоднородности системы „жидкая вода“.

Фазовый переход „жидкость–лед“ способствует увеличению электрической энергии воды. Это объясняется появлением более эффективного электроконтактного взаимодействия на межфазных границах активной поверхности структурных комплексов и свободных ионов и молекул воды (табл. 2). Величина максимального значения тока для „талой“ (после рекристаллизации) воды почти в 1.5 раза превышает значение тока для исходного образца (рис. 3, d).

После рекристаллизации образца водных сред, предварительно подвергнутых фазовому преобразованию,

способны восстанавливать первоначальную структуру. Спектры ТСТ предварительно обработанных образцов представлены на рис. 2. Особенностью этих данных по сравнению с исходным образцом (рис. 1) является изменением направления результирующего внутреннего поля: в низкотемпературной области спектра ТСТ положительны, а в высокотемпературной — отрицательны.

Проведенные ранее исследования электретных свойств электрически активных неорганических и органических систем на примере мелкодисперсной гидратированной слюды и венозной крови человека при отсутствии внешнего напряжения [8,9] также показали аккумуляцию электрических токов, формируемых собственной внутренней электрической разностью потенциалов. Причина возникновения последней была объяснена наличием внутренних механизмов кулоновского взаимодействия на электроконтактных границах между полярными молекулами, а также ионами воды с зарядами активной поверхности механоактивированной мелкозернистой слюды или во втором случае — с электроактивными мембранами клеток крови. Сопоставление результатов исследований, проведенных ранее, с полученными в настоящей работе дает основание для привлечения их в качестве аналога, позволяющего объяснить сложные процессы формирования электретных свойств в дисперсных средах на основе свободной воды.

Можно предположить, что механизм генерации электрической разности потенциалов, ответственный за аккумуляцию электрических токов в рассматриваемой системе „жидкая вода“, основан на наличии электроконтактного взаимодействия активной поверхности твердой и полярной жидкой компонентов среды. Вероятно, что формирование электрической разности потенциалов в водных образцах также является результатом кулоновского взаимодействия полярных свободных молекул и ионов воды с активными твердыми поверхностями. Такими поверхностями могут служить кристаллические льдоподобные ассоциаты, о существовании которых сообщается в работах [10–12,14,15]. Экспериментальное наблюдение термостимулированных токов является фактором, свидетельствующим в пользу вывода о присутствии в водных образцах твердых кристаллических локальных неоднородностей с электрически активной поверхностью. По всей вероятности, на внешней оболочке устойчивых нанокластерных структур геометрия полярных молекул воды способствует формированию локальных заряженных центров, что и приводит к электрической активности поверхности таких комплексов.

## Заключение

Результаты проведенных исследований показали, что воздействие на структуру воды приводит к изменению спектра термостимулированных токов. Используемый в работе метод позволяет оценить характер происходящих структурных изменений.

Дисперсная система „свободная вода“ демонстрирует свойства естественного электрета. При комнатной температуре в ней присутствуют свободные заряды, которые приводятся в движение собственными градиентами потенциала. Формирование градиента потенциала собственного внутреннего поля в системе „жидкая вода“ при отсутствии внешних сил, вероятно, осуществляется в результате кулоновского взаимодействия между полярными молекулами свободной воды и активными твердыми поверхностями. Этот вывод логически указывает на присутствие в жидкой свободной воде твердой фазы. О многокомпонентности системы свидетельствуют также обнаруженные на кривой ТСТ многочисленные максимумы, связанные с наличием разнотипных релаксаторов свободных зарядов.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют в пользу того, что вода представляет собой сложную и неоднородную по структуре жидкость, состоящую не только из свободных ионов и молекул, но также из устойчивых ассоциатов-комплексов, которыми могут являться обнаруженные ранее кристаллические льдоподобные нанокластерные структуры.

В пределах фазовых переходов термическое воздействие на жидкодисперсные среды приводит к трансформации структуры входящей в их состав водной компоненты. Можно предположить, что в диапазоне температур 100–140°С продукты трансформации будут определять дальнейший ход процессов, осуществляемых в таких системах.

## Список литературы

- [1] Electrets / Ed. by G.M. Sessler. Vol. 1. Morganhill (Ca), 1999. 431 p.
- [2] Гороховатский Ю.А., Бордовский Г.А. Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков. М.: Наука, 1991. 248 с.
- [3] Пинчук Л.С., Кравцов А.Г., Зотов С.В. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 5. С. 115–118.
- [4] Чернякова Ю.М., Пинчук Л.С., Кравцов А.Г., Кадолич Ж.В., Николаев В.И. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 5. С. 119–123.
- [5] Кулин Е.Т. Биоэлектретный эффект. Минск: Наука и техника, 1980. 216 с.
- [6] Маскаренас С. // Электреты. М.: Мир, 1983. С. 400–431.
- [7] Gaur M.S., Tiwari R.K., Prashant Shukla et al. // J. Trends Biomater. Artif. Organs. 2007. Vol. 21. N 1. P. 8–13.
- [8] Щербаченко Л.А., Борисов В.С., Максимова Н.Т. и др. // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 9. С. 129–137.
- [9] Щербаченко Л.А., Борисов В.С., Максимова Н.Т. и др. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 8. С. 136–142.
- [10] Huang C., Wikfeldt K.T., Tokushima T. et al. // PNAS. 2009. Vol. 106. P. 15 214.
- [11] Moro R., Rabinovitch R., Xia Ch., Kresin V.V. // Phys. Rev. Lett. 2006. Vol. 97. P. 123 401-1-4.
- [12] Першин С.М., Адикс Т.Г., Лукьянченко В.Г., Нигматуллин Р.Р., Потапов А.А. // Нелинейный мир. 2009. Т. 7. № 2. С. 79–90.
- [13] Ружников Л.И., Щербаченко Л.А., Борисов В.С., Максимова Н.Т. и др. Устройство для диагностики функционального состояния крови человека / Патент РФ. № 2 393 476. Зарегистр. 27.06.2010 // БИ. 2010. № 18.
- [14] Зенин С.В., Тяглов Б.В. // Журн. физ. химии. 1994. Т. 68. № 4. С. 636–641.
- [15] Смирнов А.Н., Сыроешкин А.В. // Рос. хим. журн. 2004. Т. 68. № 2. С. 125–135.
- [16] Дерягин Б.В., Овчаренко Ф.Д., Чураев Н.В. Вода в дисперсных системах. М.: Химия, 1989. 285 с.
- [17] Френкель Я.И. Сборник избранных трудов. М.: Наука, 1975. Т. 2. С. 217.
- [18] Тонконогов М.П. // УФН. 1998. Т. 168. № 1. С. 29–54.