

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ МИКРОГЕТЕРОГЕННОСТЬ РАЗБАВЛЕННЫХ ВОДНЫХ СРЕД. РОЛЬ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА И ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ

Л.В.Беловолова, М.В.Глушков, Е.А.Виноградов

Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН
Вавилова ул., 38, Москва, Россия, E-mail: gmv@smp.gpi.ru

ВВЕДЕНИЕ

Содержание активных форм кислорода (АФК) ¹ в клетках живых организмов и природных водах чрезвычайно мало, однако, установлено, что его некоторое увеличение (относительно равновесного значения) оказывает активирующее, нормализующее и протекторное влияние на биологические системы [1-3]. Показано, что это влияние осуществляется через изменение свойств водной среды, причем измененное состояние воды существует в течение часов и даже суток после воздействия [4-7]. Имеется много сообщений об увеличении содержания АФК или изменении содержания свободного кислорода в водных средах при различных воздействиях, в том числе низкоэнергетических и низкоинтенсивных (например, [5-9]). Стационарная концентрация наиболее стабильного и легко уловимого вида АФК – перекиси водорода, в природных водах и клетках живых организмов оценивается на уровне 0.1 мкМ/л и ниже, а концентрация радикалов АФК не превышает наномолей в литре. Механизмы воздействия в столь малых дозах и длительного сохранения измененного состояния водной среды не известны.

При равновесии с воздухом водные растворы содержат значительное количество газов, вступающих в сложные взаимодействия между собой и с молекулами примесей, а также способных образовывать АФК. Обнаружено значительное влияние газовых пузырьков на характеристики воды, сильно разбавленных водных растворов и процессы формирования микроэмульсий [10-14]. Установлено, что после дегазации чистой воды исчезает чувствительность к слабым магнитным и электромагнитным полям [15], изменяется электропроводность [16] и характер релаксации [17] после различных воздействий. Увеличение парциального давления газов до определенных критических величин, характерных для каждого газа, вызывает перестройку водной среды с сильным замедлением диффузии растворенных химических соединений [18, 19]. Присутствие воздушных пузырьков оказывает значительное влияние на сильно разбавленные водные среды и, по-видимому, существенно меньшее – на концентрированные растворы.

Нами развиваются представления о существенной роли микрогетерогенности сильно разбавленных водных сред и о влиянии АФК на масштаб и динамику коллективных взаимодействий. Разбавленные водные среды, содержащие гидрофобные молекулы газов воздуха, рассматриваются как микрогетерогенные, свойства которых сильно зависят от поверхностей пузырьков и концентрации АФК. Такие представления основаны на полученных нами экспериментальных результатах [20-26].

Работа проводилась высокочувствительным методом исследования УФ-флуоресценции в режиме счета фотонов. Для того чтобы выявить параметры флуоресценции, чувствительные к эффектам АФК, была выбрана удобная биохимическая система. На начальной стадии исследования наиболее подходящими оказались растворы дипептида – глицилтриптофана (ГТ). Впоследствии было установлено, что аналогичные результаты можно получить во многих сильно разбавленных водных растворах хромофорных соединений. По мере разбавления растворов ГТ и при различных воздействиях на воду были выявлены условия наблюдения эффектов АФК, что позволило целенаправленно проводить работу по их обнаружению в водной среде без добавления каких-либо индикаторов. При исследованиях воды разной степени чистоты и после различных видов обработки было обнаружено, что вода, очищенная двукратным перемораживанием с удалением примесей, замораживающих наиболее быстро и наиболее медленно [20, 21] (ДПВ), обладает высокой чувствительностью к различным воздействиям и малым добавкам различных веществ. Исходная вода даже высокой степени очистки (на установке “Milli Q”) до перемораживания такой чувствительности не имеет. Исследования ДПВ позволили сделать вывод о значительном влиянии упорядочивания структуры водородных связей вокруг заряженных газовых пузырьков и эффективности миграции

¹ Список сокращений: АФК – активные формы кислорода; ГТ – глицилтриптофан, ДПВ – дважды перемороженная вода; УФ – ультрафиолет, ПАВ – поверхностно-активное вещество, Твин-85 – полиоксиэтиленсорбитантриолеат, АНС – 1-анилино-8-нафталинсульфонат

протонной плотности по системе водородных связей. Полученные результаты согласуются с представлениями о важной роли эффектов переноса заряда и возбуждения по системе водородных связей, рассматриваемых во многих работах, например [27-33].

Важную информацию об окислительно-восстановительных процессах с участием АФК в водных средах позволили получить эксперименты с водой, активированной электролизом. Известна способность католита (вода из катодного отсека электролизера) ускорять и нормализовывать обменные процессы. В некоторых случаях использование католита в качестве растворителя для токсичных лекарственных средств позволяет резко снизить дозы лекарств и уменьшить проявление негативных побочных факторов [34, 35]. Анолит (вода из анодного отсека) может использоваться для стерилизации хирургических инструментов, дезинфекции ран, очистки воды от органических соединений. Несмотря на все многообразие химических реакций, протекающих в приэлектродной области электролизера, наиболее важным является образование АФК и их взаимодействие с молекулами воздуха и воды.

В данной работе приведены основные результаты, иллюстрирующие влияние газовых пузырьков и процессов с участием АФК на свойства водных систем.

РАЗБАВЛЕННЫЕ РАСТВОРЫ ГЛИЦИЛТРИПТОФАНА

Лобышев и соавторы обнаружили долговременные спонтанные и индуцированные изменения флуоресценции разбавленных водных растворов ГТ [36]. Параметры флуоресценции изменялись квазипериодически в течение многих часов и были чувствительными к электромагнитным воздействиям. Похожие спектры флуоресценции были зарегистрированы в дистиллированной воде, а также в водных гомеопатических препаратах хлорида натрия при некоторых (высоких) степенях разведения. В гомеопатических препаратах интенсивность флуоресценции коррелирует с биологической активностью [37]. Авторы предполагают, что наблюдаемая флуоресценция отражает процессы структурной самоорганизации в системе водородных связей между молекулами воды и образование долгоживущего метастабильного состояния. Они считают, что подобное состояние может образоваться в процессе приготовления гомеопатических препаратов и определять их биологическое действие.

Мы воспроизвели основные эксперименты цитированных работ с ГТ и получили аналогичные результаты. В дальнейшем, чтобы выявить роль воды и АФК в наблюдаемых эффектах мы модифицировали методику эксперимента. Типичный эксперимент проводили следующим образом: исходный раствор ГТ готовили в концентрации 2 мМ/л на чистой воде («Milli Q»). Исходную воду и все растворы пропускали через микробиологический фильтр, чтобы удалить возможные биогенные и твердые примеси. Такую же воду в равных объемах разливали по двум одинаковым стеклянным

пробиркам с притертыми пробками. Образец воды в одной из этих пробирок встряхивали в руке (20-100 раз с частотой ~ 1 Гц и амплитудой ~ 50 см), а другую оставляли без встряхивания. Далее в обе пробирки добавляли одинаковое количество концентрированного раствора ГТ и каждый из образцов слегка перемешивали легким встряхиванием пробирки. Содержимое каждой из пробирок

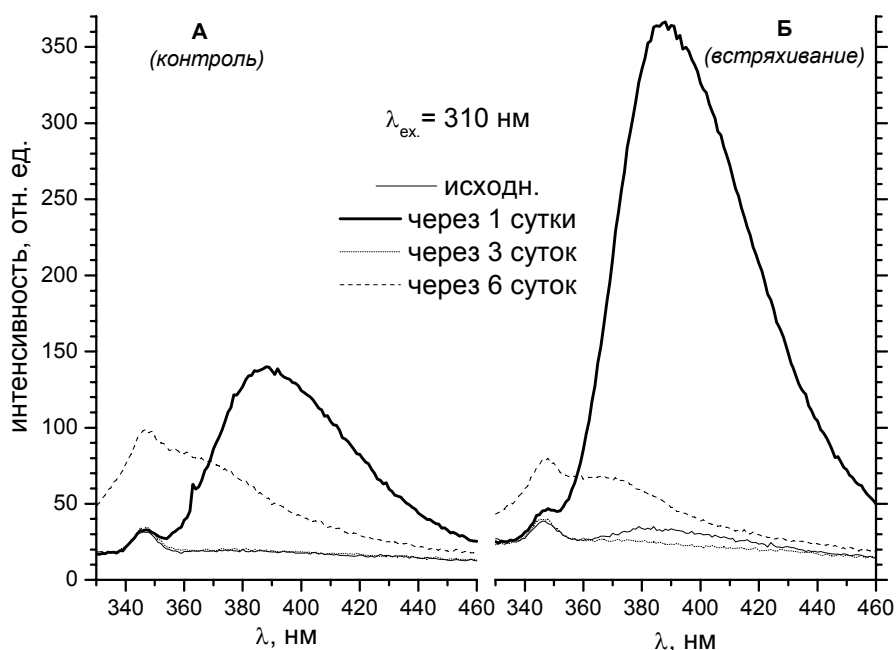


Рис. 1. Спектры флуоресценции 2 мкМ/л раствора ГТ, приготовленного А) на чистой воде без предварительного встряхивания; Б) на предварительно встряхнутой воде

переливали в одинаковые кварцевые кюветы и закрывали тефлоновыми крышками. При всех дальнейших процедурах оба образца выдерживали в одинаковых условиях.

