

УДК: 544.43

ОБРАЗОВАНИЕ ПЕРЕКИСИ ВОДОРОДА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УФ-С ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2018 г. И. М. Пискарев

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына,
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
119234, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
E-mail: i.m.piskarev@gmail.com

Поступила в редакцию 31.07.2017 г.

Исследовалось образование перекиси водорода в бидистиллированной воде под действием УФ-С излучения ртутной лампы низкого давления ДКБ-9. Выход перекиси водорода составил $(1 \pm 0.2) \times 10^{-7}$ моль(л с) $^{-1}$. Оценены длины волн излучения, под действием которого возможно образование H_2O_2 . Предполагалось, что промежуточным продуктом реакции является радикал HO_2^*/O_2^{*-} . Для его идентификации изучались окислительно-восстановительные реакции в водных растворах, содержащих ионы Fe^{2+} , Fe^{3+} и I^- при значениях pH от 0.8 до 8.1. Квантовый выход радикалов HO_2^* в кислой среде под действием излучения ртутной лампы составляет 0.015 ± 0.005 .

Ключевые слова: перекись водорода, радикал HO_2^*/O_2^{*-} , окисление Fe^{2+} и I^- , УФ-С излучение.

DOI: 10.7868/S0023119718030031

ВВЕДЕНИЕ

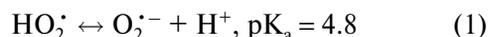
Механизмы взаимодействия излучения УФ-С диапазона, способного проходить через воздух, (200–280 нм) с веществом изучались долгое время, они детально проанализированы. Имеются монографии, подводящие итог этим исследованиям [1, 2]. Одним из механизмов является прямое поглощение кванта излучения уровнем молекулы (при условии, что такой уровень есть), после чего молекула переходит в возбужденное состояние и может модифицироваться. Если в молекуле такого уровня нет, а в воде есть растворенный кислород, то возможны реакции типа I и II с сенсibilизатором в триплетном состоянии. Роль сенсibilизаторов могут играть какие-либо примеси воды. В реакции типа I образуется ион-радикал O_2^{*-} , в реакции типа II – синглетный кислород [3].

В природных водах всегда есть вещества, которые могут играть роль сенсibilизатора, поэтому под действием видимого и УФ излучения в природной воде образуется перекись водорода [4, 5].

В случае, когда в воде нет сенсibilизатора, под действием УФ-С излучения с $\lambda < 246$ нм в принципе возможен распад молекулы воды с образованием гидроксильных радикалов. Однако вероятность этого процесса мала [6]. С заметной вероятностью гидроксильные радикалы образуются под действием вакуумного ультрафиолета при $\lambda < 180$ нм.

В работе [7] изучалось образование перекиси водорода в бидистиллированной воде под действием солнечного света и искусственного освещения от электрической лампы. За время обработки от 1 до 5 ч под действием солнечного света в пробе воды 20 мл образовывалось от 30 до 200 нмоль (концентрация от $1.5 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ моль/л) перекиси водорода. Под действием электрической лампы за то же время образовывалось от 8 до 16 нмоль (концентрация от $4 \cdot 10^{-7}$ до $8 \cdot 10^{-7}$ моль/л) перекиси водорода. Показана возможность участия в этом процессе радикалов HO_2^*/O_2^{*-} .

В работах [8, 9] показано, что в воде под действием излучения УФ-С диапазона могут образовываться радикалы HO_2^*/O_2^{*-} . Для радикалов HO_2^*/O_2^{*-} имеет место равновесие:



В зависимости от кислотности среды он существует в разных формах. В работе [9] оценен выход радикалов HO_2^* на пучке импульсного и непрерывного УФ-С излучения в кислой среде. Взаимодействие радикалов HO_2^* между собой должно приводить к образованию перекиси водорода. Однако перекись водорода в работах [8, 9] не была обнаружена.

