

ФОТОХИМИЯ
И МАГНЕТОХИМИЯ

УДК 577.3,577.34,544.52

ВЛИЯНИЕ НЕОРГАНИЧЕСКОГО ФОСФАТА
НА ФОТОПРОДУКЦИЮ ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА
В ЗАМОРОЖЕННЫХ ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ПРОИЗВОДНЫХ АДЕНИНА

© 2020 г. Т. А. Лозина^{a,*}, А. В. Лобанов^{b,c}, А. В. Ландер^d, О. Н. Бржевецкая^a

^a Российская академия наук, Институт биохимической физики имени Н.М. Эмануэля, Москва, Россия

^b Российская академия наук, Институт химической физики имени Н.Н. Семенова, Москва, Россия

^c Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, Москва, Россия

^d Российская академия наук, Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики, Москва, Россия

*e-mail: taloz@mail.ru

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

Поступила в редакцию 10.04.2019 г.

После доработки 10.04.2019 г.

Принята к публикации 14.05.2019 г.

Определено содержание пероксида водорода в облученных ближним УФ при 77 К водных растворах 2×10^{-4} М аденина (А), аденозина (Ado) и аденозин-5'-дифосфата (ADP), содержащих NaCl (0.1 М), и идентичных растворах, содержавших добавки неорганического фосфата (P_i). Показано, что введение P_i в растворы приводит к существенному увеличению выхода H_2O_2 . Результаты определения H_2O_2 в исследованных системах сопоставлены с оценками интегральных интенсивностей сигналов ЭПР (Int_S) облученных растворов перед размораживанием (и оценками содержания различных компонент данных спектров, полученными методом моделирования). Сделан вывод, что основными продуцентами образования H_2O_2 в исследованных системах являются агрегаты производных аденина, образующиеся при замораживании водных растворов.

Ключевые слова: производные аденина, фотолиз, пероксид водорода, ЭПР, пероксильные радикалы, неорганический фосфат

DOI: 10.31857/S0044453720020223

Данная работа – продолжение цикла исследований образования пероксида водорода, индуцируемого ближним УФ-облучением в замороженных водных растворах производных аденина [1–5]. В [1, 2] было показано, что при размораживании облученных ближним УФ при 77 К водных растворов производных аденина (АХ, где Х = Н для аденина (А), Х = рибоза для аденозина (Ado), Х = рибозо-5'-дифосфат для аденозин-5'-дифосфата (ADP)), содержавших 0.1 М NaCl, в образцах обнаруживается значительное количество H_2O_2 . Облучение в тех же условиях производных других нуклеиновых оснований (гуанозин-5'-монофосфат, цитидин (Cyt) и тимин) приводило к образованию H_2O_2 лишь в случае Cyt [2]. Однако, наблюдаемая фотопродукция H_2O_2 в растворах Cyt оказывалась на 2–3 порядка ниже, чем в случае Ado. Таким образом, вероятно, что производные аденина обладают достаточно специфической по сравнению с производными других нуклеиновых

оснований способностью к фотоиндуцируемому образованию пероксида водорода.

Ранее было показано, что при определенных условиях замораживания в суммарных спектрах ЭПР в области $g \approx 2.00$ (сигналы S) облученных ближним УФ при 77 К образцов водных растворов производных нуклеиновых оснований, содержавших NaCl (0.1 М), присутствует значительное количество пероксильных радикалов O_2^{\bullet} и HO_2^{\bullet} (до 40% от общего количества образующихся парамагнитных продуктов ([6] и ссылки в этой работе)). Сопоставление результатов определения H_2O_2 с результатами анализа спектров ЭПР тех же облученных образцов перед их размораживанием указывает на существенную роль ассоциации АХ в процессе образования H_2O_2 в рассматриваемых системах [3–5].

В данной работе приведены результаты исследования влияния добавок неорганического фос-

фата на фотопродукцию H_2O_2 в замороженных растворах $\text{AX} + \text{NaCl}$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Использовали препараты А, Ado и ADP фирмы “Serva”. В качестве неорганического фосфата (P_i) использовали соль $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ класса “extra pure”, остальные реактивы – класса “х.ч.”. Для приготовления растворов применяли воду, очищенную на установке Millipore. Эксперименты выполняли в слабокислой среде (рН 6.6), доведение рН растворов до этой величины производили добавлением HCl и NaOH . В исследованных растворах $[\text{AX}] = 2 \times 10^{-4}$ М, $[\text{NaCl}] = 0.1$ М.

