

ГЕОЭКОЛОГИЯ/GEOECOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.15>

ДЕЗИНФЕКЦИЯ ПРИРОДНОЙ ВОДЫ СОНОАКТИВИРОВАННЫМ ПЕРСУЛЬФАТОМ

Научная статья

Чернинова А.Б.^{1,*}, Кобунова Е.А.², Матагонова Г.Г.³, Батоев В.Б.⁴¹ ORCID : 0009-0005-2045-0425;² ORCID : 0000-0001-8807-6875;³ ORCID : 0000-0001-7383-9788;⁴ ORCID : 0009-0001-8533-0134;

^{1, 2, 3, 4} Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, Российской Федерации

¹ Бурятский государственный университет им. Доржи Банзарова, Улан-Удэ, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (cherninova2003[at]gmail.com)

Аннотация

Исследована эффективность дезинфекции модельной и природной поверхностной воды персульфатом (ПС), активированным высокочастотным ультразвуком (УЗ), с частотой 1,7 МГц. На примере бактерии *E. coli* установлены кинетические закономерности инактивации УЗ излучением, ПС и их совместным воздействием (УЗ/ПС) при разных значениях pH среды. Выявлено, что в кислой среде достигаются наибольшие скорости инактивации как в модельной, так и в реальной водной матрице. При этом совместная обработка (УЗ/ПС) является более эффективной, чем индивидуальные процессы. Это достижимо при инактивации в деионизированной воде при pH 3,9 и природной воде при pH 7,0. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности примененияsonoактивированного ПС для дезинфекции природных вод без предварительной корректировки pH среды.

Ключевые слова: дезинфекция воды, инактивация, высокочастотный ультразвук, персульфат, природная вода.

DISINFECTION OF NATURAL WATER WITH SONO-ACTIVATED PERSULPHATE

Research article

Cherninova A.B.^{1,*}, Kobunova E.A.², Matafonova G.G.³, Batoev V.B.⁴¹ ORCID : 0009-0005-2045-0425;² ORCID : 0000-0001-8807-6875;³ ORCID : 0000-0001-7383-9788;⁴ ORCID : 0009-0001-8533-0134;

^{1, 2, 3, 4} Baikal Institute of Nature Management of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation

¹ Buryat State University named after Dorzhi Banzarov, Ulan-Ude, Russian Federation

* Corresponding author (cherninova2003[at]gmail.com)

Abstract

The effectiveness of disinfection of model and natural surface water with persulphate (PS) activated by high-frequency ultrasound (US) at a frequency of 1.7 MHz was studied. Using *E. coli* bacteria as an example, the kinetic patterns of inactivation by US radiation, PS, and their combined effect (US/PS) at different pH values of the medium were established. It was found that the highest inactivation rates are achieved in an acidic environment, both in a model and in a real water matrix. At the same time, combined treatment (US/PS) is more effective than individual processes. This is achievable with inactivation in deionised water at pH 3.9 and natural water at pH 7.0. The obtained results indicate the promise of using sonocatalysed PS for the disinfection of natural waters without prior adjustment of the pH of the medium.

Keywords: water disinfection, inactivation, high-frequency ultrasound, persulphate, natural water.

Введение

В настоящее время, проблема доступной и чистой воды является одним из главных вызовов человечеству. Для ее решения приоритетное значение имеет разработка и внедрение высокоэффективных и экологобезопасных методов очистки и дезинфекции. К таким методам относятся, в первую очередь, методы на базе усовершенствованных окислительных процессов ("advanced oxidation processes"), основанные на генерации высокоактивных частиц (в основном, радикалов), которые *in situ* окисляют загрязняющие вещества и инактивируют патогенную микрофлору в воде. Генерацию радикалов интенсифицируют введением катализаторов или экологически чистых окислителей, например, пероксида водорода или персульфата в виде соли калия или натрия. ПС эффективен в широком диапазоне pH, стабилен, безопасен для окружающей среды и технологичен: его легко транспортировать, хранить и дозировать. Известно, что ПС можно активировать термически, ионами переходных металлов, электрохимически, ультрафиолетовым или ультразвуковым (УЗ) излучением [1]. Преимуществами УЗ-активации являются отсутствие дополнительных реагентов и возможность эффективной обработки водных сред, содержащих взвешенные частицы [2]. Известно, что при УЗ воздействии на жидкость образуются осциллирующие микропузырьки, при коллапсе которых локально повышается температура (до 5000° К) и давление (до 2000 атм), что приводит к сонолизу воды и

