

УДК 543.31+577.3

ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СОСТАВА ВОДЫ РЕКИ ДУБНЫ НА СОСТОЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕКИСНОГО ОКИСЛЕНИЯ ЛИПИДОВ В БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ¹

© 2024 г. В. О. Швыдкий^а, А. С. Дубовик^а, М. В. Козлов^а, А. Ю. Повх^а, Л. Н. Шишкина^{а,*}

^аИнститут биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва, 119334 Россия

*e-mail: shishkina@sky.chph.ras.ru

Поступила в редакцию 10.04.2023 г.

После доработки 24.10.2023 г.

Принята к публикации 22.02.2024 г.

Изучена динамика физико-химических свойств и гидрохимических показателей воды р. Дубны с 18.04.2021 по 04.07.2021. Обнаружены повышение рН с ростом температуры воды и значительные колебания в ней концентрации ионов аммония, нитрита и фосфата. Показана перспективность использования математической обработки УФ-спектров проб воды по методу Гаусса, модельных биологических систем на основе природных липидов (низкотемпературное окисление лецитина и его способность к спонтанной агрегации в полярной среде) для оценки качества природной воды и ее влияния на регуляцию процессов окисления биообъектов. Так, анализ УФ-спектров выявил наличие в ней гидрофобных органических соединений в течение всего срока наблюдений, соединений с сопряженными двойными связями и N-содержащих соединений в конце апреля, свободных жирных кислот, органических соединений с карбонильной группой и P-содержащих соединений в конце мая и увеличение в пробах воды разнообразия компонентов в конце июня. Пробы воды, взятые в летний период, увеличивали интенсивность окисления лецитина более чем в 1.8 раза, а в течение всего периода наблюдений вызывали стадийные изменения размера сформированных им агрегатов и оказывали существенное влияние на величины их дзета-потенциала.

Ключевые слова: вода Дубны, сезонные изменения, гидрохимия, УФ-спектрометрия, метод Гаусса, перекисное окисление липидов, лецитин, мицеллообразование.

DOI: 10.31857/S0321059624040101 EDN: APEVNI

ВВЕДЕНИЕ

Высокая диэлектрическая проницаемость воды обуславливает ее уникальные свойства как растворителя, поэтому закономерно, что природная речная вода представляет собой сложную многокомпонентную систему [6]. В ее составе присутствуют различные ионы, механические и коллоидные вещества, комплексные и органические соединения, микроорганизмы, концентрация которых имеет выраженную сезонную вариабельность [24, 29]. Способность воды к самоорганизации вследствие образования водородных связей — фактор, определяющий физико-химические и биологические свойства даже сильно разбавленных водных растворов и обу-

словливающий воздействие различных биологических активных веществ (БАВ) в малых дозах на физико-химические свойства мембран биологических объектов [8, 10].

Показано, что нормальное функционирование биологических систем зависит от протекания в них окислительных процессов, важных как для оценки качества воды, так и для регуляции метаболизма в системах разной сложности [22, 27]. В настоящее время не вызывает сомнения, что нормальное функционирование сложных биологических объектов обуславливает система регуляции процессов перекисного окисления липидов (ПОЛ) [14, 16]. Показано, что изучение состояния параметров этой системы играет важную роль в экологическом мониторинге, так как нарушения регуляции ПОЛ приводит к гибели клеток и обуславливает токсичность соединений при их поступлении в организм [11–13, 19].

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН (государственная регистрация 44.4, тема 0084-2019-0014).

Это вызывает необходимость более детального исследования влияния компонентов природной воды на состояние процессов ПОЛ биологических объектов. Однотипность функционирования физико-химической системы регуляции ПОЛ на разных уровнях организации биологических объектов (мембранном, клеточном, органном) [25] позволяет использовать биологические модельные системы для оценки качества природной воды [11, 26]. Актуальность разработки биологических моделей обусловлена и непредсказуемостью совместного действия факторов разной природы, что важно для анализа качества такой многокомпонентной системы, как природная вода.

Цель работы – изучение влияния сезонных колебаний свойств и состава воды Дубны на состояние процессов перекисного окисления липидов в модельных системах на основе природных липидов, что является новым подходом к оценке качества и биологической полноценности водной среды.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования были пробы воды р. Дубны в ее нижнем течении (в ~9 км от впадения в р. Волгу) в точке с координатами 56.72628° с.ш.; 37.23426° в.д. Отбор проб проводили с глубины 10 см с 18.04.2021 по 04.07.2021.

