

Научная статья

УДК 542.943-92:628.316.12

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-2-206-212>

EDN: NOCMUR



Фотодеструкция активных фармацевтических субстанций в присутствии пероксида водорода и пероксодисульфата

Н.А. Иванцова✉, М.А. Ветрова, А.А. Чурина, Д.В. Андриянова

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. Исследования по фотохимическому окислению могут внести существенный вклад в понимание закономерностей процессов деструкции водных растворов активных фармацевтических субстанций (АФС). АФС являются сложноразлагаемыми соединениями, которые, попадая в водоемы, вызывают необратимые последствия в живых организмах. Полученные результаты по фотодеструкции лекарственных препаратов различного рода, находящихся в воде, в присутствии пероксида водорода и пероксодисульфата способствуют расширению практических и теоретических знаний в области водоподготовки, очистки и доочистки воды. В работе представлены лабораторные результаты по окислению модельных водных растворов нитрофурала, тетрациклина и парацетамола при совместном воздействии УФ-излучения с микродобавками окислителей (пероксидом водорода и пероксодисульфатом). Порядок реакций деструкции активных фармацевтических субстанций определен методом наименьших квадратов. Установлено, что совместное воздействие УФ-излучения и микродобавок пероксида водорода и пероксодисульфата способствует получению как высоких степеней очистки (до 98%), так и высоких скоростей окислительной деструкции АФС (нитрофурала, тетрациклина и парацетамола) по сравнению с применением индивидуально УФ-излучения. Определено, что изученные лекарственные препараты по своей способности к окислительно-деструктивным превращениям можно расположить в следующем ряду: нитрофурал>тетрациклин>парацетамол. Теоретически доказано, что при фотохимической деструкции в присутствии пероксодисульфата происходит образование большого количества высокореакционных кислородсодержащих радикалов, которые участвуют в процессах разложения нитрофурала, тетрациклина и парацетамола.

Ключевые слова: фотоокисление, активные фармацевтические субстанции, пероксид водорода, пероксодисульфат

Для цитирования: Иванцова Н.А., Ветрова М.А., Чурина А.А., Андриянова Д.В. Фотодеструкция активных фармацевтических субстанций в присутствии пероксида водорода и пероксодисульфата // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2023. Т. 13. N 2. С. 206–212. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-2-206-212>. EDN: NOCMUR.

PHYSICOCHEMICAL BIOLOGY

Original article

Photodestruction of active pharmaceutical substances in the presence of hydrogen peroxide and peroxydisulfate

Natalya A. Ivantsova✉, Margarita A. Vetrova, Alina A. Churina, Darya V. Andriyanova

Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

Abstract. Studies into photochemical oxidation can enhance the current understanding of degradation processes within aqueous solutions of active pharmaceutical ingredients (APIs). APIs are complex decomposable compounds that, once in reservoirs, cause irreversible consequences in living organisms. The results obtained on the photodestruction of various drugs in water in the presence of hydrogen peroxide and peroxydisulfate contribute to gaining new practical and theoretical knowledge in the field of water treatment, post-treatment, and purification. The paper presents laboratory results on the oxidation of model aqueous solutions of nitrofurural, tetracycline, and paracetamol under the combined effect of UV radiation with micro-additives of oxidants (hydrogen peroxide and peroxydisulfate). The reaction order of APIs destruction is determined by the least square method. The results show that the combined effect of UV radiation and microadditives of hydrogen peroxide and peroxydisulfate contributes to both a high degree of purification (up to 98%) and a high rate of oxidative degradation of APIs (nitrofurural, tetracycline, and paracetamol) compared to the use of UV radiation separately. The studied drugs can be arranged in the following order in terms of their oxidative degradation transformation ability: nitrofurural>tetracycline>paracetamol. The paper theoretically proves that photochemical destruction in the presence of peroxydisulfate leads to the formation of more highly reactive oxygen-containing radicals, which are involved in the decomposition of nitrofurural, tetracycline, and paracetamol.