Образцы замораживали в тефлоновых контейнерах быстрым погружением в жидкий азот (77 К) и освобождали непосредственно перед освещением. Облучение производили ртутной лампой сверхвысокого давления ДРШ-1000 со светофильтром УФС-5 (стандартное значение 40%-го пропускания в диапазоне 260–400 нм). Интенсивность освещения I_{hv} ограничивали до ~ 0.6 от максимальной интенсивности источника облучения при помощи решеток, калиброванных на спектрофотометре, аналогично [3–5]. Это было связано с тем, что эффективность фотопродукции H_2O_2 (α), определяемая как отношение количества образующегося пероксида $[\text{H}_2\text{O}_2]$ к интегральной интенсивности сигнала ЭПР, регистрируемого в области $g \approx 2.00$ (Int_g), существенно снижается при увеличении I_{hv} [3, 4].

Образцы облучали при 77 К в кварцевом дюаре. Спектры ЭПР регистрировали при 77 К на изготовленном в лаборатории ЭПР-спектрометре (частота 9.5 ГГц). Мощность СВЧ-излучения составляла $W \approx 200$ мкВт и $W \approx 2$ мВт, амплитуда модуляции – 2 Гс. Высокую мощность СВЧ-излучения считали необходимой для более точной оценки содержания медленно насыщающихся свободных радикалов O_2^- и NO_2^{\bullet} (присутствие последних в спектрах обусловлено, по-видимому, вероятными примесями нитратов в компонентах растворов).

Методика оценки вклада различных компонент в сигналы S, выполнявшейся на основании построения модельного сигнала, идентична описанной в [7] и применявшейся во всех цитированных выше работах. Основными составляющими (“базисными сигналами”), вносящими вклад в регистрируемые спектры облученных растворов AX, являются сигналы пероксильных радикалов – O_2^- и HO_2^{\bullet} , электрондефицитных радикалов аденина A^{\bullet} ; радикалов рибозы Ri^{\bullet} в Ado и ADP, (локализованных преимущественно на C5’); C8OH-аддуктов аденина – AON^{\bullet} ; сигналы Cl_2^{\bullet} ;

стабилизированных в матрице электронов e^- и радикалов NO_2^{\bullet} .

В случаях присутствия в растворах добавок P_i попытка внесения в базисную систему сигналов фосфатных радикалов и радикалов OH^{\bullet} , вносящих существенный вклад в анализируемые спектры при более высоких концентрациях реагентов [8], при используемых концентрациях оказалась безуспешной.

После записи спектров ЭПР облученные образцы хранили в течение суток в жидком азоте (77 К) вплоть до определения H_2O_2 . Определение H_2O_2 проводили спектрально-иодометрическим методом [9], аналогично выполнявшемуся в работах [1–5]. Точность определения концентрации пероксида водорода < 1 мкМ. Параллельно с облученными образцами в каждом из опытов выполняли определение H_2O_2 в контрольных, не облучавшихся образцах, хранившихся то же время при 77 К. Пероксид водорода в этих образцах отсутствовал ($[\text{H}_2\text{O}_2] < 1$ мкМ).

Среднеквадратичная ошибка определения H_2O_2 в облученных образцах составляет $\sim 24\%$; среднеквадратичная ошибка определения Int_g составляет $\sim 33\%$. Количество параллельных образцов в различных опытах варьировало от 2 до 7.

Ранее выполненные оптические измерения зависимости оптической плотности (D) растворов AX от $[\text{P}_i]$ были произведены на автоматизированном спектрофотометре Specord UV VIS (ГДР), позволявшем хранить оцифрованные результаты измерений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты определения количества пероксида водорода в размороженных образцах AX, облученных при 77 К с светофильтром УФС-5, приведены в табл. 1. Там же представлены результаты определения интегральных интенсивностей сигналов ЭПР в этих образцах перед размораживанием (Int_g) и оценки вклада основных компонент в регистрируемые суммарные спектры.