Запись спектров флуоресценции производили по несколько раз для каждого образца, последовательно чередуя кюветы с образцами. Эксперимент показал, что в диапазоне концентраций $[ГТ] = 2-20$ мкМ/л интенсивность наблюдаемой флуоресценции существенно зависит от воздействия на воду до разведения в ней ГТ. В то время как интенсивность люминесценции триптофана ($\lambda_{ex.} = 280$ нм, $\lambda_{obs.} = 350$ нм) со временем испытывает колебания, не превышающие 30%, при возбуждении в области 310 нм колебания параметров флуоресценции значительно более выражены. Это иллюстрируется рис.1.

В описанной методике встряхивание воды производилось перед добавлением ГТ. Еще более значительное повышение интенсивности флуоресценции по сравнению с контролем наблюдается, если встряхивается образец, в котором уже растворен ГТ. На рис.2 показаны зависимости от времени интенсивности флуоресценции трех образцов с одинаковой конечной концентрацией ГТ, но приготовленных различными способами. Графики «Н» и «В» на рис.2 показывают изменение интенсивности флуоресценции ($\lambda_{obs.} = 385$ нм) в течение нескольких суток наблюдения для образцов, приготовленных на предварительно необработанной (Н) и встряхнутой воде (В), соответственно. (Эти образцы приготовлены по вышеописанному методу с разведением исходного раствора сразу в 100 раз до конечной концентрации ГТ 20 мкМ/л). Кривая «ВГТ» соответствует образцу, который приготовлен по методу, используемому при приготовлении гомеопатических препаратов. В этом случае исходный раствор ГТ сначала разводится в 10 раз и полученный раствор встряхивается. Затем снова проводится разбавление в 10 раз новой порцией воды и встряхивание.

Интенсивность флуоресценции ($\lambda_{obs.} = 385$ нм), измеренной через сутки после приготовления, зависит от концентрации ГТ не линейно. Это, в частности, видно из сравнения рис.1 и 2 (концентрация ГТ составляет 2 и 20 мкМ/л соответственно). Чем ниже концентрация ГТ, тем в большей степени параметры спектров, наблюдаемых через сутки после воздействия, определяются предысторией водной среды, видом и концентрацией примесей. В экспериментах с ГТ другие воздействия на воду, приводящие к образованию АФК, (неоднократные переливания, нагрев, облучение люстрой Чижевского или импульсным азотным лазером через верхнюю поверхность образца в открытой кювете и др.) качественно приводили к тем же результатам, что и встряхивание.

Сразу после приготовления образцов и через определенные моменты времени после него измерялись рН, содержание кислорода, окислительно-восстановительный потенциал и электропроводность [24]. Установлено, что значения рН разных образцов разбавленных растворов ГТ с течением времени испытывают колебания в диапазоне рН от 5.8 до 7.2. Значения рН чистой воды, использованной для приготовления растворов ГТ, тоже зависят от встряхивания воды. Так значения рН исходной воды и ее же сразу после встряхивания составляют 5.95 ± 0.05 и 5.75 ± 0.05 соответственно. Это небольшое, но достоверное различие обусловлено увеличением концентрации углекислого газа, растворяющегося в воде при встряхивании [24]. Как известно, проводимость чистой воды определяется, в первую очередь, содержанием углекислого газа [16]. С течением времени значения вышеперечисленных параметров образцов, приготовленных на исходно различной воде, достоверно различаются, причем эффект воздействий на воду до разведения в ней ГТ, (отнесенный к

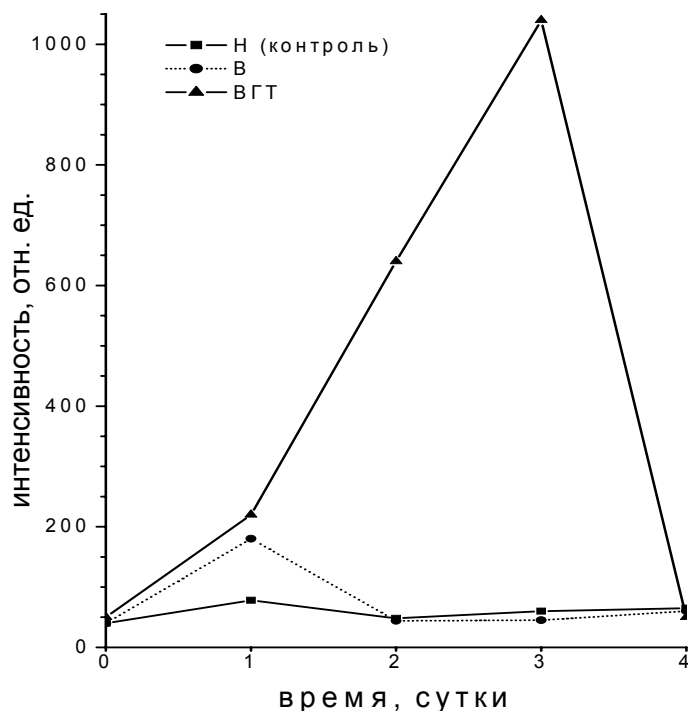


Рис.2. Зависимость интенсивности спектров люминесценции 20 мкМ/л раствора ГТ от времени после приготовления для образца, приготовленного на невстряхнутой воде (Н); на предварительно встряхнутой воде (В) и на воде, встряхнутой в присутствии ГТ (ВГТ).

единице концентрации ГТ), выражен тем сильнее, чем ниже используемая концентрация ГТ.

Встряхивание воды или водного раствора, несмотря на кажущуюся простоту, является сложным физическим процессом, приводящим к диспергированию паровоздушных пузырьков в водной среде, появлению течений и ударных волн, образованию разветвленной межфазной поверхности и связанному с этим перераспределению молекул растворенных веществ и ионов. После встряхивания возвращение в равновесное состояние происходит очень медленно, в течение многих часов, что связано, по-видимому, не только с медленностью процессов диффузии газов в воду, но и с образованием заряженных пузырьков и сверхравновесных концентраций АФК. При этом могут возникать колебательные состояния, регистрируемые по спектрам УФ-флуоресценции. Подробнее эти процессы будут рассмотрены ниже.

Полученные данные показывают, что наблюдаемый длинноволновый пик УФ-флуоресценции ($\lambda_{ex.} = 310$ нм, $\lambda_{obs.max} = 360-420$ нм) отражает содержание продуктов перекисного окисления примесей ненасыщенных органических соединений, вступающих в реакции с АФК. На примере добавок Твина-85 (ПАВ на основе непредельной олеиновой кислоты) к разбавленным растворам глицилтриптофана [24]

продемонстрировано, что влияние примесей органических соединений наиболее заметно проявляется при их низких концентрациях (рис. 3). Это связано с тем, что при малых концентрациях органические примеси сосредоточены в газовых пузырьках вблизи поверхностей раздела фаз вода-воздух. Они погружены вглубь поверхностного слоя в соответствии с гидрофильно-гидрофобным балансом их молекул и особенностями поверхностного слоя (вид и концентрация ионов, наличие свободных радикалов, других ПАВ и гидрофобных веществ). Взаимодействие с поверхностью оказывает упорядочивающее и ориентирующее воздействие на адсорбированные молекулы и влияет тем самым на их реакционную способность [38]. Ослабление зависимости при большей концентрации Твина, обусловлено нарушением упорядоченности монослоя ПАВ и мицеллярными эффектами.

Исследования разбавленных растворов ГТ позволили выявить условия наблюдения длинноволнового пика ($\lambda_{ex.} = 310$ нм, $\lambda_{obs.max} = 360-420$ нм) и получить доказательства, что его параметры связаны с АФК и газовыми пузырьками. Это позволило целенаправленно подойти к поиску подобных эффектов в сильно разбавленных водных средах и чистой воде.

ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ ВОДЫ И СИЛЬНО РАЗБАВЛЕННЫХ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

Обнаружено, что спектры флуоресценции, близкие по своим параметрам к спектрам разбавленных растворов ГТ, наблюдаются в сильно разбавленных растворах аптечной перекиси водорода (рис. 4А; [21,22]). В этих растворах интенсивность сигнала растет пропорционально концентрации перекиси. При хранении раствора H_2O_2 максимум спектра сдвигается в коротковолновую область (от 400-420 нм к 370-380 нм). В то же время, при любых концентрациях хорошо очищенной H_2O_2 (марки «ОСЧ»), подобные спектры не регистрируются.

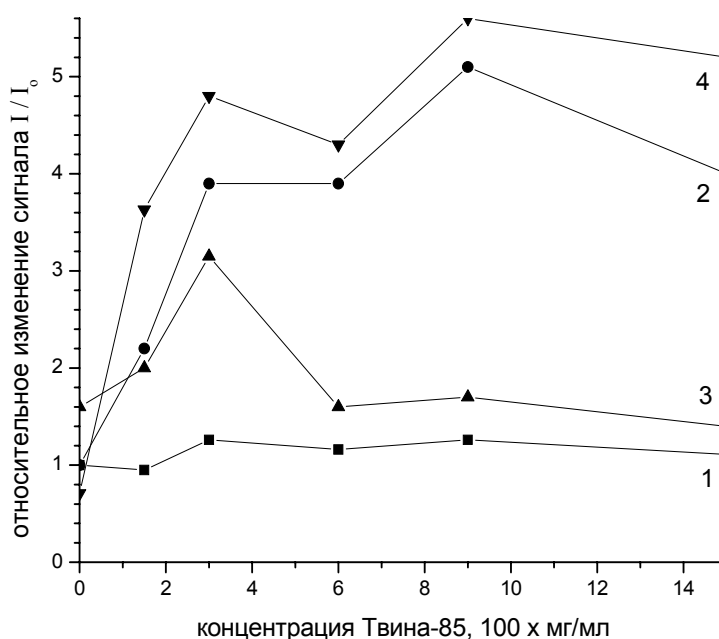


Рис. 3. Зависимости интенсивности сигналов флуоресценции (1, 3) и светорассеяния (2, 4) растворов ГТ нормированные на исходные значения (без добавок) от концентрации Твина-85. (Исходно после приготовления — 1, 2 и спустя сутки — 3, 4)

Спектры флуоресценции с максимумом около 420 нм, подобные наблюдаемым в разбавленных растворах аптечной перекиси водорода и ГТ, хорошо видны в водопроводной и родниковой воде, в то время как в необработанной дистиллированной или «чистой» воде («Milli Q») они практически отсутствуют (рис.4Б). Наш опыт показал, что введение определенных, но весьма малых количеств ионов металлов, например, меди, может приводить к полному исчезновению УФ-флуоресценции неочищенной водопроводной воды, в результате чего она спектрально совпадает со свежей чистой водой. Таким образом, однозначное соответствие между чистотой воды и параметрами ее флуоресценции отсутствует, что делает невозможным по интенсивности УФ-флуоресценции судить о чистоте воды (как предлагается, например, в [39]).

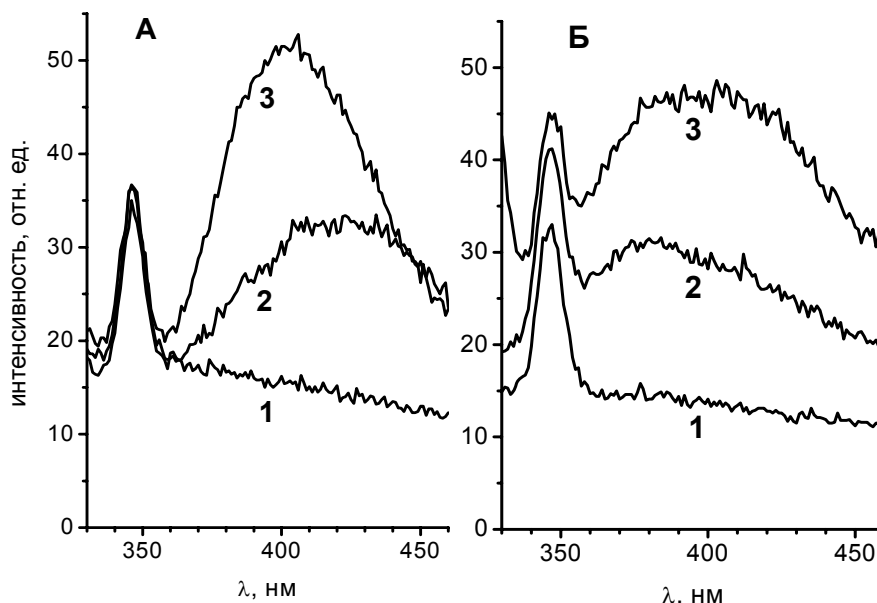


Рис.4. Спектры флуоресценции ($\lambda_{\text{ex}} = 310$ нм):

А. Водного раствора перекиси водорода: 1 — 100 мМ/л раствор H_2O_2 марки ОСЧ; 2 — 1 мМ/л свежая аптечная H_2O_2 ; 3 — 1 мМ/л старая аптечная H_2O_2

Б. Воды: 1 — дистиллированной; 2 — родниковой; 3 — водопроводной

Обнаружено, что воздействия на чистую («Milli Q») воду, аналогичные вышеприведенным для растворов ГТ, приводят к появлению характерного спектра с $\lambda_{\text{obs.max.}} = 360\text{--}420$ нм и при отсутствии органических примесей. Так после встряхивания дистиллированной или чистой воды в ней можно наблюдать спектры флуоресценции, подобные таковым в водопроводной или родниковой воде. Максимальная амплитуда таких спектров, скорректированных согласно чувствительности установки, наблюдается при $\lambda_{\text{ex}} = 250\text{--}260$ нм. Таким образом, в водных растворах, которые не содержат химических соединений, имеющих сильное поглощение или флуоресценцию в УФ области спектра, процессы с участием АФК удобнее исследовать при $\lambda_{\text{ex}} = 250\text{--}260$ нм. Эта область соответствует максимуму поглощения молекул озона [40] и O_2^- [41]. При $\lambda_{\text{ex}} \leq 310$ нм в этой области наблюдается излучение возбужденных молекул воды и ОН-радикала [42]. Полученные результаты дают основание предполагать, что наблюдаемые спектры флуоресценции связаны либо с АФК, либо с возбужденными состояниями молекул воды.

Как видно из рис.4, в воде без добавок связанные с АФК спектры флуоресценции, слабы и невыразительны, что затрудняет их исследование. Значительно повысить чувствительность спектров к различным воздействиям и добавкам различных соединений удалось посредством использования дважды перемороженной воды (ДПВ) с удалением фракций, замерзающих наиболее быстро и наиболее медленно [20, 21, 24, 25].

Спектры светорассеяния и флуоресценции ДПВ до и после интенсивного встряхивания показаны на рис.5А. Для сравнения в том же масштабе приведены спектры дистиллята до и после встряхивания (рис.5Б). До встряхивания все образцы воды, а также ДПВ после встряхивания подчиняются релеевской зависимости интенсивности светорассеяния от длины волны возбуждения. Это говорит о малости неоднородностей по сравнению с длиной волны ($\lambda_{\text{ex}} = 250$ нм). Пузырьки таких размеров должны обладать электрическим зарядом [43]. Светорассеяние дистиллята после встряхивания не подчиняется релеевской зависимости, что указывает на сравнимость размера пузырьков с длиной волны возбуждающего света.

Добавление восстановителей (аскорбиновой кислоты), а также бикарбоната натрия, увеличивает сигнал в коротковолновой части спектра. Соединения, способствующие появлению окислов азота (нитрит натрия, нитрозоглутатион), заметно снижают интенсивность коротковолновой компоненты

спектра. Поэтому можно заключить, что коротковолновая часть спектра прямо или косвенно связана с содержанием восстановленных соединений. В пользу этого заключения свидетельствуют и данные по электрохимической активации воды.