образованию гидроксильных радикалов ($\cdot\text{OH}$) (1), а также сульфатных радикал-анионов ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) (2) при сонолизе персульфат-иона [3]:



Кроме того, образуются дополнительные $\cdot\text{OH}$ (3):



Преимуществами $\text{SO}_4^{\cdot-}$ являются более высокий окислительно-восстановительный потенциал ($E_0 = 2.6\text{-}3.1$ В) по сравнению с $\cdot\text{OH}$ (1.9-2.7 В) [4], а также больший период полураспада и широкий рабочий диапазон рН [5], [6]. Поскольку с увеличением частоты генерируется больше радикалов [1], высокочастотный УЗ с частотами выше 100 кГц и мегагерцового диапазона в окислительных процессах более эффективен, чем низкочастотный УЗ.

Анализ литературы показал, что публикации по инактивации микроорганизмов соноактивированным ПС малочисленны [7], [8], [9], [10], [11]. При этом, работы выполнены в модельных водных растворах или в катализитических системах, тогда как некаталитические процессы в реальных водных матрицах остаются малоисследованными. Целью работы являлось установление кинетических закономерностей инактивации бактерии *E. coli* соноактивированным персульфатом в деионизированной и природной поверхностной воде при различных рН среды с использованием высокочастотного УЗ (1.7 МГц).

Методы и принципы исследования

В качестве модельного тест-организма взят бактериальный штамм *Escherichia coli* K-12 (ВКПМ, ГосНИИгенетика, Россия). Односуточная культура *E. coli* получена при аэробной инкубации лиофилизированных клеток в питательном бульоне (ФБУН ГНЦ ПМБ, Россия). Клетки трижды центрифугировали (4000 об/мин, 5 мин) и промывали стерильным буферным раствором при рН 7.2 (ООО Росмедбио, Россия). Далее клетки ресуспендировали в том же буферном растворе для получения исходной бактериальной суспензии. Аликвоту этой суспензии вносили в водную матрицу для достижения начальной концентрации клеток 10^5 КОЕ/мл. Водными матрицами являлись деионизированная (ДВ) и природная вода (ПВ), отобранная в реке Селенга, после фильтрования (NC, 0.45 мкм, Китай). ДВ получали в деионизаторе Simplicity®UV system (Millipore, Франция). Эксперименты по дезинфекции воды проведены в лабораторном сонореакторе, представляющем собой прямоугольную стальную ванну, на дне которой размещены пьезокерамические преобразователи (1.7 МГц) в виде единого блока. Вода обрабатывалась в сонореакторе только УЗ, персульфатом (ПС) калия (ООО Вектон, Россия) и их совместным воздействием без и после корректировки рН (табл. 1).

Таблица 1 - рН воды до и после внесения персульфата

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.15.1>

Водная матрица	pH _{исх}	pH _{ПС}	pH _{ПС+корр}
Деионизированная вода	5,3	3,9	5,3
Природная вода	8,0	7,0	3,9

Кинетические кривые инактивации *E. coli* представлены в виде зависимостей логарифмических показателей выживаемости клеток ($\lg(N/N_0)$) от времени обработки (мин). Поскольку полученные кривые характеризовались начальной лаг-фазой («плечо») до логарифмически линейной фазы, константы скорости инактивации по первому порядку (k , мин⁻¹) определены по «логарифмически линейной модели с плечом» с помощью программы GlnaFit [12].

