



Изучение влияния кипячения питьевой воды на состав органических веществ

И.А. Хлыстов, П.К. Харьков, И.А. Минигалиева, А.В. Бугаева

ФБУН «Екатеринбургский медицинский-научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий», ул. Попова, д. 30, г. Екатеринбург, 620014, Российская Федерация

Резюме

Введение. Антропогенная деятельность приводит к появлению в окружающей среде новых органических соединений с малоизученными физико-химическими и токсическими свойствами. Ввиду несовершенства технологий водоподготовки присутствие данных соединений в питьевых водоисточниках создает угрозу здоровью человека. Некоторые из органических компонентов способны вызывать негативные биологические эффекты в крайне низких концентрациях. Имеется недостаточное количество данных об изменении состава воды при бытовом кипячении. В связи с этим существует необходимость изучения состава органических веществ в разных типах вод.

Цель исследования: анализ изменения состава органических веществ при кипячении (бытовом варианте водопользования) питьевой воды методом газовой хроматографии и масс-спектрометрии.

Материалы и методы. В образцах питьевой воды перед подачей в распределительную сеть крупного промышленного города Свердловской области, отобранной в разные сезоны года, а также в воде после кипячения проведена идентификация органических веществ методом газовой хроматографии и масс-спектрометрии. Определен перечень веществ, обладающих негативным воздействием на организм.

Результаты. В питьевой воде из 65 идентифицированных органических веществ за весь период исследования обнаружено 23 вещества, оказывающих общетоксическое, раздражающее, органоспецифическое, мутагенное и канцерогенное действие на человека, что составляет 35,4 % от общего количества идентифицированных. В воде после кипячения из 53 соединений обнаружено 14 веществ, обладающих доказанным негативным действием на организм, что составляет 26,4 % от общего количества идентифицированных. В результате кипячения сохраняется около 10 % органических веществ от общего первоначального состава.

Заключение. Проведена идентификация органических соединений в питьевой воде и воде после кипячения. Выявлена сезонная закономерность изменения состава органических веществ в питьевой воде, обнаружены вещества, обладающие опасными для человека свойствами, установлен факт изменения состава идентифицированных органических веществ в воде после кипячения.

Ключевые слова: органические вещества, идентификация, питьевая вода, водопользование, опасность для здоровья.

Для цитирования: Хлыстов И.А., Харьков П.К., Минигалиева И.А., Бугаева А.В. Изучение влияния кипячения питьевой воды на состав органических веществ // Здоровье населения и среда обитания. 2024. Т. 32. № 10. С. 66–72. doi: 10.35627/2219-5238/2024-32-10-66-72

Effect of Boiling on the Composition of Organic Substances in Tap Water

Ivan A. Khlystov, Polina K. Kharkova, Ilzira A. Minigalieva, Alexandra V. Bugaeva

Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers,
30 Popov Street, Yekaterinburg, 620014, Russian Federation

Summary

Introduction: Anthropogenic activities cause the emergence of new organic compounds with poorly studied physicochemical and toxic properties in the environment. Due to the shortcomings of water treatment technologies, the presence of these compounds in drinking water sources poses a threat to human health. Even extremely low concentrations of some of the organic components can have adverse biological effects. Data on changes in the composition of water during household boiling are scarce, which makes studies of organic substances in different types of water particularly relevant.

Objective: To analyze changes in the composition of organic substances following tap water boiling using gas chromatography–mass spectrometry (GC–MS) techniques.

Materials and methods: We used GC–MS to identify organic substances in tap water samples collected at a water supply treatment plant of a large industrial city in the Sverdlovsk Region in different seasons of the year before and after boiling and to compile the list of substances having adverse human health effects.

Results: Of 65 organic substances identified in tap water over the study period, 23 (35.4 %) had toxic, irritating, organ-specific and/or carcinogenic effects on humans. Of 53 compounds found in boiled tap water, 14 (26.4 %) had a proven negative effect on the organism. About 10 % of organic substances originally identified in tap water retained after boiling.

Conclusion: We identified organic compounds in tap water before and after boiling, revealed a seasonal pattern of changes in the composition of organic substances, found substances with toxic and carcinogenic properties, and established changes in the composition of identified organic substances after boiling.

Keywords: organic substances, identification, tap water, water use, toxicity.

Cite as: Khlystov IA, Kharkova PK, Minigalieva IA, Bugaeva AV. Effect of boiling on the composition of organic substances in tap water. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2024;32(10):66–72. (In Russ.) doi: 10.35627/2219-5238/2024-32-10-66-72

Введение. Развитие человечества сопровождается появлением различных технологий, вовлечением в производственные процессы большого количества соединений и материалов. В период с 1800 по 2015 год ежегодный темп появления новых химических соединений составил 4,4 % [1]. На сегодняшний день зарегистрировано более 256 миллионов химических соединений, в том числе 187 миллионов органических и неорганических веществ, включая сплавы, координационные соединения, минералы, смеси, полимеры и соли, около 70 миллионов последовательностей белков и нуклеиновых кислот¹. Процессы миграции и трансформации поллютантов в окружающей среде приводят в том числе к контаминации открытых источников питьевого водоснабжения, снижению качества питьевой воды при отсутствии должного контроля за водоподготовкой. В настоящее время в качестве основного международного принципа нормирования веществ в воде выбрано установление толерантного суточного потребления, то есть количество вещества, поступающего в организм человека с питьевой водой и продуктами питания, выраженное в мг (мкг) на 1 кг массы тела, которое может потребляться ежедневно в течение всей жизни без риска для здоровья. При этом доля вещества, поступающего с водой, может быть различной, но в большинстве случаев она не превышает 20 % [2].

