

Влияние качества природной воды на динамику формирования тригалогенметанов в процессе водоподготовки

Рецензия эксперта на статью получена 09.11.2018 [Expert review on the article received November 09, 2018].

В условиях повышенной антропогенной нагрузки на водоисточники, постоянного ужесточения нормативов качества питьевой воды очистные сооружения водопровода должны служить надёжным барьером, предотвращающим поступление загрязняющих веществ с водой потребителям. Поэтому на этапе обоснования и подбора методов очистки воды и технологии водоподготовки одним из немаловажных этапов является проведение объективного анализа информации об изменчивости качества воды источника хозяйственно-питьевого водоснабжения непосредственно в районе забора воды за период не менее пяти лет и оценка факторов его влияния на процесс очистки воды [1–3].

В качестве наглядного примера рассмотрено составление информационной модели для источников питьевого водоснабжения города Вологды.

Система водоснабжения Вологды базируется на воде трёх поверхностных водоисточников — река Вологда, озеро Кубенское и река Тошня. Их использование зависит от ряда таких факторов, как потребность в воде, водность, засушливость, качественный состав воды и т.д.

Для составления информационной модели исследовались условия формирования гидрохимических показателей водоисточников. В качестве исходной информации о гидрохимическом режиме водоисточников города Вологды использовались данные производственного контроля качества природной воды водопроводных очистных сооружений города Вологды (МУП ЖХХ «Вологдагорводоканал») — реки Вологды и озера Кубенское за период 1990–2000 и 2008–2017 годов.

Продолжительность каждого ряда исследуемых рядов наблюдений составляет десять лет, базы данных временных рядов показателей составляют за период 2008–2017 годов по реке Вологде — 46 676 записей, озеро Кубенское — 312 записей, за период 1990–2000 годов — 31 120 записей в базе данных MS Access.

Характеристика граничных (размаха) и средних значений показателей качества воды реки Вологды, озера Кубенское и реки Вологды плюс озера Кубенское за период 2008–2017 годов представлена в табл. 1.

На этапе обоснования и подбора методов очистки воды и технологии водоподготовки одним из немаловажных этапов является проведение объективного анализа информации об изменчивости качества воды источника хозяйственно-питьевого водоснабжения непосредственно в районе забора воды

При изучении сформированных статистических рядов наблюдений за гидрохимическим режимом стока водоисточников реки Вологды и озера Кубенское проводилась дифференциация имеющихся данных по показателям загрязнений и их визуализация.

Сравнительная характеристика статистических рядов наблюдений за показателями качества воды реки Вологды и озера Кубенское представлена в табл. 2 для двух периодов наблюдений: 1990–2000 и 2008–2017 годы.

УДК 628.16

Влияние качества природной воды на динамику формирования тригалогенметанов в процессе водоподготовки

Е. А. Лебедева, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Водоснабжение и водоотведение», Вологодский технический университет; **Ж. М. Говорова**, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Водоснабжение и водоотведение», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; **А. О. Родина**, к.т.н., доцент, научный сотрудник, Вологодский технический университет; **О. Б. Говоров**, к.т.н., научный консультант, АО «МосводоканалНИИпроект»

Статья посвящена разработке информационной модели качества воды на примере источников хозяйственно-питьевого водоснабжения города Вологды. Установлено, что в изменчивости факторов влияния загрязнения исходной воды имеют место два технологических коридора, в которых существуют максимальные риски образования токсичных хлорорганических соединений при обеззараживании воды хлором. Показано, что анализ информации об изменчивости показателей как природных, так и антропогенных ингредиентов позволяет обосновать методы усовершенствования технологии водоподготовки и обеспечить барьерные функции сооружений в отношении токсичных загрязнений, таких как хлороформ, образующихся в процессе обработки воды.

Ключевые слова: природные воды, качество воды, информационная модель, очистные сооружения водопровода, тригалогенметаны.