Результаты и их обсуждение

На первом этапе проведены эксперименты в модельной водной матрице — деионизированной воде. При рН 5.3 полная инактивация *E. coli*, т.е. снижение начального числа клеток на ~5 порядков, при УЗ облучении без персульфата достигнута за 180 мин ($k = 1.98 \times 10^{-5}$ мин⁻¹), тогда как при рН 3.9 продолжительность облучения для полной дезинфекции сократилось примерно в 2 раза (рис. 1).

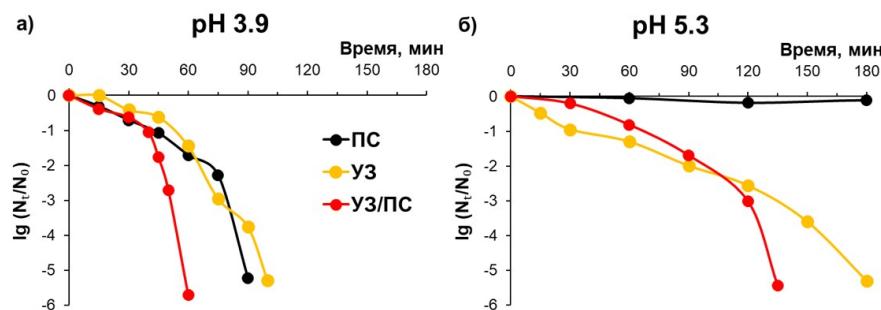
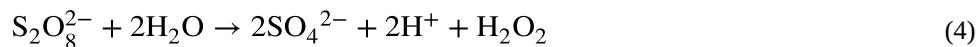


Рисунок 1 - Кинетика инактивации *E. coli* в деионизированной воде сооактивированным персульфатом при разных pH среды

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.15.2>

Примечание: $[E. coli]_0 = 10^5$ KOE/мл; $[PS]_0 = 0,4$ мМ

При снижении pH среды клетки *E. coli* (нейтрофилы) становятся более чувствительными к воздействию. Обработка в водном растворе ПС, без УЗ облучения, привела к полной инактивации *E. coli* за 90 мин ($k = 7.57 \times 10^{-5}$ мин $^{-1}$). Полагаем, что бактерии также инактивируются самим ПС в кислой среде (pH 3.9) за счет его частичного разложения (4):



Совместное воздействие УЗ и ПС существенно ускорило инактивацию при pH 3.9, обеспечив синергический эффект и полное обеззараживание за 60 мин ($k = 16.07 \times 10^{-5}$ мин $^{-1}$). Это свидетельствует о том, что ПС эффективно активируется ультразвуком, в результате чего генерируются радикалы ($SO_4^{•-}$, $•OH$), далее инактивирующие клетки. При pH 5.3 система УЗ/ПС также оставалась более эффективной, несмотря на снижение скорости инактивации ($k = 6.05 \times 10^{-5}$ мин $^{-1}$). Полагаем, это связано с более высокой устойчивостью клеток при повышении pH раствора и отсутствием вклада ПС (рис. 16).

Известно, что компоненты реальной водной матрицы, такие как неорганические анионы и растворенное органическое вещество, являются конкурентами за генерирующиеся радикалы и обычно снижают эффективность обработки воды. В отобранной ПВ преобладают гидрокарбонат- и сульфат-ионы (табл. 2).