Для удаления механических примесей пробы воды фильтровали через бумажный фильтр (“синяя лента”). Количественное содержание ионов NH_4^+ , NO_2^- , $(\text{PO}_4)^{-3}$ определяли фотометрически в соответствии с методиками [4, 5], а минерализацию определяли кондуктометрически, используя прибор “Hanna HI 9835”.

УФ-спектры проб природной воды регистрировали на спектрофотометре “Shimadzu UV-1700 PharmaSpec” (Shimadzu, Япония) в кварцевых кюветах толщиной 10 мм. При регистрации УФ-спектров образцы природной воды разбавляли в 2 раза дистиллированной водой для уменьшения ошибок в измерении величин оптической плотности при $D > 2$. Полученные УФ-спектры математически обрабатывали по методу Гаусса, используя программу Excel solver,

путем минимизации суммы квадратов разности между исходным и расчетным спектрами после аппроксимации на уровне 10^{-3} – 10^{-5} . Количество функций Гаусса зависело от вида спектра.

В качестве модели природных липидов был использован 10%-й этанольный раствор соевого лецитин-стандарта (“БИОЛЕК”, Харьков). После вскрытия ампулы и отгонки исходного растворителя готовили растворы лецитина либо в дистиллированной воде или в пробах природной воды (окисление, мицеллообразование), либо в хлороформе (анализ состава липидов).

Спонтанное автоокисление лецитина проводили при 20°C, оценивая интенсивность процесса ПОЛ по содержанию продуктов окисления, реагирующих с 2-тиобарбитуровой кислотой (ТБК-АП), на спектрофотометре “ПЭ-5400ВИ” (“ЭКРОС”, Россия) при длине волны 532 нм по методу, описанному в работе [20], и относили к 1 мг лецитина в пробе.

Качественный состав липидов лецитина определяли методом тонкослойной хроматографии (ТСХ), используя стеклянные пластинки размером 90×120 мм, силикагель типа Н (“Sigma”, США) и смесь хлороформ : метанол : ледяная уксусная кислота : дистиллированная вода в соотношениях 12.5 : 7.5 : 2 : 1 в качестве мобильной фазы [1]. Хроматограммы проявляли в парах йода. Количественный анализ содержания отдельных фракций фосфолипидов (ФЛ) проводили после удаления их пятен с пластинки и сжигания до неорганического фосфора (Р) спектрофотометрически при 815 нм (ПЭ-5400ВИ) по образованию фосфорномolibденового комплекса в присутствии аскорбиновой кислоты. Определяли также обобщенные показатели состава липидов: долю ФЛ в составе общих липидов (%ФЛ) и соотношение сумм более легкоокисляемых и более трудноокисляемых фракций ФЛ ($\Sigma\text{ЛОФЛ}/\Sigma\text{ТОФЛ}$), характеризующее способность липидов к окислению [14]. Последнее вычисляли по формуле $(\text{ФИ} + \text{ФС} + \text{ФЭ} + \text{КЛ} + \text{ФЛ})/(\text{ЛФХ} + \text{СЛ} + \text{ФХ})$, где ЛФХ – лизоформы ФЛ, СЛ – сфинголипиды, ФХ – фосфатидилхолин, ФИ – фосфатидилинозит, ФС – фосфатидилсерин, ФЭ – фосфатидилэтанолмин, КЛ – кардиолипид, ФК –

фосфатидная кислота. Подробности методики приведены в работах [9, 14].

Размер (гидродинамический диаметр, d) и дзета-потенциал (ξ -потенциал) агрегатов лецитина в водной среде определяли методом динамического рассеяния света, используя прибор “Malvern Zetasizer Nano-ZS” (“Malvern Instruments Ltd.”, Великобритания) при 25°C и угле рассеяния 173°. Прибор снабжен гелий-неоновым лазером (длина волны 633 нм) и автоматической программой Zetasizer Software 6.20 для сбора и первичной обработки данных. Измерения каждого образца повторяли не менее пяти раз и проводили спустя 2–4 ч после приготовления растворов и установления динамического равновесия.

Экспериментальные данные обрабатывали стандартными статистическими методами, используя программный продукт MS Excel и пакет компьютерных программ KINS. Данные представлены в виде средних арифметических значений и с указанием их среднеквадратичных ошибок ($M \pm m$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Поскольку качество воды, определяющее безопасность экосистемы, представляет собой совокупность химических, физических и биологических характеристик воды, то первым этапом работы было определение pH и температуры воды р. Дубны, ее гидрохимических показателей. Результаты представлены на рис. 1 и в табл. 1.