При воздействии некоторых веществ возникает риск возникновения неблагоприятных эффектов в концентрациях, значительно меньших по сравнению с установленными нормативными значениями. Так, существует серьезная опасность здоровью от воздействия эндокринных деструкторов, эффекты от которых возникают при поступлении с питьевой водой при уровне концентраций в нг/л [3]. Пристальное внимание следует уделять поллютантам, способным аккумулироваться в тканях и органах человека, в том числе обладающим синергическими свойствами – усилением эффекта при совместном воздействии [4, 5], а также компонентам, продукты метаболизма которых более опасны для организма, по сравнению с исходными. Например, отдельные продукты микросомального окисления полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) могут быть более токсичными, генотоксичными и/или канцерогенными, чем исходное вещество [6].

Международными организациями был разработан ряд директив в области водной политики и контроля за загрязнением, куда вошли опасные органические соединения^{2,3,4,5}. Эти соединения нужно учитывать при проведении скрининговых исследований, хотя далеко не для всех из них доказаны общетоксические, органоспецифические,

мутагенные и канцерогенные свойства при водных путях экспозиции. В связи с введением в Российской Федерации нового норматива по общему органическому углероду в воде [7] возникает необходимость расшифровки органических соединений, входящих в этот показатель. Для этих целей применяют ряд методов: жидкостная, газовая и пиролиз-газовая хроматография в сочетании с масс-спектрометрией [8–10], спектрометрия ионной подвижности и квадруполь-времяпролетная масс-спектрометрия (IM Q-TOF LC/MS), тандемная квадруполь-времяпролетная масс-спектрометрия (IM Q-TOF LC/MS/MS) [11, 12]. Зачастую подобные исследования становятся невозможными ввиду отсутствия инструментальной базы и высокой стоимости. В природных условиях соединения подвергаются процессам химической и биохимической трансформации, взаимодействию с другими компонентами, что также затрудняет обнаружение веществ. Большинство исследований, посвященных изучению формирования химического состава воды при бытовом водопользовании, ограничиваются представлением данных о содержании органических контаминантов в бытовых сточных водах [13, 14]. При этом уделяется мало внимания изучению трансформации соединений непосредственно в процессе различных вариантов хозяйственно-бытового использования воды человеком, например при кипячении.

Цель исследования: анализ изменения состава органических веществ при кипячении (бытовом варианте водопользования) питьевой воды методом газовой хроматографии и масс-спектрометрии.

Материалы и методы. С сентября 2020 по август 2021 г. проводился ежемесячный отбор проб воды после водоочистки (питьевая вода) перед подачей в распределительную сеть крупного промышленного города Свердловской области. Для исследований брали образцы питьевой воды и после процедуры ее кипячения (по 12 образцов каждого типа воды). Кипячение проводилось в стеклянных лабораторных стаканах в течение 30 секунд. Дальнейшая пробоподготовка заключалась в двукратной последовательной обработке 50 мл гексана 500 мл образца, объединении экстрактов и выпаривании в токе теплого воздуха до конечного объема 1 мл. Остаток экстракта растворяли в 0,5 мл гексана, откуда часть его объема использовалась для анализа. Идентификация органических веществ осуществлялась методом газовой хроматографии и масс-спектрометрии (ГХ-МС) на газовом хроматографе МАЭСТРО ГХ 7820 с масс-селективным детектором (Reg. № в Реестре 40134-11), библиотека масс-спектров NIST 2011 г. За достоверные результаты идентификации принимался коэффициент

¹ CAS Common Chemistry. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.cas.org> (дата обращения: 24.09.2024).

² Toxic and Priority Pollutants Under the Clean Water Act. U.S. Environmental Protection Agency. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.epa.gov/eg/toxic-and-priority-pollutants-under-clean-water-act> (дата обращения: 24.09.2024).

³ Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on environmental quality standards in the field of water policy, amending and subsequently repealing Council Directives 82/176/EEC, 83/513/EEC, 84/156/EEC, 84/491/EEC, 86/280/EEC and amending Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/105/oj> (дата обращения: 24.09.2024).

⁴ Priority Pollutant List. United States Environmental Protection Agency. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/priority-pollutant-list-epa.pdf> (дата обращения: 24.09.2024).

⁵ Endocrine Disruptor Screening Program: Final Second List of Chemicals and Substances for Tier 1 Screening. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OPPT-2009-0477-0074> (дата обращения: 24.09.2024).

совпадения анализа с масс-спектральными библиотечками от 80 до 100 %; вносилась поправка на содержание примесей в холостых пробах.