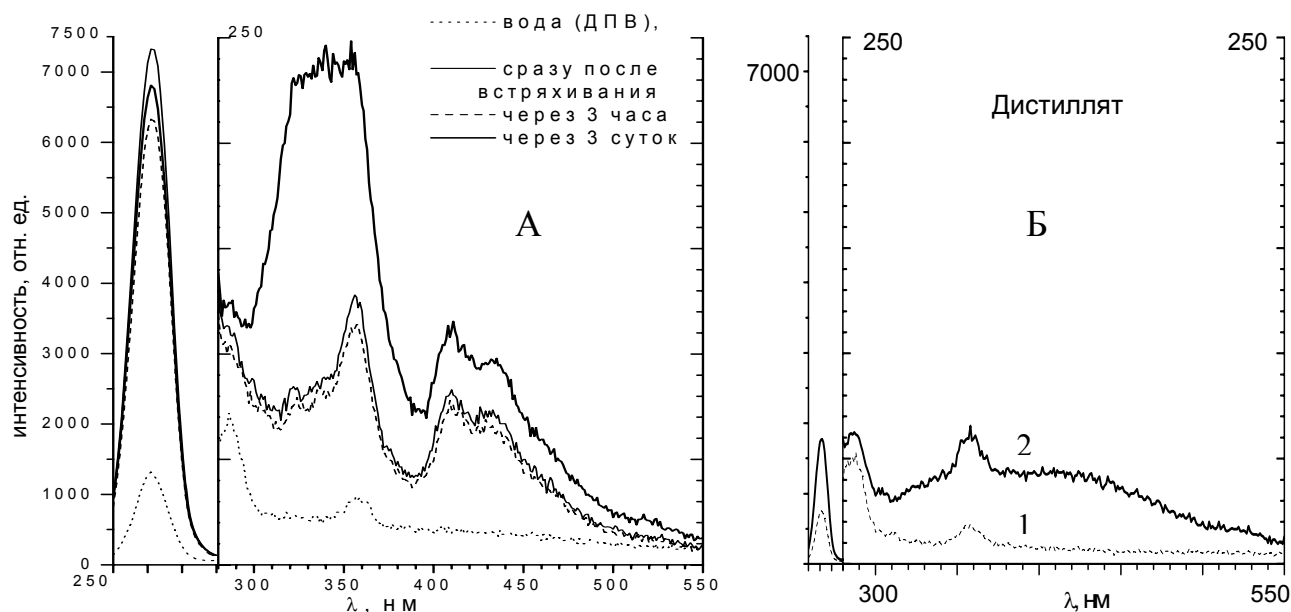
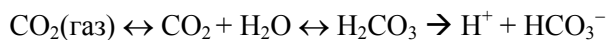


Рис. 5А. Спектры светорассеяния (слева) и флуоресценции (справа) при $\lambda_{ex} = 260$ нм для ДПВ до и с течением времени после встряхивания.

Рис. 5Б. Спектры светорассеяния (слева) и флуоресценции (справа) при $\lambda_{ex} = 260$ нм для дистиллята до (1) и после (2) встряхивания.

ЭЛЕКТРОЛИЗ ВОДЫ

В чистой аэрированной воде АФК образуются как у катода (в католите), так и у анода (в анолите), однако в католите реализуются восстановительные условия, а в анолите – окислительные [21]. У катода восстанавливаются протоны до атома водорода. В условиях, когда процесс протекает медленно и стационарная концентрация $H^\bullet$ мала, идет образование гидроперекисного радикала $\bullet HO_2$. Вследствие расходования протонов pH водной среды растет, поэтому радикалы $\bullet HO_2$ распадаются на протон и супероксидный радикал $\bullet O_2^-$ (pK 4.7). Кроме того, в щелочных растворах растворяется углекислый газ воздуха (pK 6.1) и вследствие реакции с водой, часть его образует бикарбонат:



У анода окисляются гидроксильные группы молекулы воды, и образуется $OH^\bullet$. Для усиления процессов электролиза в ячейку для анолита часто добавляют хлориды (NaCl или KCl). В этом случае в анолите образуются и другие сильные окислители: атомарный и молекулярный хлор, а также гипохлориты. В анолите pH раствора падает.

По результатам электролиза все образцы можно разделить на три класса [21]: (1) –

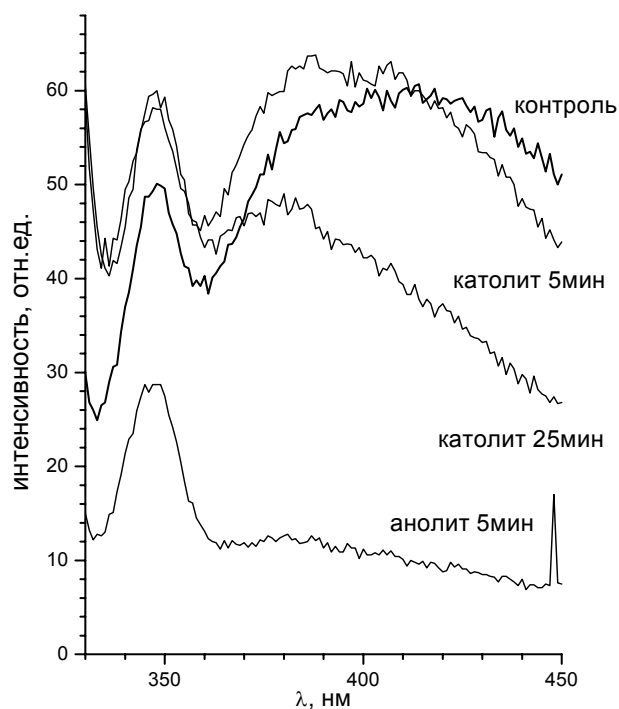


Рис.6. Спектры флуоресценции ($\lambda_{ex} = 310$ нм) католита и анолита очищенной водопроводной воды при 5 и 25 мин. электролиза с NaCl. (Контроль — спектр воды до электролиза). Для анолита после 5 мин. электролиза спектр не изменяется

дистиллированная вода, в которой изменения спектров в результате электролиза очень слабы; (2) – очищенная питьевая вода, содержащая по ГОСТу определенное количество примесей солей жесткости и органики; (3) – ДПВ, обладающая высокой чувствительностью к электролизу из-за упорядоченности структуры воды вблизи поверхности газовых пузырей и отсутствия примесей.

На рис.6 приведены спектры при $\lambda_{\text{ex.}} = 310$ нм питьевой воды, очищенной с помощью бытового фильтра «Гейзер 1». Эти спектры близки к наблюдаемым в растворах ГТ и аптечной перекиси. Широкий спектр с максимумом 380-420 нм всегда имеет более высокую интенсивность в катодите, чем в анолите. Если электролиз проводится в присутствии хлористого натрия в ячейке для анолита, то уже после 5 мин. электролиза этот пик в анолите практически пропадает. По мере протекания процесса электролиза и выпадения в осадок солей жесткости в катодите максимум этого спектра сдвигается в коротковолновую область, а его интенсивность уменьшается. Отсюда можно заключить, что параметры этого пика связаны с присутствием карбонатов солей.

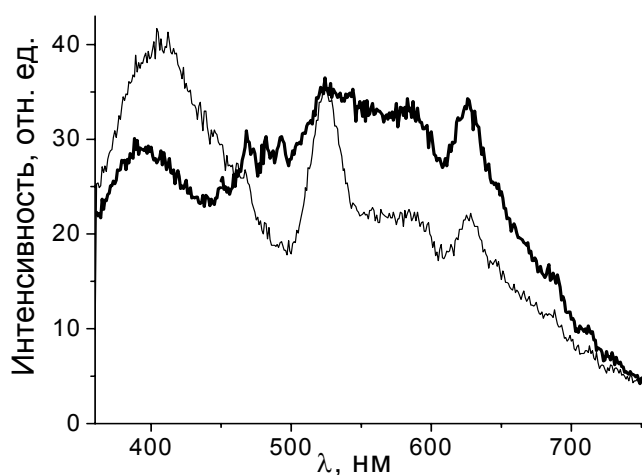


Рис.7.

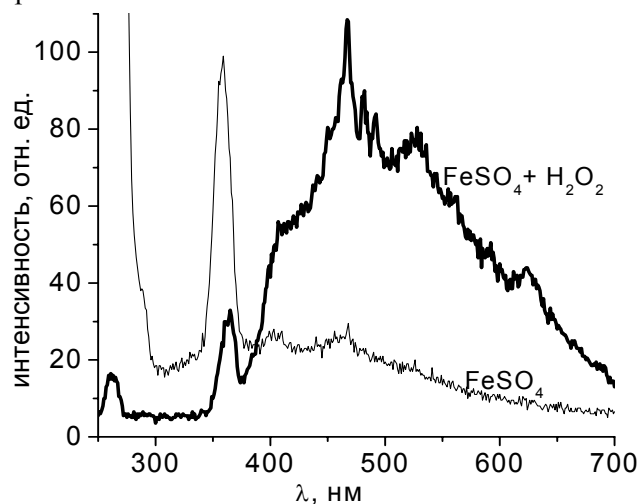


Рис.8.