Из данных рис. 1 следует, что сезонное повышение температуры воды в р. Дубне сопровождается изменением содержания в воде ионов H^+ , и pH воды из близкого к нейтральному становится щелочным. При этом выявлены колебания обоих показателей в период с 26.05.2021 по 06.06.2021. Наиболее существенная вариабельность содержания в воде р. Дубны наблюдается для ионов NH_4^+ , а стабильное повышение концентрации ионов NO_2^- и $(PO_4)^{-3}$ обнаружено в летнее время с 14.06.2021 (табл. 1), что свидетельствует об активации гидрохимических и биологических процессов. Выявлены колебания и общей минерализации воды при росте данного показателя в летнее время (табл. 1). Это может быть связано

Таблица 1. Вариабельность гидрохимических показателей проб воды р. Дубны с 18.04.2021 по 04.07.2021

Дата отбора проб	Минерализация, мг/л	$[NH_4^+]$, мг N/л	$[NO_2^-]$, мг N/л	$[(PO_4)^{3-}]$, мг P/л
18.04.2021	168	0.300 ± 0.060	0.042 ± 0.021	0.057 ± 0.034
25.04.2021	177	1.143 ± 0.160	0.019 ± 0.010	0.035 ± 0.021
03.05.2021	176	0.309 ± 0.043	0.018 ± 0.009	0.051 ± 0.031
10.05.2021	180	0.356 ± 0.050	0.022 ± 0.011	0.060 ± 0.027
16.05.2021	294	0.609 ± 0.085	0.040 ± 0.020	0.097 ± 0.044
21.05.2021	215	0.337 ± 0.047	0.045 ± 0.022	0.092 ± 0.042
23.05.2021	230	0.384 ± 0.054	0.051 ± 0.025	0.087 ± 0.039
26.05.2021	249	0.187 ± 0.037	0.048 ± 0.024	0.043 ± 0.026
29.05.2021	227	0.281 ± 0.056	0.047 ± 0.024	0.036 ± 0.022
30.05.2021	250	0.084 ± 0.025	0.057 ± 0.028	0.035 ± 0.021
02.06.2021	236	0.487 ± 0.068	0.043 ± 0.022	0.042 ± 0.025
06.06.2021	225	0.384 ± 0.054	0.031 ± 0.016	0.021 ± 0.012
10.06.2021	272	0.553 ± 0.077	0.061 ± 0.030	0.092 ± 0.041
14.06.2021	254	0.684 ± 0.096	0.065 ± 0.032	0.100 ± 0.045
17.06.2021	253	0.337 ± 0.047	0.088 ± 0.044	0.072 ± 0.032
20.06.2021	259	0.292 ± 0.058	0.090 ± 0.045	0.054 ± 0.032
25.06.2021	-	0.300 ± 0.060	0.093 ± 0.046	0.082 ± 0.037
27.06.2021	-	0.337 ± 0.047	0.128 ± 0.064	0.131 ± 0.059
01.07.2021	-	-	-	-
04.07.2021	-	0.796 ± 0.111	0.145 ± 0.072	0.219 ± 0.099

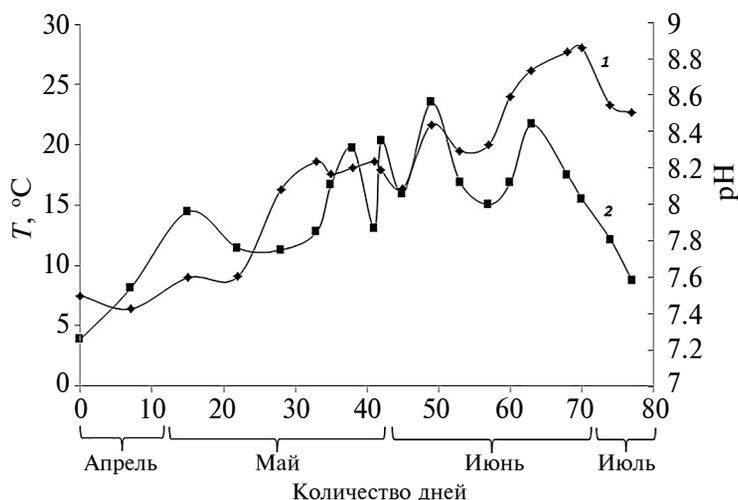


Рис. 1. Динамика изменения температуры (1) и pH (2) воды р. Дубны с 18.04.2021 (координата 0 по оси абсцисс) по 04.07.2021.