© Иванцова Н.А., Ветрова М.А., Чурина А.А., Андриянова Д.В., 2023

Keywords: photooxidation, active pharmaceutical ingredients, hydrogen peroxide, peroxydisulfate

Forcitation: Ivantsova N.A., Vetrova M.A., Churina A.A., Andriyanova D.V. Photodestruction of active pharmaceutical substances in the presence of hydrogen peroxide and peroxydisulfate. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023;13(2):206-212. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-2-206-212>. EDN: NOCMUR.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире химическая и фармацевтическая промышленности являются важнейшими отраслями производства. Разнообразие лекарственных препаратов растет с каждым годом, как и их производство. Вместе с ростом возникает проблема правильной утилизации фармацевтических отходов. Загрязнение источников водоснабжения фармацевтическими соединениями является серьезной проблемой [1] из-за легкости их распространения в водных объектах, из-за негативного воздействия на гидробионты и возможность попадания в питьевую воду [2]. На протяжении последних двух десятилетий фармацевтические препараты, а также связанные с ними метаболиты (продукты разложения), наиболее часто обнаруживаются в окружающей среде, образуя новый класс органических веществ с разнообразной химической структурой. Присутствие даже относительно низких концентраций (мкг/л – нг/л) этих препаратов может оказывать значительное негативное влияние на биосферу [3].

Поскольку существует множество данных о нахождении активных фармацевтических субстанций (АФС) в сточных и природных водах по всему миру, можно сделать вывод, что очистные сооружения не позволяют уменьшить количество препаратов до безопасного уровня по нормам предельно допустимых концентраций. Технологии очистки сточных вод, такие как осаждение, адсорбция, коагуляция, биodeградация, фильтрация и прочие, обеспечивают высокие показатели эффективности для удаления обычных загрязняющих веществ. Тем не менее эффективность удаления АФС пока неудовлетворительна из-за их высокой биотоксичности и псевдоперсистентности. Перспективными направлениями в этой области являются высокоинтенсивные окислительные методы глубокой очистки (Advanced Oxidation Methods–AOMs) [4–6]. Совместное применение различных окислительных технологий позволяет проводить процесс *in situ* (форма высокоинтенсивного/продвинутого процесса окисления, представляющая собой метод восстановления окружающей среды для снижения концентрации целевых загрязнителей до приемлемых уровней). В частности, одним из перспективных методов является гомогенное фотокаталитическое окисление – комбинация УФ-излучения с одним или несколькими окислительными агентами или катализаторами [7–11]. Наиболее часто используют гомогенные фотокатализаторы, например, ионы железа – система фото-Фентон [12]. Основным недостатком процесса фото-Фентона является использование низких значений pH (3–4). При pH выше 4 ионы железа образуют комплексные соединения с гидроксил-ионами. В этой связи для проведения процесса Фентона требуется регулировка pH и соответствующий расход ре-

агентов, что заметно повышает эксплуатационные расходы. Однако имеются и положительные результаты в фотоокислении фармацевтических соединений в присутствии ионов железа [13, 14]. Поэтому исследования как фундаментального, так и прикладного характера интересны в отношении фотоокисления в присутствии других гомогенных фотокатализаторов, способных как минимум к деструкции сложных органических соединений.

Цель данной работы заключалась в изучении кинетики деструкции некоторых модельных водных растворов АФС (нитрофурал, тетрациклин и парацетамол) при воздействии только УФ-облучения и в присутствии окислителей (пероксида водорода и пероксодисульфата) с последующей оценкой возможности применения того или иного метода и в сравнении этих результатов с данными работы [15].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объектов исследования были использованы модельные водные растворы фурацилина производства ОАО «Авексима» ($C_6H_6N_4O_4$) (действующее вещество – нитрофурал), тетрациклина марки «ЛекТ» ($C_{22}H_{24}N_2O_8 \cdot HCl$) и парацетамола фирмы «ОЗОН» ($C_8H_9NO_2$) (табл. 1). Приготовление раствора АФС заключалось в измельчении и тщательном растирании таблеток в агатовой ступке, дальнейшем взвешивании рассчитанного количества препарата (в пересчете на действующее вещество) и полном растворении навески в воде посредством перемешивания на магнитной мешалке. Исходная концентрация нитрофурала в модельных водных растворах составляла 0,04 ммоль/л, тетрациклина – 0,12 ммоль/л, парацетамола – 0,40 ммоль/л.

