

Лобанова Полина Сергеевна, Кафедра ООСРИПР,
Институт экосистем бизнеса и креативных индустрий, УГНТУ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ХЛОРИРОВАНИЯ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ

Аннотация. Хлорирование является одним из наиболее распространенных и эффективных методов обеззараживания питьевой воды, однако, взаимодействие хлора с органическими веществами, присутствующими в источнике, приводит к образованию побочных продуктов хлорирования (ППХ), таких как тригалометаны (ТГМ) и галоуксусные кислоты (ГУК). Данная статья рассматривает актуальность проблемы образования ППХ, анализирует факторы, влияющие на их концентрацию, оценивает риски для здоровья человека и окружающей среды, а также обсуждает стратегии снижения их образования. Особое внимание уделяется современным методам мониторинга и прогнозирования ППХ, а также перспективным технологиям водоподготовки, направленным на минимизацию образования данных соединений.

Ключевые слова: Хлорирование, побочные продукты (ПП), тригалометаны (ТГМ), галоуксусные кислоты (ГУК), мониторинг, качество воды, риск, методы очистки.

Для цитирования: Исследование побочных продуктов хлорирования питьевой воды / П.С. Лобанова, – 2025

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение населения качественной питьевой водой является одной из важнейших задач общественного здравоохранения. Хлорирование остается одним из самых эффективных способов уничтожения патогенных микроорганизмов, обеспечивая эпидемиологическую безопасность воды. Однако, с другой стороны, хлорирование приводит к образованию широкого спектра побочных продуктов, которые могут представлять серьезную опасность для здоровья человека при длительном воздействии. Концентрация ППХ в питьевой воде регулируется национальными и международными стандартами, однако, достижение требуемых уровней является сложной задачей, требующей постоянного мониторинга и внедрения эффективных стратегий снижения. Целью данного исследования является анализ рисков, связанных с образованием ППХ, оценка современных методов мониторинга и прогнозирования, а также обзор передовых технологий водоподготовки для минимизации образования этих нежелательных соединений.

Образование ППХ является сложным процессом, зависящим от ряда факторов, основными из которых являются природные органические вещества (ПОВ), такие как гуминовые и фульвокислоты, являются основными предшественниками ППХ. Чем выше концентрация и реакционная способность ПОВ, тем больше образуется ППХ. Чем выше доза хлора, тем больше образуется ППХ, однако, эффективная дезинфекция требует определенного уровня остаточного хлора. Использование различных форм хлора (хлор, гипохлорит, диоксид хлора) может влиять на спектр и концентрацию образующихся ППХ. Чем дольше время контакта хлора с водой, тем больше образуется ППХ. Это особенно актуально для протяженных распределительных сетей. Повышение температуры ускоряет химические реакции, увеличивая скорость образования ППХ. Значение pH влияет на форму существования хлора (хлорноватистая кислота или гипохлорит-ион), что, в свою очередь, влияет на спектр образующихся ППХ. Бромиды, присутствующие в источнике воды, могут реагировать с хлором с образованием бромированных ТГМ, которые, как правило, более токсичны, чем хлорированные.



Многие ППХ обладают токсическими, мутагенными и канцерогенными свойствами. Длительное употребление питьевой воды, содержащей высокие концентрации ППХ, может повышать риск развития рака мочевого пузыря, прямой кишки и других органов. Особенно уязвимы дети и беременные женщины.

Помимо рисков для здоровья человека, ППХ могут оказывать негативное воздействие на окружающую среду. Сброс воды, содержащей ППХ, в водоемы может приводить к токсическому воздействию на водные организмы и нарушению экологического баланса.

Для контроля за концентрацией ППХ в питьевой воде необходимо использовать современные методы мониторинга, которые включают хроматографические методы. Газовая хроматография с масс-спектрометрией (ГХ-МС) и жидкостная хроматография с масс-спектрометрией (ЖХ-МС) являются наиболее чувствительными и точными методами определения ППХ [1].