Данные, полученные на образцах, не содержащих P_i , идентичны приведенным в [5], поскольку эксперименты по влиянию P_i и ионов Zn^{2+} на фотопродукцию H_2O_2 производными аденина выполняли одновременно. Добавление P_i к исследуемым растворам $\text{AX} + \text{NaCl}$ приводит к значительному увеличению выхода H_2O_2 в облученных образцах (до ~ 10 -кратного для А, табл. 1).

В анализируемых спектрах ЭПР растворов, содержащих добавки P_i , присутствия фосфатных радикалов, радикалов OH^{\bullet} , и атомов H^{\bullet} , наблюдавшихся при более высоких концентрациях реагентов в [8], при используемых концентрациях не

Таблица 1. Результаты определения H_2O_2 и анализа спектров ЭПР в образцах AX + NaCl и AX + NaCl + P_i

Соединение	$[\text{P}_i] \times 10^4$, М	$[\text{H}_2\text{O}_2]$, мкМ	Int, усл. ед.	Содержание основных компонент, усл. ед.						α
				O_2^{\bullet}	HO_2^{\bullet}	A^{\bullet}	R_i^{\bullet}	AON^{\bullet}	Cl_2^{\bullet}	
A	—	28	469	115	49	160	—	80	34	0.06
A	5	274	122	23	16	33	—	0	6	2.25
Ado	—	141	448	124	62	117	41	42	38	0.31
Ado	5	435	184	78	0	39	31	18	5	2.36
Ado	0.5	325	333	117	37	92	22	36	7	0.98
ADP	—	41	268	68	43	70	16	30	22	0.15
ADP	5	158	152	41	23	32	19	2	13	1.04

Примечание: $[\text{AX}] = 2 \times 10^{-4}$ М, $[\text{NaCl}] = 0.1$ М. Облучение с светофильтром УФС-5, $I_{hv} = 0.6$. Время облучения – 16 мин. Приведены средние значения результатов, полученных в параллельных опытах; $\alpha = [\text{H}_2\text{O}_2] / \text{Int}_5$, условные единицы.

обнаруживается. Примеры спектров ЭПР, регистрируемых в исследуемых облученных образцах при 77 К, и результаты их моделирования показаны на рис. 1.

Значительное увеличение выхода H_2O_2 при добавлении в облучаемые растворы невысокого количества P_i вызывает вопрос о степени комплексобразования AX с P_i . Нам неизвестны литера-