На основании информации из российских, международных баз данных ECHA, HMDB, IARC^{6,7,8,9}, составлены перечни веществ (таблицы 2 и 3) из общего числа идентифицированных в питьевой воде и после ее кипячения, обладающих доказанным негативным воздействием на различные органы и системы человеческого организма.

Результаты. Максимальное количество органических соединений в пробах питьевой воды обнаружено осенью и зимой, минимальное – весной (таблица 1). В течение исследуемого периода снижается от максимального до минимального (с осени до весны), летом вновь увеличивается. В каждом сезоне, с осени до весны, после кипячения количество идентифицированных соединений снижалось. Общее количество идентифицированных соединений в питьевой воде было выше по сравнению с кипяченной.

Вещества, обнаруженные одновременно в пробах и кипяченой питьевой воды: (R)-(+)-3-метилциклопентанон (осень 2020 г.); диизооктилфталат, 2,5-циклогександиен-1,4-дион, 2,6-бис(1,1-диметилэтил), сквален, лимонен (зима 2020–2021 гг.); триаконтан, гексатриаконтан, октадекаметил-циклононасилоксан, пентатриаконтан (лето 2021 г.).

Определены химические вещества, обладающие опасными свойствами, на основании данных из Руководства по оценке риска для здоровья населения⁶ (таблица 2). Среди 65 идентифицированных органических веществ в питьевой воде обнаружено 2 вещества, оказывающих негативное действие на организм человека при питьевом поступлении, что составляет 3,1 % от общего количества идентифицированных веществ. В кипяченой питьевой воде обнаружено 1 вещество с установленным общетоксическим эффектом, что составляет 1,9 % от общего количества идентифицированных (53 вещества).

Таблица 1. Количество идентифицированных органических веществ по сезонам до и после кипячения (коэффициент совпадения с масс-спектральными библиотечками от 80 до 100 %)

Table 1. The number of organic substances identified in water before and after boiling by season (coefficient of coincidence with mass spectral libraries ranging from 80 to 100 %)

Сезон / Season	Количество органических соединений, ед. / Organic compounds, n	
	до кипячения / before boiling	после кипячения / after boiling
Осень 2020 г. / Autumn 2020	29	13*
Зима 2020–2021 гг. / Winter 2020/2021	21	17
Весна 2021 г. / Spring 2021	7	3
Лето 2021 г. / Summer 2021	13	24
Всего наименований веществ за период исследований / Total compounds over the study period	65**	53**

Примечания: * – в осенний период исследования воды после кипячения проводили за два месяца: октябрь и ноябрь; ** – органическое вещество, обнаруженное в разные сезоны, учитывалось однократно.

Notes: * in autumn, boiled water was tested in October and November; ** organic matter detected in different seasons was taken into account once.

Таблица 2. Идентифицированные органические соединения с прогнозируемым негативным эффектом на здоровье человека, обнаруженные в питьевой и кипяченой воде

Table 2. Organic compounds with predicted negative effects on human health identified in tap and boiled tap water

Соединение / Compound	CAS №	Класс соединений / Class of compounds	RfD, мг/кг / mg/kg	SFo	Прогнозируемые эффекты (орган-мишень) / Predicted effects (target organ)
Питьевая вода перед подачей в городскую распределительную сеть / Tap water before supply to the urban water supply network					
Нафталин / Naphthalene	91-20-3	Ароматические соединения / Aromatic compounds	0,02	0,12	Системное / Systemic
Трихлорэтилен / Trichloroethylene	79-01-6	Алкены (галогензамещенные) / Alkenes (halogenated)	0,0005	0,011	Развитие, иммунная система / Development, immune system
Вода после кипячения / Boiled tap water					
Диэтилфталат / Diethyl phthalate	84-66-2	Сложные эфиры (производное фталевой кислоты) / Esters (phthalic acid derivative)	0,8	–	Системное / Systemic

Примечания: RfD – референтная доза при хроническом пероральном поступлении; SFo – фактор наклона (фактор канцерогенного потенциала) при пероральном поступлении.

Notes: RfD, reference dose for chronic oral exposure; SFo, oral cancer slope factor.

⁶ Р 2.1.10.3968–23 Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания

⁷ European Chemicals Agency (ECHA). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://echa.europa.eu/> (дата обращения: 24.09.2024).

⁸ The Human Metabolome Database (HMDB). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://hmdb.ca/> (дата обращения: 24.09.2024).

⁹ The International Agency for Research on Cancer (IARC). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iarc.who.int/> (дата обращения: 24.09.2024).

В соответствии с международными базами данных (ЕСНА, HMDB, IARC) из 65 идентифицированных органических веществ в питьевой воде выявлено 23 вещества, оказывающих общетоксическое, раздражающее, органоспецифическое и канцерогенное действие на человека, что составляет 35,4 % от общего количества идентифицированных (таблица 3). Из 53 идентифицированных органических веществ в кипяченой питьевой воде обнаружено 14 веществ, обладающих негативным действием на организм, что составляет 26,4 % от общего количества идентифицированных. В воде после кипячения сохраняется около 10 % органических веществ по сравнению с общим количеством обнаруженных в питьевой воде.