UDC 628.16

Influence of the quality of natural water on the dynamics of formation of trihalomethanes in the process of water treatment

E. A. Lebedeva, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Water Supply and Wastewater Disposal, Vologda State University; **Zh. M. Govorova**, Doctor of Engineering, Professor, the Department of Water Supply and Wastewater Disposal, National Research Moscow State University of Civil Engineering; **A. O. Rodina**, PhD, Associate Professor, Research Worker, Vologda State University; **O. B. Govorov**, PhD, Scientific Consultant, "MosvodokanalNIIProekt", JSC

The article is devoted to the development of an information model of water quality on the example of sources of drinking water supply in the city of Vologda. It was established that in the variability of factors influencing the pollution of the source water there are two technological corridors in which there are maximum risks of the formation of toxic organochlorine compounds when water is disinfected with chlorine. It is shown that the analysis of information on the variability of indicators of both natural and anthropogenic ingredients allows one to substantiate methods for improving water treatment technology and to ensure the barrier functions of structures in relation to toxic pollutants, such as chloroform, formed during water treatment.

Key words: natural waters, water quality, information model, water treatment facilities, trihalomethanes.

Показатели качества воды источников водоснабжения города Вологды

табл. 1

Водоисточник Показатель	р. Вологда			оз. Кубенское			р. Вологда + оз. Кубенское		
	макс.	мин.	средн.	макс.	мин.	средн.	макс.	мин.	средн.
Цветность, град.	201	12	80,1	388	53	134,65	193	31	70,18
Мутность, мг/дм ³	149,64	0,28	6,0	25,06	1,08	7,41	25,95	0,9	5,84
Потребление кислорода биологическое полное (БПК _п), мг O ₂ /дм ³	6,1	0,34	1,3	3,4	0,81	2,0	3,07	0	1,25
Взвешенные вещества, мг/дм ³	27	0,8	5,5	23,8	0	6,98	14,8	0	5,96
Жёсткость, град. Ж	7,8	0,91	3,9	6,50	1,77	3,17	6,68	0	3,58
Нефтепродукты, мг/дм ³	0,095	0,002	0,016	0,101	0,008	0,03	0,029	0	0,02
Общая минерализация, мг/дм ³	619	108	279,6	466	136	226,74	459	0	275,79
Перманганатная окисляемость, мг O ₂ /дм ³	32,000	3,81	14,9	56,87	11,22	24,823	31,15	0	15,49
Синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), мг/дм ³	0,292	0,025	0,1	0,09	0	0,02	0,169	0	0,03
Фенол, мг/дм ³	0,027	0,000	0,002	0,008	0	0	0,007	0	0
Химическое потребление кислорода (ХПК), мг O ₂ /дм ³	83	8,0	33,9	129	22	61,22	76,5	0	36,85
Аммоний солевой, мг/дм ³	970	0	78,1	2,8	0,068	0,62	2,0	0	0,32
Общее микробное число (ОМЧ), КОЕ/мл	65600	2,0	155,2	200	1,0	54,3	3100	0	165,81
Хлорпоглощаемость, мг/дм ³	5,75	0,1	1,7	н/д	н/д	н/д	8,6	0	0,59

Формирование гидрохимических характеристик поверхностного источника водоснабжения представляет собой совокупность случайных процессов, связанных с геоморфологическими характеристиками, климатическими условиями и характером антропогенной деятельности на водосборе. Все ингредиенты, присутствующие в воде водоисточника, можно разбить на две категории: природные и антропогенные. Концентрации природных ингредиентов в воде формируют природные условия водосбора и изменчивость его гидрологического режима [4].

Антропогенные ингредиенты, такие как фенолы, синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), нефтепродукты и др. формируются под влиянием нескольких факторов: хозяйственная деятельность на территории водосбора, чрезвычайные ситуации техногенного характера. На водосборах водоисточников города Вологды — реке Вологда и озере Кубенское — ведётся активная хозяй-