Образование радикалов HO_2^*/O_2^{*-} можно рассматривать как новый механизм воздействия фотонов видимого и ультрафиолетового диапазонов на водные растворы. Поэтому представляет интерес

получения информации об образовании радикалов $\text{HO}_2^{\cdot}/\text{O}_2^{\cdot-}$ под действием УФ-С излучения в чистой воде и в водных растворах веществ, которые не могут быть в триплетном состоянии, и для которых реакции типа I и II исключены, а прямое поглощение фотонов маловероятно.

Целью настоящей работы является определение выхода перекиси водорода в бидистиллированной воде, скорости генерирования радикалов $\text{HO}_2^{\cdot}/\text{O}_2^{\cdot-}$ в водных растворах под действием УФ-С излучения и оценка возможного механизма образования радикалов $\text{HO}_2^{\cdot}/\text{O}_2^{\cdot-}$.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Источником излучения служил ультрафиолетовый бактерицидный излучатель ОУФб-04 с безозоновой ртутной лампой низкого давления ДКБ-9, корпус из увиолевого стекла, мощность лампы 9 Вт. Лампа работает в непрерывном режиме, дает монохроматическое излучение с длиной волны 253.7 нм. Поток фотонов составлял согласно паспортным данным $I_0 = 5.4 \times 10^{-8}$ моль(см² с)⁻¹ на расстоянии 3 см от поверхности лампы. Средняя продолжительность горения лампы 6000 ч, но средняя наработка из-за загрязнения внутренней поверхности стекла составляет 1000 ч. Поэтому выполнены измерения фактической интенсивности перед началом измерений и после всей серии экспериментов.

Для определения интенсивности излучения лампы измерялся выход разложения пробы перекиси водорода. Концентрация перекиси водорода составляла 0.01 моль/л, рН 3.8. Кислое значение рН раствора обусловлено стабилизатором перекиси. Обработка перекиси излучением лампы осуществлялась в стеклянном стакане диаметром 40 мм и глубиной 60 мм. Концентрация перекиси в исходном и обработанном растворе определялась титрованием всего объема обрабатываемой пробы 0.05N раствором перманганата калия в кислой среде при температуре 80 °С. Установлено, что толщина слоя полного поглощения составила 55 мм. Для слоя полного поглощения определялась зависимость концентрации оставшейся после обработки перекиси за время облучения ртутной лампой от 5 до 30 мин. Расстояние от поверхности жидкости до лампы 30 мм.

Чтобы на основании этих данных определить интенсивность излучения лампы, рассчитывалось уменьшение концентрации перекиси под действием излучения в рамках известного механизма [10]. Расчет выполнен с помощью пакета MathCad 14. Интенсивность излучения лампы задавалась как параметр.

Измеряли выход перекиси водорода, образующейся под действием излучения УФ лампы в чистой

бидистиллированной воде. Для этого воду объемом 5 мл облучали в чашке Петри в течение 5 ч. Расстояние от поверхности жидкости до лампы составляло 30 мм. Для идентификации перекиси в обработанную излучением пробу воды вводили свежеприготовленный раствор TiCl_3 . Треххлористый титан приготавливался растворением 0.3 г металлического титана в 50 мл концентрированной соляной кислоты. В пробу обработанной воды 5 мл добавляли 0.1 мл раствора треххлористого титана. С перекисью водорода треххлористый титан образует комплекс, имеющий максимум в спектре поглощения при $\lambda = 410$ нм [11]. Калибровка метода осуществлялась по растворам перекиси водорода известной концентрации, в которые добавляли TiCl_3 .

Окислительно-восстановительные свойства продуктов, образующихся в водном растворе под действием излучения и позволяющие идентифицировать их как радикалы $\text{HO}_2^{\cdot}/\text{O}_2^{\cdot-}$, исследовались с помощью нескольких детектирующих систем.

Для определения скорости окисления двухвалентного железа использовался раствор соли Мора концентрацией от 2 до 50 г/л в 0.4 М серной кислоте, рН 0.8. Концентрация трехвалентного железа в соли Мора, связанного с самопроизвольным окислением двухвалентного железа при хранении реактива, не превышала 0.5%. Время обработки раствора соли Мора УФ-С излучением составляло 1 и 2 мин.