Рис.7. Типичные спектры флуоресценции ($\lambda_{\text{ex.}} = 260$ нм), наблюдаемые в некоторые моменты времени после электролиза как в катодите, так и в анолите очищенной водопроводной воды.

Рис.8. Спектр флуоресценции ДПВ в присутствии примеси FeSO_4 и спектра флуоресценции того же образца после добавления H_2O_2 («ОСЧ», 0.015% по объему)

Обнаружено, что не только в катодите, но и в анолите, (если в результате электролиза пик с максимумом около 400 нм еще присутствует) при возбуждении на $\lambda_{\text{ex.}} = 260$ нм иногда можно наблюдать появление характерных сигналов с выраженной структурой в длинноволновой части спектра (рис.7). Подобные сигналы возникают при каталитическом разложении перекиси водорода (рис.8), когда процесс протекает с образованием синглетного кислорода. Характерные полосы, наблюдаемые в спектрах, приведенных на рис. 6-8, близки к наблюдаемым в газовой фазе при столкновениях двух молекул синглетного кислорода [45]. Полоса с максимумом около 525 нм заметно проявляется при электролизе в присутствии хлоридов, поэтому можно полагать, что она обусловлена хлорсодержащими продуктами. Появление и исчезновение интенсивного сигнала в широкой области спектра от 450 до 750 нм можно наблюдать время от времени в течение нескольких суток после электролиза [21]. Иногда этот сигнал удавалось наблюдать и в контрольных образцах в течение суток после очистки воды с помощью бытового фильтра. Время «жизни» этого сигнала составляет несколько минут. Время, когда в спектре (рис.7) присутствует только сигнал с максимумом около 400 нм, может быть от нескольких минут до нескольких часов. Длинноволновый спектр, по-видимому, связан с излучениями, возникающими при рекомбинации свободных радикалов, и главным образом, – синглетного кислорода [21].

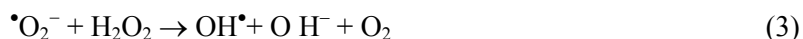
Появление спектра синглетного кислорода можно объяснить цепным разложением гидроперекисных соединений.

ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ

Как известно, в случае разложения молекул воды на радикалы [44], состав образующихся продуктов сильно зависит как от мощности воздействия, так и состава водной среды. Если разлагается сразу большое число молекул воды, то в процессе рекомбинации образующихся радикалов возникает газообразный водород и перекись водорода по уравнениям:



В этих условиях молекула супероксидного радикала способствует разложению перекиси водорода:



В итоге создаются условия с высоким окислительным редокс-потенциалом.

В условиях медленного разложения воды, когда реакция рекомбинации радикалов по уравнениям (1) и (2) маловероятны, атом водорода взаимодействует с молекулой газообразного кислорода:



В нейтральных и щелочных растворах равновесие реакции (5) (рК 4.7) сильно смещено вправо. Это означает, что по мере протекания процесса медленного разложения воды будет происходить постепенное разделение зарядов H^+ и $\text{O}_2^{\bullet -}$. Поскольку в структуре воды с большей вероятностью полости образуются на отрицательных зарядах и служат зародышами для образования газовых пузырьков, вероятно, что $\text{O}_2^{\bullet -}$ оказывается внутри пузырьков. Протон локализован в водном окружении пузырька. По мере протекания реакций (4) и (5) pH водной среды постепенно понижается, равновесие реакции (5) сдвигается вправо и постепенно накапливается перекись водорода:



Флуоресценция синглетного кислорода в реакции (6) наблюдается на длине волны около 1270 нм с очень низким квантовым выходом, и в условиях нашего эксперимента не регистрируется. При накоплении перекиси водорода происходит реакция (3), в результате чего образуется $\text{OH}^\bullet$, способный атаковать другие молекулы перекиси водорода и инициировать цепную реакцию разложения перекиси. В цепном процессе в определенные моменты времени образуется значительное число молекул синглетного кислорода, поэтому вероятны реакции столкновения между ними, приводящие к появлению спектров с характерными линиями излучения. Они близки к представленным на рис. 7 и 8. Разложение перекиси приводит к повышению pH (по реакции 3), постепенной остановке и обращению процесса разложения.

Таким образом, возникают колебания релаксационного типа, когда постепенно накапливается продукт, но условия его существования становятся все более неустойчивыми. При приближении к критическим условиям различные внешние воздействия (встряхивание, переливание, магнитные и электромагнитные возмущения) способны изменить кинетический барьер реакции или путь перехода системы в другое состояние.

РОЛЬ ОРГАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ И КАРБОНИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Хорошо известно, что в фотохимических исследованиях создание восстановительных условий создается за счет насыщения водной среды формиатом натрия [44]. Он перехватывает $\text{OH}^\bullet$ -радикал, после чего образующийся формиатный радикал $\text{CO}_2^{\bullet -}$ восстанавливает молекулы кислорода до супероксидного радикала.



Формиатный радикал является восстановителем, хотя и менее сильным, чем гидратированный электрон. В работах Владимирова [46] и Афанасьева [47] подобную роль отводят и молекулам бикарбоната:



Отмечается, что в реакции (9) возможно образование как карбонатных, так и формиатных радикалов [48]. Известно, что система $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_2$ модулирует окислительную функцию пероксинитритов и принимает важнейшее участие в биохимических процессах с участием АФК и окислов азота, протекающих в каждой живой клетке. Выход продуктов окисления пероксинитритом в присутствии бикарбоната в зависимости от конкретных условий может, как увеличиваться, так и понижаться [49]. Особенности этих процессов служат предметом интенсивных исследований.

Наши эксперименты позволяют заключить, что при возбуждении на длинах волн 260 и 310 нм широкий пик с максимумом 380–420 нм можно приписать излучению соединений, присутствующих в водной среде в восстановительных условиях. Это могут быть либо производные карбонильных соединений, либо супероксидный радикал, возникающий при взаимодействии с ними по уравнениям (7)–(9). Молекулы примесей валентно ненасыщенных органических соединений, адсорбированные на границах раздела фаз вода-пузырек, могут вступать в реакции с АФК с образованием органических гидроперекисей. Подобные реакции инициируются АФК и могут протекать по цепным механизмам [50, 51], подобно тому, как это наблюдается в биологических мембранах [52]. Реакционная способность органических примесей зависит от степени упорядоченности монослоя на границе раздела фаз, поэтому с ростом концентрации примесей, может уменьшаться (подобно растворам Твина-85, рис.3). Органические гидропероксиды, накапливающиеся на границах раздела фаз можно рассматривать как макроэргические соединения, в которых накапливается энергия АФК. Разложение органических пероксидов приводит к образованию карбонильных соединений, способных перехватывать ОН-радикал и останавливать процессы цепного окисления [45, 53, 55]. Обратимое перекисное окисление в нормальных физиологических условиях протекает в липидах мембран и имеет аналогичную природу [3]. В этих процессах важная роль принадлежит углекислоте. Известно, что в процессах с участием АФК углекислый газ является естественным антагонистом кислорода [55] и, по-видимому, принимает участие в организации клеточных ритмов [56, 57]. Роль АФК как организатора и регулятора клеточных ритмов объясняет увеличение области когерентных колебаний в тонких слоях клеточной культуры с ростом содержания АФК [58]. Детали этих процессов чрезвычайно важны и требуют дальнейших исследований.

Полученные результаты показывают, что потенцирование и динамизация водных сред, лежащие в основе приготовления гомеопатических лекарственных препаратов могут приводить к изменению состояния водной среды. Происходит образование АФК и возникновение долгоживущего неравновесного состояния, параметры которого определяются как особенностями молекулярного строения лекарственного вещества, влияющего, как минимум, на состояние границы раздела фаз вода-пузырек, так и содержанием и видом АФК [22]. В результате в сильно разбавленной водной среде организуются колебания релаксационного типа. В таких нелинейных системах с сильной обратной связью введение различных активаторов и ингибиторов процессов сложным образом зависит от их концентрации. Поэтому при малых дозах воздействия могут возникать эффекты, противоположные имеющим место при больших дозах [23]. Можно полагать, что при периодическом изменении содержания кислорода и углекислого газа в клетках живых организмов протекают колебательные процессы релаксационного типа. Их амплитуда и частота определяются количеством вовлекаемых в обратимое перекисное окисление липидов мембран, а также скоростью изменения pH и других параметров водного окружения.

