

Читать
онлайн
Read
online

Кирпиченкова Е.В., Джикия И.З., Колодина Д.В., Онищенко Г.Г.

Гигиеническая эффективность ультрафиолетового обеззараживания воды в централизованных системах питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения (систематический обзор)

ФГАОУ ВО Первый московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова
Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), 119991, Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. Питьевая вода, подаваемая населению, должна быть безопасна в эпидемическом отношении. Однако некоторые микроорганизмы вирусной и паразитарной природы обладают устойчивостью к обеззараживающему действию препаратов, традиционно применяемых в практике водоподготовки. Применение ультрафиолетового (УФ) облучения позволяет обеспечить эпидемическую безопасность воды в отношении указанных микроорганизмов, но необходимо учитывать факторы, влияющие на его эффективность.

Цель обзора – систематизация научных данных об эффективности применения УФ-облучения в отношении питьевой воды.

Материалы и методы. Поиск проводили с использованием баз научной литературы MedLine/PubMed, Scopus и Science Direct. Общее количество публикаций – 1646. Критерии включения в систематический обзор: публикации на русском или английском языках с доступной полнотекстовой версией; пробы для проведения исследования – вода из систем централизованного водоснабжения или специально подготовленные микроорганизмы; любой тип исследований с последующей оценкой эффективности широкого спектра доз УФ-облучения в отношении микроорганизмов.

Результаты анализа публикаций. В систематический обзор включено 17 публикаций, посвящённых изучению влияния УФ-излучения на различные группы микроорганизмов бактериальной и вирусной природы. Предметом ограниченного числа исследований стало изучение устойчивости цист простейших и яиц гельминтов к разным дозам УФ-излучения. По результатам, представленным в публикациях, наименьшей устойчивостью (стопроцентная инактивация) к УФ-излучению обладают патогенные вирусы, бактерии, цисты лямблий. Степень инактивации на уровне 4 log установлена в отношении микобактерий. Бактерии группы кишечной палочки и колифаги демонстрируют широкий диапазон показателей устойчивости к воздействию УФ-излучения, что обусловлено многообразием изучаемых штаммов.

Заключение. Обеззараживание ультрафиолетовым излучением следует применять в качестве дополнительного метода в сочетании с традиционными реагентными методами водоподготовки. Необходимо проводить исследования влияния УФ-излучения на яйца гельминтов и цисты простейших.

Ключевые слова: систематический обзор; УФ-обеззараживание; питьевая вода; эпидемическая безопасность; устойчивость микроорганизмов

Для цитирования: Кирпиченкова Е.В., Джикия И.З., Колодина Д.В., Онищенко Г.Г. Гигиеническая эффективность ультрафиолетового обеззараживания воды в централизованных системах питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения (систематический обзор). *Гигиена и санитария*. 2024; 103(2): 104–112. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-2-104-112> <https://elibrary.ru/lfhjhm>

Для корреспонденции: Кирпиченкова Екатерина Васильевна, канд. мед. наук, доцент каф. экологии человека и гигиены окружающей среды ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), 119991, Москва. E-mail: kirpichenkova_e_v@staff.sechenov.ru

Участие авторов: Кирпиченкова Е.В. – концепция и дизайн исследования, сбор материала, редактирование; Джикия И.З. – сбор материала, написание текста, статистическая обработка; Колодина Д.В. – сбор материала, написание текста, обработка данных; Онищенко Г.Г. – концепция исследования, редактирование окончательного текста. Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело финансовой поддержки.

Поступила: 10.01.2024 / Принята к печати: 09.02.2024 / Опубликовано: 15.03.2024

Ekaterina V. Kirpichenkova, Ilya Z. Dzhikiya, Diana V. Kolodina, Gennadiy G. Onishchenko Hygienic efficiency of ultraviolet disinfection of water in centralized drinking and household water supply systems (systematic review)

I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University),
Moscow, 119991, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Drinking water supplied to the population must be safe in epidemic terms. However, some viruses and parasites are resistant to the disinfecting effect of traditionally used agents for water treatment. The use of UV irradiation ensures the microbiological safety of water, but there are factors affecting its effectiveness. **The purpose of the review** was to systematize scientific data on the effectiveness of the use of UV irradiation in relation to drinking water.

Materials and methods. The search for scientific publications was carried out using literature databases MedLine/PubMed, Scopus, and Science Direct. The total number of publications was one thousand six hundred forty-six. The criteria for including the report in the systematic review were: publications in Russian or English with an available full-text version; samples for the study are water from centralized water supply systems or specially prepared microorganisms; any type of research evaluating the effectiveness of a wide range of doses of UV irradiation against microorganisms.

Results of the analysis of publications. A systematic review included 17 reports about the effect of UV irradiation on bacteria and viruses. The subject of several studies was the resistance of protozoan cysts and helminth eggs to different doses of UV irradiation. According to the results presented in the publication, pathogenic viruses and bacteria, giardia cysts possess of the least resistance to UV irradiation (100% inactivation). 4 log-inactivation was established for Mycobactera. E. coli and coliphages demonstrate a wide range of indicators of the resistance to ultraviolet radiation due to the diversity of the studied strains.

Conclusion. UV disinfection should be used as an additional method in combination with traditional reagents methods of water treatment. It is necessary to study the effect of UV irradiation on helminth eggs and protozoan cysts.

Keywords: systematic review; UV disinfection; drinking water; epidemic safety; resistance of microorganisms

For citation: Kirpichenkova E.V., Dzhikiya I.Z., Kolodina D.V., Onishchenko G.G. Hygienic efficiency of ultraviolet disinfection of water in centralized drinking and household water supply systems (systematic review). *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation*, Russian journal. 2024; 103(2): 104–112. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-103-2-104-112> <https://elibrary.ru/lfhjhm> (In Russ.)

For correspondence: Ekaterina V. Kirpichenkova, MD, PhD, Associate Professor of the Department of Human Ecology and Environmental Hygiene of the Sechenov University, Moscow, 119991, Russian Federation. E-mail: kirpichenkova_e_v@staff.sechenov.ru

Contribution: Kirpichenkova E.V. — the concept and design of the study, collection of material, editing; Dzhihiya I.Z. — collection of material, writing a text, statistical processing; Kolodina D.V. — collection of material, writing a text, data processing; Onishchenko G.G. — the concept of the study, editing the final text. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement. The study had no sponsorship.

