

УДК 504.054

DOI 10.48612/ntp/59mr-8zgt-e4n9

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ПРИМЕНЕНИЯ ХЛОРНЫХ РЕАГЕНТОВ В ВОДОПОДГОТОВКЕ

Д. А. КОЗЫРЬ¹, Д. А. МАКЕЕВА²

¹Севастопольский государственный университет,
Российская Федерация, г. Севастополь

²Российский государственный университет нефти и газа
(научно-исследовательский университет) имени И. М. Губкина,
Российская Федерация, г. Москва

E-mail: kozurdmirii@mail.ru, daria.makejeva@mail.ru

В условиях потенциальных чрезвычайных ситуаций и современных требований по снижению экологических рисков для населения требуется выбор наиболее безопасного и эффективного реагента для обеззараживания воды. В статье представлены результаты оценки рисков применения двух реагентов для обеззараживания воды – гипохлорита натрия и диоксида хлора. Анализ проведён с применением реестра и матрицы рисков по таким категориям, как обращение с реагентом, влияние на здоровье персонала, опасность при чрезвычайных ситуациях и вредоносность после очистки воды.

Установлено, что доля событий с критическими последствиями и высокой/очень высокой вероятностью для гипохлорита натрия составляет 21 %, для диоксида хлора – 29 %. Гипохлорит натрия предпочтительнее с точки зрения логистики и эксплуатационной простоты (готовый реагент, не требующий синтеза на месте), однако его применение связано с риском образования канцерогенных веществ. Исследования водопроводной воды выявили повышенное содержание остаточного активного хлора, тем не менее расчётный канцерогенный и неканцерогенный риск для здоровья населения соответствуют низкому уровню.

Для снижения содержания остаточного хлора и тригалогенметанов рекомендуется применять при обеззараживании комбинацию гипохлорита натрия с ультрафиолетовым излучением. Такой подход, соответствующий наилучшим доступным технологиям, снижает расход реагента, обеспечивает пролонгированный эффект обеззараживания и уменьшает образование хлорорганических соединений.

Ключевые слова: экологический риск, обеззараживание воды, гипохлорит натрия, диоксид хлора, канцерогенный риск, остаточный активный хлор.

ASSESSMENT OF THE ENVIRONMENTAL RISK OF USING CHLORINE REAGENTS IN WATER TREATMENT

D. A. KOZYR¹, D. A. MAKEEVA²

¹ Sevastopol State University,
Russian Federation, Sevastopol

² Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Research University),
Russian Federation, Moscow

E-mail: kozurdmirii@mail.ru, daria.makejeva@mail.ru

Potential emergencies and current requirements to reduce environmental risks to the population require the selection of the safest and most effective water disinfectant. This article presents the results of a risk assessment for the use of two water disinfectant reagents—sodium hypochlorite and chlorine dioxide. The analysis was conducted using a risk register and matrix for categories such as reagent handling, personnel health impacts, hazards in emergencies, and harmfulness after water treatment.

It was found that the proportion of events with critical consequences and high/very high probability is 21 % for sodium hypochlorite and 29 % for chlorine dioxide. Sodium hypochlorite is preferable from a logistical and operational standpoint (it is a ready-made reagent that does not require on-site synthesis); however, its use is associated with the risk of forming carcinogens. Tap water tests revealed elevated levels of residual active chlorine; however, the estimated carcinogenic and non-carcinogenic risks to public health are low.

To reduce residual chlorine and trihalomethanes, a combination of sodium hypochlorite and ultraviolet radiation is recommended for disinfection. This approach, consistent with best available technologies, reduces reagent consumption, provides a prolonged disinfection effect, and reduces the formation of organochlorine compounds.

Keywords: environmental risk, water disinfection, sodium hypochlorite, chlorine dioxide, carcinogenic risk, residual active chlorine.

Введение

Обеззараживание питьевой воды является обязательным этапом водоподготовки, направленным на предотвращение распространения инфекционных заболеваний. Хлорирование (использование газообразного хлора, хлорной извести, диоксида хлора и гипохлорита натрия), благодаря своей эффективности, пролонгированному действию и экономичности, остается наиболее распространенным методом обеззараживания воды в мире [1].