Молекулярные массы идентифицированных соединений в некипяченой воде находятся в интервале от 102 (3-гексанол) до 998 (нонагексактановая кислота) г/моль, а в воде после кипячения – от 98 ((R)-(+)-3-метилциклопентанол) до 998 (нонагексактановая кислота) г/моль. Медианное значение молекулярной массы веществ среди идентифицированных в питьевой воде составляет 306 г/моль, а в воде после кипячения – 390 г/моль.

Обсуждение. Согласно действующей в Российской Федерации методике¹⁰ качественного и количественного химического анализа различных видов вод для измерения массовых концентраций органических соединений средней летучести, экстракция веществ пробы проводится хлористым метилом, а минимальный коэффициент совпадения с библиотечным спектром составляет 70 %. Использование в исследовании экстрагента гексана, изменение минимального порога совпадения анализа с масс-спектральными библиотеками до 80 % было обусловлено качеством химреагентов и необходимостью повышения точности исследований.

В зарубежных информационных источниках было обнаружено большее количество сведений об установленных токсических эффектах обнаруженных соединений на организм человека, по сравнению с российскими. Однако влияние на организм человека большей части соединений не изучено, также не установлены референтные и пороговые дозы воздействия. Из всего перечня веществ, обнаруженных в питьевой воде, только два вещества обладают канцерогенными свойствами.

Таблица 3. Перечень идентифицированных органических соединений, оказывающих неблагоприятные эффекты на здоровье человека

Table 3. The list of identified organic compounds with proven adverse human health effects

№	Воздействие на организм человека / Health effect	Органическое вещество, вызывающее воздействие / Organic substance
1	Раздражение кожи / Skin irritation	1-бромодокосан; 1-деканол; 1-докозен; 1-нональ; 1,4-диметилциклогексан; 2-хлорпропионовая кислота; 2,6-бис(1,1-диметилметил)-2,5-циклогексадиен-1,4-дион; 3-гексанол; 3-метил-гептан; 7,9-ди-трет-бутил-1-оксапиран(4,5)дека-6,9-диен-2,8-дион; п-тетраоксиданол-1; гексакосан; гексатриаконтан; диэтилфталат; дотриаконтан; лимонен; миристиновая кислота; оксиран; октадекаметилциклонасилосан; олеамид; пальмитиновая кислота; стеариловый спирт; триаконтан; трихлорэтилен; фталевая кислота / 1-bromodocosane; 1-decanol; 1-docosene; 1-nonanal; 1,4-dimethylcyclohexane; 2-chloropropionic acid; 2,6-bis(1,1-dimethylmethyl)-2,5-cyclohexadiene-1,4-dione; 3-hexanol; 3-methyl-heptane; 7,9-di-tert-butyl-1-oxaspiro(4,5)deca-6,9-diene-2,8-dione; n-tetracosanol-1; hexacosane; hexatriacontane; diethyl phthalate; dotriacontane; limonene; myristic acid; oxirane; octadecamethylcyclonasiloxane; oleamide; palmitic acid; stearyl alcohol; triacontane; trichloroethylene; phthalic acid
2	Раздражение глаз / Eye irritation	1-бромодокосан; 1-деканол; 1-докозен; 2-хлорпропионовая кислота; 2,6-бис(1,1-диметилметил)-2,5-циклогексадиен-1,4-дион; 3-гексанол; 7,9-ди-трет-бутил-1-оксапиран(4,5)дека-6,9-диен-2,8-дион; гексатриаконтан; диэтилфталат; дотриаконтан; лимонен; миристиновая кислота; оксиран; октадекаметилциклонасилосан; олеамид; пальмитиновая кислота; стеариловый спирт; триаконтан; трихлорэтилен; фталевая кислота / 1-bromodocosane; 1-decanol; 1-docosene; 2-chloropropionic acid; 2,6-bis(1,1-dimethylmethyl)-2,5-cyclohexadiene-1,4-dione; 3-hexanol; 7,9-di-tert-butyl-1-oxaspiro(4,5)deca-6,9-diene-2,8-dione; hexatriacontane; diethyl phthalate; dotriacontane; limonene; myristic acid; oxirane; octadecamethylcyclonasiloxane; oleamide; palmitic acid; stearyl alcohol; triacontane; trichloroethylene; phthalic acid
3	Раздражение желудочно-кишечного тракта / Gastrointestinal irritation	Лимонен / Limonene
4	Центральная нервная система (наркотический эффект; судороги) / Central nervous system (narcotic effect; convulsions)	1-нональ; 3-метил-гептан (наркотический эффект); п-тетраоксиданол-1; миристиновая кислота; пальмитиновая кислота; трихлорэтилен / 1-nonanal; 3-methylheptane (narcotic effect); n-tetracosanol-1; myristic acid; palmitic acid; trichloroethylene
5	Эндокринная система / Endocrine system	5-альфа-14-бета-андростан / 5-alpha-14-beta-androstane
6	Репродуктивная система / Reproductive system	Бис(2-этилгексил)изофталат; диизоактилфталат; диэтилфталат / Bis(2-ethylhexyl) isophthalate; diisoactyl phthalate; diethyl phthalate
7	Мутагенное воздействие / Mutagenic effect	Сквален; трихлорэтилен / Squalene; trichloroethylene

¹⁰ НДП 30.1.2.3.68-2009 (ФР.1.31.2001.00368). Методика измерения массовых концентраций органических соединений в питьевых, природных и сточных водах методом хромато-масс-спектрометрии. Москва: Аналитический центр ЗАО «РОСА», Отдел физико-химических методов анализа, Сектор хроматографии, 2011. 33 с.