Река Вологда — источник хозяйственно-питьевого водоснабжения

Показатели качества воды реки Вологды и озера Кубенское*

табл. 2

Показатель	р. Вологда		оз. Кубенское	
	1990–2000	2008–2017	1990–2000	2008–2017
Цветность, град.	140–13 / 53	201–12 / 80	200–39 / 76	388–53 / 134,65
Мутность, мг/дм ³	19,6–0,6 / 3,6	149–0,28 / 6,0	21,2–0,8 / 3,8	25,06–1,08 / 7,41
ХПК, мг O ₂ /дм ³	63,6–14,79 / 40	83–8,0 / 33,9	76,96–18,68 / 53	129–22 / 61,2
Нефтепродукты, мг/дм ³	0,45–0,0 / 0,15	0,095–0,002 / 0,016	0,32–0,0 / 0,06	0,101–0,008 / 0,03
Перманганатная окисляемость, мг O ₂ /дм ³	25,6–1,57 / 10,56	32–3,8 / 14,9	40,31–3,62 / 16,46	56,87–11,22 / 24,82
БПК _п , мг O ₂ /дм ³	7,7–0,4 / 2,19	6,1–0,34 / 1,3	5,6–0,1 / 2,78	3,4–0,81 / 2,0
Аммоний солевой, мг/дм ³	1,38–0,0 / 0,38	0,97–0,0 / 0,078	9,85–0,0 / 0,68	2,8–0,068 / 0,62
ОМЧ, КОЕ/мл	1000–5,0 / 147	65600–2 / 155,2	300–1,0 / 42	200–1 / 54,3
Фенол, мг/дм ³	7,07–0,0 / 0,006	0,27–0,0 / 0,002	0,019–0,0 / 0,003	0,008–0,0 / 24,82
СПАВ, мг/дм ³	3,15–0,0 / 1,75	0,292–0,025 / 0,1	1,71–0,03 / 0,92	0,09–0,0 / 0,02

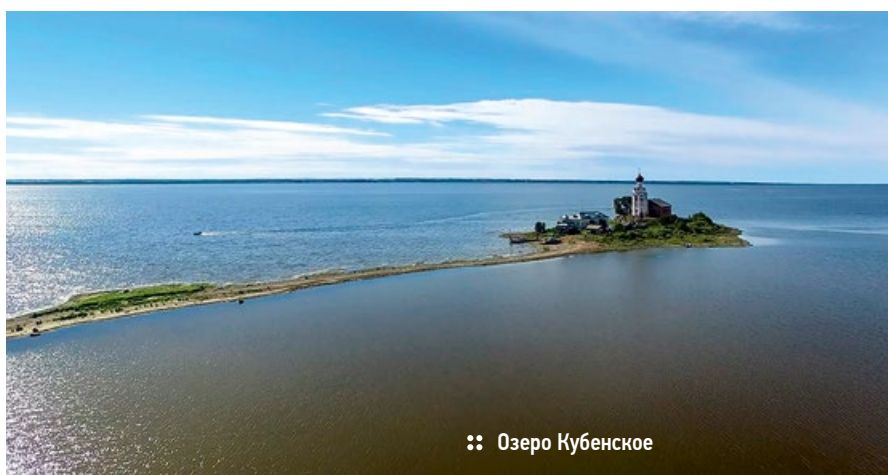
* В числителе дроби — макс. и мин. значение показателя, в знаменателе — норма ряда наблюдений.

ственная деятельность, поэтому в составе воды данных водных объектов присутствуют как природные, так и антропогенные ингредиенты.

Сопоставление данных табл. 2 по показателям, формирование которых определяется природными факторами: цветности, мутности, окисляемости, показывает наличие схожих закономерностей увеличения размаха вариаций (разности между наибольшим и наименьшим значением показателей), так и средних значений. Одновременно наблюдается снижение аналогичных значений показателей антропогенных загрязнений, таких как аммоний солевой, фенолы, СПАВ, БПК_п в изменчивости рассматриваемых рядов.

Наибольшей репрезентативностью среди данных наблюдений за качеством воды имеют данные по реке Вологда по показателям цветность, мутность, перманганатная окисляемость. Сравнение изменчивости по этим показателям позволяет увидеть схожие закономерности в динамике показателей этих рядов.

При визуализации рядов исследуемых показателей цветности, мутности и перманганатной окисляемости выявляется наличие закономерности (цикличности) изменений в характере изменчивости ингредиентов природного происхождения, связанной с сезонными изменениями гидрологического режима.



Озеро Кубенское



помимо гепато-, нефро- и нейротоксического эффектов, обладают канцерогенным, эмбриотоксическим и тератогенным действием [5–7].