Таблица 2 - Общие гидрохимические показатели природной воды

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.15.3>

Показатель	Значение	Показатель	Значение
УЭП ¹ , мкСм/см	$229 \pm 0,6$	NO_3^- , мг/л	$0,17 \pm 0,02$
РОУ ² , мг/л	$3,23 \pm 0,16$	NH_4^{4+} , мг/л	$< 0,1$
ХПК ³ , мг/л	$< 4,0$	$Fe_{общ}$, мг/л	$0,26 \pm 0,05$
HCO_3^- , мг/л	$108,7 \pm 13,0$	Cl^- , мг/л	$1,68 \pm 0,22$
CO_3^{2-} , мг/л	$10,10 \pm 2,12$	PO_4^{3-} , мг/л	$< 0,1$
NO_2^- , мг/л	$< 0,1$	SO_4^{2-} , мг/л	$18,41 \pm 2,39$

Примечание: ¹ – удельная электропроводность; ² – растворенный органический углерод; ³ – химическое потребление кислорода

Поэтому, далее были исследованы кинетические закономерности инактивации *E. coli* в реальной водной матрице — природной поверхностной воде без корректировки pH (7.0) и после подкисления до pH 3.9. В нейтральной среде скорость инактивации ультразвуком значительно уменьшилась ($k = 0.6 \times 10^{-5}$ мин $^{-1}$) и число клеток снизилось на 1.4 порядка за 180 мин. При этом инактивация только ПС, без УЗ облучения, не наблюдалась. Тем не менее, в системе УЗ/ПС достигнута 100% инактивация *E. coli* за 135 мин обработки (рис. 2б). Это указывает на то, что эффективность дезинфекции ПВ в нейтральной среде не снижалась по сравнению с ДВ (pH 5.3) и более продолжительное время для обработки ПВ не требовалось. Т.е. в этих условиях ингибирующее влияние компонентов водной матрицы не прослеживалось.

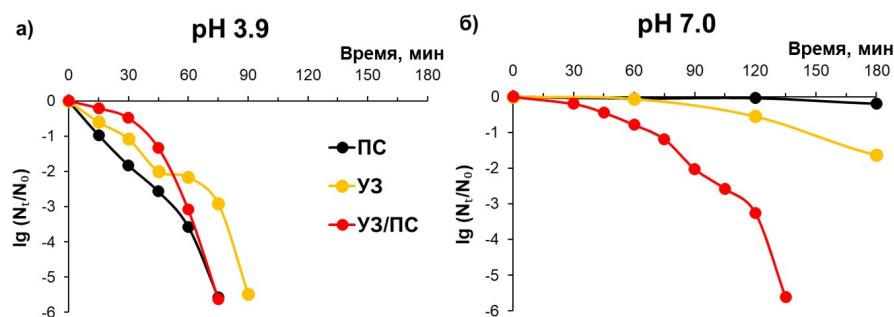


Рисунок 2 - Кинетика инактивации *E. coli* в природной воде сооактивированным персульфатом при разных рН среды

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.15.4>

Примечание: $[E. coli]_0 = 10^5$ KOE/мл; $[PS]_0 = 0,4$ мМ

Заключительная серия экспериментов выполнена в ПВ после подкисления до рН 3.9. В этих условиях, как известно, элиминируются гидрокарбонат-ионы, которые являются основными ловушками генерирующихся радикалов в природной воде. Результаты показали, что вклад УЗ был нивелирован, и полная инактивация достигалась за такое же время, что и при обработке только ПС (рис. 2а). При этом продолжительность обработки ПВ для полной дезинфекции (75 мин) больше, чем ДВ, что отражает влияние компонентов матрицы. Ранее в каталитической системе УЗ (600 кГц)/ПС (0.5 мМ)/Fe⁰ (0.5 г/л) за 40 мин наблюдалось снижение исходного числа клеток *E. coli* в дистиллированной и природной поверхностной воде на 5.74 и 3.77 порядка, соответственно [8]. В работе [9] сообщалось о полной инактивации *E. coli* в ДВ при обработке сооактивированным ПС при 35 кГц в течение 120 мин. В целом, для некаталитического процесса инактивации предложенная система УЗ/ПС при 1.7 МГц является эффективной, показав снижение исходного числа клеток на 5 порядков (полную дезинфекцию) при обработке природной воды без предварительной корректировки рН.