как с увеличением доли подземного стока, что характерно для физико-географических условий Московской области, так и с ростом растворимости солей при повышении температуры воды.

Ранее было показано, что присутствие в природной воде гидрофобных органических соединений, N- и P-содержащих соединений даже в малых дозах оказывает существенное влияние на физико-химические свойства мембран биологических объектов и характеристики УФ-спектров как самой природной воды из разных источников, так и ее образцов после техногенной аварии

[11, 15, 26]. Математический анализ УФ-спектров воды р. Дубны также свидетельствует о существенных изменениях их характеристик в зависимости от состава воды. Наиболее интенсивная полоса поглощения в течение всего срока наблюдения обнаружена для гидрофобных соединений, среди которых присутствуют и липиды. Максимум полосы поглощения сложноэфирных и несопряженных двойных связей липидов в полярной среде находится в области 195–205 нм [13], а их содержание претерпевает существенные колебания в зависимости от времени отбора проб (рис. 2).

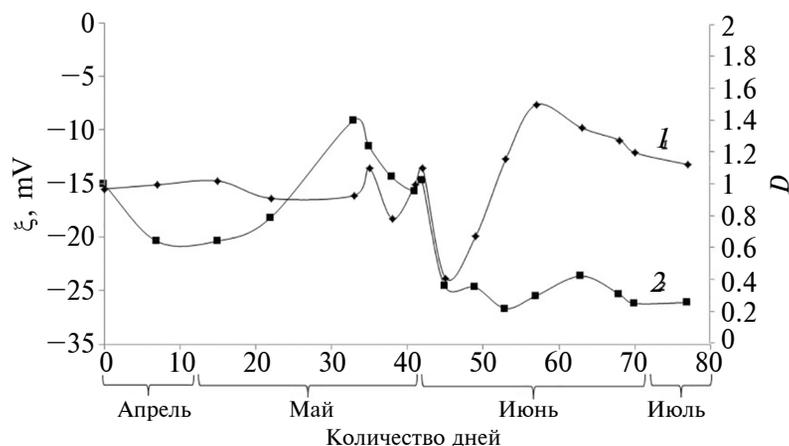


Рис. 2. Вариабельность содержания ξ-потенциала агрегатов лецитина в присутствии проб воды р. Дубны (1) и гидрофобных соединений в пробах воды р. Дубны (2) с 18.04.2021 (координата 0 по оси абсцисс) по 04.07.2021. [Лецитин] = 4.3×10^{-5} моль/л.

От времени отбора проб существенно зависит и набор присутствующих в воде компонентов. Так, в пробе воды от 25.04.2021 преимущественно содержатся гидрофобные соединения, соединения с сопряженными двойными связями (максимум полосы поглощения в области 230–235 нм) и N-содержащие соединения с максимумом полосы поглощения в области 250–255 нм (рис. 3). Однако в пробе воды от 23.05.2021 (рис. 4), помимо гидрофобных соеди-

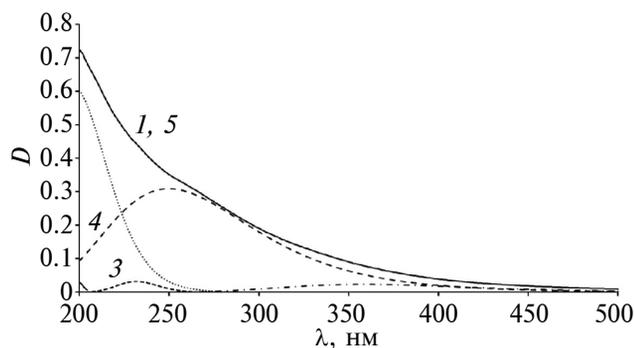


Рис. 3. УФ-спектр и его гауссианы воды р. Дубны от 25.04.2021: 1, 5 – исходный и расчетный спектры, 2 – 196 нм, 3 – 232 нм, 4 – 250 нм.