Received: January 10, 2024 / Accepted: February 9, 2024 / Published: March 15, 2024

Введение

В соответствии с современными санитарно-эпидемиологическими требованиями к питьевому водоснабжению вода, подаваемая населению, должна быть безвредна по химическому составу, безопасна в эпидемическом и радиационном отношении и должна обладать благоприятными органолептическими свойствами*. К контролируемым показателям эпидемической безопасности питьевой воды относятся кишечная палочка, энтерококки, обобщённые колиформные бактерии, колифаги, споры сульфитредуцирующих клостридий, цисты и ооцисты патогенных простейших, яйца и личинки гельминтов, возбудители кишечных инфекций вирусной и бактериальной природы, синегнойная палочка, легионелла, общее микробное число. При этом некоторые микроорганизмы, преимущественно вирусной и паразитарной природы, обладают устойчивостью к обеззараживающему действию соединений хлора. Применение физических методов обеззараживания позволяет обеспечить эпидемическую безопасность воды в вирусном и паразитарном отношении и не приводит к образованию опасных для человека хлорорганических соединений, однако эффективность этих методов зависит от прозрачности обрабатываемой воды и характеризуется эффектом реактивации в случае применения низких доз ультрафиолетового (УФ) облучения. Высокий уровень вирусного загрязнения поверхностных источников в мегаполисах вызывает необходимость создания многобарьерной схемы очистки и обеззараживания воды. В подобных схемах УФ-облучение сочетается с реагентными методами обеззараживания воды (хлорирование, озонирование). Внедрение комплексных схем водоподготовки позволяет существенно повысить количество проб воды, соответствующих нормативным требованиям по микробиологическим показателям, и способствует снижению показателей заболеваемости населения вирусным гепатитом А и энтеровирусными инфекциями [1].

Эффективность источников УФ-излучения, применяемых для бактерицидной обработки питьевой воды, зависит от комплексного влияния различных факторов — климатических, биологических и технологических [2]. При этом научные исследования последних десятилетий показали, что эффективность УФ-облучения зависит от дозы. Были проведены экспериментальные исследования в отношении различных вирусов и применены расчётные методики. Так, доза 11 мДж/см² обеспечивала инактивацию вирусов гепатита А, 25 мДж/см² — полиовирусов и колифагов, 45 мДж/см² — спор клостридий. При расчёте эффективной дозы УФ-облучения учитывались концентрации вирусов в обрабатываемой воде. Установлено, что при количестве микроорганизмов более $n \cdot 10^3$ клеток УФ-облучение необходимо комбинировать с реагентными методами обеззараживания воды [3]. В отношении вирусов, присутствующих в питьевой воде, высокая эффективность обеззараживания достигалась в случае применения хлорирования в сочетании с УФ-облучением. Применение только хлорирования не обеспечивало полного вирулицидного действия, так как в воде присутствовали вирусы, устойчивые к хлорсодержащим препаратам. Комбинированное обеззараживание помимо высокой эф-

фективности позволило использовать более низкие концентрации препаратов и более низкие дозы облучения, уменьшая вероятность образования побочных продуктов [4]. Вместе с тем повсеместное применение хлорирования для обеззараживания питьевой воды привело к формированию бактерий, устойчивых к воздействию хлорсодержащих препаратов. На примере спор *B. cereus* изучалось воздействие УФ-излучения в дозе 180 мДж/см² и комбинация УФ-излучения в дозе 140 мДж/см² с пероксидом водорода, а в дозе 120 мДж/см² — с пероксимонсульфатом. Установлено, что дополнение УФ-излучения окислителями позволяет снизить дозу и сократить время контакта [5]. Сочетание УФ-облучения с пероксимонсульфатом также продемонстрировало фунгицидную активность в отношении спор *Trichoderma*, *Acremonium*, *Penicillium* и *Cladosporium* [6]. С учётом того, что эффективность УФ-облучения зависит от прозрачности воды, заслуживает внимания метод комбинирования процессов УФ-обеззараживания и коагуляции. Применение в качестве коагулянта хлорида алюминия в концентрации 0,15 мг/л демонстрирует снижение (4 Lg) количества аденовирусов, что превосходит аналогичный показатель при сочетании УФ-облучения с хлорированием [7].

В отношении микроорганизмов бактериальной природы установлено, что УФ-облучение воды с высоким уровнем загрязнения ($n \cdot 10^3$ КОЕ/100 мл) дозами 25; 40 и 60 мДж/см² вызывает мгновенную гибель *E. coli*, *S. enteritidis*, *P. aeruginosa* и *E. faecalis*, но через 48 ч указанные микроорганизмы вновь обнаруживаются в воде в количестве $> 10^3$ клеток, что доказывает их реактивацию. При этом в случае воздействия дозы 80 мДж/см² реактивация отсутствовала. При облучении воды с низким уровнем загрязнения ($n \cdot 10^2$ КОЕ/100 мл) реактивация в отношении указанных микроорганизмов отсутствовала независимо от применяемой дозы [8]. Возможность применения светодиодных УФ-ламп наряду с традиционными ртутными УФ-лампами изучалась во многих научных исследованиях последнего десятилетия. В основном оценивалась эффективность широкого спектра доз УФ-облучения (0,73–31 500 мДж/см²) с длинами волн в диапазоне 250–405 нм в отношении *E. coli* и мезофильных бактерий. Но в связи с отсутствием единого протокола обеззараживания воды с применением светодиодных УФ-ламп полученные результаты имеют значительные отличия [9]. Для УФ-ламп среднего давления проводились исследования для оценки эффективности УФ-излучения с различными длинами волн (210–290 нм) в отношении индикаторных микроорганизмов — колифагов, *MS2*, *T1UV*, *Q beta*, *T7*, *B. pumilus* и криптоспоридий. Полученные результаты позволили подходить к патогенным микроорганизмам контрольные и эффективно оценивать дозу УФ-облучения [10]. Кроме того, исследование эффективности УФ-излучения с разными длинами волн показало, что инактивирующая способность уменьшается в ряду: бактериофаг 174 > *E. coli* > бактериофаг T-типа > *B. subtilis* > *MS2* или *Q beta* > аденовирус человека. Наиболее сильную инактивирующую способность продемонстрировало УФ-излучение с длинами волн 280 и 260 нм. При этом с учётом экономического фактора целесообразно использовать излучение с длиной волны 280 нм [11]. Аналогичные исследования проведены в отношении воздействия импульсных УФ-светодиодов на *E. coli*. Результаты продемонстрировали высокую эффективность импульсного излучения по сравнению с непрерывным излучением на

* Федеральный закон от 30.03.99 г. № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» (действующая редакция от 24.07.2023 г.).