Исследования по воздействию фотоокислительного процесса на модельные водные растворы АФС проводили на лабораторной установке, подробно описанной в работе [15]. С помощью перистальтического насоса раствор поступает в УФ-установку, где он проходит по кварцевому спиралевидному змеевику вокруг лампы ДРБ-8, и очищенный раствор попадает в приемник. Минимальная интенсивность излучения УФ-лампы на длине волны 254 нм составляет $E_{min} = 0,025$ Вт/см². Согласно техническим условиям, при электрической мощности 8 Вт световая мощность лампы ДРБ-8, соответствующая резонансной линии 254 нм (и энергии квантов $E = 4,8$ эВ), составляет 3 Вт. Время контакта жидкости с зоной облучения (t , с) варьировали в диапазоне от 10 до 90 с (что соответствовало расходу насоса 2–0,3 мл/с и дозе облучения 0,45–2,61 Дж/см²).

Интенсификацию фотоокисления 500 мл водного раствора АФС проводили при введении микродобавок пероксида водорода (H_2O_2 3%) (метод $УФ/H_2O_2$) и пероксодисульфата калия ($K_2S_2O_8$ 4,5%) (метод $УФ/S_2O_8^{2-}$) в количестве, указанном в табл. 2.

Таблица 1. Характеристики исследуемых фармпрепаратов

Table 1. Characteristics of the studied pharmaceuticals

Название фармацевтического препарата	Химическое название действующего вещества (по ИЮПАК)	Брутто-формула	Структурная формула
Фурацилин	Нитрофурал (Семикарбазон 5-нитрофурфурола [(E)-[(5-nitrofuran-2-yl)methylidene]amino]urea)	$C_6H_6N_4O_4$	
Тетрациклин-ЛекТ	Тетрациклин гидрохлорид [4S-(4альфа,4а альфа,5а альфа,6бета,12а альфа)]-4-(Диметиламино)-1,4,4а,5,5а,6,11,12а-октагидро-3,6,10,12,12а-пентагидрокси-6-метил-1,11-диоксо-2-нафтаценкарбоксамид	$C_{22}H_{24}N_2O_8 \cdot HCl$	
Парацетамол	Парацетамол (N-(4-гидроксифенил)ацетамид)	$C_8H_9NO_2$	

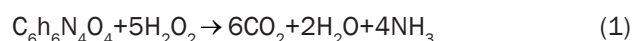
Таблица 2. Количество введения микродобавок в раствор активных фармацевтических субстанций

Table 2. Microadditives introduction into the APS solution

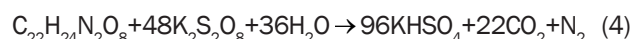
Наименование АФС	Наименование микродобавки	
	H_2O_2 , мл	$K_2S_2O_8$, мл
Нитрофурал	0,3	0,8
Тетрациклин	6	12
Парацетамол	14	27

Количество вводимых микродобавок рассчитывалось по стехиометрии – по уравнению реакции АФС с микродобавкой (реакции 1–6) при соотношении [АФС]:[микродобавка] – 1:1 при предположении, что происходит полная деструкция до диоксида углерода и воды.

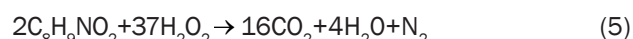
Нитрофурал:



Тетрациклин:



Парацетамол:



Концентрацию нитрофурала устанавливали спектрофотометрическим методом, основанным на из-

мерении поглощения его щелочных растворов и на сравнении оптической плотности стандартного и анализируемого растворов [16]. Измерения массовой концентрации тетрациклина (до и после фотоокислительной деструкции) проводили также спектрофотометрическим методом при взаимодействии с 10%-м гидроксидом натрия с образованием раствора, окрашенного в желтый цвет [17]. Определение парацетамола осуществляли по адаптированной методике, основанной на реакции взаимодействия его с азотистой кислотой в водной среде с образованием хиноидного соединения после добавления натрия гидроксида и на последующем фотометрическом измерении окрашенного продукта реакции при 400 нм¹.

