

Особенности формирования электретного состояния в электрически активных гидратированных структурах

© Н.Т. Максимова, Д.С. Савинов, Д.Д. Мирошник, Л.И. Ружников

Иркутский государственный университет,
664003 Иркутск, Россия
e-mail: Natmax_2001@mail.ru

Поступило в Редакцию 11 апреля 2025 г.

В окончательной редакции 4 февраля 2026 г.

Принято к публикации 16 февраля 2026 г.

Методами термостимулированной токовой спектроскопии (ТСТ), а также абсорбционной и люминесцентной спектроскопии в коллоидных системах, содержащих активную твердую и полярную жидкую фазы, проведено исследование механизма межфазного электрического взаимодействия, обеспечивающего запасание заряда электрически активной средой. Обнаружено, что все исследуемые объекты проявляют свойства электрета. В спектрах ТСТ биологических объектов обнаружены пики, связанные с присутствием гидратированных молекул белков гемоглобина. Показано, что создание дефектов структуры, формирующих связанное состояние с молекулами воды, является ключевым механизмом для получения эффективных гидратированных электретных материалов.

Ключевые слова: биоэлектрет, гидратация, коллоидная система, полярная жидкая фаза, дисперсная среда.

DOI: 10.61011/JTF.2026.07.63137.60-25

Введение

Процессы жизнедеятельности организма сопровождаются возникновением в клетках и тканях электродвижущих сил [1–3]. Выяснение физико-химических причин и механизмов генерации электрических полей в биологических объектах является основополагающим моментом для биофизики и для медицины. Кроме того, приоритетной физической задачей является получение новых материалов с особыми свойствами, которые могут быть использованы как в сфере энергетики, так и в медицинской практике [4–11].

Способность диэлектрических материалов запасать и длительно сохранять заряд, называемая электретным эффектом, активно изучается в структурах как неорганического, так и органического происхождения [12–17]. В технических приложениях довольно эффективно используются электретные свойства материалов неорганического происхождения [17]. Сведения об использовании электретного эффекта в органических материалах в настоящее время сконцентрированы в основном в области медицины. Наиболее интенсивно разрабатываемым направлением для перспективного использования в медицине является применение электретных пленок при изготовлении эндопротезов и искусственно созданных сосудов [9,12].

В то время как в общем случае электретные состояния могут наблюдаться в веществах, содержащих диполи или ионы, для биоэлектретов физико-химической основой эффекта является связанная белками вода [1–3]. Предполагается, что в органическом материале в ходе биохимических процессов, обеспечивающих жизнедеятельность организма, формируется импульсное электрическое по-

ле, действие которого переводит воду в электретное состояние [2,3]. Таким образом, в случае гидратированного объекта такое состояние может быть обусловлено наличием связанной или структурированной воды.

В органическом веществе белки, наряду со связанной водой, содержат жидкокристаллическую воду и, кроме того, погружены в жидкокристаллическую воду цитоплазмы, которая занимает три четверти объема живой клетки [18–19]. Таким образом, отмеченная особенность структуры биологических объектов проявляется в том, что вода в них находится в связанном состоянии и обеспечивает накопление энергии и проявление биоэлектретного эффекта.

Для биологических систем одним из наиболее информативных методов исследования может служить электретно-термический анализ [20–22]. Он позволяет изучать процессы релаксации заряда в среде при ее нагревании. В связи с тем, что решающая роль в трансформации и переносе энергии внутри живой клетки принадлежит движению электронов, форма и положение пиков в спектре термостимулированных токов позволяют выявить механизм удержания заряда биоэлектретом. В биологических явлениях можно выделить два вида энергии: энергия валентных связей, запасенная в химических соединениях, и энергия миграции в биохимических процессах. Характерный для биоэлектретов эффект поляризации и запоминания заряда связан с воздействием собственных слабых электрических и магнитных полей. Такие воздействия в объектах биологического происхождения осуществляются в ходе структурных перестроек через их водные среды.

Целью настоящей работы являлось изучение условий запасания заряда в биоэлектретной гидратированной

среде на основе структур органического происхождения и выяснение роли структурированной воды в обеспечении такого эффекта в среде неорганического происхождения.

1. Материалы и методы исследования

Объектами исследования служили биологические структуры животного происхождения и неорганические материалы на основе кристаллических сред. В качестве биологических объектов животного происхождения были выбраны личинки комаров-звонцов, мотыль или *Chironomus* [23], относящиеся к типу насекомых, и дендробена, обыкновенный дождевой червь или *Lumbricus terrestris* [24], относящаяся к типу беспозвоночных животных. Эксперименты на биологических объектах проводились с учетом максимального сохранения жизнеспособности клеток организма. Поэтому живой организм механически разрушался непосредственно перед помещением в измерительную ячейку. Объектами неорганического происхождения служили дисперсные среды на основе монокристаллов фторида лития LiF.

Для исследования спектров термостимулированных токов (ТСТ) изучаемые образцы помещались в ячейку специальной конструкции [25], представляющую собой плоский конденсатор объемом $0.12 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ с двумя одинаковыми электродами из инвара ($^{56}\text{FeNi}$).