Для выявления факторов влияния внешней среды (качества воды реки Вологды и озера Кубенское) на динамику формирования тригалогенметанов в процессе очистки природной воды на водопроводных очистных сооружениях города Вологды и выявления закономерностей проведён корреляционный анализ рядов наблюдений за показателями исходной воды и содержанием хлороформа в воде на насосной станции второго подъёма. Временные ряды, пригодные для такого анализа, сформированы на основе систематических данных по показателям загрязнения за период 2012–2017 годов.

Репрезентативность и достаточность для достоверного анализа ряда наблю-

Результаты статистического анализа рядов наблюдений представлены в табл. 3.

По величине коэффициента вариации и его изменению в период с 2008–2017 годы в сравнении с периодом 1990–2000 годы можно судить о повышении степени вариации и неоднородности совокупности по различным показателям.

Проблема образования токсических веществ связана не только с загрязнением источника водоснабжения органическими и минеральными примесями, но и с трансформацией химических веществ непосредственно в процессе её очистки. Включение в процесс подготовки воды, содержащей органические вещества, такого важного этапа, как обеззараживание с использованием хлора приводит к образованию различных летучих хлорорганических соединений.

Наиболее опасными веществами, образующимися в питьевой воде при хлорировании, являются тригалогенметаны и четырёххлористый углерод, которые,

Результаты статистического анализа рядов наблюдений*

табл. 3

Водоисточник	Показатель	Цветность, град.		Мутность, мг/дм ³		Перманганатная окисляемость, мг O ₂ /дм ³	
		1990–2000	2008–2017	1990–2000	2008–2017	1990–2000	2008–2017
река Вологда	X_{cp}	59,594	80	2,768	6,0	10,726	14,9
	X_{max}	210,000	201	10,700	149,64	25,6	32
	C_v	0,476	0,406	0,708	1,715	0,436	1,058
	C_s	0,305	0,402	1,124	1,456	0,176	0,323
	D	804,201	1055,6	3,833	118,81	21,835	248,388
	σ	28,358	32,49	1,958	10,29	4,673	15,76
	$\sigma_{\%}$	1,052	0,73	1,630	0,23	1,304	0,54
	C_s/C_v	0,640	0,989	1,587	0,848	0,404	0,305
озеро Кубенское	X_{cp}	73,168	134,65	5,305	7,41	15,873	11,22
	X_{max}	235,000	388	19,000	25,06	25,600	56,87
	C_v	0,431	0,197	0,759	0,540	0,244	0,367
	C_s	0,469	0,218	0,843	0,654	0,016	0,121
	D	990,391	705,434	16,126	16,00	14,813	16,974
	σ	31,470	26,56	4,016	4,00	3,849	4,12
	$\sigma_{\%}$	2,968	1,396	5,262	0,389	2,312	0,315
	C_s/C_v	1,088	1,10	1,111	1,21	0,066	0,329

* X_{cp} — среднее значение; X_{max} — максимальное значение; C_v — коэффициент вариации; C_s — коэффициент корреляции; D — дисперсия; σ — среднеквадратичное отклонение; $\sigma_{\%}$ — среднеквадратичная погрешность результата серии наблюдений в процентах.