Применение хлора сопряжено с рядом рисков – это экологические риски, связанные с образованием и попаданием в окружающую среду побочных продуктов дезинфекции, а также риски техногенного характера, обусловленные хранением и транспортировкой больших объемов токсичного хлора. Хлор, взаимодействуя с природными органическими веществами, содержащимися в воде, образует галогенсодержащие соединения. Эти соединения являются ксенобиотиками, то есть чужеродными для живых организмов, и эволюционно выработанные механизмы защиты от них отсутствуют. Хлорирование с дехлорированием лишено этого недостатка, но его стоимость высока.

Оценка остаточной токсичности является критически важным параметром для определения безопасности процессов водоподготовки. Образование хлорсодержащих, бромсодержащих, йодсодержащих и азотсодержащих побочных продуктов дезинфекции, а также оксианионов хлора и других токсичных побочных продуктов существенно влияет на токсикологические показатели воды, очищенной с помощью окислителей на основе хлора. На химические и биологические свойства этих побочных продуктов влияют природа загрязняющего вещества, доза окислителя на основе хлора, химический состав сточной воды, время контакта и pH раствора [2].

Проблема усугубляется тем, что хлор в остаточных концентрациях может оказывать стимулирующее влияние на некоторые водные патогены, способствуя их персистенции в водной среде. При определенных концентрациях и времени воздействия дезинфектанты не убивают, а стимулируют бактерии [3]. Воздействие остаточного хлора приводит к необратимым

изменениям в составе генов устойчивости к антибиотикам. Хлор способствует коселекции – выживанию бактерий, которые устойчивы и к хлору, и к антибиотикам [4]. Сброс хлорированных сточных вод влияет на водные объекты – они снижают разнообразие микробных сообществ в речном перифитоне [5].

Процесс окисления диоксидом хлора приводит преимущественно к формированию нестабильных продуктов трансформации. При этом деструкция природных органических веществ под действием данного реагента сопровождается генерацией существенных объемов биоразлагаемых органических соединений, в частности альдегидов и карбоновых кислот. Наличие данных субстратов создает предпосылки для вторичного микробного роста, что представляет собой серьезный риск для сохранения качества воды на этапах ее длительного транзита по трубопроводам [6]. Использование диоксида хлора приводит к образованию нежелательных токсичных побочных продуктов, таких как хлорит (ClO_2^-) – загрязняющее вещество, которое представляет огромную опасность из-за того, что снижает количество эритроцитов в крови человека [7]. К недостаткам процессов с использованием диоксида хлора относятся: низкая химическая стабильность ClO_2 , поскольку он разлагается на Cl_2 и O_2 под воздействием инсоляции или тепла, а также невозможность его хранения в коммерческих целях из-за высокого риска взрыва при концентрации в воздухе выше 10 % [8].

Использование физических способов очистки воды от патогенов гарантирует её вирусную и паразитарную безопасность, а также исключает образование опасных хлорорганических веществ. Тем не менее, эффективность данных методов напрямую связана со степенью прозрачности жидкости, а при малых дозах ультрафиолета возможна реактивация микроорганизмов. Если микробная обсеменённость превышает 1000 клеток, ультрафиолетовое облучение следует дополнять химическими реагентами. Кроме того, при определённой мощности УФ-излучения существует вероятность трансформации химических соединений в воде с образованием токсичных и мутагенных продуктов [9, 10].

Применение озона для предварительной обработки природных вод сопряжено с серьезными рисками. Взаимодействие озона с растворенными органическими веществами инициирует образование токсичных соединений, зачастую более опасных, чем продукты хлорирования. В дополнение к этому, недостаточная эффективность озонирования в отношении некоторых микроорганизмов не исключает развития биокоррозии и накопления в воде канцерогенных структур, производных от исходного органического субстрата [11, 12]. С точки зрения эксплуатационной безопасности, озон характеризуется более высокой токсичностью по сравнению с хлором, интенсифицирует коррозионные процессы в оборудовании и является взрывоопасным веществом. Применение данного реагента требует привлечения высококвалифицированного персонала и реализации дополнительных мер по защите обслуживающего персонала и предупреждению аварийных ситуаций [13].