Для оценки скорости восстановления трехвалентного железа использовался водный раствор нитрата железа $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ концентрацией 0.04 г/л, рН 3.4. В обоих случаях концентрация трехвалентного железа, которое было в исходном растворе Fe^{3+} , и накапливалось при окислении двухвалентного железа в соли Мора, определялась по полосе в спектре поглощения при длине волны 304 нм (коэффициент экстинкции $\epsilon = 2100$ л(моль см)⁻¹) [12].

Окисление ионов иода. Использовался водный раствор KI концентрацией 5 г/л. Исходное значение кислотности рН 5.6. Измерения выполнялись при значениях рН от 1.4 до 8.1. Величина рН устанавливалась введением в исходный раствор серной кислоты и щелочи NaOH. Объем кислоты или щелочи не превышал 2% объема приготавливаемого раствора. При окислении ионов иода образуются ионы трииодида. Концентрация трииодида определялась по оптической плотности полосы в УФ спектре поглощения при $\lambda = 288$ нм, $\epsilon = 2.65 \times 10^4$ л(моль см)⁻¹ [13].

Детектирующие растворы подвергались действию излучения ртутной лампы в чашках Петри диаметром 40 мм. Объем обрабатываемой жидкости во всех экспериментах составлял 5 мл, толщина слоя жидкости 7 мм. Расстояние от поверхности жидкости до поверхности лампы 30 мм.

Величина рН измерялась прибором Эксперт-001 фирмы Эконикс (Россия). УФ спектры поглощения измерялись спектрофотометром СФ-102 фирмы Аквилон (Россия), рабочий диапазон длин волн 200–1100 нм. Длина оптического пути кюветы составляла 10 мм. Использовались химически чистые реактивы, бидистиллированная вода рН 5.5. Для обработки экспериментальных результатов использовался пакет программ MathCad 14.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Определение интенсивности излучения ртутной лампы ДКБ-9. Оценим возможность разложения перекиси водорода, используемой как детектор излучения, под действием радикалов. Если образуется радикал $\text{HO}_2^{\cdot}/\text{O}_2^{\cdot-}$, то при кислотности раствора перекиси водорода рН 3.8, используемого в работе, этот радикал существует преимущественно в виде HO_2^{\cdot} , так как значение pK_a 4.8. Реакция с перекисью водорода:



В этой реакции не расходуются ни перекись водорода, ни радикалы HO_2^{\cdot} , в ней происходит только перенос атомов водорода. Образование гидроксильных радикалов в воде под действием излучения 253.7 нм невозможно. Поэтому механизмом разложения перекиси может быть только прямое поглощение фотонов молекулами перекиси водорода с последующим их распадом. Исходная концентрация перекиси составляла (0.01 ± 0.0005) моль/л, после обработки в течение 30 мин $[\text{H}_2\text{O}_2] = (0.0032 \pm 0.0004)$ моль/л. Расчет [10] описывает экспериментальные данные при значении интенсивности $I_0 = (5.7 \pm 0.5) \cdot 10^{-8}$ моль(см² с)⁻¹. По окончании серии экспериментов величина интенсивности уменьшилась на 10%. Такое уменьшение лежит в пределах ошибок всех измерений, поэтому его можно было не учитывать.