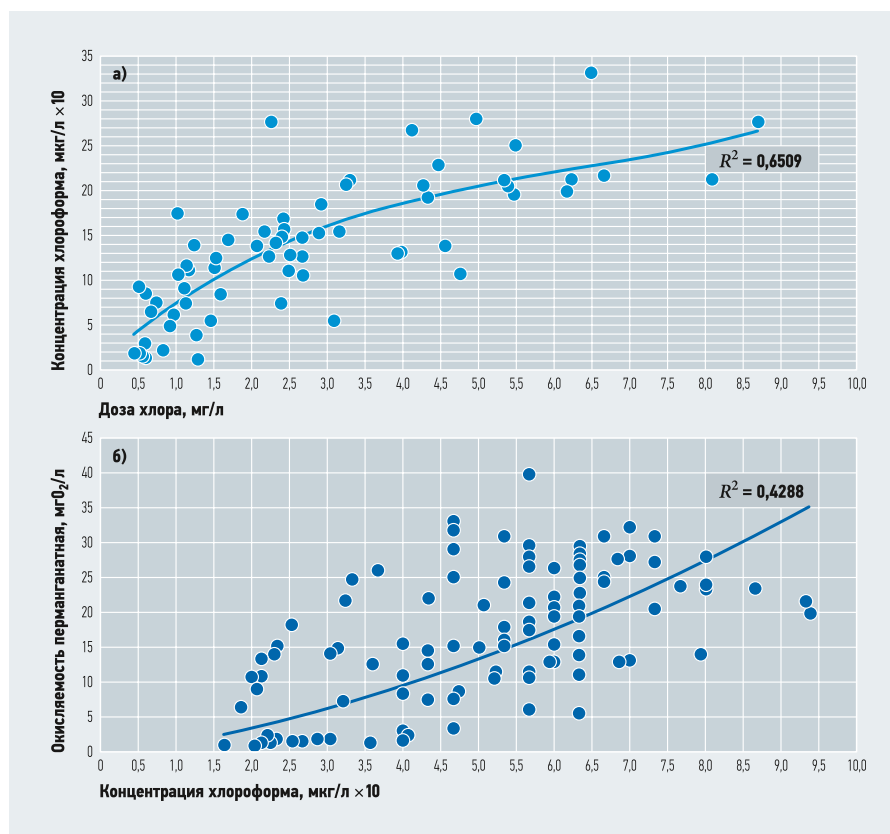


Рис. 1. Кривые связи содержания хлороформа и дозы хлора (а), перманганатной окисляемости (б) речной воды

дений пятилетней продолжительности была доказана исследованиями по реке Вологде, представленными в [1]. Анализ показал, что наиболее тесная корреляция содержания хлороформа имеет место с показателями pH, цветность, мутность, перманганатная окисляемость и содержание аммония солевого. Визуализация некоторых из этих зависимостей приведена на рис. 1. Анализ данных рисунков показывает, что определяющими факторами влияния на формирование содержания хлороформа в воде на насосной станции второго подъема являются перманганатная окисляемость ($R^2 = 0,43$) и технологический параметр — доза хлора ($R^2 = 0,65$). Кроме того немаловажную роль играет и цветность речной воды ($R^2 = 0,24$).

Для выявления технологических коридоров по формированию концентрации хлороформа в обрабатываемой на водопроводных очистных сооружениях города Вологды воде по показателям перманганатная окисляемость и цветность исходной воды реки Вологды, а также мутности проведены исследования повторяемости их в интервалах варьирования. Анализ имеющихся данных показывает, что в границах размаха вариаций показателей цветности и перманганатной окисляемости имеют место два периода со своими максимальными значениями, имеющими наибольшую повторяемость. Эти два периода соответствуют двум характерным фазам в водном режиме водоемного источника: первый период соответствует

фазам летне-осенних паводков, второй — фазе весеннего половодья.

В питании водных объектов в одни сезоны преобладают грунтовые (летняя, зимняя межень), в другие сезоны (весеннее половодье) — поверхностные воды с водосбора. Наличие существенной доли поверхностных вод с территории водосбора, и их доминирующая роль в водном режиме и определяет динамику цветности и перманганатной окисляемости.

Повышение этих показателей в период интенсификации поверхностного стока определяют почвы и подстилающие грунты, покрывающие водосборы реки Вологды и озера Кубенское — это болотные и подзолистые почвы разной степени оглеения, сформировавшиеся на ледниковых отложениях, по механическому составу — глины, суглинки, супеси. При прохождении через почвогрунты атмосферных осадков по пути к речным руслам и озёрным ваннам формируются цветные гидрокарбонатно-кальциевые воды малой и средней минерализации.

Наибольшей репрезентативностью среди наблюдений за качеством воды имеют данные по реке Вологда по показателям цветности, мутности и перманганатной окисляемости. Сравнение изменчивости по этим показателям позволяет увидеть схожие закономерности

В водном режиме реки Вологды наблюдается чёткая выраженность фаз весеннего половодья и летне-осенних паводков: весеннее половодье (начало приходится примерно на середину апреля, ранее — конец марта, позднее — конец апреля); летняя межень, прерываемая кратковременными дождевыми паводками; зимняя межень с плавным понижением уровня до минимума к концу зимы.