В настоящее время активно исследуются технологические решения для предотвращения образования хлорорганических соединений. Одним из таких методов является совместное использование свободного хлора и ультрафиолетового излучения.

Сочетание свободного хлора и ультрафиолетового излучения приводит к образованию высокореактивных частиц, которые способны удалять из воды широкий спектр загрязняющих веществ и потенциально снижать образование диоксинов по сравнению с использованием только свободного хлора [14, 15].

Помимо химической опасности дезинфектантов, существует значительный экологический риск, связанный с использованием жидкого (газообразного) хлора как опасного химического вещества. Транспортировка многотонных запасов хлора через населенные пункты и их хранение на станциях создают угрозу возникновения чрезвычайных ситуаций с выбросом токсичного газа. Для обеспечения техногенной и экологической безопасности возможна замена жидкого хлора на альтернативные обеззараживающие агенты, в частности, на гипохлорит натрия [1].

Цель исследования: оценка экологического риска применения хлорных реагентов для повышения эффективности и безопасности водоподготовки.

Материалы

и методы исследования

Объект исследования – экологические риски при хлорировании воды. Оценка экологического риска выполнялась в соответствии с ГОСТ Р 51901.22-2012 «Менеджмент риска. Реестр риска. Правила построения»¹, ГОСТ Р 58771-2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска»². Характеристика риска для здоровья населения выполнена в соответствии с Р 2.1.10.3968-23 «Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания»³. Для оценки экологических рисков при обеззараживании хлором были выполнены экспериментальные исследования содержания остаточного хлора в водопроводной воде йодометрическим методом.

Результаты исследования

На основании ГОСТ Р 51901.22-2012 «Менеджмент риска. Реестр риска. Правила построения» проведена оценка рисков для реагентного хозяйства на основе гипохлорита натрия (ГХН) и диоксида хлора (ДХ). Исходные реагенты различаются по способу поступления: электролитический ГХН доставляется в виде готового водного раствора, а ДХ синтезируется на станции водоподготовки в реакторе при смешивании NaClO_2 и HCl . В рамках работы составлен реестр из 14 рисков, которые возможны при эксплуатации очистных сооружений. Анализ проводился по следующим категориям рисков:

1. Обращение с реагентом и применение (хранение реагента на станции водочистки, перевозка реагента до станции водочистки, добавление реактива в воду).

2. Влияние реагента на здоровье сотрудников на предприятии (попадание реагента через дыхательные пути, попадание реагента на кожу сотрудников, попадание реактива на слизистую, попадание реактива в организм при приеме пищи).

3. Опасность хранения реактива при чрезвычайной ситуации (ЧС) (в случае пожара, в случае наводнения, в случае землетрясения, в случае ведения боевых действий рядом с местами хранения реагента).

4. Вредоносность реактива после очистки воды (в случае не контролируемой передозировки реагента, при регулярном употреблении воды очищенной реагентом,

¹ ГОСТ Р 51901.22-2012. Менеджмент риска. Реестр риска. Правила построения. Введ. 2013-09-01. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.

² ГОСТ Р 58771-2019. Менеджмент риска. Технологии оценки риска. Введ. 2020-04-01. М.: Стандартинформ, 2019. 52 с.

³ Р 2.1.10.3968-23. Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания: утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. М., 2023.

вероятность канцерогенного эффекта в период употребления воды с реагентом).

В работе применялась матричная оценка риска. Каждому опасному событию присваивался балл вероятности (P) – от 1 балла (низкая) до 5 баллов (очень высокая), а также балл последствий (W) – от 1 балла (несущественные последствия) до 5 баллов (критический ущерб). Итоговое значение риска (R) рассчитывалось как произведение полученных баллов [16].

Реестры рисков, с событиями, имеющими наибольший риск представлены в табл. 1, 2.

Полученные результаты оценки рисков при обеззараживании воды ГХН и ДХ представлены в виде матрицы рисков (ГОСТ Р 58771-2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска») (рис. 1, 2).