Процессы с участием ионов металлов, глутатиона и нитрозоглутатиона играют очень важную роль в биологии. Ионы меди катализируют распад нитрозоглутатиона, в результате чего выделяется окись азота. В организме эти реакции протекают при весьма низких концентрациях реагирующих веществ. Модельные эксперименты показывают, что при высоких и низких концентрациях реагентов взаимодействия между различными компонентами системы происходят по-разному, поэтому принципиальное значение имеют исследования этой системы при низком содержании реагентов. В окислительно-восстановительной системе присутствие окислов азота усиливает окислительные процессы, причем углекислота модулирует выход продуктов окисления [44]. Информацию об этих процессах можно получать с помощью высокочувствительного метода исследования ультрафиолетовой люминесценции водных систем [26].

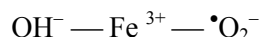
ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОГЕТЕРОГЕННОСТИ ВОДНЫХ СРЕД

Исследование УФ-флуоресценции при различных воздействиях на растворы и при введении малых добавок может дать информацию не только о реакциях с участием АФК при низких концентрациях биологически важных соединений, но и о процессах, протекающих в разбавленных водных средах. Обнаружено существенное влияние ионов металлов (железо, медь, кальций и др.) и многих биологически важных соединений (глутатион, нитрозоглутатион, аминокислоты, NADH, перекись водорода, карбонильные соединения и др.) на параметры люминесценции и макроскопические характеристики водной среды [26]. Качественно воздействие многих соединений на спектры ультрафиолетовой флуоресценции воды близко к известным для спектров сонолюминесценции [42]. Полученные результаты позволяют заключить, что резкое сужение и рост

интенсивности пика с максимумом около 360 нм, наблюдаемое в присутствии ионов металлов, перекиси водорода (марки «ОСЧ»), глутатиона и других соединений отражает структурированность водной среды около иона металла и присутствие в этой структуре супероксидного радикала. Характерный спектр флуоресценции ДПВ в присутствии ионов двухвалентного железа можно видеть на рис. 8. Поскольку спектр более ярко проявляется при высоких значениях pH можно полагать, что влияние на спектр обусловлено присутствием анион-радикала ($\cdot\text{O}_2^-$), а не его протонированной формы ($\cdot\text{HO}_2$). Известно, что в водной среде возможен перенос электрона с иона металла на газообразный кислород [59]:



Присутствие анионов способствует стабилизации такого состояния. Эту роль могут выполнять гидроксильные группы молекул воды, расположенных на границе раздела фаз вода–паровоздушный пузырек вблизи иона металла:



С помощью добавок к воде ацетона и анионного флуоресцентного зонда 1-анилино-8-нафталинсульфоната (АНС) проведено исследование структуры и динамики воды вокруг газовых пузырьков [61]. Например, показано, что введение ~0.1% (по объему) ацетона не только повышает интенсивность люминесценции воды, но и сильно влияет на спектр комбинационного рассеяния воды на валентных колебаниях протонов (рис.9, $\lambda_{\text{obs.max.}} \sim 280\text{-}290$ нм). Можно полагать, что в низких концентрациях единичные молекулы ацетона встраиваются в клатратные полости сетки водородных связей и оказывают на них стабилизирующее действие. Поглощая возбуждающий свет ($\lambda_{\text{ex.}} \sim 260$ нм), молекулы ацетона передают энергию, а возможно и электрон, окружающим молекулам воды. Наблюдаемые сигналы приписываются излучению возбужденных молекул воды, окружающих клатратные полости. По-видимому, аналогичное взаимодействие с водным окружением должно быть и для гидрофобных молекул газов. Молекулы азота и кислорода также встраиваются в клатратные полости, присутствующие в структуре воды [60], и могут подобным же образом взаимодействовать с водным окружением.

С ростом содержания ацетона или зонда АНС происходят перестройки водно-пузырьковой структуры и изменения характера взаимодействия пузырьков с водным окружением. Полученные результаты показывают, что взаимодействие малых (размер молекулы не превышает 1 нм) молекул в относительно низких концентрациях с водой может быть трех основных видов. Первый – молекулы вещества встроены в не взаимодействующие между собой клатратные полости. Для ацетона критическое расстояние между клатратами в условиях, когда эта структура переходит во второе состояние – ассоциаты из нескольких клатратов, составляет 30-40 Å. Проявление третьего состояния – отдельных пузырьков, начинается при концентрации ацетона около 0.8%. Об этом свидетельствует резкое возрастание интенсивности светорассеяния. Добавление АНС при содержании ацетона ~(0.25-5)% способствует образованию пузырьков ацетона.

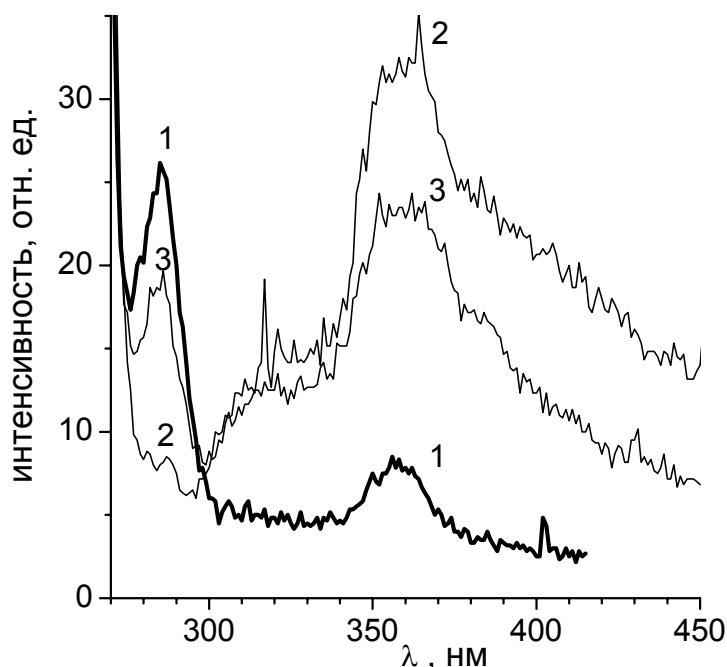


Рис.9. Спектры флуоресценции при $\lambda_{\text{ex.}} = 260$ нм:

- (1) – чистая вода;
- (2) – в присутствии 0.125% ацетона по объему;
- (3) – 8 мкМ/л АНС, растворенного в таком же количестве ацетона.

Найдены условия, при которых наблюдаются спонтанные колебания интенсивности светорассеяния и спектров флуоресценции, отражающие перестройки водно-пузырьковой структуры (рис. 10). Колебания параметров спектров флуоресценции и светорассеяния воды при определенных содержаниях включений указывают на близость системы к критическим условиям фазового перехода, при котором реакции с участием АФК в воде тесно сопряжены с перестройками структуры водной матрицы. Интересно, что значения интенсивности светорассеяния при всех колебаниях спектра флуоресценции в пределах 10% ошибки эксперимента принимают два значения (см. рис. 10). По-видимому, этот факт отражает колебания системы между двумя состояниями газовых пузырьков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

АФК постоянно образуются в воде в силу действия природных (естественный радиационный фон Земли [62]) и различных техногенных факторов. Их энергия может запасаться в виде органических гидропероксидов, образующихся в реакциях АФК с молекулами органических примесей, способных к перекисному окислению. В этих процессах важнейшую роль могут играть гуминовые соединения, присутствующие во всех природных водах. В ходе реакций с участием АФК происходят изменения параметров водной среды (рН, редокс-потенциал, заряда пузырьков, содержания газов), что приводит к появлению долгоживущих квазипериодических и переходных состояний системы. Различные воздействия на водные среды, в том числе и низкоэнергетические, могут приводить к разложению органических пероксидов и высвобождению накопленной энергии в виде повторного образования АФК и излучений. Это может объяснить многочисленные данные о появлениях АФК при низкоинтенсивных и низкоэнергетических воздействиях на водные среды.