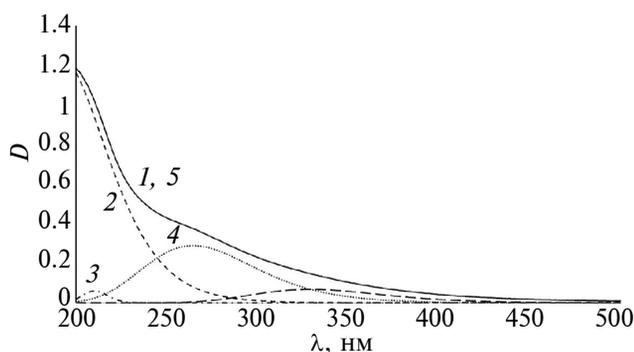


Рис. 4. УФ-спектр и его гауссианы воды р. Дубны от 23.05.2021: 1, 5 – исходный и расчетный спектры, 2 – 192 нм, 3 – 219 нм, 4 – 264 нм.

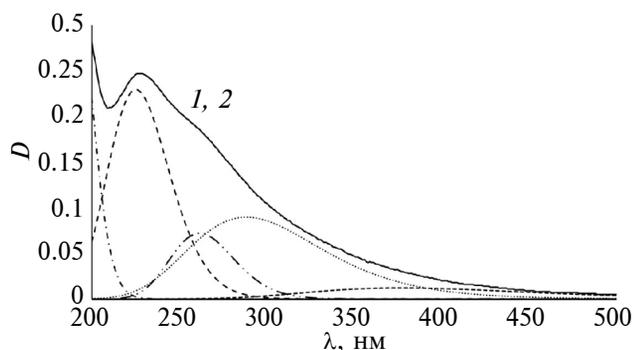


Рис. 5. УФ-спектр и его гауссианы воды р. Дубны от 25.06.2021: 1, 2 – исходный и расчетный спектры.

нений, обнаружены свободные жирные кислоты ($\lambda = 213$ нм), органические соединения с карбонильной группой ($\lambda = 258$ нм) и P-содержащие соединения ($\lambda > 300$ нм). Типичный УФ-спектр воды р. Дубны в последнюю декаду наблюдений представлен на рис. 5, гауссианы которого свидетельствуют об увеличении в пробах воды разнообразия компонентов. В целом, динамика полос поглощения в УФ-спектрах проб воды соответствует концентрации в ней гидрохимических соединений (табл. 1).

Среди параметров физико-химической системы регуляции ПОЛ в биообъектах важную роль играют интенсивность ПОЛ, состав и способность липидов к окислению, структурное состояние биомембран [14]. Поэтому влияние качества воды р. Дубны на процессы ПОЛ биологических объектов определяли на предложенных ранее двух модельных системах: низкотемпературном автоокислении лецитина и его способности к спонтанной агрегации в полярной среде [11–13, 26]. Лецитин представляет собой смесь природных липидов, в составе которых $\geq 50\%$ ФЛ. Как и любые природные объекты, разные партии соевого лецитина характеризуются высокой лабильностью состава липидов [9]. В работе использованы два образца соевого лецитина, количественный состав ФЛ которых представлен в табл. 2. Необходимо отметить определенные различия содержания ФЛ в составе общих липидов данных партий лецитина: %ФЛ в партиях 1 и 2 составляет 65.5 ± 5.0 и 57.1 ± 1.9 соответственно. Кроме того, различия количественного соотношения фракций в составе ФЛ обуславливают и достоверные различия способности липидов к окислению: $\Sigma\text{ЛОФЛ}/\Sigma\text{ТОФЛ} = 0.104 \pm 0.008$ ($n = 5$) и $\Sigma\text{ЛОФЛ}/\Sigma\text{ТОФЛ} = 0.1536 \pm 0.0045$ ($n = 5$) для партий 1 и 2 соответственно.

Оценку влияния проб воды р. Дубны на интенсивность ПОЛ проводили в период с 10.06.2021 по 04.07.2021, используя партию лецитина 2, которая характеризуется более высокой способностью липидов к окислению и исходным содержанием продуктов окисления $[\text{ТБК-АП}] = 5.93 \pm 0.21$ нмоль/мг ($n = 5$). Обнаружено, что летние пробы воды р. Дубны вызывают рост интенсивности окисления лецитина более чем в 1.8 раза, при этом максимальное увеличение выявлено

Таблица 2. Качественный и количественный состав партий лецитина

Фракция ФЛ, %P	Лизоформы ФЛ	СЛ	ФХ	ФИ + ФС	ФЭ	КЛ + ФК
Партия 1	3.03 ± 0.26	3.47 ± 0.42	84.1 ± 1.4	2.67 ± 0.32	1.89 ± 0.38	4.85 ± 0.3
Партия 2	4.83 ± 0.45	3.45 ± 0.45	78.5 ± 1.1	5.15 ± 0.4	6.88 ± 0.19	1.25 ± 0.2

10.06.2021 ([ТБК-АП] = 13.65 ± 0.48 нмоль/мг, $n = 3$), а минимальное 27.06.2021 ([ТБК-АП] = 10.50 ± 0.37 нмоль/мг, $n = 3$).