С одной стороны, повышение температуры способствует высвобождению из воды летучих органических соединений [15]. В то же время можно предположить, что повышение температуры и физико-химический состав воды будет способствовать прохождению реакций, способствующих образованию новых компонентов с другими молекулярными массами.

Фталаты, включая диэтилфталат, повсеместно используются в качестве растворителей и пластификаторов в промышленных и потребительских товарах¹¹. Лимонен является одним из наиболее распространенных соединений, содержащихся в эфирных маслах ароматических растений. Данное вещество применяется в качестве ароматизаторов пищевых продуктов, входит в состав медицинских и косметических препаратов [16]. Трихлорэтилен применяется для обезжиривания металлов, кожи, тканей, для экстракции жиров и масел из природного сырья, в производстве хладагентов, различных кислот, гербицидов, в качестве растворителя, а также может образовываться в результате хлорирования питьевой воды. Алканы применяются в химическом синтезе и в качестве растворителей¹². Предельные углеводороды и их производные, а также моноциклические ароматические углеводороды относят к люминесцирующей фракции нефтепродуктов. Появление этих соединений в воде является индикатором загрязнения экосистемы [17]. Вещество 7,9-ди-трет-бутил-1-оксапиро(4,5)дека-6,9-диен-2,8-дион представляет собой один из продуктов распада полиуретанового клея в многослойных упаковочных материалах, контейнеров для хранения пищевых продуктов из полипропилена, оберток для конфет на основе пластиковых и бумажных материалов [18]. Также данный компонент мигрирует в воду из труб, состоящих из сшитого полиэтилена [19].

Органические вещества в воде представляют собой динамическую систему, которая характеризуется непрерывно протекающими процессами трансформации и перехода веществ в растворенное, коллоидное и/или взвешенное состояние под воздействием физических, химических и биологических факторов¹³. Количество идентифицированных органических соединений в питьевой воде напрямую связано с качеством водоподготовки и химическим составом исходной воды в хозяйственно-питьевых источниках. Анализируя полученные данные, можно предположить, что наиболее высокое разнообразие органических веществ зимой связано с процессами их концентрирования под ледяным покровом водоема. Так, было установлено, что в процессе образования озерного льда растворенные вещества могут вытесняться из твердой ледяной матрицы и переходить в водную фазу [20]. Поскольку многие

водоемы Свердловской области находятся под влиянием различных промышленных загрязнений, вероятно присутствие в воде трудноокисляемых органических соединений. В зимнее время происходит подавление процессов жизнедеятельности организмов (фитопланктон, водная растительность) – важнейшего фактора самоочищения водоемов¹⁴, в связи с чем прекращается процесс деструкции органических соединений. В свою очередь, увеличение числа органических соединений в летнее время может быть обусловлено повышением температуры воды и растворимостью веществ, а также наличием дополнительных источников привноса веществ в водоемы. Выделяют аллохтонные источники поступления веществ в водоемы (привнос с почвой, растительным опадом, атмосферными осадками, хозяйственно-бытовыми и промышленными сточными водами) и автохтонные (процессы, происходящие в самом водоеме – деструкция, эвтрофикация) [21–23]¹⁵.

В Свердловской области ранее проводили исследования по идентификации органических соединений в природных и сточных водах, по результатам которых было установлено присутствие ацетильных производных фенолов и хлорфенолов, а также о- и п-крезол¹⁵. В настоящее время к числу потенциальных загрязнителей воды также относят фармацевтические препараты, перфторалкиловые кислоты, активные компоненты продуктов личной гигиены, лекарства и биологически активные препараты, ароматизаторы, солнцезащитные средства [24, 25]. Эти соединения и их биоактивные метаболиты могут поступать в воду различными путями. Но приоритетным является путь поступления со сточными водами [24]. В настоящее время обозначена проблема поступления в окружающую среду и водоемы стероидных гормонов, таких как эстрогены, прогестагены и их синтетические аналоги, в частности содержащиеся в оральных контрацептивах. Токсические эффекты для теплокровных животных и человека от распространения данных соединений в водном путем пока не установлены [26]. В США проводили исследования 25 подземных и 49 поверхностных водоемов, служащих источниками питьевой воды 8 миллионам человек. Наиболее часто встречаемые органические загрязнители в поверхностных источниках: холестерин (натуральный стерол; обнаружен в 59 % проб), метолахлор (гербицид; в 53 % проб), котинин (метаболит никотина; в 51 % проб), β-ситостерин (натуральный растительный стерол; в 37 % проб), и 1,7-диметилксантин (метаболит кофеина; в 27 % проб). В подземных водах обнаружены: тетрахлорэтилен (растворитель; в 24 % проб), карбамазепин (фармацевтический препарат; в 20 % проб), бисфенол-А (пластификатор; в 20 % проб), 1,7-диметилксантин (метаболит кофеина; в 16 %

¹¹ Diethyl Phthalate. Priority Existing Chemical Assessment Report No. 33 Доступно по: <https://www.industrialchemicals.gov.au/sites/default/files/PEC33-Diethyl-phthalate-DEP.pdf>. Ссылка активна на 24.09.2024.