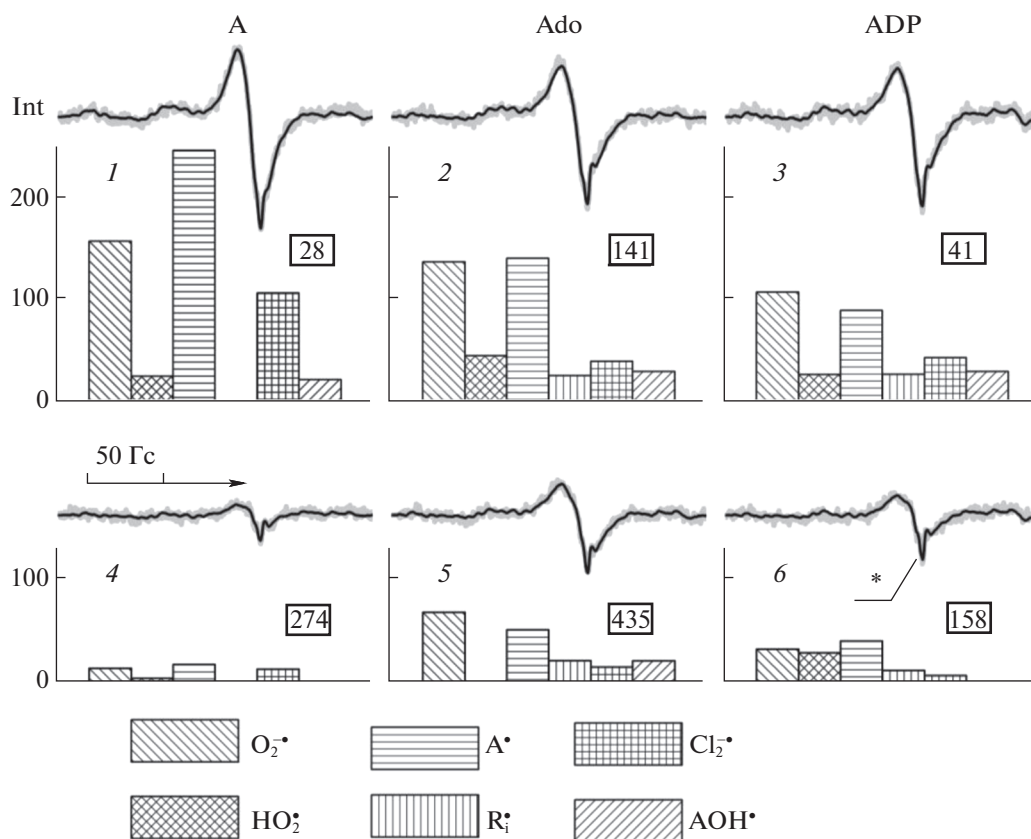


Рис. 1. Примеры спектров ЭПР, регистрируемых в облученных растворах AX (2×10^{-4} М); $I_{hv} = 0.6$, $t_{hv} = 16$ мин, $W \approx 200$ мкВт. Экспериментальные спектры ЭПР – серые линии, модельные – обычно накладывающиеся тонкие черные линии. Под спектрами приведены результаты оценки вклада основных компонент сигналов (условные единицы); * – сигнал дьюара, 1–3: AX + 0.1 М NaCl; 4–6: AX + 0.1 М NaCl + 5×10^{-4} М P_i ; $T = 77$ К. В рамках указан выход пероксида водорода в соответствующих системах, в мкМ.