Влияние качества воды р. Дубны на состояние мембранной системы биологических объектов оценивали по изменению способности лецитина к спонтанной агрегации в полярной среде и величины ξ -потенциала его агрегатов. Процесс спонтанной агрегации поверхностно-активных веществ, в том числе и природных липидов, – динамический и зависит от концентрации и состава ФЛ [7, 23, 26]. В дистиллированной воде лецитин образует две фракции агрегатов [11, 26], размеры которых варьируют в зависимости от состава его липидов, однако во всех случаях преобладают частицы с $d \sim 1000$ нм. Используемые в работе партии лецитина также образовывали в дистиллированной воде две фракции агрегатов. У частиц основной фракции лецитина партии 1 (92.2 ± 0.2%, $n = 24$) $d = 980 \pm 70$ нм, а у частиц лецитина партии 2 (90.2 ± 1.1%, $n = 20$), характеризующегося более высокой окисляемостью липидов, $d = 1405 \pm 20$ нм. Колебания рН, температуры и состава воды р. Дубны вызывают изменение размера и соотношения фракций агрегатов лецитина. Это следует из данных, представленных на рис. 6 и в табл. 3. Из анализа представленных данных следует, что изменчивость состава воды вызывает стадийные изменения размера агрегатов лецитина, незави-

симо от состава его липидов. При этом наиболее существенное уменьшение диаметра агрегатов наблюдается в конце мая – начале июня и 27.06.2021. Однако масштаб изменения размера частиц $\leq 35\%$.

Величины ξ -потенциала частиц лецитина в дистиллированной воде, хотя и зависят от состава его липидов, имеют достаточно близкие отрицательные значения: -33.2 ± 1.0 мВ ($n = 8$)

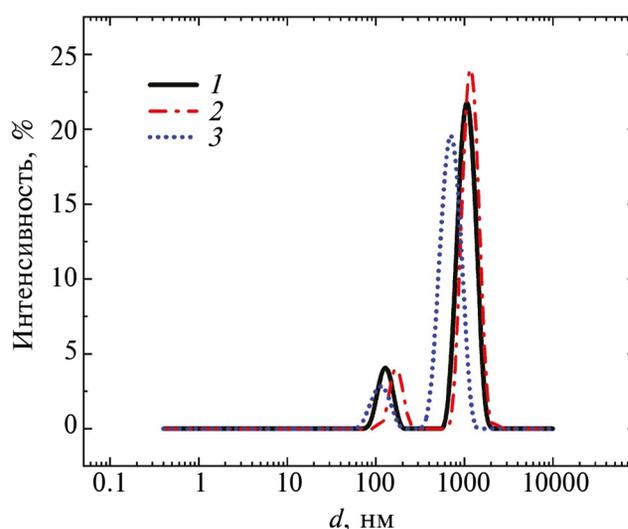


Рис 6. Кривые распределения размера агрегатов лецитина по интенсивности светорассеяния в дистиллированной воде (1) и в присутствии воды р. Дубны от 25.04.2021 (2) и 26.05.2021 (3). [Лецитин] = 4.3×10^{-5} моль/л.

Таблица 3. Динамика относительного изменения гидродинамического диаметра лецитина в присутствии проб воды р. Дубны

Лецитин 1		Лецитин 2	
дата отбора пробы	относительный средний диаметр, %	дата отбора пробы	относительный средний диаметр, %
18.04.2021	91.6 ± 9.7	02.06.2021	81.7 ± 5.8
25.04.2021	130.1 ± 13.5	06.06.2021	75.4 ± 3.2
03.05.2021	100.1 ± 12.5	10.06.2021	120.7 ± 14.5
10.05.2021	84.8 ± 10.3	14.06.2021	104.1 ± 5.3
21.05.2021	90.95 ± 12.9	20.06.2021	106.8 ± 5.6
23.05.2021	106.7 ± 9.2	27.06.2021	63.0 ± 4.6
26.05.2021	66.8 ± 11.5	04.07.2021	80.3 ± 2.8
30.05.2021	70.2 ± 9.4		