Для оценки экологических рисков при обеззараживании хлором были выполнены экспериментальные исследования содержания остаточного хлора в водопроводной воде йодометрическим методом. Метод основан на взаимодействии остаточного хлора с иодидом калия. В качестве материала для исследования использовалась вода, взятая из водопровода северной стороны г. Севастополя. Обеззараживание осуществлялось гипохлоритом натрия. В результате экспериментальных исследований установлено, что концентрация остаточного хлора в водопроводной воде составляла 2,6 мг/л и превышает ПДК. Согласно СанПиН 1.2.3685-21, остаточный связанный хлор в питьевой воде должен находиться в пределах 0,8–1,2 мг/л ⁴.

Таблица 1. Реестр рисков с высокой вероятностью реализации и ущерба при применении гипохлорита натрия (ГХН)

№ риска	Группа типов риска	Наименование опасного события (риска)	Описание опасного события (риска)	P, баллы	W, баллы	R
5	Влияние на здоровье сотрудников на предприятии	Попадание реагента на кожу сотрудников	Контакт возможен при обслуживании насосов, замене уплотнений, отборе проб	3	5	15
11	Опасность хранения реактива при ЧС	В случае ведения боевых действий рядом с местами хранения реагента	Есть вероятность разгерметизации и пролива ГХН	4	5	20
12	Вредоносность реактива после очистки воды	Вероятность канцерогенного эффекта в период употребления воды с реагентом	При обеззараживании воды хлором возможно превышение допустимых нормативов по содержанию тригалогенметанов, которые относятся к группе канцерогенных веществ.	4	5	20

Таблица 2. Реестр рисков с высокой вероятностью реализации и ущерба при применении диоксида хлора (ДХ)

№ риска	Группа типов риска	Наименование опасного события (риска)	Описание опасного события (риска)	P, баллы	W, баллы	R
4	Влияние реагента на здоровье сотрудников на предприятии	Попадание реагента через дыхательные пути	Утечка аэрозоля HCl	3	5	15
5		Попадание реагента на кожу сотрудников	Возможны проливы при подсоединении шлангов, при снятии манометров	4	5	20
8	Опасность хранения реактива при ЧС	В случае пожара	При пожаре окислитель (NaClO ₂) будет поддерживать горение, разлагаясь с выделением токсичного хлора и тепла.	3	5	15

⁴ СанПиН 1.2.3685-21: Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания:

утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2. М., 2021. 470 с.

№ риска	Группа типов риска	Наименование опасного события (риска)	Описание опасного события (риска)	P, баллы	W, баллы	R
11		В случае ведения боевых действий рядом с местами хранения реагента	Одновременная разгерметизация всех емкостей, смешение реагентов с образованием взрывоопасного диоксида хлора прямо в воздухе	4	5	20

Вероятность	Очень высокая					
	Высокая					11, 12
	Средняя		4	2,13	10	5
	Низкая	11	1, 6	7		
	Очень низкая	14	3	8,9		
		несущественные	малосущественные	существенные	значительные	критические
	Последствия/Ущерб					

Рис. 1. Матрица рисков при обращении с реагентом ГХН
(1–14 – опасные события в соответствии с реестром риска)

Прогнозирование содержания тригалогенметанов (хлороформ, дибромхлорметан и дихлорбромметан) в водопроводной воде выполнялось с помощью регрессионных моделей. В этих моделях расчётная концентрация тригалогенметанов (Y) зависит от экспериментально определённого количества остаточного свободного хлора (X) [17]:

$$Y(\text{хлороформ}) = 0,023445 + 0,019443 \cdot \log(X),$$

$$Y(\text{дибромхлорметан}) = 0,033443 + 0,051431 \cdot \log(X),$$

$$Y(\text{дихлорбромметан}) = 0,024353 + 0,027236 \cdot \log(X).$$

В соответствии с Р 2.1.10.3968-23 «Состояние здоровья населения в связи с состоянием окружающей среды и условиями проживания населения. Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания», выполнен расчет риска развития неканцерогенных и канцерогенных эффектов. Результаты расчета риска представлены в табл. 3.