Для нахождения начальных скоростей фотоокисления проводилась обработка кинетических кривых разложения исходных соединений с использованием программного обеспечения пакета Origin 8.0. С помощью графического метода определения констант скоростей разложения устанавливали порядок реакции. Для этого построили графики зависимости концентрации АФС от времени для нулевого, первого и второго порядков. Далее методом наименьших квадратов для каждой кривой построена аппроксимирующая прямая и рассчитаны коэффициенты аппроксимации. Исходя из полученных данных, было определено, что фотоокисление рассматриваемых АФС протекает по первому порядку.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Высокоинтенсивные окислительные процессы на основе фотолиза являются новыми и достаточно перспективными методами в решении экологических проблем, в частности в доочистке воды. Главной особенностью данных методов является образование реакционноспособных радикалов, в основном гидроксильных

¹ МУК 4.1.0.272-4.1.0.340–96. Фотометрическое измерение концентрации парацетамола (4-ацетиламинофенола) в воздухе рабочей зоны. М., 1986.

(ОН•) и гидропероксидных радикалов ($\text{HO}_2\cdot$) [18, 19]. Основные механизмы реакций гидроксильных радикалов с органическими соединениями включают присоединение ОН• и в меньшей степени реакции переноса электронов [3, 19]. Путь разложения экотоксикантов в таких процессах в большинстве случаев основан на радикально-цепном механизме распада молекул через свободные радикалы. Многие фармацевтические активные соединения подвергаются фотодеструкции, поскольку в структуре их молекул присутствуют ароматические кольца, гетероатомы и определенные функциональные группы, которые позволяют поглощать солнечное излучение или инициировать реакцию светочувствительными веществами [20]. Фотолит кинетически улучшается при введении в систему, например, пероксида водорода, персульфата, карбонат-ионов, хлорид-ионов, нитрат-ионов, поскольку высокореакционные гидроксильные радикалы снижают необходимую для деструкции дозу УФ-излучения. Экспериментальные результаты по фотолитизу нитрофурала в присутствии пероксида водорода и оксосульфата титана были получены ранее в работе [15] и показывают, что действительно введение окислителей даже в микроколичествах способствует более быстрому протеканию реакции фотоокисления АФС.

Экспериментальные данные по изменению концентрации с течением времени нитрофурала, тетрациклина и парацетамола при индивидуальном УФ-воздействии (УФ), комбинированном УФ-воздействии с пероксидом водорода ($\text{УФ}/\text{H}_2\text{O}_2$) и комбинированном УФ-воздействии с пероксодисульфатом ($\text{УФ}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$) представлены на рис. 1–3.

Установлено, что кинетические зависимости во всех случаях имеют экспоненциальный характер. Фотоокисление рассматриваемых АФС в присутствии пероксида водорода ($\text{УФ}/\text{H}_2\text{O}_2$) и пероксодисульфата ($\text{УФ}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$) протекает эффективнее, чем индивидуальное УФ-излучение. Максимальные степени фотодеструкции при УФ-излучении, $\text{УФ}/\text{H}_2\text{O}_2$ и $\text{УФ}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ для нитрофурала составили 89, 98 и 99%, для тетрациклина – 55, 93 и 98%, для парацетамола – 92, 93 и 97% соответственно.