Измерительная ячейка представляет собой керамический цилиндр со внутренним диаметром 18 mm и образующей 50 mm. Витки бифилярной обмотки из нихромового провода, выполняющей роль нагревателя, плотно намотаны по наружной поверхности цилиндра от нижнего до верхнего края. Нижний неподвижный электрод в виде диска диаметром 15 mm расположен на расстоянии 10 mm от нижнего края цилиндра. Верхний электрод, диаметром также 15 mm, может перемещаться вдоль внутренней поверхности цилиндра. Исследуемое вещество располагается между электродами. В результате формируется своеобразный конденсатор. Пространство, занимаемое образцом, обычно составляет не более 5–7 mm. После заправки ячейки верхняя часть цилиндра запирается керамической крышкой на весь период измерения зависимости тока от температуры.

ТСТ регистрировались в интервале температур от 20 °C до 220 °C с помощью высокоточного цифрового вольтметра-электронметра В7-49 (погрешность измерения тока 10^{-15} А). Линейный нагрев образца осуществлялся со скоростью, не превышающей 5 deg/min. Внешнее напряжение на электроды измерительной ячейки не подавалось. 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. Перед записью спектра ТСТ осуществлялся контроль емкости

и проводимости исследуемого образца с использованием измерителя иммитанса (RLC) Е7-20.

После установки материала в измерительную ячейку осуществлялась оценка его способности удерживать электрический заряд, т.е. электрическая емкость, а также способность проводить электрический ток, т.е. проводимость. Это индивидуальные характеристики объектов, которые сами по себе представляют интерес. Кроме того, для сопоставления объектов было необходимо исключить некоторые свойства объектов, существенно изменяющие емкость и проводимость. Поэтому для получения возможности сравнения объектов выбирались образцы с близкими значениями емкости C_p и проводимости G_p . Объекты одинакового происхождения при близких значениях C_p и G_p давали хорошую повторяемость при записи кривых зависимости тока от температуры.

Для оценки состояния образцов были использованы также методы абсорбционной и люминесцентной спектроскопии. Для измерения спектров оптического поглощения использовался спектрофотометр СФ-56 (ЛОМО). Спектры свечения были измерены с помощью флуоресцентного спектрофотометра Hitachi 650-10S. Замораживание объектов производилось в криогенной камере при –20 °C. Запас поляризации вещества оценивался по величине плотности остаточного заряда, накопленного на поверхности исследуемого объекта.

2. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены спектры оптического поглощения исследуемых объектов биологического происхождения. По сравнению с другими насекомыми, комары-звонцы имеют ряд уникальных особенностей. В частности, в гемолимфе их личинок содержится гемоглобин, используемый для дыхания [23]. Гемолимфа представляет собой жидкость, циркулирующую в сосудах и межклеточных полостях беспозвоночных животных с незамкнутой системой кровообращения [23,24]. В измеренном нами спектре поглощения гемолимфы мотыля обнаружены полосы оксигемоглобина HbO_2 , характерные для крови живых организмов: 415, 542 и 577 nm [26]. В коротковолновой области спектра поглощения полосы с максимумами 200 и 280 nm связаны с присутствием молекул белков [27]. Максимум 970 nm соответствует полосе поглощения жидкой воды [28].

При измерении ТСТ в процессе нагрева образца происходит нарушение структуры объекта и освобождение зарядов, захваченных ловушками различного происхождения. На температурной зависимости ТСТ мотыля (рис. 2, кривая 1) наблюдаются максимумы в области 100 °C и 110 °C. Низкотемпературная область (20 °C – 70 °C) связана с накоплением межфазных гетерозарядов под действием внутреннего электрического поля [29,30], а также с присутствием гидратированных молекул белков гемолимфы. Область более высоких

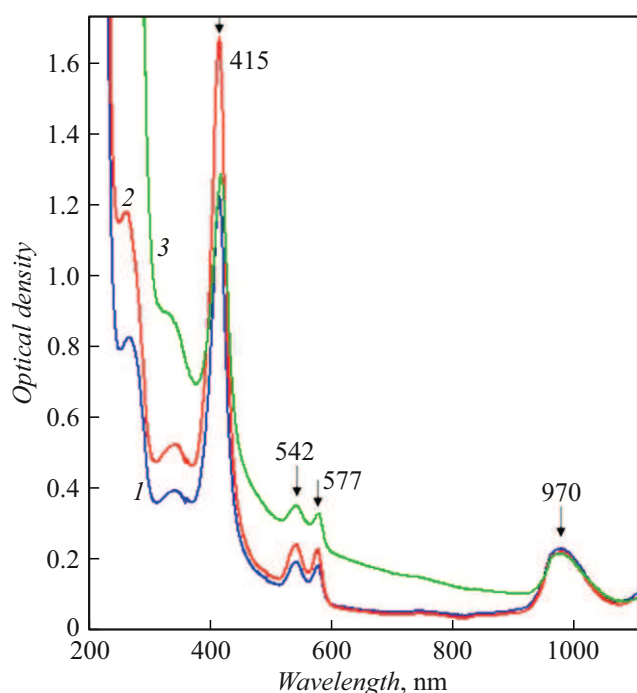


Рис. 1. Спектры оптического поглощения раствора гемолимфы: 1 — *Chironomus*, исходный образец; 2 — *Chironomus*, после воздействия низких температур; 3 — *Lumbricus terrestris*, исходный образец.