Вероятность	Очень высокая					
	Высокая					5, 11
	Средняя			6	13	4, 8
	Низкая		3	2	12	1, 10
	Очень низкая		14		7	9
		несущественные	малосущественные	существенные	значительные	критические
	Последствия/Ущерб					

Рис. 2. Матрица рисков при обращении с реагентом ДХ
(1 – 14 – опасные события в соответствии с реестром риска)

Таблица 3. Результаты расчета риска

Показатель	Остаточный хлор	Хлороформ (CHCl ₃)	Дибромхлорметан (CHBr ₂ Cl)	Бромдихлорметан (CHBrCl ₂)
Потенциальная доза поступления вещества, мг/кг-день	0,0712	0,00037	0,000643	0,000419
Коэффициент опасности развития неканцерогенных эффектов (HQ)	0,712	0,037	–	–
Индивидуальный пожизненный канцерогенный риск (CR)	–	0,0000023	0,000054	0,000026

Обсуждение

В ходе исследований установлено, что вероятность опасных событий при обращении с ГХН низкая, последствия существенные. ГХН хранится в специальных резервуарах, оснащенных ваннами в случае разлива, перевозится в специально оборудованной цистерне для химических реактивов и подается через насосы дозаторы в емкости с водой (опасные события 1-3). Вероятность влияния реагента на здоровье сотрудников на предприятии при обслуживании насосов, замене уплотнений, отборе проб – средняя, т.к. возможно попадание реагента на кожу сотрудников (опасное событие 5). В случае ведения боевых действий рядом с местами хранения реагента есть высокая вероятность разгерметизации и пролива ГХН, при этом последствия будут критические (опасное событие 11). Вероятность канцерогенного эффекта в период употребления воды с реагентом высокая, последствия критические (опасное событие 12).

Опасные события со средней вероятностью и критическими последствиями возникают при обращении с реагентами ДХ, а также при ЧС (воздействие аэрозоля HCl на сотрудников при утечке (опасные события 4, 8). В случае ведения боевых действий рядом с местами хранения реагента есть высокая вероятность разгерметизации емкостей, смешения реагентов с образованием взрывоопасного диоксида хлора прямо в воздухе, что приведёт к критическим последствиям (опасное событие 5). Высокой вероятностью и критическими последствиями также характеризуются возможные проливы реагентов при подсоединении шлангов, при снятии манометров (опасное событие 11). Низкой вероятностью и критическими последствиями характеризуется нарушение режима обработки воды с образованием побочных продуктов (хлориты, хлораты) (опасное событие 14).

События, которые приведут к критическим последствиям, а также характеризуются

высокой и очень высокой вероятностью при использовании ГХН составляют 21 % и при использовании ДХ составляют 29 % от общего числа проанализированных событий.

Гипохлорит натрия лучше, чем диоксид хлора в логистике и эксплуатационной простоте – это один готовый реагент, который не требует сложного оборудования для синтеза на месте. Однако он образует канцерогенные вещества.

В ходе исследований определено высокое содержание остаточного активного хлора в водопроводной воде при её обеззараживании ГХН на очистных сооружениях. Проанализировав полученные данные установлено, что коэффициент опасности развития неканцерогенных эффектов остаточного хлора и хлороформа соответствует низкому уровню риска. Индивидуальные пожизненные канцерогенные риски хлороформа, дибромхлорметана, бромдихлорметана также соответствуют низкому уровню риска.

Для уменьшения содержания остаточного хлора и тригалогенметанов предлагается выполнять обеззараживание очищенных вод гипохлоритом натрия совместно с УФ-облучением.

В соответствии с ИТС 10-2019 «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов» обеззараживание гипохлоритом натрия на малых и сверхмалых объектах соответствует наилучшим доступным технологиям.⁵

Обеззараживание очищенных вод гипохлоритом натрия совместно с УФ-облучением представляет собой эффективный метод, который сочетает преимущества обоих процессов. Использование УФ-облучения позволяет уничтожить бактерии и микроорганизмы в воде, а обработка гипохлоритом натрия может обеспечить пролонгированный эффект обеззараживания.

⁵ ИТС 10-2019. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов. М.: Росстандарт, 2019. 248 с. утв.

Приказом Росстандарта от 12.12.2019 № 2981. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564068889>

Для уменьшения содержания остаточного хлора и тригалогенметанов предлагается выполнять обеззараживание очищенных вод гипохлоритом натрия совместно с УФ-излучением. При этом снизится расход гипохлорита натрия и соответственно снизится содержание остаточного активного хлора в водопроводной воде. Сочетание свободного хлора и ультрафиолетового излучения приводит к образованию высокореактивных частиц, которые способны удалять из воды широкий спектр загрязняющих веществ и обеспечивать снижение концентрации тригалогенметанов и других хлорорганических соединений по сравнению с использованием только свободного хлора.