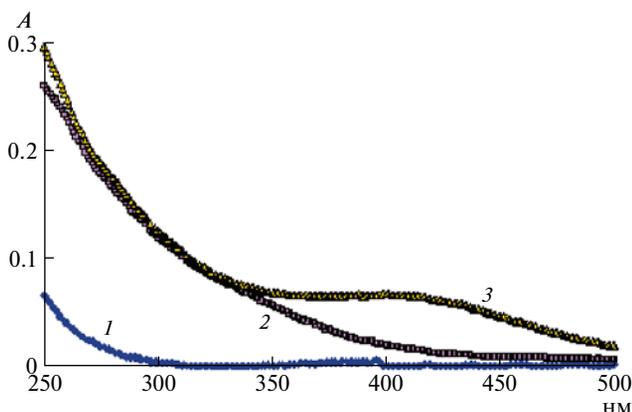


Рис. 1. Идентификация перекиси водорода в пробе бидистиллированной воды, обработанной УФ излучением ртутной лампы. 1 – чистая перекись водорода концентрацией 0.01%; 2 – проба воды, обработанная УФ излучением в течение 5 ч; 3 – проба, обработанная 5 ч после добавления 0.1 мл TiCl_3 .

Образование перекиси водорода. В работе [8] было обнаружено образование под действием УФ-С излучения радикалов HO_2^{\cdot} . Взаимодействие радикалов HO_2^{\cdot} должно приводить к образованию H_2O_2 . На рис. 1 представлены спектр поглощения раствора чистой перекиси водорода, спектр поглощения пробы бидистиллированной воды сразу после обработки излучением ртутной лампы в течение 5 ч, и спектр той же обработанной излучением пробы после добавления в нее треххлористого титана.

На рис. 1, кривая 3, видно появление пика 410 нм, характерного для комплекса, возникающего при взаимодействии перекиси водорода и TiCl_3 . На основе полученного спектра определена концентрация перекиси водорода в пробе воды, обработанной 5 ч $[\text{H}_2\text{O}_2] = (0.006 \pm 0.001)\%$ или $2 \cdot 10^{-3}$ моль/л. Отсюда выход перекиси водорода под действием излучения лампы ДКБ-9 составляет $(1 \pm 0.2) \cdot 10^{-7}$ моль(л с)⁻¹.

Оптическая плотность воды в диапазоне 250–400 нм, обработанной УФ излучением в течение 5 ч, (рис. 1, кривая 2) значительно больше оптической плотности раствора чистой перекиси водорода (рис. 1, кривая 1), хотя концентрация чистой перекиси в пробе, соответствующей кривой 1, больше. Это означает, что под действием УФ излучения лампы образуются и другие соединения. В работе [8] идентифицировано образование ионов NH_4^+ .

Окисление двухвалентного железа. На рис. 2 представлена зависимость концентрации трехвалентного железа, образующегося в кислом растворе соли Мора под действием излучения ртутной лампы за 1 мин, от концентрации двухвалентного железа. Окисление железа может быть обусловлено взаимодействием с радикалами HO_2^{\cdot} . С увеличением времени обработки до 2 мин концентрация Fe^{3+} пропорционально увеличивается. Концентрация Fe^{3+} растет с увеличением концентрации Fe^{2+} , и достигает максимума при $[\text{Fe}^{2+}] = 40\text{--}50$ г/л (100–130 ммоль/л). Максимальная концентрация образующегося трехвалентного железа составляет $[\text{Fe}^{3+}] = 195 \pm 10$ мкмоль/л. Такой характер зависимости может быть обусловлен гибелью радикалов HO_2^{\cdot} , образующихся в растворе под действием излучения, во взаимодействиях между собой при малых концентрациях двухвалентного железа [14]. В результате выход окисленного железа при малых концентрациях Fe^{2+} оказывается меньше, и выходит на плато при больших концентрациях Fe^{2+} . Поэтому на основании величины максимальной концентрации образующегося трехвалентного железа можно оценить выход радикалов HO_2^{\cdot} . Взаимодействие двухвалентного железа в кислой среде с радикалами HO_2^{\cdot} описывается реакциями:



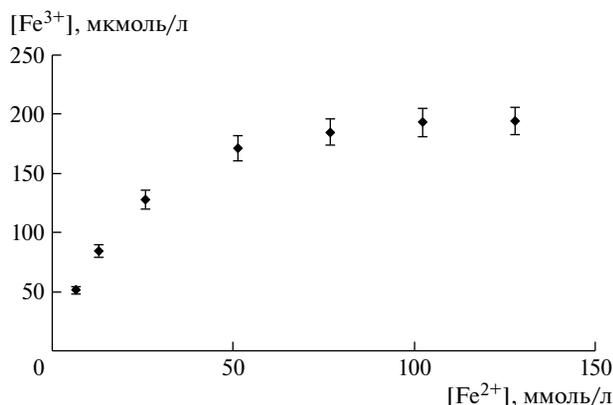
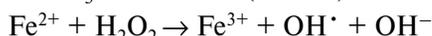
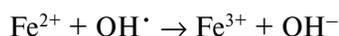


Рис. 2. Зависимость концентрации трехвалентного железа $[Fe^{3+}]$, мкмоль/л, образовавшегося под действием излучения ртутной лампы за 1 мин в кислом растворе двухвалентного железа от концентрации $[Fe^{2+}]$, ммоль/л.

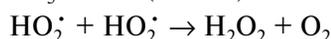
$$k_3 = 1.5 \cdot 10^6 \text{ л (моль с)}^{-1} \quad (3)$$



$$k_4 = 56 \text{ л (моль с)}^{-1} \quad (4)$$



$$k_5 = 10^9 \text{ л (моль с)}^{-1} \quad (5)$$



$$k_6 = 9.6 \cdot 10^8 \text{ л (моль с)}^{-1} \quad (6)$$

Здесь и далее использованы данные по константам скорости реакций из справочника [15]. Из реакций 3–6 видно, что на один первичный радикал HO_2^\cdot образуются три молекулы трехвалентного железа. При этом мы пренебрегаем расходом образующейся перекиси водорода под действием первичного УФ-С излучения. Исходя из концентрации насыщения $[Fe^{3+}] = 195 \pm 10$ мкмоль/л

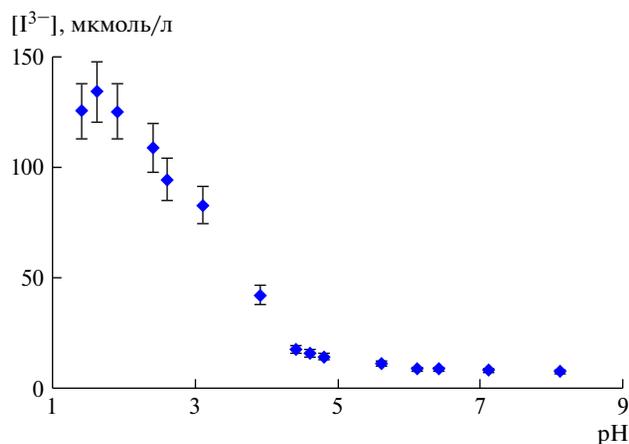


Рис. 3. Зависимость концентрации трииодида $[I_3^-]$, мкмоль/л, образовавшегося под действием излучения ртутной лампы за 1 мин в растворе KI, от pH водного раствора.

скорость генерации радикалов HO_2^\cdot в воде составляет $(1.08 \pm 0.1) \cdot 10^{-6}$ моль(л с) $^{-1}$. Скорость генерирования радикалов в чашке Петри объемом 5 мл с поверхностью 7 см² составляет $(7.7 \pm 0.8) \cdot 10^{-10}$ моль(см² с) $^{-1}$.

Восстановление накапливающегося трехвалентного железа под действием излучения в условиях настоящей работы (кислая среда) невозможно. Это подтверждается полученными нами экспериментальными данными.

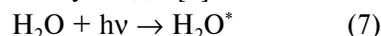
Восстановление трехвалентного железа в растворе $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ не обнаружено. При обработке этого раствора УФ-С излучением наблюдалось только увеличение оптической плотности полосы 304 нм, относимой к трехвалентному железу. Наблюдаемый эффект может быть связан с тем, что за время хранения реактива $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ трехвалентное железо частично восстановилось до двухвалентного, окисление которого наблюдается в данном эксперименте. Отсутствие восстановления трехвалентного железа означает, что под действием излучения в кислой среде не образуются частицы, обладающие восстановительными свойствами. Реакция радикалов HO_2^\cdot с трехвалентным железом в кислой среде невозможна.