Свободнорадикальные реакции с участием АФК, протекающие внутри и на поверхности газовых пузырьков, влияют на магнитные свойства и электрический заряд пузырьков, а также на параметры границы раздела фаз пузырек–вода. От них зависит структура и динамика ближайшего водного окружения пузырька. Вследствие кооперативности водородных связей и возможности миграции по ним протонной плотности это влияние может распространяться вглубь водной фазы. Малые газовые пузырьки имеют преимущественно отрицательный заряд, а положительный заряд, часть которого обусловлена неоднородным распределением протонов воды, локализован в водном

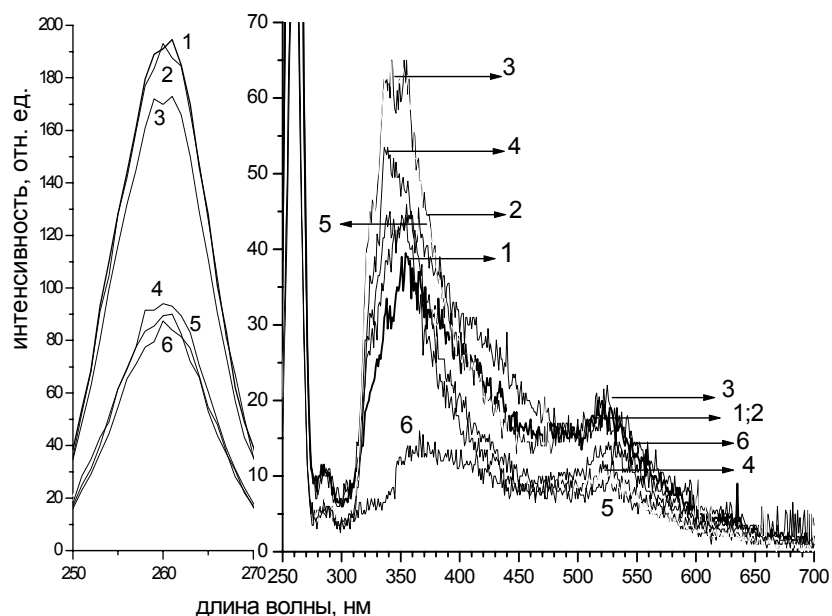


Рис.10. Некоторые из характерных спектров светорассеяния (слева) и флуоресценции (справа) раствора 16 мкМ/л АНС с 0.25% ацетона в воде, наблюдаемых в течение двух суток после приготовления образца

окружении пузырьков. Подвижность зарядов разных знаков существенно различается, поэтому при встряхиваниях, переливаниях и т.п. происходит разделение зарядов, в результате чего появляются дипольные образования значительных размеров. Их размер определяется не только диаметром пузырька, но и расстоянием от его поверхности, на которое может перемещаться протонная плотность. Синхронизация осцилляций диполей под влиянием некоторых факторов может приводить к увеличению масштаба коллективных взаимодействий и самоорганизации водной среды. Предполагается, что эти эффекты лежат в основе формирования структуры и динамики водной среды при приготовлении гомеопатических лекарственных средств. Их свойства определяются как особенностями молекулярной структуры разводимого вещества, влияющего на свойства границы раздела фаз и ближайшее водное окружение, так и содержанием и видом АФК, необходимых для организации водной матрицы.

Высокая чувствительность ДПВ к различным воздействиям и малым добавкам различных соединений свидетельствует о существенном влиянии на свойства водно-пузырьковой системы состояния границы раздела фаз, а также эффективности миграции протонной плотности по системе водородных связей между молекулами воды. При замораживании воды из нее удаляется часть воздуха, поэтому остаются только малые заряженные пузырьки радиусом порядка десятка нм. Большие незаряженные паровоздушные пузырьки, растущие в первую очередь при повышении температуры, оказывают на водную систему разупорядочивающее влияние [14].

Приведенные данные показывают принципиальную микрогетерогенность сильно разбавленных водных растворов, связанную с присутствием заряженных газовых пузырьков, и свидетельствуют о важном влиянии на их свойства процессов с участием АФК. В концентрированных «химических» системах, в присутствии большого числа хаотически сталкивающихся ионов, порождающих высокие градиенты быстро меняющихся электромагнитных полей, это влияние теряется.

В сильно разбавленных водных средах заряженный газовый пузырек служит своеобразным чувствительным «активным центром» для ближайшего водного окружения, подобно активному центру в белковых структурах. Изменения его состояния в результате внешних воздействий, также как и в белках, вызывают релаксацию макроструктуры к новому равновесному состоянию [63]. Уникальным свойством водной структуры является высокая эффективность миграции протонной плотности и возбуждений по системе водородных связей между молекулами воды [27- 33]. Можно полагать, что различные макроскопические воздействия, вызывающие однонаправленное движение многих таких «элементарных ячеек» водного окружения вокруг заряженных пузырьков, способствуют синхронизации их осцилляций и могут служить основой процессов самоорганизации сильно разбавленных водных сред.

Литература

1. Voeikov V.L. Reactive Oxygen Species, Water, Photons and Life // Rivista di Biologia/ Biology Forum. 2001, 94 ss.193–214
2. Кузин А.М., Суркенова Г.Н., Заичкина С.И. и др. О возможном участии вторичных биогенных излучений в явлении “адаптивного ответа” // ДАН, 1998, т.358, №1, сс.122–124
3. Саакян И.Р., Гогвадзе В.Г., Сирота Т.В. и др. Физиологическая активация перекисного окисления отрицательными аэроионами // Биофизика, 1998, т.43, в.4, сс. 580–587
4. Ставровская И.Г., Сирота Т.В., Саакян И.Р., Кондрашова М.Н. Оптимизация энергозависимых процессов в митохондриях печени и мозга крыс после вдыхания отрицательных аэроионов // Биофизика, 1998, т.43, в.5, сс.766–771
5. Брусков В.И., Масалимов Ж.К., Черников А.В. Образование активных форм кислорода под действием тепла при восстановлении растворенного кислорода воздуха // ДАН, 2001, т.381, № 2, сс.262–264
6. Брусков В.И., Масалимов Ж.К., Черников А.В. Образование активных форм кислорода в воде под действием тепла // ДАН, 2002, т.384, № 6, сс.821–824
7. Воейков В.Л. Благотворная роль активных форм кислорода // “МИС-RT”-2001г. Сборник № 24-1, Научно-исследовательский центр «ИКАР»
8. Казаченко В.Н., Фесенко Е.Е., Кочетков К.В., Чемерис Н.К. Облучение воды и водных растворов изменяет содержание в них свободного кислорода // Биофизика, 1998, т.43, в.6, сс. 981–988
9. Поцелуева М.М., Пустовидко А.В., Евтодиенко Ю.В. и др. Образование реактивных форм кислорода в водных растворах под действием электромагнитного излучения КВЧ-диапазона // ДАН, 1998, т. 359, № 3, сс. 415–418
10. Attard P. Nanobubbles and the hydrophobic attraction // Adv. Coll. Int. Sci., 2003, v. 104, #1-3, pp. 75-91
11. Pashley R.M. Effect of degassing on the formation and stability of surfactant-free emulsions and fine Teflon dispersions // J. Phys. Chem. B, 2003, v. 107, pp. 1714-1720
12. Prevenslic T.V. Cavitation induced Becquerel effect // Ultrasonics, 2003, v. 41, #4, pp. 323-327
13. Абросимов В.К., Ефремов Л.С., Иванов Е.В., Панкратов Ю.П. Изменение структуры воды под влиянием растворенных компонент воздуха // Журн. физ. хим., 2000, т.74, №5, сс.854–857.
14. Зелепухин В.Д., Зелепухин И.Д., Красноголовец В.В. Термодинамические особенности и молекулярная организация дегазированной водной системы // Химическая физика, 1993, т.12, №7, сс.992-1005
15. Colic M., Morse D. The elusive mechanism of the magnetic «memory» of water // Colloids and Surfaces A: Physicochem and Engineer Aspects, 1999, v. 154, #1-2, pp. 167-174