Выводы

1. Проведённая оценка рисков с использованием реестра и матрицы по категориям (обращение и применение, влияние на здоровье персонала, опасность при чрезвычайных ситуациях, экотоксичность после очистки) показала, что доля событий с критическими последствиями и высокой/очень высокой вероятностью составляет 21 % для гипохлорита натрия (ГХН) против 29 % для диоксида хлора (ДХ). Несмотря на преимущества ГХН (готовый реагент, простота логистики, отсутствие сложного синтеза на месте), его применение связано с риском образования канцерогенных побочных продуктов.

Список литературы

1. Скрыбин А. Ю. Ротация жидкого хлора на гипохлорит как решение проблемы техногенной и экологической безопасности при обеззараживании воды // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2022. № 3 (41). С. 78–81. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rotatsiya-zhidkogo-hlora-na-gipohlorit-kak-reshenie-problemy-tehnogennoy-i-ekologicheskoy-bezopasnosti-pri-obezzarazhivanii-vody> (дата обращения: 15.04.2026).

2. Toxicological aspect of water treated by chlorine-based advanced oxidation processes: A review / I. Sánchez-Montes, G. O. S. Santos, A. J. dos Santos [et al.]. *Science of the Total Environment*, 2023, vol. 878, P. 163047. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163047>.

3. Beneficial or harmful: Time-dependent hormesis induced by typical disinfectants and their mixtures with toxicological interaction / M. T. Tao, S. S. Liu, Z. W. Gu [et al.]. *Science of the Total Environment*, 2023, vol. 904, pp. 167204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167204>.

4. Residual chlorine persistently changes antibiotic resistance gene composition and increases the risk of antibiotic resistance in sewer

2. Экспериментальными исследованиями водопроводной воды северной стороны г. Севастополя установлено превышение санитарных нормативов по содержанию остаточного хлора, а также низкий уровень экологического риска остаточного хлора и тригалогенометанов. Коэффициенты опасности развития не канцерогенных эффектов остаточного хлора (0,712) и хлороформа (0,037) соответствуют низкому уровню риска. Индивидуальные пожизненные канцерогенные риски хлороформа ($2,3 \cdot 10^{-6}$), дибромхлорметана ($5,4 \cdot 10^{-5}$), бромдихлорметана ($2,6 \cdot 10^{-5}$) также соответствуют низкому уровню риска.

3. Для уменьшения содержания остаточного хлора и тригалогенметанов предлагается выполнять обеззараживание очищенных вод гипохлоритом натрия совместно с УФ-облучением. При этом снизится расход гипохлорита натрия и соответственно снизится содержание остаточного активного хлора в водопроводной воде. УФ-излучение эффективно уничтожает микроорганизмы за счёт повреждения их ДНК и РНК, а хлор обеспечивает пролонгированный дезинфицирующий эффект. Их сочетание позволяет достичь более высокой общей эффективности обеззараживания по сравнению с использованием каждого метода в отдельности.

systems / J. Zhang, Z. Xu, W. Chu [et al.]. *Water Research*, 2023, vol. 245, pp. 120635. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120635>.

5. Impacts of chlorine disinfection of municipal sewage effluent on receiving rivers: Changes in organic matter and microbial communities / D. Su, W. Ben, B. W. Strobel [et al.]. *Journal of Hazardous Materials*, 2025, vol. 492, pp. 138232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138232>.

6. Reactivity of natural organic matter fractions with chlorine dioxide and ozone / J. Swietlik, A. Dabrowska, U. Raczek-Stanislawiak [et al.]. *Water Research*, 2004, vol. 38, issue 3, pp. 547–558.

7. Influence of drinking water treatments on chlorine dioxide consumption and chlorite/chlorate formation / S. Sorlini, F. Gialdini, M. Biasibetti [et al.]. *Water Research*, 2014, vol. 54, pp. 44–52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.038>.