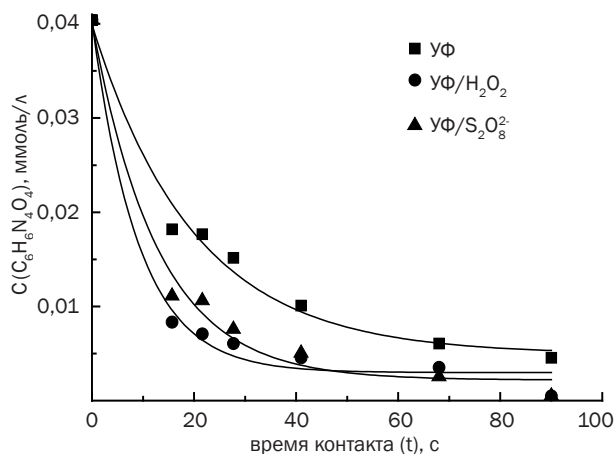


Рис. 1. Кинетические зависимости фотоокисления нитрофурала

Fig. 1. Kinetic curves of nitrofurantoin photooxidation

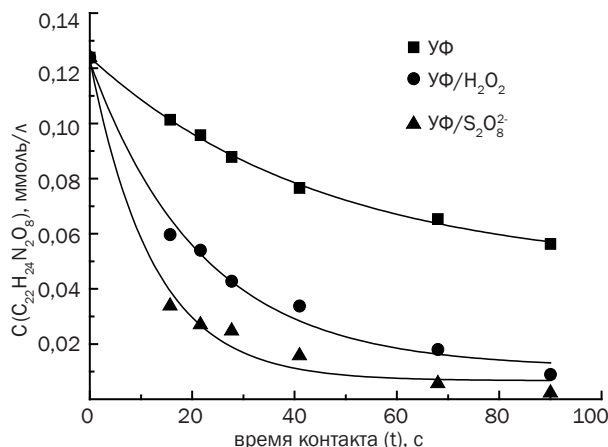


Рис. 2. Кинетические зависимости фотоокисления тетрациклина

Fig. 2. Kinetic curves of tetracycline photooxidation

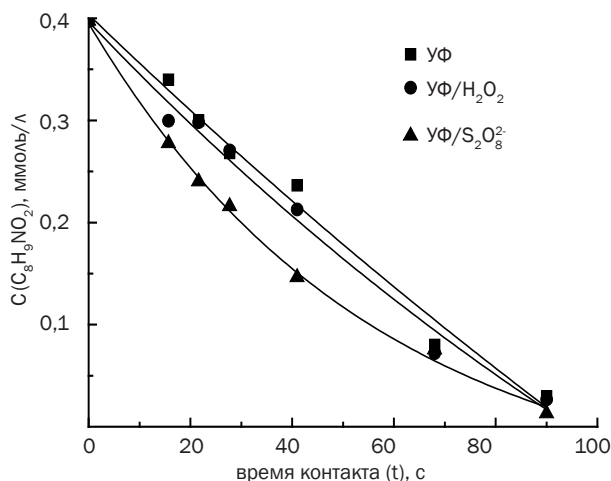


Рис. 3. Кинетические зависимости фотоокисления парацетамола

Fig. 3. Kinetic curves of paracetamol photooxidation

При воздействии кванта света окислители (пероксид водорода и пероксодисульфат) по механизму свободных радикалов образуют гидроксильный радикал (реакции 7–10), который имеет высокий окислительный потенциал, что говорит о способности к присоединению данного радикала к свободным концам фармацевтического соединения. Сульфатный радикал, образующийся при УФ-излучении пероксодисульфата калия, дает не только гидроксильные радикалы, но и сульфат-радикалы, обладающие также высокой эффективностью в отношении фотодеструкции АФС. Кроме того, сульфат-радикал обладает более высокой окислительной способностью (2,5–3,1 В), чем гидроксил-радикал (1,8–2,8 В) [21]. Данные по константам (табл. 3) подтверждают этот факт.

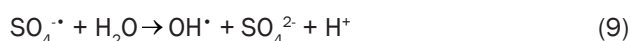


Таблица 3. Скорость (u , мкмоль/л·с) и степень (α , %) фотодеструкции активных фармацевтических субстанций в начальный момент времени

Table 3. Rate (u , $\mu\text{mol/l}\cdot\text{s}$) and degree (α , %) of APS photodestruction at the initial time

Метод фотодеструкции	Наименование АФС					
	Нитрофурал		Тетрациклин		Парацетамол	
	u	α	u	α	u	α
УФ	1,7	55	1,7	18	4,8	4
УФ/ H_2O_2	4,1	79	5,1	52	5,2	24
УФ/ $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$	3,4	73	9,5	73	8,4	30