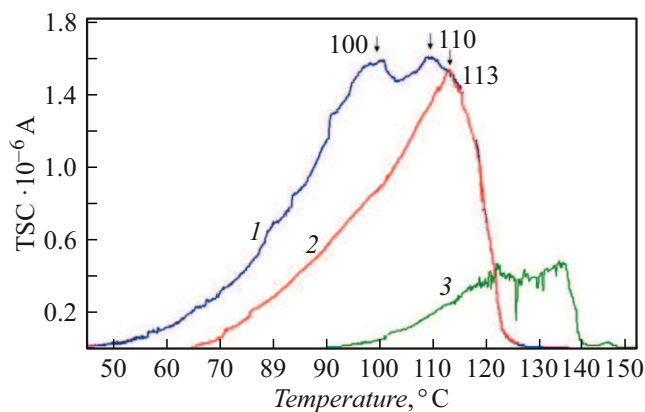


Рис. 2. Спектры ТСТ объекта *Chironomus*: 1 — исходный образец; 2 — после воздействия низких температур; 3 — *Chironomus* в состоянии куколки.

температур ($80^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$) связана с термическим разрушением структуры белков гемоглобина. Скорость и степень денатурации белков при нагревании зависят от температуры нагревания и его продолжительности. В большинстве белков к нарушению различных связей приводит их нагревание до температуры выше 70°C . Это объясняется усилением колебаний атомов полипептидной цепи [26].

Для оценки влияния гидратированности объекта на электрентные характеристики производилось заморажи-

вание объекта до -20°C и последующее его оттаивание до температуры в диапазоне $0^{\circ}\text{C} - (+4)^{\circ}\text{C}$ и измерение спектра ТСТ.

Результаты измерений представлены на рис. 2, кривая 2. При замораживании учитывалось, что воздействие низких температур деформирует структуру клетки и тем самым уменьшает общую гидратированность объекта. Ниже температур, при которых происходит превращение воды в лед, негативным фактором являются процессы кристаллообразования. Механическое действие кристаллов льда приводит к разрыву оболочек клеток. В межклеточном пространстве кристаллы льда разрастаются. Это приводит к сдавливанию и уменьшению размеров клетки. Оболочка клетки сжимается и повреждает клеточную протоплазму.

В результате проведенного воздействия в спектре ТСТ объекта исчезают полосы с коротковолнового края при 100°C и 110°C (рис. 2, кривая 2). В спектре появляется пик с максимумом 113°C . Полосы в низкотемпературной области спектра ТСТ обусловлены освобождением электронов из ловушек в структуре белков, которые связаны с гидратированной структурой гемолимфы. Следует отметить, что структура спектра оптического поглощения образца *Chironomus* после воздействия низких температур в целом не изменяется (рис. 1, кривая 2). Сохраняется положение основных полос, связанных с оксигемоглобином, и несколько увеличивается интенсивность этих полос. В спектре ТСТ высокотемпературный пик 113°C (рис. 2, кривая 2), вероятно, имеет связь с гемоглобином, а также с органической соединительной тканью образца (волокнами коллагена), которая имеет меньшее содержание слабосвязанных молекул воды и не подвергается разрушающему действию низких температур.

О связи высокотемпературного пика с органической соединительной тканью мотыля свидетельствуют измерения ТСТ этого объекта в состоянии куколки. В этом состоянии у исследуемого объекта появляются крылья, голова, членистые конечности. Содержание водной компоненты в объекте значительно снижается, и усложняется состав соединительной ткани [23]. В спектре ТСТ для этого образца наблюдается сдвиг максимумов пиков ТСТ в сторону высоких температур (рис. 2, кривая 3).

Дендробена, *Lumbricus terrestris* представляет собой образец более сложной структуры (тип беспозвоночных животных). В ее составе также имеется гемолимфа [24], которая выполняет те же функции, что кровь и лимфа у животных с замкнутой системой кровообращения (рис. 1, кривая 3).

В спектре ТСТ объекта *Lumbricus terrestris* (рис. 3, кривая 1) низкотемпературная область ($20^{\circ}\text{C} - 70^{\circ}\text{C}$) практически не проявляется, что может свидетельствовать о меньшей гидратированности объекта. Имеется два максимума — при 105°C и при 150°C . Первый максимум, вероятно, связан с гидратированными молекулами белков гемоглобина. Высокотемпературный максимум обусловлен разрушением белков в составе гемолимфы,