8. Concentration-dependence of the explosion characteristics of chlorine dioxide gas / R. Jin, S. Hu, Y. Zhang [et al.]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 166, pp. 842–847. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.124>.

9. Гигиеническая эффективность ультрафиолетового обеззараживания воды в

централизованных системах питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения (систематический обзор) / Е. В. Кирпиченкова, И. З. Джикия, Д. В. Колодина [и др.] // Гигиена и санитария. 2024. Т. 103, № 2. С. 104–112. DOI: <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-2-104-112>.

10. Попова Т. Ю., Головин В. Л., Волкова В. Н. Экологизация обработки природных вод, содержащих растворенные органические вещества // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32, № 4. С. 400–408. DOI: [10.22363/2313-2310-2024-32-4-400-408](https://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-4-400-408).

11. Treatment Features of High-Color Natural Waters / V. L. Golovin, T. Y. Popova, P. V. Medved [et al.]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, vol. 666, P. 042039. DOI: [10.1088/1755-1315/666/4/042039](https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/4/042039).

12. Optimizing ozone treatment for pathogen removal and disinfection by-product control for potable reuse at pilot-scale / Leticia Reggiane de Carvalho Costa, Lin Li, Laura Haak [et al.]. Chemosphere, 2024, vol. 364, p. 143128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143128>.

13. Per- and polyfluoroalkyl substances in source and treated drinking waters of The United States / S. Boone, C. Vigo, T. J. Boone [et al.]. Science of the Total Environment, 2019, vol. 653, pp. 359–369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.245>.

14. Feng Y., Smith D. W., Bolton J. R. Photolysis of aqueous free chlorine species (HOCl and OCl⁻) with 254 nm ultraviolet light. Journal of Environmental Engineering and Science, 2007, vol. 6, issue 3, pp. 277–284. DOI: <https://doi.org/10.1139/s06-052>.

15. Khajouei G., Finklea H. O., Lin L.-Sh. UV/chlorine advanced oxidation processes for degradation of contaminants in water and wastewater: A comprehensive review. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, vol. 10, issue 3. P. 107508. DOI: [10.1016/j.jece.2022.107508](https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107508).

16. Козырь Д. А. Оценка экологического риска при обращении с отходами недропользования // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2024. Т. 13, № 4 (68). С. 244–251.

17. Assessing efficiency of pre-ammonization aimed at reducing carcinogenic risks caused by trihalomethanes in drinking water / L. A. Deryabkina, B. I. Marchenko, N. K. Plugotarenko [et al.]. Health Risk Analysis, 2020, issue 3, pp. 70–77. DOI: <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.08.eng>.

References

1. Scriabin A. Y. Rotatsiya zhidkogo khloro na gipokhlorit kak reshenie problemy tekhnogennoy i ekologicheskoy bezopasnosti pri obezzarazhivanii vody [Rotation of liquid chlorine to hypochlorite as a solution to the problem of technogenic and environmental safety in water disinfection]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya*, 2022, vol 3 (41), pp. 78–81. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rotatsiya-zhidkogo-hloro-na-gipokhlorit-kak-reshenie-problemy-tehnogennoy-i-ekologicheskoy-bezopasnosti-pri-obezzarazhivanii-vody> (in Russ.)

2. Toxicological aspect of water treated by chlorine-based advanced oxidation processes: A review / I. Sánchez-Montes, G. O. S. Santos, A. J. dos Santos [et al.]. Science of the Total Environment, 2023, vol. 878, P. 163047. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163047>.

3. Beneficial or harmful: Time-dependent hormesis induced by typical disinfectants and their mixtures with toxicological interaction / M. T. Tao, S. S. Liu, Z. W. Gu [et al.]. Science of the Total Environment, 2023, vol. 904, pp. 167204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167204>.

4. Residual chlorine persistently changes antibiotic resistance gene composition and increases the risk of antibiotic resistance in sewer systems / J. Zhang, Z. Xu, W. Chu [et al.]. Water Research, 2023, vol. 245, pp. 120635. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120635>.

5. Impacts of chlorine disinfection of municipal sewage effluent on receiving rivers: Changes in organic matter and microbial communities / D. Su, W. Ben, B. W. Strobel [et al.]. Journal of Hazardous Materials, 2025, vol. 492, pp. 138232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138232>.