Среди изученных лекарственных препаратов парацетамол можно охарактеризовать как наиболее устойчивый. В молекуле парацетамола присутствуют два заместителя – ацетамидная и гидроксогруппы, являющиеся ориентантами первого рода, увеличивающие электронную плотность в бензольном кольце, особенно на углеродных атомах в орто- и пара-положениях, и тем самым сохраняющие устойчивость к фотодеструкции [22]. Нитрофурал, наоборот, оказался наименее устойчивым (независимо от типа обработки), поскольку в структуре его молекулы (см. табл. 1) содержатся ориентанты второго рода, снижающие электронную плотность в бензольном кольце и его активность в реакциях электрофильного замещения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных данных можно сделать предположение о возможности применения высокоинтенсивных окислительных методов глубокой очистки в отношении доочистки воды от фармацевтических соединений широкого ряда, однако данный вопрос требует дальнейшего изучения и проработки деталей. Определено, что фотолиз в присутствии пероксодисульфата калия возможен, во-первых, для эффективной деструкции АФС, во-вторых, в качестве альтернативы процессу УФ-излучения в присутствии пероксида водорода. Однако реальные сточные воды представляют собой сложную смесь органических и неорганических соединений, и их часто трудно представить в лабораторных условиях. Поэтому в практическом применении АОМ-технологий существуют проблемы. Кроме того, необходимы дополнительные исследования об экотоксичности промежуточных продуктов, образующихся при окислительной деструкции лекарственных препаратов с использованием УФ-катализа. Фотоокислительные процессы на современном ультрафиолетовом оборудовании позволяют повысить экологизацию производства и тем самым сделать уверенный шаг в направлении ESG-технологий (Environmental, Social, Governance) на территории Российской Федерации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Баренбойм Г.М., Чиганова М.А. Загрязнение поверхностных и сточных вод лекарственными препаратами // Вода: химия и экология. 2012. N 10. С. 40–46.
2. Прожерина Ю.А. Фармацевтические отходы как новая экологическая проблема // Ремедиум. 2017. N 11. С. 14–19. <https://doi.org/10.21518/1561-5936-2017-11-14-19>.
3. Jiao J., Li Y., Song Q., Wang L., Luo T., Gao Ch., et al. Removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) by free radicals in advanced oxidation processes // Materials. 2022. Vol. 22, no. 15. P. 8152. <https://doi.org/10.3390/ma15228152>.
4. Oluwole A.O., Omotola E.O., Olatunji O.S. Pharmaceuticals and personal care products in water and wastewater: a review of treatment processes and use of photocatalyst immobilized on functionalized carbon in AOP degradation // BMC Chemistry. 2020. No. 14. <https://doi.org/10.1186/s13065-020-00714-1>.
5. Fast S.A., Gude V.G., Truax D.D., Martin J., Magbanua B.S. A critical evaluation of advanced oxidation processes for emerging contaminants removal // Environmental Process. 2017. No. 4. P. 283–302. <https://doi.org/10.1007/s40710-017-0207-1>.
6. Parson S. Advanced oxidation processes for water treatment: fundamentals and applications. Canada: IWA Publishing, 2004. 356 p. <https://doi.org/10.2166/9781780403076>.
7. Lescano M.R., Lopez A.O., Romero R.L., Zalazar C.S. Degradation of chlorpyrifos formulation in water by the UV/ H_2O_2 process: lumped kinetic modelling of total organic carbon removal // Journal of Photochemistry and Photobiology, A: Chemistry. 2021. Vol. 404. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2020.112924>.
8. Устинова М.Н., Лебедева О.Е., Курдупова В.И. Фотодеструктивные превращения бензойной кислоты и ее производных // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2017. Т. 7. N 4. С. 16–23. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2017-7-4-16-23>.
9. Bazargan A. Photocatalytic water and wastewater treatment. UK: IWA Publishing Unit, 2022. 220 p.
10. Saadati F., Keramati N., Ghazi M.M. Influence of parameters on the photocatalytic degradation of tetracycline in wastewater: a review // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2016. Vol. 46, no. 8. P. 757–782. <https://doi.org/10.1080/10643338.2016.1159093>.
11. Кармазинов Ф.В., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Храменков С.В. Ультрафиолетовые технологии в современном мире: коллективная монография. Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2012. 392 с.
12. Suheyda A., Gulin E. Green chemistry and water remediation: research and applications // Advances in Green and Sustainable Chemistry. 2021. P. 209–238. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817742-6.00007-4>.
13. Giraldo-Aguirre A.L., Serna-Galvis E.A., Erazo-Erazo E.D., Silva-Agredo J., Giraldo-Ospina H., Flórez-Acosta O.A., et al. Removal of β -lactam antibiotics from pharmaceutical wastewaters using photo-Fenton process at near-neutral pH // Environmental Science and Pollution Research. 2018. Vol. 25, no. 21. P. 20293–20303. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8420-z>.
14. Emzhina V.V., Kuzin E.N., Babusenko E.S., Krutchinina N.E. Photodegradation of tetracycline in presence of H_2O_2 and metal oxide based catalysts // Journal of Water Process Engineering. 2021. Vol. 39. P. 101696. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101696>.