Сравнительные характеристики объектов исследования

№	Образец	Состояние	Cp, nF	$Gp, \mu S$	Номер пика	Температурное положение пика		Энергия активации E, eV	Величина тока в макс пика $I, 10^{-6} A$	Площадь термограммы $S, a.u.$	Плотность заряда $\sigma, 10^{-2} C/m^2$
						$^{\circ}C$	K				
1	<i>Chironomus</i> (мотыль)	Исходный образец	8.3	173	1	100	373	0.72	1.3	34	0.94
					2	110	383	0.74			
2	<i>Chironomus</i> (мотыль)	После заморозки	5.9	117	1	113	386	0.75	1.3	16	0.88
3	<i>Chironomus</i> (Комар)	Образец в состоянии куколки	8.2	206	1	120	393	0.76	0.5	5.8	0.32
					2	135	408	0.79			
4	<i>Lumbricus terrestris</i> (дендробена)	Исходный образец	36	2250	1	105	378	0.73	3.38	55	3.05
					2	150	423	0.82			
5	<i>Lumbricus terrestris</i> (дендробена)	После заморозки	92	2645	1	165	438	0.85	1.5	27	1.5
					2	175	448	0.87			
6	$LiF F_3^+$	Исходный образец	78	2474	1	100	373	0.72	0.61	7.5	0.42
					2	110	383	0.74			
7	$LiF F_3^+$	После заморозки	48	1717	1	110	383	0.74	0.27	4	0.22
8	LiF не содержит F_3^+	Исходный образец	49	1882	1	110	383	0.74	0.28	2	0.11

а также в составе органической соединительной ткани образца.

Замораживание образца дендробены при $-20^{\circ}C$ с последующим оттаиванием оказывает влияние на характер спектра (рис. 3, кривая 2), однако процесс заморозки не приводит к полному устранению полосы в области $105^{\circ}C$. Она снижается и несколько сдвигается в сторону высоких температур. В этом образце происходит разрушение компоненты, связанной с присутствием слабосвязанных молекул воды в составе гидратированных молекул белков гемоглобина. Аналогичным образом изменяется полоса в области $150^{\circ}C$. В последнем случае, наряду со сдвигом в сторону высоких температур, выявляются максимумы при $165^{\circ}C$ и $175^{\circ}C$.

Как было ранее отмечено, в случае гидратированного объекта электретное состояние обусловлено наличием связанной или структурированной воды. Процесс замораживания объекта с последующим размораживанием при комнатной температуре и измерением спектров ТСТ показал, что после заморозки значительно снижаются (в ряде случаев исчезают) низкотемпературные пики, связанные с гидратированными образованиями. Выявляется повреждающий характер кристаллообразования. Жидкокристаллическая вода, содержащаяся в белках и в цитоплазме, при заморозке приводит к частичной деформации этих структур, а также вымораживается,

и это отражается на спектрах ТСТ, ответственных за соответствующие структуры.

Гидратация является процессом, который сопровождается взаимодействием полярных молекул воды с другими молекулами, ионами или атомами гидратируемого вещества [29–31]. Молекула воды, находящаяся в непосредственной близости от элемента органической структуры, проявляет себя иначе, чем молекула в объеме воды. Если на поверхности такого элемента имеются полярные группы, то они формируют водородные связи с водой. Результаты проведенного эксперимента, представленные в таблице, показывают: чем сложнее гидратируемая структура, тем глубже залегают электронные ловушки, характеризующие электретное состояние.

Для обоснования этого положения мы использовали модельный объект неорганического происхождения, дисперсную среду на основе монокристалла фторида лития. Монокристаллы фторида лития практически нерастворимы в воде. Следовательно, силы взаимодействия молекул воды с поверхностью кристалла будут иметь преимущественно кулоновскую природу. Механоактивация, механическое дробление, переводит эту систему в электрически-активное состояние [25,32]. В результате проведенной механоактивации была получена среда с дисперсностью порядка $1-40 \mu m$. Размеры полученных кристаллитов коррелируют с размером эукарио-

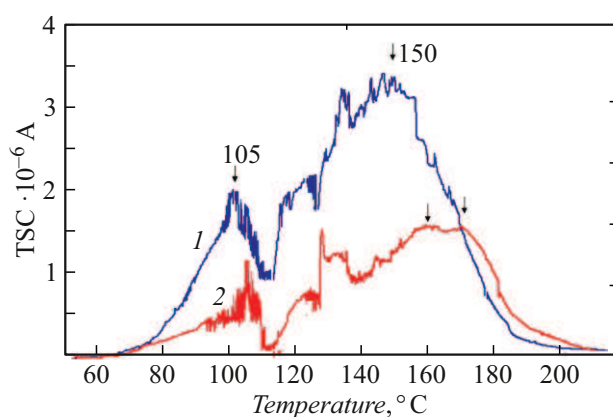


Рис. 3. Спектры ТСТ объекта *Lumbricus terrestris*: 1 — исходный образец; 2 — образец после воздействия низких температур.

тической клетки, величина которой составляет от 10 до $50 \mu\text{m}$ [18,19]. Следует отметить, что эукариотическая клетка является основным элементом структуры исследуемых нами живых организмов.

В механоактивированных, увлажненных электрически активных объектах межфазные взаимодействия, сопровождающиеся образованием двойного электрического слоя, приводят к формированию электретного эффекта и запасанию энергии [32]. Вместе с тем для создания более глубоких электронных ловушек, обеспечивающих более устойчивое существование электретного эффекта, необходимо наличие структуры, прочно удерживающей молекулы воды. Вероятными кандидатами для этого процесса могут служить радиационные дефекты, центры окраски, которые формируются в этих кристаллах под действием гамма-излучения.