¹² PubChem - open chemistry database at the National Institutes of Health Доступно по: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/> Ссылка активна на 24.09.2024.

¹³ Логинова ЕВ, Лопух ПС. Гидроэкология: курс лекций: Минск: БГУ, 2011. 300 с.

¹⁴ Алексеевнина МС, Поздеев ИВ. Санитарная гидробиология с основами водной токсикологии: учеб. пособие: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2016. 205 с. ISBN 978-5-7944-2769-1.

¹⁵ Кириченко ВЕ, Первова МГ, Пашкевич КИ, Назаров АС. Определение фенолов в воде методами газовой хроматографии в виде ацетильных производных // Аналитика и контроль. 2001. № 5(1). С. 70–74.

проб) и три (2-хлорэтил) фосфат (антипирен; в 12 % проб) [27]. Установлена опасность от присутствия в воде ретиноидных соединений. Ретиноидные соединения образуются в поверхностных водоемах естественным образом при цветении цианобактерий, попадают в поверхностные воды через сброс сточных вод, где они представляют потенциальную угрозу для окружающей среды и здоровья человека. Негативные последствия для человека от воздействия ретиноидов заключаются в развитии неврологических расстройств, аффективных расстройств, шизофрении. Проблема с загрязнением данными веществами может усугубиться наряду с нехваткой воды, вызванной изменением климата и ростом населения [28].

Полученные в ходе данного исследования результаты свидетельствуют о присутствии различных органических веществ в питьевой воде. При этом свойства большинства веществ малоизучены. В условиях отсутствия научной информации об их влиянии на организм человека для оценки вреда здоровью необходимо проведение количественных химических и токсикологических исследований. Справедливо отметить, что эффекты для здоровья человека при воздействии компонентов питьевой и кипяченой воды будут различными. Однако при отсутствии данных о количественном содержании этих веществ в воде, развитии негативных эффектов при их совместном поступлении, а также различных предпочтениях людей относительно вариантов бытового водопользования, можно лишь делать вывод о наличии потенциальной угрозы здоровью от содержащихся в питьевой воде органических веществ. В связи с этим существует острая необходимость совершенствования методологии идентификации органических соединений в воде, проведения их количественных исследований, изучения дозозависимых эффектов и персонализированной оценки экспозиции при различных вариантах бытового водопользования. Преимущество примененного метода заключается в его скорости и воспроизводимости, что особо важно в случаях необходимости проведения быстрого скрининга воды. Но вместе с тем для более детального анализа органических соединений нужно применять специальные методы пробоподготовки, специфичные для каждого класса веществ, а также расширять базу хроматографического оборудования.

Заключение. По итогам всесезонного изучения питьевой воды крупного промышленного города установлено, что наибольшее число органических соединений было идентифицировано летом и зимой. В питьевой воде из 65 идентифицированных органических веществ за весь период исследований обнаружено 23 вещества, оказывающих доказанное общетоксическое, раздражающее, органоспецифическое, мутагенное и канцерогенное действие на человека, что составляет 35,4 % от общего количества идентифицированных. В питьевой воде после кипячения из 53 соединений обнаружено 14 веществ, обладающих негативным действием на организм, что составляет 26,4 % от общего количества идентифицированных. В воде после кипячения не выявлено веществ, обладающих кан-

церогенным действием, тогда как в питьевой воде, подаваемой в городскую распределительную сеть, обнаружены два канцерогеноопасных вещества – трихлорэтилен и нафталин. В результате кипячения сохраняется около 10 % органических веществ от общего первоначального состава. Метод можно использовать для скрининговых исследований и оперативной расшифровки состава содержащихся в воде среднелетучих органических соединений.