Вторым методом мониторинга является экспресс-методы. Для оперативного контроля используются портативные анализаторы, основанные на спектрофотометрических и электрохимических методах.

Третьим методом мониторинга является прогнозирование ППХ. Для оптимизации процессов водоподготовки используются математические модели, позволяющие прогнозировать концентрацию ППХ в зависимости от параметров воды и технологических режимов.

Для минимизации образования ППХ необходимо использовать комплексный подход, включающий следующие стратегии:

- охрана водосборных площадей от загрязнения органическими веществами;
- использование методов предварительной очистки воды для удаления ПОВ до хлорирования. К таким методам относятся коагуляция и флокуляция: удаление взвешенных веществ и части ПОВ. Также адсорбция активированным углем, то есть эффективное удаление широкого спектра органических веществ. Мембранные методы (ультрафильтрация, нанофильтрация, обратный осмос), а именно удаление растворенных органических веществ;
- оптимизация процесса хлорирования с помощью контроля дозы хлора, времени контакта и pH. Использование альтернативных дезинфектантов (диоксид хлора, озон, ультрафиолетовое излучение) или их комбинации;
- удаление ППХ из питьевой воды с помощью применения сорбционных и мембранных методов.

Количественная оценка эффективности методов необходима для приведения примерных значений снижения концентрации ППХ в процентах. Улучшение качества исходной воды позволяет снизить образование ППХ на 10-30 % в зависимости от степени загрязнения. С помощью методов коагуляции и флокуляции проводится удаление взвешенных веществ и части ПОВ может снизить концентрацию ППХ на 20-40 %. Применение активированного угля при методе адсорбции позволяет удалить до 50-80 % органических веществ и снизить образование ППХ на 40-70 %. Мембранные технологии обеспечивают удаление до 90-99 % органических веществ и снижение образования ППХ на 80-95 %. Оптимизация хлорирования и переход на альтернативные дезинфектанты, а именно использование комбинированных методов оптимизации позволяет снизить концентрацию ППХ на 20-50 %. Продвинутое окисление, комбинация озона, перекиси водорода и/или ультрафиолетового излучения позволяет снизить концентрацию органических веществ и образование ППХ до 70-90 % [1].

В последние годы активно разрабатываются и внедряются новые технологии водоподготовки, направленные на снижение образования ППХ. К таким технологиям относятся продвинутое окисление, биологическая фильтрация, использование



микроорганизмов для разложения ПОВ. Разработка новых сорбентов и мембранных материалов с повышенной эффективностью удаления ПОВ и ППХ.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования служат среднемесячные данные по побочным продуктам – тригалометанам (ТГМ): хлороформ, дибромхлорметан, бромдихлорметан. Данные зафиксированы в резервуарах чистой воды (РЧВ) поверхностного водозабора г. Уфы в период с 1995–2021 гг.

Изучение временных рядов ТГМ (хлороформ, дибромхлорметан, бромдихлорметан) проведено при помощи метода анализа временных рядов.

Метод анализа временных рядов позволяет выделить закономерные изменения показателей качества воды под воздействием тенденции, сезонных колебаний и случайной компоненты. Таким образом, в основе метода анализа временных рядов лежит сезонная декомпозиция ряда данных, дающая возможность из совокупности элементов, образующих временной ряд, выделить закономерную (или детерминированную) и случайную компоненты. Значения детерминированной составляющей представляются функциональной зависимостью от времени, стохастическая (случайная) составляющая – это разность между истинными и закономерными значениями. Детерминированная компонента раскладывается на тренд (тенденцию), циклическую и сезонную составляющие [2, 3]. Трендом временного ряда trt при $t = 1, \dots, n$ называют плавно изменяющуюся, не циклическую компоненту, описывающую чистое влияние долговременных факторов, эффект которых сказывается постепенно.

Декомпозиция временного ряда производится математической моделью – аддитивной.