одинаковых длинах волн с позиции сокращения рабочего цикла [12]. В исследовании эффективности светодиодных УФ-ламп в отношении *E. coli*, *MS2* и спор *B. spizizenii* и была доказана целесообразность их применения вследствие сокращения расходов за счёт исключения подбора длины волн при сохранении высокой эффективности по отношению к микроорганизмам и способности подавлять их восстановление [13]. По данным многочисленных исследований, оптимальная длина волны УФ-излучения, обладающая обеззараживающим действием, составляет 200–280 нм, а к наиболее УФ-устойчивым микроорганизмам относятся аденовирусы, споры бактерий и простейшие *Acanthamoeba* [14]. В последние годы проводятся исследования, направленные на изучение сочетанного воздействия УФ-облучения и электролиза для повышения эффективности. Установлено, что это позволяет сократить время обеззараживания и расход электроэнергии. Барботирование и повышение температуры обрабатываемой воды обладает подобным эффектом. Кроме того, применение электролиза позволяет исключить реактивацию микроорганизмов через 48 ч после обеззараживания [15]. Получены доказательства эффективного применения УФ-облучения в отношении биоплёнок на этапах их образования, отслоения и инактивации микроорганизмов. В зависимости от типа источника УФ-излучения (ртутные, эксимерные, светодиодные УФ-лампы или ксенонные импульсные лампы) получены различные результаты. С учётом факторов, препятствующих действию УФ-излучения (увеличение длины пути излучения, поглощение активных форм кислорода, поглощение и рассеивание УФ-излучения), светодиодные лампы продемонстрировали наилучшие показатели [16]. Среди альтернативных источников УФ-излучения заслуживают внимания микроплазменные УФ-лампы с длиной волны 222 нм. Эффективность этих ламп в отношении аденовирусов не имела существенных отличий от УФ-ламп среднего давления, но была значительно выше по сравнению с УФ-лампами низкого давления. Кроме того, отмечались различия и в механизмах действия: облучение от микроплазменных ламп повреждало не геном, а белки капсида вирусов [17]. Сокращение времени обеззараживания питьевой воды с помощью компактных установок было достигнуто и при использовании метода комбинирования УФ-светодиодных ламп и водного волновода. Доказана его эффективность в отношении *E. coli*, *V. cholerae* и *C. parvum*, а в случае увеличения дозы – в отношении *P. aeruginosa* и спор *B. subtilis*. При этом во всех случаях время обеззараживания составляло примерно 1 с [18]. Важным аспектом оценки обеззараживания воды методом УФ-облучения является возможность сохранения бактерицидного действия во время транспортировки воды в распределительной сети. При создании условий, близких к распределительной сети, установлено, что через шесть дней после УФ-облучения наблюдается увеличение количества микроорганизмов групп *ASK-M1*, *Mycobacteriaceae*, *Nitrosomonadaceae* [19].

По нашему мнению, с точки зрения науки и практики представляется важным изучение возможности применения УФ-излучения для обеззараживания воды в системах централизованного питьевого и хозяйственно-бытового назначения. Это позволит обеспечить не только более широкий спектр бактерицидного действия, но и исключит отрицательные эффекты применения хлорсодержащих препаратов.

Таким образом, целью настоящей работы стала систематизация научных данных об эффективности применения УФ-облучения питьевой воды. Для достижения поставленной цели нами были сформулированы следующие задачи: 1) в базах данных с использованием ключевых слов найти публикации по оценке гигиенической эффективности УФ-облучения и систематизировать результаты исследований; 2) выявить общие тенденции подбора наиболее эффективной дозы облучения и длины волны; 3) установить микроорганизмы, в отношении которых применение УФ-облучения наиболее эффективно.

Материалы и методы

Поиск проводили в апреле 2022 г. с использованием баз данных научной литературы MedLine/PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>), Scopus (<https://www.scopus.com/home.uri>) и Science Direct (<https://www.sciencedirect.com/>). В базе данных MedLine/PubMed по поисковому запросу [(disinfection OR treatment OR purification) AND «drinking water» AND («ultra violet» OR uv OR solar)] было найдено 1007 статей. В базе данных Scopus – 310 статей [поисковый запрос (TITLE-ABS-KEY disinfection OR purification OR treatment AND «drinking water» AND «ultra violet» OR uv OR solar)]. В базе данных Science Direct был использован поисковый запрос (disinfection purification treatment «drinking water» «ultra violet» uv solar), в соответствии с которым были получены 329 статей. Общее количество публикаций – 1646. Критериями отбора для включения в систематический обзор были определены следующие параметры: публикации на русском или английском языках с доступной полнотекстовой версией; пробы для проведения исследования – вода из систем централизованного водоснабжения или специально подготовленные микроорганизмы; любой тип исследований с последующей оценкой эффективности широкого спектра доз УФ-облучения в отношении микроорганизмов. Критериями исключения источника из систематического обзора являлись: обзоры, короткие сообщения, редакционные комментарии и письма, статьи без доступной полнотекстовой версии; исследования эффективности УФ-облучения в отношении воды, расфасованной в ёмкости, и в отношении сточных вод; исследования эффективности солнечного света, применяемого для обеззараживания питьевой воды; статьи, посвящённые обсуждению эффективности УФ-обеззараживания питьевой воды, но без результатов собственных исследований; статьи, посвящённые анализу экономической эффективности УФ-обеззараживания питьевой воды.

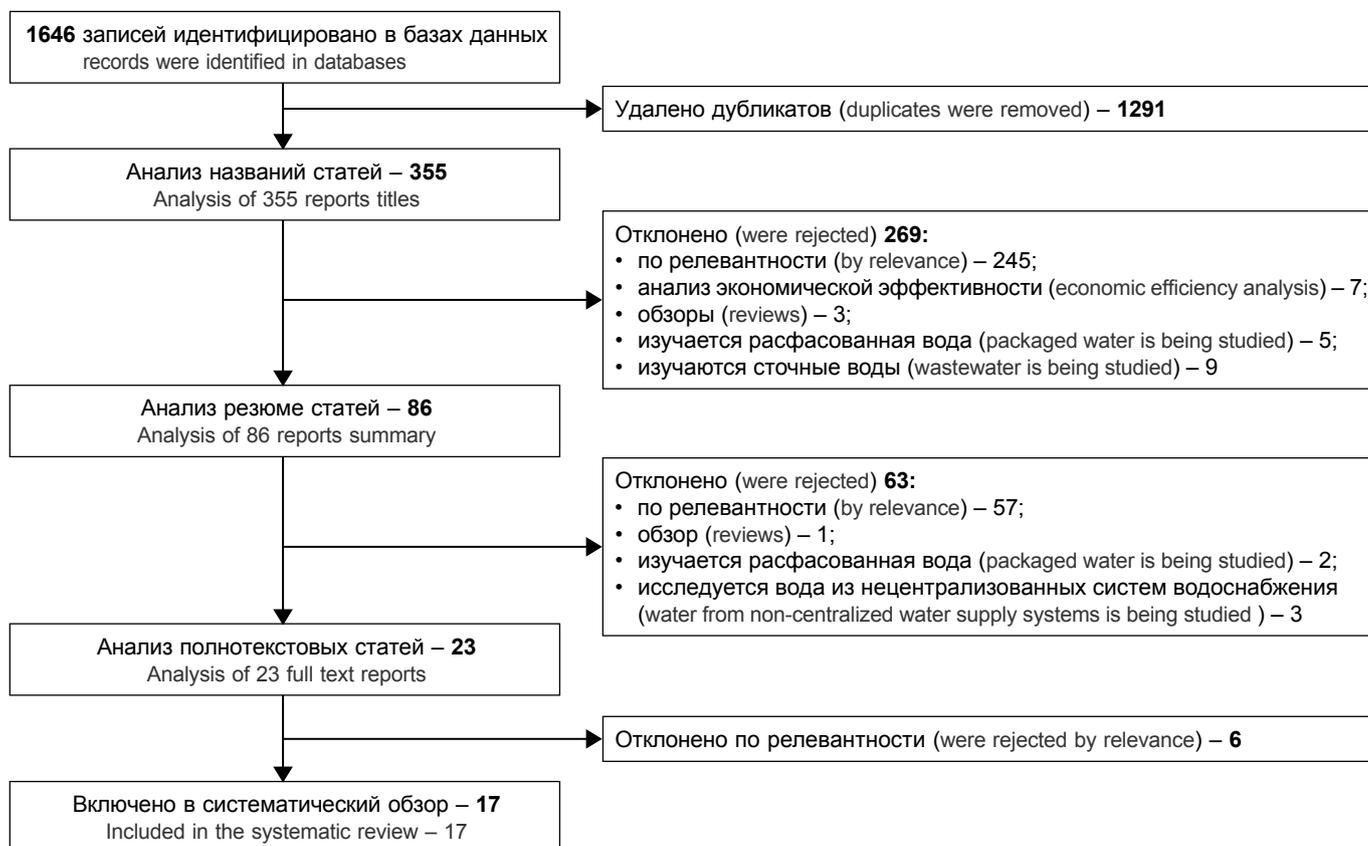
Публикации анализировали на предмет дублирования с помощью онлайн-версии программы EndNote. По результатам анализа исключена 1291 статья. Далее проводили оценку соответствия названий и резюме 355 публикаций критериям включения (исключения), по результатам которой для анализа полнотекстовых форматов осталось 23 публикации на русском и английском языках. Анализ полнотекстовых источников осуществляли без использования специализированных программных средств. Три исследователя независимо друг от друга анализировали полные тексты публикаций. Любые разногласия разрешались консенсусом. По результатам работы данные 17 публикаций были обобщены в таблице формата Excel (производитель Microsoft) и включены в систематический обзор (см. рисунок).