16. Pashley R.M., Zechowicz M.R., Pashley L.R. et al. De-Gassed Water Is a Better Cleaning Agent // J. Phys. Chem. B. 2005. v.109. pp.1231.
17. Vallee P., Lafait J., Legrand L. et al. Effects of pulsed low-frequency electromagnetic fields on water characterized by light scattering techniques: role of bubbles // Langmuir 2005. v.21. pp. 2293-2299
18. Габуда С.П. Связанная вода. Факты и гипотезы. Наука, Сиб. отд., 1982
19. Pauling L. A molecular theory of general anesthesia // Science, v.134, N 3471, p.15-21
20. Беловолова Л.В., Глушков М.В. Влияние активных форм кислорода и диспергированных газовых пузырьков на флуоресценцию воды и водных растворов глицилтриптофана // Электронный журнал «Исследовано в России» <http://zhurnal.apelarn.ru/articles/2006/215.pdf>
21. Беловолова Л.В., Глушков М.В., Виноградова Г.И. Особенности воды, активированной электролизом. Роль активных форм кислорода // Электронный журнал «Исследовано в России» <http://zhurnal.apelarn.ru/articles/2006/268.pdf>
22. Беловолова Л.В., Глушков М.В. Физико-химические механизмы биологического действия гомеопатических лекарственных средств. Роль активных форм кислорода и воды // XIII Московская международная гомеопатическая конф., 24–25 января 2003, Москва, сс.38–43
23. Беловолова Л.В., Глушков М.В., Ожиганова Е.Я. Активация и ингибирование в биохимических колебательных системах с отрицательной обратной связью // Там же, сс.36-38
24. Belovolova L.V., Glushkov M.V., Vinogradova G.I., Vinogradov E.A. Nature of long-lived nonequilibrium states of water and glycytryptophan aqueous solutions // Physics Wave Phenomena, 2008, v.16, N4, pp.292-299
25. Belovolova L.V., Glushkov M.V., Vinogradov E.A., et al. Ultraviolet fluorescence of water and highly diluted aqueous media // Physics of Wave Phenomena, 2009, v.17, N 1, pp.21-31
26. Беловолова Л.В., Глушков М.В., Виноградов Е.А. Структурообразование в водной среде при воздействии ионов меди, глутатиона и S-нитрозоглутатиона // Электронный журнал «Исследовано в России», 307-319, <http://zhurnal.apelarn.ru/articles/2009/031.pdf>
27. Luck W.A. The importance of cooperativity for the properties of liquid water // J. Mol. Struct., 1998, v. 448, #1-2, pp.131-142
28. Shelton D.P. Collective molecular rotation in water and other simple liquids // Chem. Phys. Lett. 2000, v.325, pp. 513–516
29. Цундель Г. Гидратация и межмолекулярное взаимодействие. Мир, Москва, 1972
30. Woutersen S., Bakker H.J. Resonant intermolecular transfer of vibrational energy in liquid water // Lett. Nature, 1999, 402, pp.507–509
31. Маэно Н. Наука о льде. М, Мир, 1988
32. Антонченко В.Я., Давыдов А.С., Ильин В.В. Основы физики воды, 1991, Киев, Наукова думка
33. Зацепина Г.Н. Физические свойства и структура воды. МГУ, 1998
34. Петрушанко И.Ю., Лобышев В.И. Неравновесное состояние электрохимически активированной воды и ее биологическая активность // Биофизика, 2001, т.46, в.3, сс.389–401
35. Фесенко Е.Е., Новоселова Е.Г., Огай В.Б. и др. Иммуномодулирующие свойства бидистиллированной модифицированной воды. // Биофизика, 2001, т.46, в.2, сс.353 – 358
36. Лобышев В.И., Рыжиков Б.Д., Шихлинская Р.Э. Спонтанные и индуцированные внешними электромагнитными полями долговременные переходные процессы в разбавленных водных растворах глицилтриптофана и воде. // Биофизика, 1998, т.43, в.4, сс. 710–715
37. Лобышев В.И., Томкевич М.С., Петрушанко И.Ю. Экспериментальное исследование потенцированных водных растворов // Биофизика, 2005, т. 50, в. 3, сс. 464-469
38. Беловолова Л.В. Структурные характеристики и реакционная способность белков в обращенных мицеллах ПАВ в органических растворителях // дисс. канд. физ.-мат. наук, 1987
39. Пацаева С.В., Фадеев В.В., Филиппова Е.М. и др. Диагностика органических примесей в кислотах методом лазерной флуорометрии // Изв. РАН, Сер. Физическая, 1992, т.56, № 12, сс.145-149
40. Калверт Дж., Питтс Дж. Фотохимия, Мир, Москва, 1968
41. Фридович И. Радикалы кислорода, пероксид водорода и токсичность кислорода // в сб. «Свободные радикалы в биологии», ред. У. Прайор, Мир, М., 1979, сс. 272–308
42. Маргулис М.А. Звукохимические реакции и сонолюминесценция, Москва, Химия, 1986, с. 99
43. Бункин Н.Ф., Бункин Ф.В. Бабстоны – стабильные газовые микропузырьки в сильно разбавленных растворах электролитов // ЖЭТФ 1992, т.101, в.2, сс.512- 527
44. Бенсассон Р., Лэнд Э., Траскот Т. Флеш-фотолиз и импульсный радиолиз, М., Мир, 1987
45. Шинкаренко Н.В., Алесковский В.Б. Синглетный кислород. Методы получения и обнаружения. // Усп. химии, 1981, т.50, в.3, сс.406–428

46. Владимиров Ю.А. Свободнорадикальное окисление липидов и физические свойства липидного слоя биологических мембран // Биофизика, 1987, т. в.5, сс.830–844
47. Афанасьев И.Б. Анион-радикал кислорода $O_2^{\bullet-}$ в химических и биохимических процессах // Усп. Химии, 1979, т.48, в.6, сс.977–1014
48. Владимиров Ю.А., Гаврилов В.Б., Лосев Г.М. и др. Изучение роли свободных радикалов $CO_2^{\bullet-}$, $COOH^{\bullet}$ и $HCO^{\bullet}$ в хемилюминесцентных реакциях // Журн. физ. химии, 1980, т.54, №2, сс.504–506
49. Denicola A, Freeman B.A., Trujillo M., Radi R. Peroxynitrite reaction with carbon dioxide/bicarbonate: kinetics and influence on peroxynitrite-mediated oxidations // Arch. Biochem. Bioph. 1996, v.333, N 1, pp.49–58
50. Теренин А.Н.. Фотоника молекул красителей и родственных органических соединений. Л.: Наука
51. Васильев Р.Ф. Хемилюминесценция в растворах // УФН, 1966, Т.89, В.3, сс.409–436
52. Владимиров Ю.А. Свободные радикалы в биологических системах // Соросовский образовательный журнал, 2000, т.6, в.12, сс.13-19
53. Фут Х. Фотосенсибилизированное окисление и синглетный кислород. Биологические следствия // в сб. «Свободные радикалы в биологии», ред. У. Прайор, Мир, М., 1979, сс. 96–143
54. Разумовский С.Д. Кислород – элементарные формы и свойства // М., Химия, 1979
55. Коган А.Х., Грачев С.В., Елисеева С.В. Углекислый газ – естественный регулятор свободнорадикального гомеостаза на разных ступенях эволюции организмов // ДАН, 1998, т. 362, N 5, сс.705-708
56. Kindzelskii A.L., Zhou M.J., Haugland R.P., et al. Oscillatory Pericellular Proteolysis and Oxidant Deposition during Neutrophil // 1998, Locomotion. Biophys. J., v. 74, pp. 90–97.
57. Adachi Y., Kindzelskii A.L., Ohno N., et al. Amplitude and Frequency Modulation of Metabolic Signals in Leukocytes: Synergistic Role of Ifn-Gamma in Il-6- and Il-2-Mediated Cell Activation. // J. Immunol., 1999, v.163, pp. 4367–4374.
58. Тычинский В.П., Вайсс Д., Вышенская Т.В. и др. Кооперативные процессы в митохондриях: регистрация методом динамической фазовой микроскопии // Биофизика, 2000, т.45, в.5, сс.870–877
59. Fee J.A., Valentine J.S. Chemical and Physical Properties of Superoxide // in Superoxide and Superoxide Dismutases, ed. A.M. Michelson, J.M. McCord, I. Fridovich, Ac.Pr., L.N-Y.S-F, 1977, pp.19–60
60. Дядин Ю.А., Гушин А.Л. Газовые гидраты // Соросовский образоват. журн. 1998, №3, сс. 55-64
61. Беловолова Л.В., Глушков М.В., Виноградов Е.А. Влияние ацетона и зонда 1-анилино-8-нафталинсульфоната на ультрафиолетовую флуоресценцию воды // в печати
62. Кузин А.М. Электромагнитная информация в явлении жизни // Биофизика, 2000, т.45, в.1, сс.144-147
63. Блюменфельд Л.А. Проблемы биологической физики // Наука, М., 1977.

УДК:537.86.52.7+58.027

ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДЫ И ЧАСТОТЫ КОМБИНИРОВАННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ГРАВИТРОПИЧЕСКУЮ РЕАКЦИЮ РАСТЕНИЙ И НИЗКОЧАСТОТНОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ГЕНЕРИРУЕМОЕ ИМИ В ПРОЦЕССЕ РОСТА

Богатина Н.И., Шейкина Н.В.¹

Физико-технический институт низких температур НАН Украины, 47, пр. Ленина, Харьков, 61100
Украина Email: n_bogatina@rambler.ru

¹ Национальный университет фармакологии, 17, пл. Восстания, Харьков, 61001, Украина
Email:sheykina@ukr.net

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы исследования влияния слабых комбинированных магнитных полей (КМП), имеющих величину магнитной индукции постоянной составляющей магнитного поля (МП) порядка земного и величину коллинеарной ей переменной составляющей МП на уровне от 10^{-12} Тл до 10^{-5} Тл на различные физиологические свойства биологических объектов, составляют содержание одного из наиболее интересных и перспективных направлений биофизики. Такой интерес к изучаемой