Заключение

Результаты исследования показали наибольшую эффективность персульфата, активированного высокочастотным ультразвуком (1.7 МГц), для инактивации *E. coli* в дистиллированной и природной воде при рН 3.9 и 7.0 соответственно. Несмотря на более высокие скорости инактивации клеток в кислой среде, для исключения этапа подкисления воды с последующей нейтрализацией, рекомендуется обработка природной воды при естественных значениях рН без предварительного подкисления. Предложенный метод в перспективе может быть использован в малотоннажных системах дезинфекции природной воды.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания БИП СО РАН (проект № FWSU-2026-0010).

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Acknowledgement

The work was carried out as part of the state assignment of the Baikal Institute of Environmental Management SB RAS (project No. FWSU-2026-0010).

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Wang B. A comprehensive review on persulfate activation treatment of wastewater / B. Wang, Y. Wang // Science of the Total Environment. — 2022. — Vol. 831. — P. 154906.
2. Yang L. Review on ultrasound assisted persulfate degradation of organic contaminants in wastewater: Influences, mechanisms and prospective / L. Yang, J. Xue, L. He et al. // Chemical Engineering Journal. — 2019. — Vol. 378. — P. 122146.
3. Li Y. Ultrasonic enhancement of persulfate oxidation system governs emerging pollutants decontamination / Y. Li, Y. Zhou, Y. Zhou // Green Energy and Environment. — 2024. — Vol. 9, № 11. — P. 1666–1678.
4. Oh W.D. Generation of sulfate radical through heterogeneous catalysis for organic contaminants removal: Current development, challenges and prospects / W.D. Oh, Z. Dong, T.T. Lim // Applied Catalysis B: Environmental. — 2016. — Vol. 194. — P. 169–201.
5. Yang Q. Recent advances in photo-activated sulfate radical-advanced oxidation process (SR-AOP) for refractory organic pollutants removal in water / Q. Yang, Y. Ma, F. Chen et al. // Chemical Engineering Journal. — 2019. — Vol. 378. — P. 122149.

6. Lee J. Persulfate-based advanced oxidation: Critical assessment of opportunities and roadblocks / J. Lee, U. Von Gunten, J.H. Kim // Environmental Science & Technology. — 2020. — Vol. 54, № 6. — P. 3064–3081.
7. Wu X. Sonochemical synthesis of Fe_3O_4 /carbon nanotubes using low frequency ultrasonic devices and their performance for heterogeneous sono-persulfate process on inactivation of *Microcystis aeruginosa* / X. Wu, G. Xu, J.J. Zhu // Ultrasonics Sonochemistry. — 2019. — Vol. 58. — P. 104634.
8. Wu X. High frequency ultrasonication enhances iron-catalyzed sulphate inactivation of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* / X. Wu, L. Yan, G. Xu et al. // Chemical Engineering Journal Advances. — 2021. — Vol. 8. — P. 100170.
9. Venieri D. Application of activated persulfate for the inactivation of fecal bacterial indicators in water / D. Venieri, A. Karapa, M. Panagiotopoulou et al. // Journal of Environmental Management. — 2020. — Vol. 261. — P. 110223.
10. Popova S. Evaluating (sono)-photo-Fenton-like processes with high-frequency ultrasound and UVA LEDs for degradation of organic micropollutants and inactivation of bacteria separately and simultaneously / S. Popova, I. Tsenter, N. Garkusheva et al. // Journal of Environmental Chemical Engineering. — 2021. — Vol. 9. — P. 105249.
11. Garkusheva N. Dual-Frequency ultrasonic inactivation of *Escherichia coli* and *Enterococcus faecalis* using persulfate: A synergistic effect / N. Garkusheva, I. Tsenter, E. Kobunova et al. // Water. — 2022. — Vol. 14. — P. 2604.
12. Geeraerd A.H. GIaNaFiT, a freeware tool to assess non-log-linear microbial survivor curves / A.H. Geeraerd, V.P. Valdramidis, J.F. Van Impe // International Journal of Food Microbiology. — 2005. — Vol. 102, № 1. — P. 95–105.