и -30.9 ± 1.1 mV ($n = 5$) для партий 1 и 2 соответственно. Влияние сезонных колебаний физико-химических характеристик и состава воды р. Дубны на величину ξ -потенциала агрегатов лецитина представлено на рис. 2. Как видно из представленных данных, в присутствии проб воды р. Дубны наблюдается существенное достоверное уменьшение отрицательной величины ξ -потенциала частиц лецитина, а масштаб его изменения значительно превосходит размах колебаний размера частиц лецитина в зависимости от состава воды р. Дубны. Ранее аналогичные эффекты были выявлены и при исследовании свойств природной воды рек Воронежской и Московской областей, пробы которых были взяты с 10.03.2021 по 21.03.2021 [26]. Необходимо отметить также, что наиболее существенное влияние на величину ξ -потенциала частиц лецитина оказывают колебания в природной воде содержания гидрофобных соединений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Чувствительность параметров системы регуляции ПОЛ биологических моделей на примере природных липидов позволяет рассматривать их в качестве перспективных тестов для оценки качества природной воды. Выявлена интенсификация процессов ПОЛ при низкотемпературном окислении лецитина в присутствии проб воды р. Дубны. Математическая обработка УФ-спектров природной воды по методу Гаусса позволила обнаружить как присутствие гидрофобных соединений в течение всего срока наблюдений, так и изменение набора различных органических, N- и P-содержащих соединений в зависимости от сезона отбора проб. Сезонные колебания размера спонтанно сформированных агрегатов лецитина и выраженные изменения их ξ -потенциала свидетельствуют о влиянии компонентов воды на структурное состояние мембран биообъектов. Установлено, что структурное состояние биомембран тесно взаимосвязано с их функциями и составом липидов [3]. Это играет важную роль в регуляции метаболизма в организме, поскольку активные формы кислорода – инициаторы ПОЛ, минорные фракции ФЛ и окисленные ФЛ обладают сигнальными функциями [17, 18, 21, 28], обуславливая масштаб и направленность ответа биологических объектов при изменении физико-химических свойств и состава природной воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биологические мембраны: методы / Под ред. Дж. Б. С. Финдлея, В. Х. Эванза. М.: Мир, 1990. 423 с.
2. Брин Э. Ф., Травин С. О. Моделирование механизмов химических реакций // Хим. физика. 1991. Т. 10. № 6. С. 830–837.
3. Геннис Р. Биомембраны: Молекулярная структура и функции. М.: Мир, 1997. 624 с.
4. ГОСТ 18309-2014
5. ГОСТ 33045-2014
6. Гуриков Ю. В., Бондаренко Н. Ф. Природная вода как окислительная система // ЖФХ. 2001. Т. 75. № 7. С. 1221–1224.
7. Касаикина О. Т., Менгеле Е. А., Плащина И. Г. Окисление неионных поверхностно-активных веществ молекулярным кислородом // Коллоид. журн. 2016. Т. 78. № 6. С. 730–734.
8. Коновалов А. И., Рыжкина И. С. Образование наноассоциатов – ключ к пониманию физико-химических и биологических свойств высококонцентрированных водных растворов // Изв. АН. Сер. хим. 2014. № 1. С. 1–14.
9. Маракулина К. М., Крамор Р. В., Луканина Ю. К., Плащина И. Г., Поляков А. В., Федорова И. В., Чукичева И. Ю., Кучин А. В., Шишкина Л. Н. Влияние природных фосфолипидов на масштаб их взаимодействия с антиоксидантами нового класса – изоборнилфенолами // ЖФХ. 2016. Т. 90. № 2. С. 182–189.
10. Пальмина Н. П., Мальцева Е. Л., Часовская Т. Е. Действие разбавленных растворов биологически активных веществ на клеточные мембраны // Биофизика. 2014. Т. 59. № 4. С. 704–716.
11. Шишкина Л. Н., Дубовик А. С., Козлов М. В., Повх А. Ю., Швыдкий В. О. Модельные системы для оценки воздействия компонентов водной среды на биологические объекты // Актуальные вопросы биологической физики и химии. 2022. Т. 7. № 1. С. 160–165.
12. Шишкина Л. Н., Козлов М. В., Мазалецкая Л. И., Повх А. Ю., Швыдкий В. О., Шелудченко Н. И. Система регуляции перекисного окисления липидов как основа экологического тестирования // Хим. физика. 2020. Т. 30. № 6. С. 52–58.
13. Шишкина Л. Н., Козлов М. В., Повх А. Ю., Швыдкий В. О. Роль перекисного окисления липидов в оценке последствий воздействия химических токсикантов на биообъекты // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 9. С. 57–63.
14. Шишкина Л. Н., Кушнирева Е. В., Смотряева М. А.