Образованные в кристалле центры окраски в ряде случаев несут положительный заряд, который с учетом отрицательной заряженности поверхности водной пленки, внедренной в систему при увлажнении, может служить основой для создания устойчивого гидратированного состояния.

Выбранные нами монокристаллы были предварительно облучены гамма-излучением от источника ^{60}Co в интервале доз $3 \cdot 10^3$ – $2 \cdot 10^5$ С/кг. В результате облучения в монокристаллах были созданы центры окраски. Размеры собственных дефектов по порядку величины соответствуют размеру элементарной ячейки кристалла LiF (постоянная решетки $0.4 \cdot 10^{-9}$ м) [33]. Глубокая структуризация дефектности может служить залогом создания устойчивой гидратированной системы. В диапазоне доз облучения выбранных образцов можно ожидать наличия нейтральных (F , F_2) и положительно заряженных F_3^+ центров. Спектры поглощения исследованных монокристаллов приведены на рис. 4. Выбранные образцы монокристаллов отличались содержанием F_3^+ центров. Для экспериментов с использованием модельных объектов были выбраны монокристаллы LiF, выращенные по мето-

ду Киропулоса на воздухе. В образцах LiF, выращенных на воздухе и содержащих примеси в виде диполей кислорода и анионной вакансии $\text{O}-\text{Va}^+$, а также ионов гидроксидов OH^- , после облучения гамма-излучением образуются центры $\text{O}-F_3^+$ [34], полоса поглощения которых имеет максимум в области 400 нм (рис. 4, кривая 1). При возбуждении в этой полосе наблюдается зеленое свечение, максимум которого соответствует 540 нм. В образце LiF, представленном для сравнения (рис. 4, кривая 2), отсутствует полоса в области 400 нм, соответственно зеленое свечение не возбуждается, что позволяет сделать вывод о практическом отсутствии F_3^+ центров. В спектрах ТСТ механоактивированных увлажненных дисперсных сред на основе LiF (рис. 5) наблюдаются две области: низкотемпературная (до 80°C) и высокотемпературная (80°C – 120°C). Низкотемпературная связана с присутствием поляризованных молекул воды, структура которых разрушается при термическом воздействии до 70°C [29,30]. Высокотемпературная область (80°C – 120°C), вероятно, обусловлена дефектами, в состав которых входят молекулы воды и центры окраски.

Замораживание объекта вносит изменение в характер спектра (рис. 5, кривая 2). Разрушается полоса с максимумом 100°C , в то время как положение максимума 110°C остается практически неизменным.

Для того чтобы выяснить природу дефектов, обеспечивающих наиболее прочную связь с молекулами воды, мы исследовали люминесценцию этих объектов в видимом диапазоне. Как было отмечено, центры окраски, образующиеся в монокристалле в результате воздействия радиации, могут быть как нейтральными образованиями, так и несущими заряд. Положительно заряженные центры окраски в условиях диспергированной механоак-

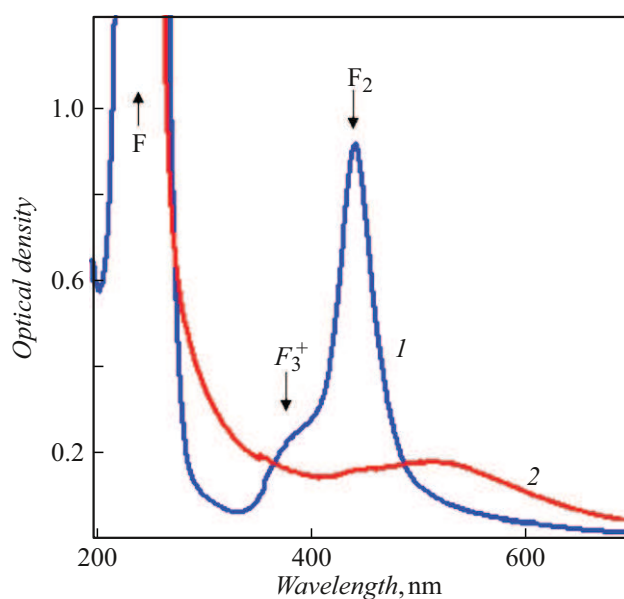


Рис. 4. Спектры оптического поглощения монокристаллов LiF, облученных гамма квантами: 1 — образец с F_3^+ центрами; 2 — образец не содержит F_3^+ центров.

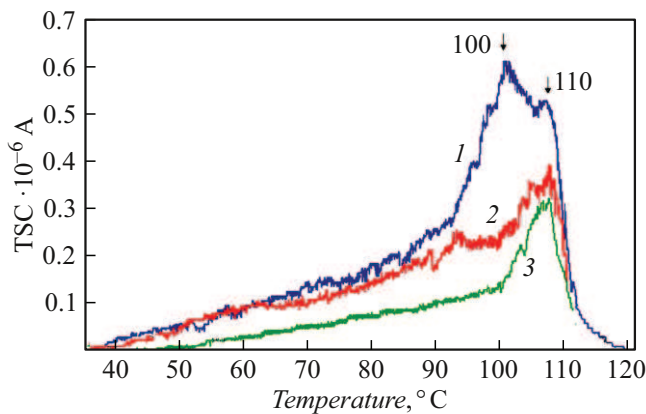


Рис. 5. Спектры ТСТ дисперсной увлажненной среды на основе кристалла LiF: 1 — исходный образец с F_3^+ центрами; 2 — исходный образец после воздействия низких температур; 3 — образец не содержит F_3^+ центров.