Сравнение эффективности обеззараживания питьевой воды с применением УФ-облучения проводили по уровням содержания исследуемых групп микроорганизмов как по показателям Log inactivation, так и в формате КОЕ/мл.

Настоящий систематический обзор представлен в соответствии с рекомендациями группы PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Протокол систематического обзора зарегистрирован в системе Prospero (ID CRD42022334994).

Результаты анализа публикаций

Из полученных литературных источников были отобраны следующие данные: авторы исследования; год; страна; микроорганизмы, в отношении которых оценивалась эффективность УФ-облучения; образцы или пробы, которые подвергались воздействию УФ-излучения; технические параметры УФ-облучения (источник, доза, длина волны); результаты воздействия УФ-облучения. Обобщённые данные эффективности применения УФ-облучения с целью обеззараживания питьевой воды представлены в таблице. Включённые в анализ 17 научных статей изданы в период с 2007 по 2022 г. Наибольший интерес к вопросам применения УФ-облучения для обеззараживания питьевой воды наблюда-



Блок-схема стратегии отбора исследований.
Flowchart of the study selection strategy.

ются в последние семь из анализируемых лет: в 2015–2022 гг. вышло 14 статей, тогда как с 2007 по 2014 г. – 3 статьи. Большинство научных исследований (6–35%) выполнено в Великобритании, Германии, Финляндии, Швеции [4, 19, 20–23]. Существенный вклад в изучение данной темы внесли исследователи из России [8, 24], Китая [13, 25], Шри-Ланки [32], Канады [26–28], США [29–31]. Каких-либо упоминаний подобных работ в Австралии, странах Латинской Америки и Африки нами не обнаружено.

Предметом изучения в большинстве (59%) исследований являлись различные штаммы *E. coli* [8, 13, 19, 20, 22, 25, 27, 28, 30]. Отдельные исследования (41%) посвящены изучению влияния УФ-облучения на микроорганизмы вирусной природы, среди которых вирус полиомиелита [8, 24], аденовирусы типов 2, 5, 41 [26], бактериофаги [4, 8, 20, 23, 24, 30]. В немногочисленных исследованиях (29%) предметом изучения была устойчивость к УФ-облучению микобактерий [29, 32], легионелл [31] и криптоспоридий [8, 21]. При этом следует отметить значительное количество комплексных исследований (47%), направленных на одновременное изучение устойчивости нескольких различных групп микроорганизмов к воздействию УФ-облучения [8, 19, 20, 22–24, 28, 30]. Данные, характеризующие устойчивость цист других простейших (кроме криптоспоридий) и яиц гельминтов (кроме аскарид) к УФ-облучению, нами не обнаружены.

Объектом исследования в большинстве (65%) работ являлись специально подготовленные культуры микроорганизмов с заранее известной концентрацией – от 10^5 до 10^9 КОЕ/мл (или клеток/мл) [4, 13, 22, 25–32]. Кроме того, в исследованиях использовались пробы воды, полученные с городских водопроводных станций после различных этапов водоподготовки (озонирование, фильтрация) [8, 19, 20, 21, 24].

Воздействие на пробы воды и культуры микроорганизмов осуществлялось с применением различных источников УФ-облучения. Эффективность УФ-светодиодов оценива-

лась в 35% проведённых исследований [8, 13, 20, 22, 24, 31], при этом ещё в двух исследованиях [25, 28] сравнивали результаты применения УФ-светодиодов и УФ-ламп низкого давления. УФ-лампы низкого давления применяли в 47% исследований [4, 19, 23, 26, 27, 29, 30, 32]. Немногочисленные исследования посвящены изучению эффективности ртутных ламп средней и высокой мощности [27, 30], и лишь в одном исследовании оценивалась эффективность эксимерной лампы как источника УФ-излучения [30].

Диапазон длин волн, применяемых в экспериментальных исследованиях, составил 253,7–460 нм. В большинстве публикаций отражено изучение эффективности длин волн в диапазоне 253,7–280 нм [4, 8, 13, 19, 20, 23–26, 28, 30, 31]. При этом в четырёх исследованиях [21, 27, 29, 32] отсутствовали упоминания о длинах волн. Следует отметить, что длина волны УФ-излучения не зависела от вида применяемого источника. Дозы УФ-излучения определялись целями и задачами каждого исследования и не зависели от источника излучения. В одном исследовании авторы наряду с дозой учитывали и продолжительность контакта микроорганизмов с УФ-излучением [32].

По показателям логарифмической инактивации наиболее высокие значения (стопроцентная инактивация) достигнуты при использовании УФ-лампы с мощностью излучения 25 мДж/см² и длиной волны 254 нм в отношении вирусов полиомиелита, цист лямблий, MS2, *E. coli*, сальмонелл, энтерококков и *P. aeruginosa*. Для стопроцентной инактивации яиц аскариды требовалась мощность излучения 40 мДж/см² [8]. Аналогичные результаты получены в отношении *M. fortuitum* и *M. marinum* ($1 \cdot 10^4$ – $1 \cdot 10^5$ КОЕ/мл) при облучении в течение 30 и 5 с соответственно [32]. В каждом случае наблюдается прямая пропорциональная зависимость между степенью инактивации и исходной концентрацией микроорганизмов в облучаемой воде. Так, при воздействии УФ-ламп с мощностью излучения 20 мДж/см² на *M. avium* и *M. intracellulae* ($1 \cdot 10^6$ КОЕ/мл) была достигнута инактивация на уровне 4 Log [29].