Заключение

1. Разработана информационная модель факторов влияния качества воды реки Вологда и озера Кубенское на динамику формирования тригалогенметанов, которая позволяет обоснованно принимать решения по усовершенствованию технологии водоподготовки на действующих очистных сооружениях водопровода (применение пре- и постаммонизации, изменение режима хлорирования воды, замена хлора на альтернативные окислители и т.д.). Установлено, что определяющими факторами влияния на формирование содержания хлороформа в воде на насосной станции второго подъема являются перманганатная окисляемость цветности исходной воды и доза хлора.

2. Проведённый развёрнутый статистический анализ информации о качестве исходной воды водоисточников города Вологды показал, что в изменчивости факторов влияния загрязнений исходной воды имеют место два технологических коридора, в которых существуют максимальные риски образования хлорорганических соединений (тригалогенметанов и др.). Иными словами, период летне-осенних паводков и весеннего половодья в водном режиме реки Вологды и озера Кубенское.

1. Журба М.Г., Соколов Л.И., Говорова Ж.М. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: Т. 2. Очистка и кондиционирование природных вод. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Из-во АСВ, 2010. 496 с.
2. Говорова Ж.М., Журба М.Г. Обоснование водоочистных технологий и их инвестирования. — М., 2012. 176 с.
3. Баренбойм Г.М., Веницианов Е.В., Авандеева О.П., Борисов В.М. и др. Научные основы создания систем мониторинга качества природных поверхностных вод / Под науч. ред. Баренбойма Г.М., Веницианова Е.В. — М.: Научный мир, 2016. 462 с.
4. Родина А.О. Обоснование расчётных показателей качества поверхностных вод при выборе водоочистных технологий с применением теории риска: Дисс. канд. техн. наук по спец. 05.23.04. — Вологда: ВоГТУ, 2005. 172 с.
5. Алексеева Л.П. Снижение концентрации хлорорганических соединений, образующихся в процессе подготовки питьевой воды // Водоснабжение и санитарная техника, 2009. №9. С. 27–34.
6. Коверга А.В., Благова О.Е., Стрихар Ю.В. Снижение содержания хлорорганических соединений на московских станциях водоподготовки // Водоснабжение и санитарная техника, 2009. №10. С. 39–42.
7. Арутюнова И.Ю., Калашникова О.Б. Применение метода предварительной аммонизации и хлорирования при подготовке московской воды // Водоснабжение и санитарная техника, 2012. №10. С. 18–22.

References — see page 95.

Influence of the quality of natural water on the dynamics of formation of trihalomethanes in the process of water treatment. Pp. 18–21.

E. A. Lebedeva, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Water Supply and Wastewater Disposal, Vologda State University; **Zh. M. Govorova**, Doctor of Engineering, Professor, the Department of Water Supply and Wastewater Disposal, National Research Moscow State University of Civil Engineering; **A. O. Rodina**, PhD, Associate Professor, Research Worker, Vologda State University; **O. B. Govorov**, PhD, Scientific Consultant, "MosvodokanalNIiproekt", JSC

-
1. Zhurba M.G., Sokolov L.I., Govorova Zh.M. *Vodosnabzhenie. Proektirovanie sistem i sooruzhenij. T. 2. Ochkistka i kondicionirovanie prirodnyh vod* [Water supply. Designing systems and facilities. Vol. 2. Purification and conditioning of natural waters]. 2nd edition, rev. and exp. Moscow. *Izd-vo ASV* [Publishing Association of Construction Universities]. 2010. 496 p.
 2. Govorova Zh.M., Zhurba M.G. *Obosnovanie vodoochistnyh tehnologij i ih investirovanija* [Rationale of water treatment technologies and their investment]. Moscow. 2012. 176 p.
 3. Barenbojm G.M., Venicianov E.V., Avandeeva O.P., Borisov V.M. et al. *Nauchnye osnovy sozdaniya sistem monitoringa kachestva prirodnyh poverhnostnyh vod* [Scientific basis for