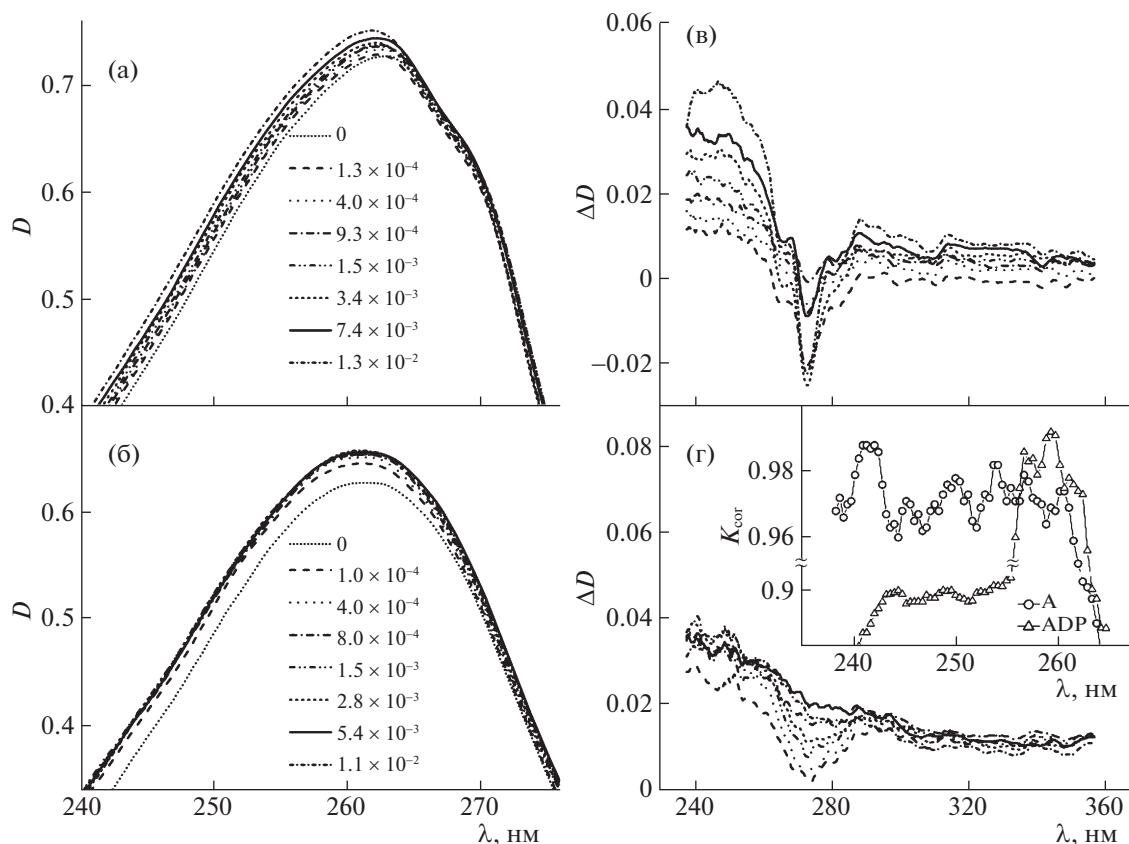


Рис. 2. Влияние P_i на спектры оптического поглощения А (а) и ADP (б); в и г – разностные спектры (ΔD) растворов AX + NaCl + P_i и AX + NaCl; приведены значения $[P_i]$, М. Вставка – зависимости констант корреляции (K_{cor}) экспериментальных результатов с получаемым линейным приближением в системе двойных обратных координат от λ ; 0.05 М цитратный буфер, pH 5.6, 293 К.

турные данные о величинах констант ассоциации AX с P_i (K_a). Приведенная нами для комплексования А и P_i оценка $K_a \sim 400 \text{ М}^{-1}$, полученная в [10], была, по-видимому, недостаточно корректной.

Результаты оптических измерений. Более подробный анализ результатов влияния P_i на изменение D растворов AX по этим измерениям (0.05 М цитратный буфер, pH 5.6, 293 К) показывает существенное различие между поведением оптических спектров А и ADP (рис. 2). Добавление небольших количеств P_i ($\sim 10^{-4}$ М) к растворам А и ADP приводит к появлению минимума в разностных спектрах ($\Delta D = D_{(AX + P_i)} - D_{AX0}$) при длинах волн $\lambda \sim 273$ нм, более выраженному в случае А. Увеличение ΔD в области $\lambda \approx 240\text{--}264$ нм в случае А больше, чем в ADP (рис. 2).

При линейризации результатов измерений оптической плотности ADP + P_i в системе двойных обратных координат ($1/[P_i]$; $1/\Delta D$) по методике [11] (в предположении образования комплексов 1:1) зависимости от λ констант корреляции (K_{cor}) экспериментальных результатов с получаемым

линейным приближением существенно различаются в случаях А и ADP (рис. 2, вставка). Результаты расчета возможных величин K_a при λ , соответствующих оптимальным соотношениям величин $\beta = K_{cor}/\sigma$ (%), приведены в табл. 2.

Относительная среднеквадратичная ошибка определения K_a при различных длинах волн λ составляет в случае ADP $\sim 11\%$ и $\sim 60\%$ для А. Таким образом, определение констант ассоциации аденина с P_i (K_a) по оптическим измерениям представляется невозможным. Мы считаем, что причина этого может состоять в изменении соотношения таутомерных форм А в присутствии P_i . Известно, что помимо основной формы А (N9H), некоторый вклад в спектры оптического поглощения вносят его таутомеры N7H и N3H [12]. (Хотя возможность присутствия в водных растворах формы N3H не очевидна [13]). Отсутствие в спектрах оптического поглощения растворов Ado “плеча” в области $\lambda \sim 270$ нм, наблюдаемого в растворах А [14], свидетельствует, по-видимому, о том, что вклад таутомеров А в соответствующие спектры в данной области λ существенен. Соот-

Таблица 2. Константы корреляции (K_{cor}) экспериментальных результатов с линейным приближением, получаемым в системе двойных обратных координат [12] при $\lambda = 248$ и 260 нм

Соединение	$[P_i]$, М/λ, нм	K_{cor}		σ , %		K_a	
		248	260	248	260	248	260
А	$4 \times 10^{-4} - 1.3 \times 10^{-2}$	0.937	0.940	14.1	16.4	1461	1120
	$2 \times 10^{-3} - 1.1 \times 10^{-2}$	0.962	0.968	6.5	8.8	427	214
	$2 \times 10^{-3} - 1.3 \times 10^{-2}$	0.964	0.972	6.7	8.5	396	210
ADP	$2 \times 10^{-4} - 1.1 \times 10^{-2}$	0.912	0.961	10.9	3.9	6604	12690
	$2 \times 10^{-4} - 2.1 \times 10^{-2}$	0.918	0.948	10.2	4.8	6583	11649

Примечание: σ – относительное среднеквадратичное отклонение, K_a – расчетные значения констант ассоциации АХ и P_i , получаемые при использовании различных диапазонов $[P_i]$. Цитратный буфер, 0.05 М, рН 5.6, 293 К.