Перечень статей, включённых в систематический обзор

List of articles included in the systematic review

№	Авторы Authors	Год Year	Страна Country	Микроорганизмы Microorganisms	Образцы Samples	Тип УФ-ламп UV lamp type	Длина волны, нм Wavelength, nm	Доза излучения, МДж/см ² UV-dose, MJ/cm ²	Результаты (величина уровня инактивации), Log Findings (inactivation), Log
1	Nyungaresi et al. [13]	2018	Китай China	<i>E. coli</i> CGMCC 1.3373	Суспензия бактериальных клеток в концентрации 10 ⁶ КОЕ/мл Suspended bacteria cells at a concentration 10 ⁶ CFU/ml	УФ-светодиоды UV-LED	267 267 267–275 267–275 275 275	8.78 11.52 10.09 15.35 12.26 23.04	3 4 3 4 3 4
2	Li et al. [25]	2017	China Китай	<i>E. coli</i> CGMCC 1.3373	Пробы воды с суспензией <i>E. coli</i> в концентрации 10 ⁷ КОЕ/мл Water samples with <i>E. coli</i> suspended od final concentration 10 ⁷ CFU/ml	УФ-светодиоды UV-LED УФ-лампы низкого давления LP UV lamps	265 265 280 280 —	7.27 ± 0.51 10.91 ± 0.76 10.24 ± 1.01 15.35 ± 1.52 8.69 ± 0.50 13.03 ± 0.75	3 4.5 3 4.5 3 4.5
3	Green et al. [28]	2017	Канада Canada	<i>E. coli</i> O157:H7 <i>E. coli</i> ATCC 8739 <i>L. innocua</i> <i>L. monocytogenes</i> <i>L. seeligeri</i> <i>S. enterica</i> <i>E. faecium</i> NRRL-B2354	Суспензия микроорганизмов в концентрации 10 ⁹ кл./мл Microbial suspension of final concentration of 10 ⁹ cells/ml	УФ-светодиоды UV-LED	259 268	7 7	3.77 ± 0.22 (<i>L. seeligeri</i>) 4.33 ± 0.61 (<i>L. innocua</i>) 1.10 ± 0.12 (<i>E. coli</i> ATCC8739) 5.21 ± 0.13 (<i>E. coli</i> O157:H7) 5.32 ± 0.15 (<i>S. enterica</i>) 4.68 ± 0.13 (<i>L. monocytogenes</i>) 3.89 ± 0.23 (<i>E. faecium</i> NRRL-B2354)
4	Baxter et al. [26]	2007	Канада Canada	Различные серотипы аденовирусов (2, 5 и 41) Different types of adenovirus (2, 5 and 41)	Суспензия, содержащая аденовирусы серотипов 2, 5, 41 в концентрации в 10 ⁶ Ед/мл Suspension of Ad 41, Ad 2, Ad 5 cells, 10 ⁶ IU/ml	УФ-лампы низкого давления LP UV lamps	254 254 254	40 120 120	1 (2, 5, 41) 3 (2, 5) 2 (41)
5	Blyth et al. [21]	2021	Великобритания UK	<i>S. chilensis</i>	Пробы воды со станции водоподготовки Samples of water, which obtained from a water treatment works	Ртутная лампа низкого давления высокой мощности LP high output mercury lamp	253.7	2–7	2.2
6	Hokajärvi et al. [23]	2018	Финляндия Finland	<i>E. coli</i> <i>C. bifementas</i> NCTC 506 <i>MS2</i> NCTC 12487	Пробы природной очищенной воды FWW2-Natural and artificial water lamps	Ртутные лампы низкого давления LP mercury vapor lamps	253.7	60	2.9 (<i>E. coli</i>) 0.3 (<i>C. bifementas</i>) 0.1 (<i>MS2</i>)
7	Buse et al. [31]	2022	США USA	<i>L. pneumophila Philadelphia</i> <i>L. pneumophila Los Angeles-1</i> <i>L. pneumophila Chicago-2</i> <i>L. pneumophila I DW</i>	Водная суспензия клеток <i>L. pneumophila</i> в концентрации 10 ⁶ КОЕ/мл <i>L. pneumophila</i> cells suspended in H ₂ O of 10 ⁶ CFU/ml	УФ-светодиоды UV-LED	255 265	0.5 2	4.8 ± 0.1 (<i>L. pneumophila Philadelphia</i>) 4.4 ± 0.1 (<i>L. pneumophila DW</i>) 4.8 ± 0.1 (<i>L. pneumophila Chicago-2</i> , <i>L. pneumophila Los Angeles-1</i>)

Продолжение Таблицы на стр. 109–110. / Continuation of the Table on pages 109–110.

Продолжение Таблицы. Начало на стр. 108. / Continuation of the Table. The beginning is on page 108.