Окисление ионов иода. Зависимость концентрации трииодида, образовавшегося в растворе KI за 1 мин облучения ртутной лампой, представлена на рис. 3. При значениях pH от 1.4 до 1.9 концентрация трииодида в пределах ошибок не меняется, она максимальна, и составляет 134 ± 13 мкмоль/л. Концентрация I_3^- с увеличением pH быстро уменьшается, при pH 4.4 уменьшение сильно замедляется, а начиная с pH 6.1, концентрация I_3^- практически не меняется. Качественно характер зависимости обусловлен тем, что для радикала $HO_2^\cdot/O_2^{\cdot-}$ значение константы диссоциации $pK_a = 4.8$. В сильнокислой среде он существует в виде радикала HO_2^\cdot , который окисляет ионы иода, а при pH > 6 он существует преимущественно в виде восстановителя $O_2^{\cdot-}$, и окисление ионов иода становится невозможным.

ОБСУЖДЕНИЕ

Возможным механизмом образования окислителей мог бы быть процесс $H_2O \rightarrow OH^\cdot + H^\cdot$. Энергия разрыва молекулы воды составляет 499 кДж/моль [16]. Это соответствует энергии кванта 5.03 эВ, длине волны $\lambda \sim 246$ нм. Поэтому под действием ультрафиолетовой лампы с $\lambda = 253.7$ нм образование гидроксильных радикалов невозможно.

В работе [8] экспериментальные результаты объяснялись образованием под действием УФ-С излучения радикалов HO_2^\cdot . Предложен механизм образования радикалов HO_2^\cdot под действием импульсного УФ-С излучения в кислой среде через возбужденные состояния молекул воды [9]

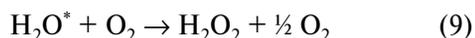


Линейный десятичный коэффициент поглощения излучения водой оставляет около 0.8 м^{-1} при $\lambda = 200 \text{ нм}$, достигает минимума $\sim 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}$ при $\lambda \sim 470 \text{ нм}$, и далее практически монотонно увеличивается с ростом длины волны до $\sim 20 \text{ м}^{-1}$ при $\lambda = 970 \text{ нм}$ [17]. Поглощение для пика при $\lambda = 970 \text{ нм}$ измерено непосредственно спектрофотометром СФ-102, коэффициент экстинкции $\epsilon = (3.1 \pm 0.1) 10^{-3} \text{ л(моль см)}^{-1}$. При длинах волн 200–1200 нм возбуждаются вибрационные и электронные уровни молекул воды [7], энергия которых недостаточна для изменения структуры молекулы, поэтому они могут служить только аккумулятором энергии.

Можно предположить, что молекулы воды, возбужденные УФ-С излучением, приводят к образованию перекиси водорода:



В присутствии растворенного кислорода возможен другой процесс:



Оценим энергетическую возможность осуществления реакций 8 и 9. Стандартная энтальпия образования жидкой воды при температуре 298 °К составляет -285.8 кДж/моль , перекиси водорода -187.8 кДж/моль , энтальпия образования простых веществ H_2 и O_2 полагается равной нулю [16]. Реакции 8 и 9 эндотермические, изменение энтальпии для реакции 8:

$$\Delta H = -187.8 - 2(-285.8) = 383.8 \text{ кДж/моль},$$

что соответствует длине волны $\lambda = 311.7 \text{ нм}$.

Изменение энтальпии для реакции 9:

$$\Delta H = -187.8 - (-285.8) = 98 \text{ кДж/моль},$$

$$\lambda = 1220.7 \text{ нм}.$$

Отсюда видно, что реакция 8 возможна в воде под действием ультрафиолетового излучения с $\lambda < 311.7 \text{ нм}$, а реакция 9 под действием излучения с $\lambda < 1220.7 \text{ нм}$.