ветственно, увеличение минимума ΔD в разностных спектрах в этой области и одновременное увеличение ΔD при меньших значениях λ (рис. 2) может свидетельствовать об изменении таутомерного равновесия А в присутствии добавок P_i . К сожалению, как результаты расчетных работ, так и данные экспериментальных работ, выполненных различными методами, не позволяют конкретизировать указанное предположение.

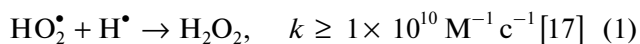
Для А максимальное полученное нами значение константы ассоциации (при $\lambda = 238.5$ нм) составляет $K_a^{A-P} = 935 \text{ М}^{-1}$. Количество связанного P_i при $[P_i] = 1.3 \times 10^{-4} \text{ М}$ мало ($[A-P_i] \sim 5 \times 10^{-6} \text{ М}$), расстояние между свободными молекулами P_i составляет $\sim 240 \text{ \AA}$ и среднее расстояние между свободными молекулами P_i и А может составлять $\sim 120 \text{ \AA}$. В случае ADP определение константы ассоциации для комплексования ADP с P_i приводит к очень высоким значениям $K_a^{ADP-P} \sim 12300 \text{ М}^{-1}$. Следовательно, при $[P_i] = 1.0 \times 10^{-4} \text{ М}$ (рис. 2) $\sim 35\%$ молекул ADP находятся в связанном с P_i состоянии и не связанными с ADP оказываются $\sim 6.5 \times 10^{-5} \text{ М}$ P_i . Расстояние между свободными молекулами P_i составляет в этом случае $\sim 295 \text{ \AA}$, между P_i и ADP $\sim 150 \text{ \AA}$. Возможные механизмы влияния низких концентраций растворенных молекул (обусловленного их воздействием на структуру водного окружения) рассмотрены в [15, 16].

Выход H_2O_2 и результаты измерений ЭПР. Возвращаясь к результатам влияния P_i на выход пероксида водорода в АХ, следует отметить, что при используемых концентрациях АХ и $[P_i] = 5 \times 10^{-4} \text{ М}$ $\sim 80\%$ молекул ADP и $\sim 30\%$ молекул А может находиться в комплексах $[AX-P_i]$ (в случае справедливости полученных оценок K_a). Однако, если в облученных растворах А + NaCl добавление P_i приводит к почти десятикратному увеличению выхода H_2O_2 по сравнению с растворами, не содержащими P_i , то в аналогичных растворах ADP и

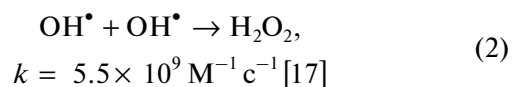
Ado это увеличение составляет всего 3.8 и 3.1 раза, соответственно (табл. 1). Таким образом, у нас есть существенные основания для предположения ключевой роли изменения соотношения таутомерных форм А в рассматриваемых экспериментах.

Как и при включении в растворы $ZnCl_2$, увеличивающем, по-видимому, самоассоциативные свойства АХ ([5] и ссылки в этой работе), возрастанию выхода H_2O_2 в случаях А и ADP сопутствует падение Int_S . Напротив, в случае снижения образования H_2O_2 в растворах Ado при добавлении $ZnCl_2$ (предположительно, обусловленного изменением конформации рибозной группы Ado), наблюдалось некоторое возрастание Int_S [5].

В облученных при 77 К растворах АХ + NaCl + P_i как увеличение выхода H_2O_2 при $[P_i] = 5 \times 10^{-4} \text{ М}$ по сравнению с растворами, не содержащими P_i , так и падение Int_S , наблюдаются для всех исследованных АХ, включая Ado (табл. 1, рис. 1). Нам представляется, что приведенные в данной работе результаты подтверждают предположение о существенности для АХ пути фотоиндуцируемого образования H_2O_2 , происходящего в агрегатах этих соединений, и не приводящему к сколько-нибудь заметному выходу в среду интермедиатных свободных радикалов [3–5]. В [5] предположено, что возможными путями образования H_2O_2 в этом случае могут быть реакции:



и



Помимо предполагаемого в определенных условиях взаимодействия фотоиндуцируемых в наших системах радикалов OH^\bullet с молекулами H_2O [7], фотопродукция радикалов HO_2^\bullet в присут-