№	Авторы Authors	Год Year	Страна Country	Микроорганизмы Microorganisms	Образцы Samples	Тип УФ-лампы UV lamp type	Длина волны, нм Wavelength, nm	Доза излучения, МДж/см ² UV-dose, MJ/cm ²	Результаты (величина уровня инактивации), Log Findings (inactivation), Log
8	Gross et al. [22]	2015	Германия Germany	<i>E. coli</i> DSM 498 <i>B. subtilis</i> DSM 402	9 мл дистиллированной воды с концентрацией микроорганизмов 1–3 • 10 ⁶ КОЕ/мл 9 ml distilled water with inserted microorganisms, concentration 1–3 • 10 ⁶ CFU/ml	УФ-светодиоды UV-LED	281.8	8.64–77.82	1.85–2.80 (<i>E. coli</i>) 1.04–1.79 (<i>B. subtilis</i>)
9	Jarvis et al. [20]	2019	Великобритания UK	<i>E. coli</i> ATCC 15.597 MS2 ATCC 15.597-B1	Пробы воды после скорых фильтров со станции водоподготовки Water samples post rapid gravity filter from the water treatment works	УФ-светодиоды UV-LED	275 275	4.5–27 9.2	1.85–2.80 (<i>E. coli</i> ATCC 15.597) 2 (MS2 ATCC 15.597-B1)
10	Zyaga et al. [4]	2016	Финляндия Finland	Колифаги (10 штаммов, устойчивых к УФ-облучению) Coliphages (10 UV-resistant strains) MS2	Колифаги на культуре клеток <i>E. coli</i> ATCC 13706 и <i>E. coli</i> ATCC 15597 Isolated coliphages. The host bacteria were <i>E. coli</i> ATCC 13706 and <i>E. coli</i> ATCC 15597	Ртутные лампы низкого давления LP mercury lamps	253.7 253.7	22 117	< 2 (штаммы, устойчивые к УФ-облучению) / < 2 (UV-resistant strains) 3 (MS2)
11	Rahmanin et al. [8]	2019	Россия Russia	<i>E. coli</i> 1257 <i>P. aeruginosa</i> ATCC 10145 <i>S. enteritidis</i> 5765 <i>E. faecalis</i> 29212 MS2 ($n \cdot 10^2$ и $n \cdot 10^4$ БОЕ/100 мл) ($n \cdot 10^5$ и $n \cdot 10^4$ ПФУ/100 мл) PV1 (1000 вирионов/мл) (1000 virions/mL) <i>Cryptosporidium</i> ооцисты ($5 \cdot 10^2$ ед./50 л) <i>Cryptosporidium</i> spp. ($5 \cdot 10^2$ units/50 L) <i>L. intestinalis</i> ($5 \cdot 10^2$ ед./50 л) ($5 \cdot 10^2$ units/50 L) <i>A. lumbricoides</i> ($5 \cdot 10^2$ ед./50 л) ($5 \cdot 10^2$ units/50 L)	Водопроводная вода, контаминированная микроорганизмами Tap water, contaminated with microorganisms	УФ-светодиоды UV-LED	254 254	25 40	100%-я инактивация (<i>E. coli</i> , <i>S. enteritidis</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>E. faecalis</i> , <i>PV1</i> , <i>L. intestinalis</i>) 100% inactivation (<i>E. coli</i> , <i>S. enteritidis</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>E. faecalis</i> , <i>PV1</i> , <i>L. intestinalis</i>) 100%-я инактивация (MS2 $n \cdot 10^2$ БОЕ/100 мл) 100% inactivation (MS2 $n \cdot 10^4$ ПФУ/100 ml) 3 (MS2 $n \cdot 10^4$ БОЕ/100 мл) 3 (MS2 $n \cdot 10^4$ ПФУ/100 ml) 4 (MS2 $n \cdot 10^4$ БОЕ/100 мл) 4 (MS2 $n \cdot 10^4$ ПФУ/100 ml) 100%-я инактивация (<i>A. lumbricoides</i> , <i>Cryptosporidium</i> ооцисты) 100% inactivation (<i>A. lumbricoides</i> , <i>Cryptosporidium</i> spp.)
12	Edirisinghe et al. [32]	2017	Шри-Ланка Sri Lanka	<i>M. fortuitum</i> <i>M. marinum</i>	Суспензия бактерий в концентрации 1–4 • 10 ⁵ КОЕ/мл Bacterial suspensions containing 1–4 • 10 ⁵ CFU/mL	УФ-лампы низкого давления LP UV lamps	– –	6 10 17	3 (60 с (sec) (<i>M. fortuitum</i>)) 3 (10 с (sec) (<i>M. marinum</i>)) 3 (30 с (sec) (<i>M. marinum</i>)) 3 (5 с (sec) (<i>M. fortuitum</i>)) 100%-я инактивация 30 с (<i>M. fortuitum</i>) 100% inactivation 30 sec (<i>M. fortuitum</i>) 100% инактивация 5 с (<i>M. marinum</i>) 100% inactivation 5 sec (<i>M. marinum</i>)

Продолжение Таблицы на стр. 110. / Continuation of the Table on pages 110.

Продолжение Таблицы. Начало на стр. 108. / Continuation of the Table. The beginning is on page 108.

№	Авторы Authors	Год Year	Страна Country	Микроорганизмы Microorganisms	Образцы Samples	Тип УФ-ламп UV lamp type	Длина волны, нм Wavelength, nm	Доза излучения, МДж/см ² UV-dose, MJ/cm ²	Результаты (величина уровня инактивации), Log Findings (inactivation), Log
13	Mbonimpa et al. [30]	2018	США USA	MS2 T4 (бактериофаг / bacteriophage) <i>E. coli</i> ATCC 15597 <i>E. coli</i> ATCC 11303	Чистая культура микроорганизмов Pure culture of microorganisms	Ртутные УФ- лампы среднего давления Medium-pressure mercury UV lamp Экцимерные лампы XeBr excimer lamp	297 297 310 310 320 282	100 200 100 120 60 60	6 (<i>E. coli</i>) 3.5 (MS2) 3.5 (MS2) 1.5 (T4) 0.3 (T4) 2 (MS2)
14	Zimmer- Thomas et al. [27]	2007	Канада Canada	<i>E. coli</i> O157:H7	Суспензия <i>E. coli</i> O157:H7 (10 ⁷ –10 ⁹ клеток/мл) <i>E. coli</i> O157:H7 suspension (10 ⁷ –10 ⁹ cells/ml)	УФ-лампы низкого давления LP UV lamps УФ-лампы среднего давления MP UV lamps	– – –	5 8 6.7 10.6	4.5 ± 0.2 5.1 ± 0.3 6.4 ± 0.2 6.6 ± 0.4
15	Pullerits et al. [19]	2020	Швеция Sweden	Среда для подсчёта гетеротрофных микроорганизмов Heterotrophic plate counts (HPCs) Колиформные микроорганизмы Coliforms <i>E. coli</i>	Питьевая вода со станции водоподготовки Drinking water from GöväInverket waterworks	УФ-лампы низкого давления LP UV lamps	254	250 400/600	0.53 ± 0.12 (среда для подсчёта гетеротрофных микроорганизмов) / (HPC) 0.43 ± 0.12 (среда для подсчёта гетеротрофных микроорганизмов) / (HPC) < 1 колоний/10 л (колиформные микроорганизмы) < 1 colonies/10 L (Coliforms) < 1 <i>E. coli</i>
16	Nedachin et al. [24]	2019	Россия Russia	PV(1) MS2	Дехлорированная водопроводная вода, контаминированная вирусами Dechlorinated tap water contaminated with viruses	УФ-светодиоды UV-LED	254 254 254	25 40 60	3 (PV1) 1 (MS2) 100%-я инактивация (PV1) 100% inactivation (PV1) 1.25 ± 0.25 • 10 ² КОЕ/мл (MS2) 1.25 ± 0.25 • 10 ² CFU/ml (MS2) 4 КОЕ/мл (MS2) 4 CFU/ml (MS2)
17	Hayes et al. [29]	2008	США USA	<i>M. avium</i> <i>M. intracellulare</i>	Суспензии микроорганизмов в концентрации 10 ⁶ КОЕ/мл Suspensions of microorganisms (10 ⁶ CFU/ml)	УФ-лампы низкого давления LP UV lamps	–	20	4 (<i>M. avium</i>) 4 (<i>M. intracellulare</i>)

Различные типы аденовирусов демонстрировали высокую устойчивость к УФ-облучению. Например, при воздействии УФ-ламп с мощностью излучения 120 мДж/см² и длиной волны 254 нм на пробу воды, содержащую аденовирусы в концентрации $1 \cdot 10^6$ БОЕ/мл, достигалась инактивация на уровне 2–3 Log [26]. Устойчивость легионелл разных типов ($1 \cdot 10^6$ КОЕ/мл) при воздействии УФ-ламп с мощностью излучения 0,5–2 мДж/см² и длиной волны 255–265 нм составила 4,4–4,8 Log [31].