Образование перекиси водорода возможно через промежуточные частицы: радикалы $\text{HO}_2^{\cdot}/\text{O}_2^{\cdot-}$. Окисление Fe^{2+} и I^- в кислой среде и прекращение окисления в нейтральной и щелочной среде подтверждают такую возможность. Квантовый выход радикалов HO_2^{\cdot} в кислой среде на пучке непрерывного излучения $\lambda = 253.7 \text{ нм}$ составляет 0.015 ± 0.005 .

В работе [18] исследовались окислительно-восстановительные процессы в растворе метгемоглобина под действием УФ-С излучения ртутной лампы того же типа, что была использована в данной работе. Наблюдалось восстановление метгемоглобина (окисленной формы гемоглобина) до дезоксигемоглобина:



Кислотность раствора метгемоглобина рН 7.4. В такой среде радикал $\text{HO}_2^{\cdot}/\text{O}_2^{\cdot-}$ существует в виде отрицательного ион-радикала $\text{O}_2^{\cdot-}$, который беспрепятственно может взаимодействовать с положительным ионом Fe^{3+} .

ВЫВОДЫ

Результаты работы позволяют предполагать существование механизма воздействия УФ-С излучения на водные растворы через образование радикалов $\text{HO}_2^{\cdot}/\text{O}_2^{\cdot-}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Steiner U.E. Fundamentals of photophysics, photochemistry and photobiology. In: Abdel-Kader M (Ed) Photodynamic therapy from theory to application. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 2014. Ch. 2. P. 25.
2. Rohatgi-Mukherjee K.K. Fundamentals of photochemistry. Publisher New Age International. New Delhi. 2013. 386 p.
3. Pattison D.I., Davies M.J. // EXS. 2006. 96. P. 131.
4. Legrini O., Oliveros E., Braun A.M. Photochemical processes for water treatment. // Chem. Rev. 1993. 93. p. 671.
5. Штамм Е.В., Пурмаль А.П., Скурлатов Ю.И. Роль пероксида водорода в природной среде. // Успехи химии. 1991. т. 60. Вып. 10. С. 2373.
6. Окабе Х. Фотохимия малых молекул. М.: Мир. 1981. С. 500. (Н. Okabe. Photochemistry of small molecules. John Wiley and Sons. New York. 1978.)
7. Гудков С.В., Карп О.Е., Гармаш С.А., Иванов В.Е., Черников А.В., Манохин А.А., Асташев М.Е., Ягузинский Л.С., Брусков В.И. // Биофизика. 2012. Т. 57. Вып. 1. С. 5.
8. Пискарев И.М., Иванова И.П., Трофимова С.В. // Химия высоких энергий. 2013. Т. 47. № 2. С. 152.
9. Piskarev I.M. // Research Journal of Pharmaceutical, biological and chemical science. 2015. V. 6. P. 1136.
10. Brisset J-L., Hnautic E. // Plasma Chem. Plasma Process. 2012. V. 32. P. 655.
11. Пикаев А.К. Дозиметрия в радиационной химии. М. Наука. 1975. С. 147.
12. Kireev S.V., Shnyrev S.L. // Laser Phys. 2015. V. 25. 075602 (11 pp).
13. Karpel Vel Leitner N., Dore M. // Water Research. 1997. V. 31. № 6. P. 1383.
14. Пискарев И.М. // Журнал технической физики. 1999. Т. 69. № 1. С. 58.
15. William M. Haynes. Editor-in-Chief. Handbook of chemistry and physics. CRC Press. 97 Edition. 2016–2017 Years.
16. Luo Yu-Ran. Handbook of bond dissociation energies in organic compounds. CRC Press LLC. Boca Raton, London, New York, Washington. 2003.
17. Wozniak B., Dera J. (2007). Atmospheric and Oceanographic Sciences Library (PDF). New York: Springer Science+Business Media. LLC. Part 2.2. P. 48.
18. Пискарев И.М., Бурхина О.Е., Иванова И.П. // Химия высоких энергий. 2016. Т. 50. № 1. С. 75.