Аддитивная модель подразумевает разложение элементов ряда в сумму его составляющих:

$$x_t = dt + et,$$

где x_t – истинные значения показателя; dt – детерминированная компонента; et – случайная величина ряда; $t = 1, \dots, n$ – порядковые номера элементов временного ряда.

При этом детерминированная компонента представляется суммой:

$$dt = trt + ct + st,$$

где trt – тренд; ct – циклическая компонента; st – сезонная компонента.

Ввиду того, что циклическая компонента ct отдельно не рассматривается, в дальнейшем детерминированную компоненту будем рассматривать как сумму тренд – циклической $trt + ct$ и сезонной st компоненты [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Проведена обработка временных рядов ТГМ (хлороформ, дибромхлорметан, бромдихлорметан) в РЧВ поверхностного водозабора по наблюдениям, проведенным для периода 1995–2021 гг., (табл. 1).

Таблица 1

Значения вклада компонент временного ряда ТГМ (хлороформ, дибромхлорметан, бромдихлорметан) в РЧВ поверхностного водозабора, полученные в результате построения аддитивной модели со среднегодовым методом сглаживания, %

Показатель	Компонента	Период
		1995–2021 гг.
Хлороформ	Тренд – циклическая	0,15
	Сезонная	34,1
	Случайная	65,8



Бромдихлорметан	Тренд – циклическая	3,65
	Сезонная	18,3
	Случайная	78,1
Дибромхлорметан	Тренд – циклическая	31,7
	Сезонная	5,1
	Случайная	63,2

Наибольший вклад (65,8 %) в значения воды хлороформа в питьевой воде поверхностного водозабора вносит случайная величина, а тренд – циклическая компонента вносит наименьший вклад (табл. 1). Вклад сезонной компоненты не превышает 34,1 % для СГ.

Наибольший вклад в значения воды бромдихлорметана в питьевой воде поверхностного водозабора вносит случайная компонента, которая составляет 78,1 %. Тренд – циклическая компонента вносит наименьший вклад (табл. 1). Вклад сезонной компоненты не превышает 18,3 % для СГ.

Полученные результаты по вкладам компонент в значения воды дибромхлорметана показывают, что наибольший вклад (63,2 %) вносит случайная величина. Вклад сезонной компоненты вносит наименьший вклад (табл. 1). Тренд не превышает 31,7 % для СГ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлено, что доминирующий вклад в значения ТГМ (хлороформ, дибромхлорметан, бромдихлорметан) поверхностного водозабора вносит сезонная случайная величина, а основные факторы, тренд-циклические колебания и сезонные факторы, определяющие содержание ТГМ в РЧВ поверхностного водозабора, не превышают 31,7 % и 34,1 % соответственно.

Список литературы:

1. Харабрин, С.В. Экологический мониторинг тригалогенметанов в питьевой воде и воде водоисточника: На примере поверхностного и инфильтрационных водозаборов г. Уфы / С.В. Харабрин. – Уфа, 2004.
2. Малкова, М.А. Сопоставление качества питьевой воды по содержанию тригалогенметанов с заболеваемостью населения / М. А. Малкова, А. А. Хузиахметова, А. В. Жигалова, Н.Н. Егорова, М.Ю. Вожаева, Е.А. Кантор // Современные проблемы науки и образования. – 2017. – № 3. – С. 145.
3. Кантор, Е.А. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2016620652 Российская Федерация. Содержание тригалогенметанов в питьевой воде некоторых водозаборов г. Уфы: № 2015621682: заявл. 28.12.2015: опубл. 23.05.2016 / Е. А. Кантор, М. А. Малкова, А. В. Жигалова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (ФГБОУ ВПО УГНТУ).
4. Садовникова, Н.А. Анализ временных рядов и прогнозирование: учеб. пособие / Н.А. Садовникова, Р.А. Шмойлова. – М.: Синергия, 2016. – 152 с.