Кишечная палочка не была показательной в отношении бактерицидного действия УФ-облучения, поскольку для его изучения использовались различные штаммы. Это объясняет широкий диапазон показателей инактивации: от 1,1 Log при облучении УФ-лампами мощностью 7 мДж/см² (штамм ATCC8739) [28] до 6,6 Log при облучении УФ-лампами мощностью 10,6 мДж/см² (штамм O157:H7) [27]. Степень инактивации колифагов MS2 зависела от мощности УФ-излучения – 1 Log (25 мДж/см²) и 4 Log (40 мДж/см²) [8, 24].

Таким образом, полученные результаты позволили установить, что устойчивость микроорганизмов к воздействию УФ-излучения различается и зависит как от исходной их концентрации в воде, так и от характеристик самого излучения (мощность, длина волны).

Заключение

Анализ доступных публикаций, посвящённых оценке эффективности УФ-излучения в отношении микробиологического загрязнения питьевой воды, показал относительно небольшую долю исследований, направленных на установление устойчивости яиц гельминтов и цист патогенных простейших к УФ-излучению. Широкий спектр изучаемых штаммов микроорганизмов затрудняет сравнительный анализ полученных результатов. Высокие показатели эффективности достигнуты при мощности УФ-ламп 25–40 мДж/см² и длине волны 254–267 нм. Применение УФ-излучения наиболее эффективно в отношении вирусов полиомиелита, синегнойной палочки, цист лямблий и некоторых штаммов кишечной палочки и колифагов. Однако следует учитывать исходную концентрацию микроорганизмов в обрабатываемой воде.

Таким образом, УФ-излучение может быть рекомендовано к применению в качестве дополнительного метода обеззараживания воды в централизованных системах питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения. Высокие показатели эффективности обеззараживания могут быть достигнуты при сочетании УФ-излучения и реагентных методов обеззараживания.

Литература

(п.п. 4–6, 9–23, 25–32 см. References)

- Жолдакова З.И., Тульская Е.А., Костюченко С.В., Ткачев А.А. Ультрафиолетовое обеззараживание как элемент многобарьерной схемы очистки воды для защиты от патогенов, устойчивых к хлорированию. *Гигиена и санитария*. 2017; 96(6): 531–5. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-6-531-535> <https://elibrary.ru/zapecd>
- Довлатов И.М. Факторы, влияющие на эффективность источников УФ излучения. *Инновации в сельском хозяйстве*. 2017; (2): 41–4. <https://elibrary.ru/zjzwrvg>
- Лопатин С.А., Кирилленко В.И., Муртузалиев М.А. Обеззараживание воды ультрафиолетовым облучением. *Актуальные проблемы военно-научных исследований*. 2021; (S4): 110–23. <https://elibrary.ru/dpqhpl>
- Бобоёров Р.А., Ульмасбаев А.Ш. Перспектива синергии ультрафиолетового излучения с методом коагуляции против патогенов. *Universum: технические науки*. 2021; (4–3): 84–6. <https://elibrary.ru/rapcxe>
- Рахманин Ю.А., Загайнова А.В., Артемова Т.З., Гипп Е.К., Кузнецова К.Ю., Курбатова И.В. и соавт. Определение унифицированных доз ультрафиолетового обеззараживания воды от бактериального, вирусного и паразитарного загрязнения. *Гигиена и санитария*. 2019; 98(12): 1342–8. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-12-1342-1348> <https://elibrary.ru/nuzein>
- Недачин А.Е., Дмитриева Р.А., Доскина Т.В., Долгин В.А. Сравнительная устойчивость полиовирусов, вируса гепатита А и их РНК к воздействию ультрафиолетового облучения. *Гигиена и санитария*. 2019; 98(11): 1240–4. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-11-1240-1244> <https://elibrary.ru/qoybhq>

References

- Zholdakova Z.I., Tul'skaya E.A., Kostyuchenko S.V., Tkachev A.A. Ultraviolet disinfection as an element of multi-barrier approach to the water treatment for the protection against chlorine-resistant pathogens. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian Journal)*. 2017; 96(6): 531–5. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-6-531-535> <https://elibrary.ru/zapecd> (in Russian)
- Dovlatov I.M. Factors affecting the efficiency of UV radiation sources. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2017; (2): 41–4. <https://elibrary.ru/zjzwrvg> (in Russian)
- Lopatin S.A., Kirilenko V.I., Murtuzaliev M.A. Water disinfection by ultraviolet irradiation. *Aktual'nye problemy voenno-nauchnykh issledovaniy*. 2021; (S4): 110–23. <https://elibrary.ru/dpqhpl> (in Russian)
- Zyara A.M., Torvinen E., Vejjalainen A.M., Heinonen-Tanski H. The effect of chlorine and combined chlorine/UV treatment on coliphages in drinking water disinfection. *J. Water Health*. 2016; 14(4): 640–9. <https://doi.org/10.2166/wh.2016.144>
- Zeng F., Cao S., Jin W., Zhou X., Ding W., Tu R., et al. Inactivation of chlorine-resistant bacterial spores in drinking water using UV irradiation, UV/Hydrogen peroxide and UV/Peroxymonosulfate: Efficiency and mechanism. *J. Clean. Prod.* 2020; 243: 118666. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118666>
- Wen G., Xu X., Zhu H., Huang T., Ma J. Inactivation of four genera of dominant fungal spores in groundwater using UV and UV/PMS: Efficiency and mechanisms. *Chem. Eng. J.* 2017; 328: 619–28. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.07.055>
- Boboevov R.A., Ul'masbaev A.Sh. Prospective of the synergy of ultraviolet radiation with the method of coagulation against pathogens. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2021; (4–3): 84–6. <https://elibrary.ru/rapcxe> (in Russian)
- Rakhmanin Yu.A., Zagaynova A.V., Artemova T.Z., Gipp E.K., Kuznetsova K.Yu., Kurbatova I.V., et al. Determination of standardized doses of ultraviolet disinfection of water from bacterial, viral and parasitic contamination. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian Journal)*. 2019; 98(12): 1342–8. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-12-1342-1348> <https://elibrary.ru/nuzein> (in Russian)
- Song K., Mohseni M., Taghipour F. Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review. *Water Res.* 2016; 94: 341–9. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.003>
- Beck S.E., Wright H.B., Hargy T.M., Larason T.C., Linden K.G. Action spectra for validation of pathogen disinfection in medium-pressure ultraviolet (UV) systems. *Water Res.* 2015; 70: 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.11.028>
- Li X., Cai M., Wang L., Niu F., Yang D., Zhang G. Evaluation survey of microbial disinfection methods in UV-LED water treatment systems. *Sci. Total Environ.* 2019; 659: 1415–27. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.344>
- Zou X.Y., Lin Y.L., Xu B., Cao T.C., Tang Y.L., Pan Y. et al. Enhanced inactivation of E. coli by pulsed UV-LED irradiation during water disinfection. *Sci. Total Environ.* 2019; 650(Pt. 1): 210–5. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.367>
- Nyangaresi P.O., Rathnayake T., Beck S.E. Evaluation of disinfection efficacy of single UV-C, and UV-A followed by UV-C LED irradiation on *Escherichia coli*, *B. spizizenii* and MS2 bacteriophage, in water. *Sci. Total Environ.* 2023; 859(Pt. 1): 160256. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160256>
- Paidalwar A.A., Khedkar I. Overview of water disinfection by UV technology – a review. *Int. J. Sci. Technol. Eng.* 2016; 2(09): 213–9. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30976.25608>
- Jin Y., Chen Z., Chen X., Huang P., Chen X., Ding R., et al. The drinking water disinfection performances and mechanisms of UVA-LEDs promoted by electrolysis. *J. Hazard. Mater.* 2022; 435: 129099. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129099>
- Luo X., Zhang B., Lu Y., Mei Y., Shen L. Advances in application of ultraviolet irradiation for biofilm control in water and wastewater infrastructure. *J. Hazard. Mater.* 2022; 421: 126682. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126682>
- Oh C., Sun P.P., Araud E., Nguyen T.H. Mechanism and efficacy of virus inactivation by a microplasma UV lamp generating monochromatic UV irradiation at 222 nm. *Water Res.* 2020; 186: 116386. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116386>
- Matsumoto T., Tatsuno I., Hasegawa T. Instantaneous water purification by deep ultraviolet light in water waveguide: *Escherichia coli* bacteria disinfection. *Water*. 2019; 11(5): 968. <https://doi.org/10.3390/w11050968>
- Pullerits K., Ahlinder J., Holmer L., Salomonsson E., Öhrman C., Jacobsson K., et al. Impact of UV irradiation at full scale on bacterial communities in drinking water. *npj Clean Water*. 2020; 3(1): 11. <https://doi.org/10.1038/s41545-020-0057-7>