Благодарности. Авторы выражают благодарность коллективу отдела физико-химических методов исследования, в том числе заведующей отделом канд. хим. наук Т.Н. Штин за организацию проведения исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Llanos EJ, Leal W, Luu DH, Jost J, Stadler PF, Restrepo G. Exploration of the chemical space and its three historical regimes. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2019;116(26):12660-12665. doi: pnas.1816039116.
2. *Trace Elements in Human Nutrition and Health*. Geneva: World Health Organization; 1996. Accessed October 14, 2024. <https://www.who.int/publications/i/item/9241561734>
3. Pironti C, Ricciardi M, Proto A, Bianco PM, Montano L, Motta O. Endocrine-disrupting compounds: An overview on their occurrence in the aquatic environment and human exposure. *Water*. 2021;13(10):1347. doi: 10.3390/w13101347
4. Кацнельсон Б.А., Вараксин А.Н., Панов В.Г., Привалова Л.И. и др. Экспериментальное моделирование и математическое описание хронической комбинированной токсичности как основа анализа многофакторных химических рисков для здоровья // Токсикологический вестник. 2015. № 5(134). С. 37–45. EDN: XQJLBR.
Katsnelson BA, Varaksin AN, Panov VG, Privalova LI, Minigalieva IA, Kireyeva EP. Experimental modeling and mathematical description of the chronic combined toxicity as a basis of multi-factor chemical health risks analysis. *Toksikologicheskii Vestnik*. 2015;(5(134)):37-45. (In Russ.)
5. Minigalieva IA, Shtin TN, Makeyev OH, et al. Some outcomes and a hypothetical mechanism of combined lead and benzo(a)pyrene intoxication, and its alleviation with a complex of bioprotectors. *Toxicol Rep*. 2020;7:986-994. doi: 10.1016/j.toxrep.2020.08.004
6. Katsnelson BA, Minigaliyeva IA, Degtyareva TD, Privalova LI, Beresneva TA. Does a concomitant exposure to lead influence unfavorably the naphthalene subchronic toxicity and toxicokinetics? *Environ Toxicol Chem*. 2014;33(1):152-157. doi: 10.1002/etc.2405
7. Хлыстов И.А., Щукина Д.А., Кузьмина Е.А., Плотко Э.Г., Брусницына Л.А. Подходы к нормированию органического углерода и необходимость его обязательного контроля в питьевой воде // Здоровье населения и среда обитания. 2020. № 9(330). С. 61–66. doi: 10.35627/2219-5238/2020-330-9-61-66
Khlystov IA, Shchukina DA, Kuzmina EA, Plotko EG, Brusnicyna LA. Approaches to regulating organic carbon and the necessity of its obligatory monitoring in drinking water. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2020;(9(330)):61-66. (In Russ.) doi: 10.35627/2219-5238/2020-330-9-61-66
8. Rivera J, Fraisse D, Ventura F, Caixach J, Figueras A. Identification of non-volatile organic compounds in GAC filters and in raw and drinking water extracts by FAB and FAB-CID-MIKE spectrometry. *Fresenius J Anal Chem*. 1987;328(7):577-582. doi: 10.1007/BF00468972
9. Watts CD, Crathorne B, Fielding M, Killops SD. Nonvolatile organic compounds in treated waters. *Environ Health Perspect*. 1982;46:87-99. doi: 10.1289/ehp.824687
10. Zhang Y, Yang K, Dong Y, Nie Z, Li W. Chemical characterization of non-volatile dissolved organic matter from oilfield-produced brines in the Nanyishan area of the western Qaidam Basin, China. *Chemosphere*. 2021;268:128804. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128804
11. He D, Li P, He C, Wang Y, Shi Q. Eutrophication and watershed characteristics shape changes in dissolved organic matter

- chemistry along two river-estuarine transects. *Water Res.* 2022;214:118196. doi: 10.1016/j.watres.2022.118196
12. Lu K, Li X, Chen H, Liu Z. Constraints on isomers of dissolved organic matter in aquatic environments: Insights from ion mobility mass spectrometry. *Geochim Cosmochim Acta.* 2021;308:353-372. doi: 10.1016/j.gca.2021.05.007
 13. Koul B, Yadav D, Singh S, Kumar M, Song M. Insights into the domestic wastewater treatment (DWWT) regimes: A review. *Water.* 2022;14(21):3542. doi: 10.3390/w14213542
 14. Huang MH, Li YM, Gu GW. Chemical composition of organic matters in domestic wastewater. *Desalination.* 2010;262(1-3):36-42. doi: 10.1016/j.desal.2010.05.037
 15. Ma JX, Xu Y, Sun FY, Chen XD, Wang W. Perspective for removing volatile organic compounds during solar-driven water evaporation toward water production. *Ecomat.* 2021;3(6):e12147. doi: 10.1002/eom2.12147
 16. Erasto P, Viljoen AM. Limonene – a review: Biosynthetic, ecological and pharmacological relevance. *Nat Prod Commun.* 2008;3(7):1193-1202. doi: 10.1177/1934578X0800300728
 17. Темердашев З.А., Павленко Л.Ф., Корпакова И.Г., Ермакова Я.С., Экилик В.С. О некоторых методических аспектах оценки нефтяного загрязнения водных объектов с учетом деградации нефтепродуктов во времени // Аналитика и контроль. 2016. № 20(3). С. 225–235. doi: 10.15826/analitika.2016.20.3.006
 18. Temerdashev ZA, Pavlenko LPh, Karpokova IG, Ermakova YaS, Ekilik VS. Some methodological aspects of oil pollution evaluation of water bodies based on the degradation of petroleum products over time. *Analitika i Kontrol'.* 2016;20(3):225-235. (In Russ.) doi: 10.15826/analitika.2016.20.3.006
 19. Kato LS, Conte-Junior CA. Safety of plastic food packaging: The challenges about non-intentionally added substances (NIAS) discovery, identification and risk assessment. *Polymers (Basel).* 2021;13(13):2077. doi: 10.3390/polym13132077
 20. Song K, Wen Z, Jacinthe PA, Zhao Y, Du J. Dissolved carbon and CDOM in lake ice and underlying waters along a salinity gradient in shallow lakes of Northeast China. *J Hydrol.* 2019;571:545-558. doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.02.012
 21. Lozovik PA, Morozov AK, Zobkov MB, Dukhovicheva TA, Osipova LA. Allochthonous and autochthonous organic matter in surface waters in Karelia. *Water Resour.* 2007;34(2):204-216. doi: 10.1134/S009780780702011X
 22. Toming K, Tuvikene L, Vilbaste S, et al. Contributions of autochthonous and allochthonous sources to dissolved organic matter in a large, shallow, eutrophic lake with a highly calcareous catchment. *Limnol Oceanogr.* 2013;58(4):1259-1270. doi: 10.4319/lo.2013.58.4.1259
 23. Mostafa KMG, Yoshioka T, Mottaleb A, Vione D, eds. *Photobiogeochemistry of Organic Matter: Principles and Practices in Water Environments.* Springer Berlin Heidelberg; 2012. doi: 10.1007/978-3-642-32223-5
 24. Daughton CG, Ternes TA. Pharmaceuticals and personal care products in the environment: Agents of subtle change? *Environ Health Perspect.* 1999;107(Suppl 6):907-938. doi: 10.1289/ehp.99107s6907
 25. Tsuchiya Y. Organic chemicals as contaminants of water bodies and drinking water. In: Kubota S, Tsuchiya Y, eds. *Water Quality and Standards.* EOLSS Publications; 2010;2:150-171.
 26. Svgruha R, Fodor I, Györi J, Schmidt J, Padisák J, Pirger Z. Effects of chronic sublethal progesterone exposure on development, reproduction, and detoxification system of water flea, *Daphnia magna*. *Sci Total Environ.* 2021;784:147113. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147113
 27. Focazio MJ, Kolpin DW, Barnes KK, et al. A national reconnaissance for pharmaceuticals and other organic wastewater contaminants in the United States – II) Untreated drinking water sources. *Sci Total Environ.* 2008;402(2-3):201-216. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.02.021
 28. Kubickova B, Ramwell C, Hilscherova K, Jacobs MN. Highlighting the gaps in hazard and risk assessment of unregulated Endocrine Active Substances in surface waters: Retinoids as a European case study. *Environ Sci Eur.* 2021;33:20. doi: 10.1186/s12302-020-00428-0