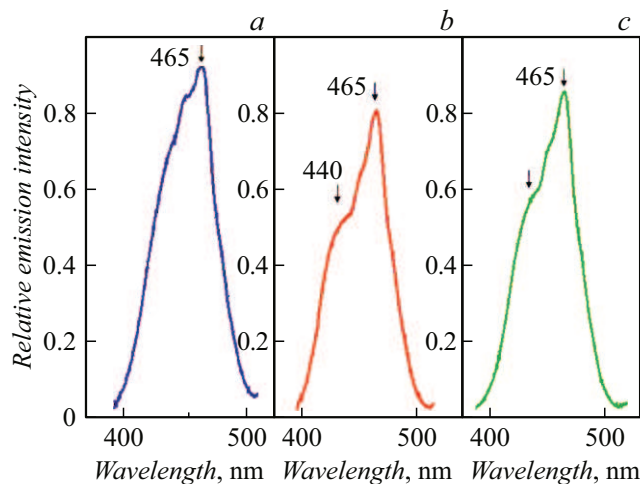


Рис. 6. Спектры возбуждения люминесценции F_3^+ центров для свечения 540 nm в дисперсной среде на основе кристалла LiF. Измерено при 300 K: *a* — исходный образец; *b* — после увлажнения; *c* — после воздействия низких температур.

тивированной увлажненной среды, вероятно, способны формировать достаточно прочную связь с отрицательно заряженными водными структурами, сформированными при увлажнении.

При возбуждении с коротковолнового края F_2 полосы поглощения (рис. 4, кривая 1) наблюдается зеленая люминесценция с максимумом 540 nm, принадлежащая F_3^+ центрам окраски [34,35]. Спектры возбуждения люминесценции дисперсной среды, имеющей в своем составе положительно заряженные F_3^+ центры, представлены на рис. 6. В исходном объекте (рис. 6, *a*) наблюдается полоса возбуждения зеленого свечения, принадлежащего F_3^+ центрам (максимум возбуждения — 465 nm). В спектре возбуждения увлажненного образца с коротковолнового края исходной полосы появляется четко выраженная „ступенька“ в области 440 nm (рис. 6, *b*).

Такая деформация спектра возбуждения связана с тем, что при увлажнении дисперсной механоактивированной среды на границе раздела фаз, одной из которых является поверхность водной пленки, формируется двойной электрический слой (ДЭС). Вблизи положительно заряженных центров окраски ДЭС оказывает влияние на энергетические параметры этих центров. „Вымораживание“ (рис. 6, *c*) приводит к некоторому снижению „ступеньки“ в области 440 nm спектра возбуждения, однако полностью действие ДЭС не устраняет.

Результаты исследования люминесценции соответствуют процессам в спектрах ТСТ (рис. 5). Так, в исходном увлажненном образце присутствуют два пика 100 °C и 110 °C. После замораживания пик 100 °C устраняется. Оба пика — 100 °C и 110 °C — связаны с присутствием в объекте центров окраски. Однако о преимущественной связи пика 100 °C с F_3^+ центрами может свидетельствовать факт отсутствия этого максимума в образце, в котором содержание F_3^+ минимально (рис. 5, кривая 3).

Состояние поляризации электрета соответствует ситуации, при которой остаточный заряд будет наибольшим при максимальном времени релаксации заряженного состояния. Таким образом, параметры электрета как физического объекта и материала определяют его способность создавать и удерживать электрическое поле. Прежде всего, это заряд. Величина заряда, накапливаемого на поверхности, определяет силу поля, создаваемого электретом. Ключевым параметром, определяющим способность материала длительно сохранять электрический заряд, является энергия активации.

В таблице приведены сравнительные характеристики исследованных объектов. Энергия активации центров захвата была оценена по кривым термограммы с учетом температурного положения соответствующих пиков. Для оценки глубины залегания электронных ловушек была использована формула Бьюба [4,20,36]:

$$E = 22.5 k \cdot Tm, \quad (1)$$

где E — энергия активации захвата, Tm — температура, соответствующая пику максимальной интенсивности тока, k — постоянная Больцмана, [eV], ($k = 0.86 \cdot 10^{-4}$ eV/K). Плотность заряда, накопленного на поверхности электрета, вычислялась по площади, заключенной под кривой термотока. Для этого предварительно был оценен остаточный заряд электрета по формуле

$$Q = \frac{S_0 M_1 M_2}{v}, \quad (2)$$

где S_0 — площадь под кривой термограммы, [cm²], M_1 — масштаб по оси абсцисс, [K/cm], M_2 — масштаб по оси ординат, [A/cm] и v — скорость повышения температуры, [5 K/s]. Плотность остаточного заряда электрета рассчитывалась по формуле

$$\sigma = \frac{Q}{S_1}, \quad (3)$$

где Q — остаточный заряд электрета, рассчитанный по формуле (2), S_1 — площадь поверхности электродов ячейки (в нашем случае $S_1 = 1.8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$).