20. Jarvis P., Autin O., Goslan E.H., Hassard F. Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LED) to full-scale drinking-water disinfection. *Water*. 2019; 11(9): 1894. <https://doi.org/10.3390/w11091894>
21. Blyth J., Templeton M., Court S.J., Luce C., Cairns W., Hazell L. Assessment of indigenous surrogate microorganisms for UV disinfection dose verification. *Water Environ. J.* 2021; 35(4): 1384–92. <https://doi.org/10.1111/wej.12722>
22. Gross A., Stangl F., Hoenes K., Sift M., Hessling M. Improved drinking water disinfection with UVC-LEDs for *Escherichia coli* and *Bacillus subtilis* utilizing quartz tubes as light guide. *Water*. 2015; 7(9): 4605–21. <https://doi.org/10.3390/w7094605>
23. Hokajärvi A.M., Pitkänen T., Meriläinen P., Kauppinen A., Matikka V., Kovanen S., et al. Determination of removal efficiencies for *Escherichia coli*, *Clostridial Spores*, and F-specific coliphages in unit processes of surface waterworks for QMRA applications. *Water*. 2018; 10(11): 1525. <https://doi.org/10.3390/w10111525>
24. Nedachin A.E., Dmitrieva R.A., Doskina T.V., Dolgin V.A. Comparative stability of poliovirus, hepatitis A virus and their RNA to the impact of ultraviolet radiation. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2019; 98(11): 1240–4. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-11-1240-1244> <https://elibrary.ru/goybhq> (in Russian)
25. Li G.Q., Wang W.L., Huo Z.Y., Lu Y., Hu H.Y. Comparison of UV-LED and low pressure UV for water disinfection: photoreactivation and dark repair of *Escherichia coli*. *Water Res.* 2017; 126: 134–43. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.09.030>
26. Baxter C.S., Hofmann R., Templeton M.R., Brown M., Andrews R.C. Inactivation of adenovirus types 2, 5, and 41 in drinking water by UV light, free chlorine, and monochloramine. *J. Environ. Eng.* 2007; 133(1): 95–103. <https://clck.ru/399QbF>
27. Zimmer-Thomas J.L., Slawson R.M., Huck P.M. A comparison of DNA repair and survival of *Escherichia coli* O157:H7 following exposure to both low- and medium-pressure UV irradiation. *J. Water Health.* 2007; 5(3): 407–15. <https://doi.org/10.2166/wh.2007.036>
28. Green A., Popović V., Pierscianowski J., Biancanello M., Warriner K., Koutchma T. Inactivation of *Escherichia coli*, *Listeria* and *Salmonella* by single and multiple wavelength ultraviolet-light emitting diodes. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 2015; 47: 353–61. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.03.019>
29. Hayes S.L., Sivaganesan M., White K.M., Pfäller S.L. Assessing the effectiveness of low-pressure ultraviolet light for inactivating *Mycobacterium avium* complex (MAC) microorganisms. *Lett. Appl. Microbiol.* 2008; 47(5): 386–92. <https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2008.02442.x>
30. Mbonimpa E.G., Blatchley E.R. 3rd, Applegate B., Harper W.F. Jr. Ultraviolet A and B wavelength-dependent inactivation of viruses and bacteria in the water. *J. Water Health.* 2018; 16(5): 796–806. <https://doi.org/10.2166/wh.2018.071>
31. Buse H.Y., Hall J.S., Hunter G.L., Goodrich J.A. Differences in UV-C LED inactivation of *Legionella pneumophila* Serogroups in Drinking Water. *Microorganisms.* 2022; 10(2): 352. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10020352>
32. Roshani Edirisinghe E.A., Anuruddhika Dissanayake D.R., Abayasekera C.L., Arulkanthan A. Efficacy of calcium hypochlorite and ultraviolet irradiation against *Mycobacterium fortuitum* and *Mycobacterium marinum*. *Int. J. Mycobacteriol.* 2017; 6(3): 311–4. https://doi.org/10.4103/ijmy.ijmy_88_17

Информация для РИНЦ:

Кирпиченкова Екатерина Васильевна, кандидат мед. наук, доцент каф. экологии человека и гигиены окружающей среды ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), 119991, Москва, Россия. E-mail: kirpichenkova_e_v@staff.sechenov.ru

Джикия Илья Зурабович, студент ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), 119991, Москва, Россия

Колодина Диана Викторовна, студентка ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), 119991, Москва, Россия

Онищенко Геннадий Григорьевич, доктор мед. наук, профессор, академик РАН, зав. каф. экологии человека и гигиены окружающей среды ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), 119991, Москва, Россия

Information about the authors:

Ekaterina V. Kirpichenkova, MD, PhD, Associate Professor of the Department of Ecology of human and hygiene of the environment of the I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), Moscow, 119991, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-7594-8336> E-mail: kirpichenkova_e_v@staff.sechenov.ru

Ilya Z. Dzhikeya, a student of the I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), Moscow, 119991, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0002-6613-6528>

Diana V. Kolodina, a student of the I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), Moscow, 119991, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-6832-0762>

Gennadiy G. Onishchenko, MD, PhD, DSci., Professor, Academician RAS, Head of the Department of human ecology and hygiene of the environment of the I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), Moscow, 119991, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-0135-7258>