ствии Ado и ADP, по-видимому, может осуществляться при взаимодействии радикалов R^\bullet с O_2 [18]. В отсутствие добавок относительное содержание радикалов HO_2^\bullet , действительно, несколько выше в растворах Ado и ADP, чем в растворах A (табл. 1). Небольшое количество H^\bullet ($Int_H^\bullet \leq 0.02Int_S^\bullet$) наблюдалось в содержащих NaCl облученных растворах Ado и ADP, в отличие от растворов A, в [6]. Поэтому вклад реакции (1) в образование H_2O_2 , по-видимому, возможен. Вклад реакции (2) маловероятен, поскольку образование радикалов OH^\bullet не регистрируется методом ЭПР ни в одной из исследованных систем.

В [19] выдвинуто предположение о существенности для транспорта электронов образования “напряженных” связей OH-групп с окружающими реагентами (которое, по-видимому, может быть отнесено и к молекулам H_2O). Экспериментальными основаниями для этого предположения служили опыты по обнаруживаемому методом ЭПР при 77 К переносу электрона от фотоиндуцируемого донора (обычно, триптофан) к различным акцепторам. Отмечается, что перенос электрона между донором и возможным акцептором возможен при концентрациях последнего < 0.01 М, т.е. при расстояниях, составляющих $< 28 \text{ \AA}$ [19].

Возможная справедливость предполагаемого в [19] механизма фотоиндуцируемых реакций в исследованных нами системах в случаях “внутриагрегатного” (без существенного выброса интермедиатных свободнорадикальных продуктов в среду) образования H_2O_2 представляется весьма привлекательной для интерпретации наших результатов. Этому может способствовать возможность существования в условиях наших экспериментов катион-радикалов A.

Поскольку используемый в качестве базисного сигнал A^\bullet был получен нами при относительно высокой концентрации аденина, $[A] = 2 \times 10^{-3}$ М (при фотоиндуцируемом окислении A в присутствии P_i [20], $pH \sim 5.2$), принадлежность его депротонированным катион-радикалам $A^{+\bullet}$ ($pK_a = 4.2$ [21]), предполагавшаяся в наших предшествующих работах, не очевидна.

В работе [22] методом ЭПР было продемонстрировано, что при γ -радиолизе олигомера $(dA)_6$ в 7.5 М стеклах LiCl при 77 К и последующем отжиге сигналов при $T \sim 150$ К, изменение параметров электрондефицитных свободных радикалов A свидетельствует о существенном увеличении pK_a этих радикалов ($pK_a \sim 8$) по сравнению с наблюдаемыми в аналогичных условиях в растворах dA при $pK_a > 4$.

В жидких растворах методом импульсного радиолиза показано, что при окислении растворов

олигонуклеотидов свободными радикалами $SO_4^{\bullet-}$ результаты анализа возникающего оптического поглощения зависят от последовательности нуклеиновых оснований. В олигонуклеотидах, содержащих последовательные фрагменты AA и AAA, наблюдалось двухкратное снижение константы скорости депротонирования катион-радикалов A по сравнению с растворами дезоксиаденозина (dA) [21]. В то же время спектры депротонированных (нейтральных) электрондефицитных радикалов $A(-H)^\bullet$ в олигонуклеотидах не зависят от последовательности оснований. Предположено, что значительное увеличение энергетического барьера для депротонирования катион-радикалов A вызвано стабилизацией катиона при стэкинге оснований A [21]. Выводы работ [21, 22] подтверждаются результатами расчетов, показывающими, что в случае стэкинга оснований A отрыв e^- от A приводит к делокализации образующейся “дырки” между 2–3 молекулами [23].

Известно, что расстояние между стэкинг-ассоциированными молекулами AX составляет $\sim 3.4 \text{ \AA}$ [24]. Это, в принципе, позволяет внедрение в них одномолекулярного слоя H_2O (размер молекулы $H_2O < 3 \text{ \AA}$). Таким образом, существуют некоторые основания для предположения о том, что ключевым фактором образования H_2O_2 в агрегатах AX является фотоиндуцируемая деструкция молекул H_2O , а не предполагавшееся ранее исключительно восстановление растворенного O_2 и последующее взаимодействие $O_2^{\bullet-}$ с компонентами раствора (включая фотоиндуцируемые) [1, 3].