Как следует из таблицы, максимальные биоэлектретные свойства проявляет дендробена. Согласно приведенной оценке, объект дендробена обладает максимальным запасом поляризации. Этот факт объясняется сложностью ее структуры и наличием в ее составе множества органоидов, в составе которых присутствуют прочно связанные молекулы воды.

Результаты, полученные на модельном объекте LiF, демонстрируют существенно меньшую энергетику и меньшее значение максимального тока. Это вполне объяснимо. Во-первых, количество электронных ловушек, связанных с присутствующими радиационными дефектами, ограничено. Во-вторых, только определенная часть из них могла вступить во взаимодействие с поверхностью внесенной увлажняющей жидкости. Это означает, что величина возникающего электретоного эффекта в гидратированном объекте определяется не степенью увлажнения объекта, т.е. не общим количеством влаги, внесенной в объект, а относительным количеством молекул воды, находящихся в связанном состоянии с матричной структурой объекта.

Следовательно, степень гидратированности объекта, его способность связывать и удерживать в своей структуре молекулы воды в значительной степени зависит от наличия в этой системе дефектов, способных к взаимодействию. Концентрация таких дефектов может служить ориентиром для оценки электретных характеристик объекта.

Заключение

Результаты исследования показывают, что наиболее сильные токи и наиболее высокотемпературные ловушки проявляются в объектах органического происхождения, в образцах, где существует более сильная структуризация молекул воды, обеспечивающая максимальную гидратируемость объекта. Основными факторами, способствующими накоплению заряда в системе, являются диполи, сформированный пространственный заряд и связанная вода. Следует заметить, что в органических системах вода является непосредственным участником формирования структуры белков, нуклеиновых кислот и их комплексов. Проведенные сравнительные исследования объектов *Chironomus* (мотыль) и *Lumbricus terrestris* (дендробена) показали: чем выше организационная структура объекта, чем больше в нем структурных единиц, способных связывать молекулы воды, тем больше глубина залегания электронных ловушек и тем выше электретный эффект.

В гетерогенной системе, к которой относится дисперсная среда на основе механоактивированного увлажненного фторида лития, аккумуляция зарядов происходит на границах между твердой и жидкой фазами,

что приводит к поляризации на границах раздела. Данные, полученные с использованием такого модельного объекта, подтверждают способность молекул воды формировать электретное состояние в результате их структуризации, обеспеченной механической активацией кристаллической среды. Кроме того, показано, что эффект структуризации может быть значительно усилен за счет создания дефектов более глубокого уровня. В частности, за счет создания собственных дефектов решетки кристаллического объекта, а также изменения зарядового состояния таких дефектов.

Таким образом, как в органических средах, так и в объектах неорганического происхождения, образование элементов структуры, формирующих связанное состояние с молекулами воды, является определяющим механизмом для создания высокоэффективных гидратированных электретных материалов.

Соблюдение этических стандартов

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования живых организмов были соблюдены.

Финансирование работы

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта Иркутского государственного университета для молодых ученых № 091-24-304 „Роль дефектов структуры в процессах формирования электретного состояния в объектах синтетического и природного происхождения“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] С. Маскаренас. В сб.: *Электреты*, пер. с англ./под ред. Г. Сесслера (Мир, М., 1983), с. 400–430.
- [2] Е.Т. Кулин. *Биоэлектретный эффект* (Наука и техника, Минск, 1980), с. 216.
- [3] Г. Линг. *Физическая теория живой клетки: незамеченная революция* (Наука, СПб., 2008), с. 376. [пер. с англ. G. Ling. *Life at the cell and below-cell level: the hidden history of a fundamental revolution in biology* (Pacific Press, NY., 2001), с. 376.]
- [4] Г. Сесслер (ред.). *Электреты* (Мир, М., 1983), с. 487.
- [5] J. van Turnhout. *Polymer J.*, **2** (2), 173 (1971). DOI: 10.1007/3540173358_11
- [6] А.В. Макаревич, Л.С. Пинчук, В.А. Гольдаде. *Электрические поля и электроактивные материалы в биологии и медицине* (ИММС НАНБ, Гомель, 1998), с. 106.
- [7] Л.С. Пинчук, А.Г. Кравцов, С.В. Зотов. *ЖТФ*, **71** (5), 115 (2001).
- [8] L.S. Pinchuk, V.A. Goldade, G.M. Sessler, A.G. Kravtsov, S.V. Zotov, E.A. Tsvetkova. *Med. Eng. Phys.*, **24** (5), 361 (2002). DOI: 10.1016/s1350-4533(02)00029-2