- Новые подходы к оценке биологических последствий воздействия радиации в малых дозах // Радиацион. биология. Радиоэкология. 2004. Т. 44. № 3. С. 289–295.
15. Шишкина Л.Н., Повх А.Ю., Швыдкий В.О. Динамика состояния окислительных процессов в природных водах после аварии в коммунальной сети // Сб. ст. по материалам Международ. конф. “Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность–2021” / Под ред. Г.В. Кучерик, Ю.А. Омельченко. Севастополь: СевГУ, 2021, С. 100–106.
16. Burlakova Ye.B., Pal'mina N.P., Mal'tseva Ye.L. Membrane Lipid Oxidation / Ed. C. Vigo Pelfrey. Boston: CRC Press, 1991. V. III. P. 209–237.
17. D'Autreaux B., Toledano M.B. ROS as signalling molecules: mechanism that generate specificity in ROS homeostasis // Nature Reviews | Molecular Cell Biol. 2007. V. 8. P. 813–824.
18. Forman H.J., Maiorino M., Ursini F. Signaling Functions of Reactive Oxygen Species // Biochem. 2010. V. 49. P. 835–842.
19. Gaschler M.M., Stockwell B.R. Lipid peroxidation and cell death // Biochem. Biophys. Res. Commun. 2017. V. 482. P. 419–425.
20. Isakawa T., Matsushita S. Coloring conditions of thio-barbituric acid test for detecting lipid hydroperoxides // Lipids. 1980. V. 15. № 3. P. 137–140.
21. Lordan R., Tsoupras A., Zabetakis I. Phospholipids of Animals and Marine Origin: Structure, Function, and Anti-Inflammatory Properties // Molecules. 2017. V. 22. № 11. P. 1964–1996.
22. Membrane Lipid Oxidation / Ed. C. Vigo Pelfrey. Boston: CRC Press, 1991. V. III. 300 p.
23. Mosca M., Ceglie A., Ambrosone L. Effect of membrane composition on lipid oxidation in liposomes // Chem. and Phys. Lipoids. 2011. V. 164. P. 158–165.
24. Shesterkina N.M., Shesterkin V.P., Talanskaya V.S., Ri T.D. Space and Time Variations of the Concentrations of Dissolved Forms of Microelements in Amur River Water // Water Res. 2020. V. 47. № 4. P. 629–540.
25. Shishkina L.N., Klimovich M.A., Kozlov M.V. Similarity Functioning of the Physicochemical Regulatory System on the Membrane and Organ Levels // Pharmaceutical and Medical Biotechnology. New Perspective / Eds R. Orlicki, C. Cienciala, L.P. Krylova, J. Pielichowski, G.E. Zaikov. N.Y.: Nova Sci. Publ., 2013. P. 151–157.
26. Shvydkiy V., Dolgov S., Dubovik A., Kozlov M., Povkh A., Shishkina L., Duca G. New Aspects for the Estimation of the State of the Natural Water // Chem. J. Moldova. 2022. V. 17. № 2. P. 35–42.
27. Shvydkiy V.O., Shtamm E.V., Skurlatov Yu.I., Vichutinskaya E.V., Zaitseva N.I., Semenyak L.V. Intoxication of the Natural Aqueous Medium Resulting from Disbalance of Redox and Free Radical Intracellular Processes // Russ. J. Phys. Chem. B. 2017. V. 11. № 4. P. 643–651.
28. Slotte J.O., Ramstedt B. The functional role of sphingomyelin in cell membranes // Eur. J. Sci. Technol. 2007. V. 109. P. 977–981.
29. Sorokovikova L.V., Popovskaya G.I., Tomberg I.V., Bashenkhina N.V. Space-Time Variations of the Concentration of biogenic and organic Matter and Phytoplankton in the water of the Selenga river and its delta reaches // Water Res. 2009. V. 36. № 4. P. 443–453.