6. Reactivity of natural organic matter fractions with chlorine dioxide and ozone / J. Swietlik, A. Dabrowska, U. Raczek-Stanislawiak [et al.]. Water Research, 2004, vol. 38, issue 3, pp. 547–558.

7. Influence of drinking water treatments on chlorine dioxide consumption and chlorite/chlorate formation / S. Sorlini, F. Gialdini, M. Biasibetti [et al.]. Water Research, 2014, vol. 54, pp. 44–52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.038>.

8. Concentration-dependence of the explosion characteristics of chlorine dioxide gas / R. Jin, S. Hu, Y. Zhang [et al.]. Journal of Hazardous Materials, 2009, vol. 166, pp. 842–847. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.124>.

9. Gигиеническая эффективность ультрафиолетового обеззараживания воды в централизованных системах питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения [Hygienic efficiency of ultraviolet disinfection of water in centralized

drinking and household water supply systems (a systematic review)] / Ye. V. Kirpichenkova, I. Z. Dzhikiya, D. V. Kolodina [et al.]. *Gigiyena i sanitariya*, 2024, vol. 103, issue 2, pp. 104–112. DOI: <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-2-104-112>. (in Russ.)

10. Popova T. Yu., Golovin V. L., Volkova V. N. Ekologizatsiya obrabotki prirodnkh vod, sodержashchikh rastvorennye organicheskie veshchestva [Ecologization of natural water treatment containing dissolved organic substances]. *Vestnik Rossiyskogo universiteta družby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2024, vol. 32, issue 4, pp. 400–408. DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-4-400-408. (in Russ.)

11. Treatment Features of High-Color Natural Waters / V. L. Golovin, T. Y. Popova, P. V. Medved [et al.]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 666, P. 042039. DOI: 10.1088/1755-1315/666/4/ 042039.

12. Optimizing ozone treatment for pathogen removal and disinfection by-product control for potable reuse at pilot-scale / Leticia Reggiane de Carvalho Costa, Lin Li, Laura Haak [et al.]. *Chemosphere*, 2024, vol. 364, p. 143128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143128>.

13. Per- and polyfluoroalkyl substances in source and treated drinking waters of The United

States / S. Boone, C. Vigo, T. J. Boone [et al.]. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 653, pp. 359–369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.245>.

14. Feng Y., Smith D. W., Bolton J. R. Photolysis of aqueous free chlorine species (HOCl and OCl⁻) with 254 nm ultraviolet light. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2007, vol. 6, issue 3, pp. 277–284. DOI: <https://doi.org/10.1139/s06-052>.

15. Khajouei G., Finklea H. O., Lin L.-Sh. UV/chlorine advanced oxidation processes for degradation of contaminants in water and wastewater: A comprehensive review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, vol. 10, issue 3. P. 107508. DOI: 10.1016/j.jece.2022.107508.

16. Kozyr D. A. Otsenka ekologicheskogo riska pri obrashchenii s otkhodami nedropolzovaniya [Assessment of environmental risk in the management of subsurface use waste]. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus*, 2024, issue 13, vol. 4 (68), pp. 244–251. (in Russ.)

17. Assessing efficiency of pre-ammonization aimed at reducing carcinogenic risks caused by trihalomethanes in drinking water / L. A. Deryabkina, B. I. Marchenko, N. K. Plugo-tarenko [et al.]. *Health Risk Analysis*, 2020, issue 3, pp. 70–77. DOI: <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.08.eng>.

Козырь Дмитрий Александрович,
Севастопольский государственный университет,
Российская Федерация, г. Севастополь
кандидат технических наук, доцент
e-mail: kozurdmittii@mail.ru

Kozyr Dmitry Alexandrovich
Sevastopol State University,
Russian Federation, Sevastopol
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
e-mail: kozurdmittii@mail.ru

Макеева Дарья Александровна,
Российский государственный университет нефти и газа (научно-исследовательский университет)
имени И. М. Губкина,
Российская Федерация, г. Москва
кандидат технических наук, доцент
e-mail: daria.makejeva@mail.ru

Makeeva Darya Alexandrovna
Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Scientific Research University),
Russian Federation, Moscow
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
e-mail: daria.makejeva@mail.ru