Следует отметить, что выход пероксида водорода в ряде случаев [1, 2, 4, 5] превышает растворимость O_2 в водных и водно-солевых системах [25]. Однако, при использовавшемся способе замораживания наблюдаемое превышение выхода H_2O_2 над содержанием растворенного O_2 может объясняться также адсорбцией O_2 на поверхности образцов либо в результате неизбежных контактов с воздухом при освобождении образцов из контейнеров, либо при контакте их с примесным кислородом, растворенным в жидком азоте [2, 7].

Авторы выражают глубокую благодарность Е.Н. Дегтяреву за существенную помощь в экспериментальной работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лозина Т.А., Лобанов А.В., Ландер А.В. // Журн. физ. химии. 2015. Т. 89. № 8. С. 1329.
2. Лозина Т.А., Лобанов А.В., Ландер А.В. // Там же. 2016. Т. 90. № 11. С. 1739.
3. Лозина Т.А., Лобанов А.В., Ландер А.В. // Там же. 2017. Т. 91. № 12. С. 2146.
4. Лозина Т.А., Лобанов А.В., Ландер А.В. // Там же. 2018. Т. 92. № 10. С. 1653.

5. Лозинова Т.А., Лобанов А.В., Ландер А.В. // Там же. В печати.
6. Лозинова Т.А., Ландер А.В. // Там же. 2015. Т. 89. № 5. С. 869.
7. Лозинова Т.А., Ландер А.В. // Там же. 2014. Т. 88. № 1. С. 120.
8. Лозинова Т.А., Ландер А.В. // Биофизика. 2013. Т. 58. № 3. С. 445.
9. Лобанов А.В., Рубцова Н.А., Веденеева Ю.А., Комиссаров Г.Г. // Докл. РАН. 2008. Т. 421. № 6. С. 773.
10. Лозинова Т.А., Бржевская О.Н., Дегтярев Е.Н., Рыков С.В. // Биофизика. 2008. Т. 53. № 2. С. 205.
11. Lineweaver H., Burk D. // J. Am. Chem. Soc. 1934. V. 56. № 3. P. 658.
12. Shukla M.K., Leszczynski J. // Journal of Biomolecular Structure & Dynamics. 2007. V. 25. № 1. P. 93.
13. Aidas K., Mikkelsen K.V., Kongsted J. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2010. V. 12. № 3. P. 761.
14. Voelter W., Records R., Bunnenberg E., Djerassi C. // J. Am. Chem. Soc. 1968. V. 90. № 22. P. 6163.
15. Pollack G.H. The Fourth Phase of Water : Beyond Solid, Liquid, and Vapor. Seattle WA, USA. Ebner and Sons Publishers. 2013.
16. Коновалов А.И., Рыжкина И.С. // Изв. АН. Сер. хим. 2014. № 1. С. 1.
17. Buxton G.V., Greenstock C.L., Helman W.P., Ross A.B. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1988. V. 17. № 2. P. 513.
18. Boussicault F., Kaloudis P., Caminal C. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2008. V. 130. № 26. P. 8377.
19. Неделина О.С., Бржевская О.Н., Дегтярев Е.Н. и др. Проблемы зарождения и эволюции биосферы: До-планетная стадия развития Солнечной системы. Реконструкция химических и геологических условий на ранней Земле. Теоретические и экспериментальные исследования предбиологических химических систем. События и факторы эволюции биосферы / Под ред. Э.М. Галимова. М.: КРА-САНД, 2013. С. 247.
20. Лозинова Т.А., Бржевская О.Н., Дегтярев Е.Н., Рыков С.В. // Биофизика. 2007. Т. 52. № 4. С. 581.
21. Kobayashi K. // J. Phys. Chem. B. 2010. V. 114. № 16. P. 5600.
22. Adhikary A., Kumar A., Khanduri D., Sevilla M.D. // J. Am. Chem. Soc. 2008. V. 130. № 31. P. 1082.
23. Kumar A., Sevilla M.D. // J. Phys. Chem. B. 2011. V. 115. № 17. P. 4990.
24. Зенгер В. Принципы структурной организации нуклеиновых кислот. М.: Мир, 1987. 583 с. (Saenger W. Principles of Nucleic Acid Structure. Springer-Verlag New York, 1984.)
25. Engineering ToolBox, Oxygen – Solubility in Fresh Water and Sea Water. [online]. Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/oxygen-solubility-water-d_841.html.