15. Иванцова Н.А., Захарова Д.С., Ветрова М.А. Исследование процессов фотоокисления водного раствора нитрофурала // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. 2022. Т. 15. N 4. С. 507–517. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0297>.
16. Семченко Т.К., Кабанов С.В. Инструментальные методы анализа. Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. 48 с.
17. Соловей Н.В. Фотометрическое определение тетрациклина гидрохлорида // Фармация. 1974. Т. 23. N 4. С. 72.
18. Deng Y., Zhao R. Advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment // Current Pollution Reports. 2015. Vol. 1. P. 167–176. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0015-z>.
19. Wang J.L., Xu L.J. Advanced oxidation processes for wastewater treatment: formation of hydroxyl radical and application // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2012. Vol. 42. P. 251–325. <http://dx.doi.org/10.1080/10643389.2010.507698>.
20. Boreen A.L., Arnold W.A., McNeill K. Photodegradation of pharmaceuticals in the aquatic environment: a review // Aquatic Sciences. 2003. Vol. 65. P. 320–341. <https://doi.org/10.1007/s00027-003-0672-7>.
21. Changotra R., Rajput H., Dhir A. Treatment of real pharmaceutical wastewater using combined approach of Fenton applications and aerobic biological treatment // Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 2019. Vol. 376. P. 175–184. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.02.029>.
22. Устинова М.Н., Лебедева О.Е. Инактивация N-(4-гидроксифенил)ацетамида пероксидными окислительными системами // Научные ведомости БелГУ. Серия: Естественные науки. 2014. N 10. С. 117–120.
- REFERENCES**
1. Barenboim G.M., Chiganova M.A. Pharmaceutical pollution of surface and waste water. *Voda: khimiya i ekologiya*. 2012;10:40-46. (In Russian).
2. Prozherina J.A. Pharmaceutical waste as a new environmental problem. *Remedium*. 2017;(11):14-19. (In Russian). <https://doi.org/10.21518/1561-5936-2017-11-14-19>.
3. Jiao J., Li Y., Song Q., Wang L., Luo T., Gao Ch., et al. Removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) by free radicals in advanced oxidation processes. *Materials*. 2022;22(15):8152. <https://doi.org/10.3390/ma15228152>.
4. Oluwole A.O., Omotola E.O., Olatunji O.S. Pharmaceuticals and personal care products in water and wastewater: a review of treatment processes and use of photocatalyst immobilized on functionalized carbon in AOP degradation. *BMC Chemistry*. 2020;(14). <https://doi.org/10.1186/s13065-020-00714-1>.
5. Fast S.A., Gude V.G., Truax D.D., Martin J., Magbanua B.S. A critical evaluation of advanced oxidation processes for emerging contaminants removal. *Environmental Process*. 2017;(4):283-302. <https://doi.org/10.1007/s40710-017-0207-1>.
6. Parson S. *Advanced oxidation processes for water treatment: fundamentals and applications*. Canada: IWA Publishing; 2004. 356 p. <https://doi.org/10.2166/9781780403076>.
7. Lescano M.R., Lopez A.O., Romero R.L., Zalazar C.S. Degradation of chlorpyrifos formulation in water by the UV/H₂O₂ process: lumped kinetic modelling of total organic carbon removal. *Journal of Photochemistry and Photobiology, A: Chemistry*. 2021;404. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2020.112924>.
8. Ustinova M.N., Lebedeva O.E., Kurdupova V.I. Photodestructive transformations of benzoic acid and its derivatives. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2017;7(4):16-23. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2017-7-4-16-23>.
9. Bazargan A. *Photocatalytic water and wastewater treatment*. UK: IWA Publishing Unit; 2022. 220 p.
10. Saadati F., Keramati N., Ghazi M.M. Influence of parameters on the photocatalytic degradation of tetracycline in wastewater: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2016;46(8):757-782.
11. Karmazinov F.V., Kostyuchenko S.V., Kudryavtsev N.N., Khramenkov S.V. *Ultraviolet technologies in the modern world: a collective monograph*. Dolgoprudnyi: ID "Intellect"; 2012. 392 p. (In Russian).
12. Suheyda A., Gulin E. Green chemistry and water remediation: research and applications. *Advances in Green and Sustainable Chemistry*. 2021;209-238. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817742-6.00007-4>.
13. Giraldo-Aguirre A.L., Serna-Galvis E.A., Erazo-Erazo E.D., Silva-Agredo J., Giraldo-Ospina H., Flórez-Acosta O.A., et al. Removal of β -lactam antibiotics from pharmaceutical wastewaters using photo-Fenton process at near-neutral pH. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25(21):20293-20303. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8420-z>.
14. Emzhina V.V., Kuzin E.N., Babusenko E.S., Krutchinina N.E. Photodegradation of tetracycline in presence of H₂O₂ and metal oxide based catalysts. *Journal of Water Process Engineering*. 2021;39:101696. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101696>.
15. Ivantsova N.A., Zakharova D.S., Vetrova M.A. Investigation of the processes of photooxidation of an aqueous solution of nitrofurantoin. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Khimiya = Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2022;15(4):507-517. (In Russian). <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0297>.
16. Semchenko T.K., Kabanov S.V. *Instrumental methods of analysis*. Penza: Izd-vo PGU; 2016. 48 p. (In Russian).
17. Solovoi N.V. Photometric determination of tetracycline hydrochloride. *Farmatsiya*. 1974;23(4):72. (In Russian).
18. Deng Y., Zhao R. Advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment. *Current Pollution Reports*. 2015;1:167-176. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0015-z>.
19. Wang J.L., Xu L.J. Advanced oxidation processes for wastewater treatment: formation of hydroxyl radical and application. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2012;42:251-325. <http://dx.doi.org/10.1080/10643389.2010.507698>.
20. Boreen A.L., Arnold W.A., McNeill K. Photodegradation of pharmaceuticals in the aquatic environment: a review. *Aquatic Sciences*. 2003;65:320-341. <https://doi.org/10.1007/s00027-003-0672-7>.