- [9] Е.А. Цветкова, И.Ю. Ухарцева, С.В. Зотов, К.В. Овчинников, В.А. Гольдаде, Ж.В. Кадолич. Вестник технологического университета, **19** (20), 57 (2016).
- [10] В.П. Хомутов, Н. И. Нелин, В.И. Котов, А.А. Баскаков, А.В. Черноиван. Современная медицина, **2** (14), 2 (2019).
- [11] И.В. Фатеев, С.В. Чепур, А.А. Шубина, М.В. Блинов, А.С. Овчинникова. MEDLINE.RU, **23**, 499 (2022).
- [12] Ю.М. Чернякова, Л.С. Пинчук, А.Г. Кравцов, Ж.В. Кадолич, В.И. Николаев. ЖТФ, **75** (5), 119 (2005).
- [13] M.S. Gaur, R.K. Tiwari, P. Shukla, P. Saxena, K. Gaur, U. Tiwari. Trends in Biomaterials and Artificial Organs, **21** (1), 8 (2007).
- [14] Л.А. Шербаченко, Н.Т. Максимова, Е.С. Комаров, Л.И. Ружников, В.А. Карнаков, Е.С. Барышников, Д.А. Краснов, А.А. Трошев, Д.С. Барышников, Л.И. Ежова. ЖТФ, **82** (10), 96 (2012).
- [15] О.И. Александрова, С.А. Александрова, В.П. Хомутов, М.С. Моргунов, М.И. Блинова. ЖТФ, **88** (9), 1348 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2018.09.46419.58-18
- [16] П.И. Бортулѳ, С.В. Виссарионов, Т.В. Баскаева Д.Б. Барсуков, И.Ю. Поздников, Т.В. Мурашко, В.Е. Басков, М.С. Познович. Травматология и ортопедия России, **28** (1), 46 (2022). DOI: 10.17816/2311-2905-1726
- [17] Г.А. Лушѳейкин. Успехи химии, **52** (8), 1410 (1983). DOI: 10.1070/RC1983v052n08ABEN002884
- [18] Э. Рис, М. Стернберг. Введение в молекулярную биологию. От клеток к атомам (Мир, М., 2002), с. 142.
- [19] Ю.С. Ченцов. Введение в биологию клетки. Общая цитология (МГУ, М., 1995)
- [20] Ю.А. Гороховатский, Г.А. Бордовский. Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков (Наука, М., 1991), с. 248.
- [21] Ю.А. Гороховатский, М.Ф. Галиханов, Д.А. Игнатѳева, Ю.И. Сотова, Д.Э. Темнов, А.А. Гужова. Вестник технологического университета, **20** (6), 26 (2017).
- [22] М.А. Ризаханов, М.М. Расулов, Л.Б. Атлуханова. ЖТФ, **87** (4), 617 (2017). DOI: 10.21883/JTF.2017.04.44325.1446
- [23] I.I. Kiknadze. Entomolog. Rev., **88** (5), 509 (2008). DOI: 10.1134/s0013873808050011
- [24] С.В. Шеховцов, Д.И. Берман, Е.В. Голованова, С.Е. Пельтек. Вавиловский журнал генетики и селекции, **21** (3), 588 (2017). DOI: 10.18699/VJ17.24-о
- [25] Н.Т. Максимова, Л.И. Ружников, А.А. Иноземцева. Патент на полезную модель № 172569 „Источник электродвижущей силы“. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент), № 20-2017, 11.07.2017-20.07.2017
- [26] С.А. Лысенко. Методы оптической диагностики биологических объектов (БГУ, Минск, 2014), с. 231.
- [27] И.А. Лавриненко, Г.А. Вашанов, М.К. Рубан. Журнал прикладной спектроскопии, **80** (6), 907 (2013).
- [28] M.Z. Vardaki, B. Gardner, N. Stone, P. Matousek. Analyst, **140**, 5112 (2015). DOI: 10.1039/C5AN01118C
- [29] Н.В. Чураев. Исследование свойств тонких слоев жидкостей (МГУ, М., 1974), с. 84–96.
- [30] Б.В. Дерягин, З.М. Зорин, В.Д. Соболев, Н.В. Чураев. Свойства тонких слоев воды вблизи твердых поверхностей — связанная вода в дисперсных системах (ИГУ, Иркутск, 1980), с. 413.
- [31] Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, В.М. Муллер. Поверхностные силы (Наука, М., 1985), с. 339.
- [32] N.T. Maksimova, S.Y. Terenin, A.V. Mitova, L.I. Ruzhnikov. AIP Conf. Proceed., **2392** (1), 040005 (2021). DOI: 10.1063/5.0063216
- [33] А.И. Непомнящих, Е.А. Раджабов, А.В. Егранов. Центры окраски и люминесценция кристаллов LiF (Наука СО, Новосибирск, 1984), с. 112.
- [34] N.T. Maksimova, D.D. Miroshnik, A.I. Evdokimova. Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys., **88** (7), 1046 (2024). DOI: 10.1134/S1062873824707050
- [35] J. Nahum, D.A. Wiegand. Phys. Rev. J., **154**, 817 (1967). DOI: 10.1103/PhysRev.154.817
- [36] В.Н. Вертопрахов, Е.Г. Сальман. Термостимулированные токи в неорганических веществах (Наука СО, Новосибирск, 1979), с. 336.