Сведения об авторах:

✉ **Хлыстов Иван Андреевич** – к.б.н., научный сотрудник, заведующий лабораторией гигиены окружающей среды и экологии человека отдела комплексных проблем гигиены и профилактики заболеваний населения; e-mail: hlistovia@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4632-6060>.

Харькова Полина Константиновна – младший научный сотрудник лаборатории гигиены окружающей среды и экологии человека отдела комплексных проблем гигиены и профилактики заболеваний населения; e-mail: harkovapk@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7927-0246>.

Минигалиева Ильзира Амировна – д.б.н., ведущий научный сотрудник, заведующая отделом токсикологии и биопрофилактики; e-mail: ilzira@ymrc.ru; ORCID: <https://www.orcid.org/0000-0002-0097-7845>.

Бугаева Александра Владиславовна – младший научный сотрудник лаборатории гигиены окружающей среды и экологии человека отдела комплексных проблем гигиены и профилактики заболеваний населения; e-mail: bugaeva@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6562-2842>.

Информация о вкладе авторов: концепция и дизайн исследования: Хлыстов И.А.; сбор и анализ данных: Хлыстов И.А., Бугаева А.В., Харьковская П.К.; интерпретация результатов, подготовка проекта рукописи: Хлыстов И.А., Минигалиева И.А. Все авторы рассмотрели результаты и одобрили окончательный вариант рукописи.

Соблюдение этических стандартов: данное исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

Финансирование: исследование проведено без спонсорской поддержки.

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

Статья получена: 24.08.24 / Принята к публикации: 10.10.24 / Опубликовано: 31.10.24

Author information:

✉ **Ivan A. Khlystov**, Cand. Sci. (Biol.), Researcher, Head of the Laboratory of Environmental Hygiene and Human Ecology, Department of Complex Problems of Hygiene and Disease Prevention; e-mail: hlistovia@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4632-6060>.

Polina K. Kharkova, Junior Researcher, Laboratory of Environmental Hygiene and Human Ecology, Department of Complex Problems of Hygiene and Disease Prevention; e-mail: harkovapk@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7927-0246>.

Ilzira A. Minigalieva, Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher, Head of the Department of Toxicology and Bioprophylaxis; e-mail: ilzira@ymrc.ru; ORCID: <https://www.orcid.org/0000-0002-0097-7845>.

Alexandra V. Bugayeva, Junior Researcher, Laboratory of Environmental Hygiene and Human Ecology, Department of Complex Problems of Hygiene and Disease Prevention; e-mail: bugaeva@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6562-2842>.

Author contributions: study conception and design: Khlystov I.A.; data collection and analysis: Khlystov I.A., Bugaeva A.V., Kharkova P.K.; interpretation of results, draft manuscript preparation: Khlystov I.A., Minigalieva I.A. All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

Compliance with ethical standards: Not applicable.

Funding: This research received no external funding.

Conflict of interest: The authors have no conflicts of interest to declare.

Received: August 24, 2024 / Accepted: October 10, 2024 / Published: October 31, 2024