21. Changotra R., Rajput H., Dhir A. Treatment of real pharmaceutical wastewater using combined approach of Fenton applications and aerobic biological treatment. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2019;376:175-184. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.02.029>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванцова Наталья Андреевна,
к.х.н., доцент,
Российский химико-технологический
университет им. Д.И. Менделеева,
125047, г. Москва, Миусская площадь, 9,
Российская Федерация,
ivantsova.n.a@muctr.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4117-072X>

Ветрова Маргарита Александровна,
аспирант,
Российский химико-технологический
университет имени Д.И. Менделеева,
125047, г. Москва, Миусская площадь, 9,
Российская Федерация,
vetrova.m.a@muctr.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0165-6549>

Чурина Алина Антоновна,
студент,
Российский химико-технологический
университет им. Д.И. Менделеева,
125047, г. Москва, Миусская площадь, 9,
Российская Федерация,
linachurina@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7120-6255>

Андриянова Дарья Витальевна,
магистрант,
Российский химико-технологический
университет им. Д.И. Менделеева,
125047, г. Москва, Миусская площадь, 9,
Российская Федерация,
anddarya33@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0401-8075>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный
вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 26.01.2023.
Одобрена после рецензирования 27.02.2023.
Принята к публикации 30.05.2023.

22. Ustinova M.N., Lebedeva O.E. Inactivation of N-(4-hydroxyphenyl)acetamide by peroxide oxidative systems. *Nauchnye vedomosti BelGU. Seriya: Estestvennye nauki = Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences*. 2014;(10):117-120. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Natalya A. Ivantsova,
Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,
Mendeleev University of Chemical Technology
of Russia,
9, Miusskaya Sq., Moscow, 125047,
Russian Federation,
ivantsova.n.a@muctr.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4117-072X>

Margarita A. Vetrova,
Postgraduate Student,
Mendeleev University of Chemical Technology
of Russia,
9, Miusskaya Sq., Moscow, 125047,
Russian Federation,
vetrova.m.a@muctr.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0165-6549>

Alina A. Churina,
Student,
Mendeleev University of Chemical Technology
of Russia,
9, Miusskaya Sq., Moscow, 125047,
Russian Federation,
linachurina@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7120-6255>

Darya V. Andriyanova,
Master Student,
Mendeleev University of Chemical Technology
of Russia,
9, Miusskaya Sq., Moscow, 125047,
Russian Federation,
anddarya33@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0401-8075>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests regarding
the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all
the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 26.01.2023.
Approved after reviewing 27.02.2023.
Accepted for publication 30.05.2023.