



Влияние фитопланктона на формирование качества воды и методы его удаления. Часть 1

Фитопланктон играет значимую роль в формировании качества воды поверхностных источников, используемых для систем хозяйственно-питьевого водоснабжения. В связи с этим на этапе обоснования технологии очистки воды и разработки проектных решений в каждом конкретном случае необходимо выполнять детальный анализ по численности, биомассе и видовому составу водорослей, учитывать определяющие факторы и особенности развития фитопланктона и прогнозировать возможные последствия, связанные с поступлением в воду продуктов жизнедеятельности и отмирания клеток фитопланктона.

Пресноводный фитопланктон наиболее часто представлен следующими отделами (рис. 1): сине-зелёные (*Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Lyngbya*, *Oscillatoria* и др.); диатомовые (*Asterionella Formosa*, *Melosira*, *Navicula* и др.); зелёные (*Tetrastrum*, *Coelastrum*, *Pediastrum*, *Actinastrum* и др.); золотистые (*Dinobryon*, *Mallomonas* и др.); пиррофитовые (*Ceratium*, *Peridinium*); криптофитовые (*Cryptomonas*); а также эвгленовые (*Trachelomonas*).

Развитие фитопланктонных сообществ происходит с определённой периодичностью и зависит от различных факторов, таких как: количество поглощаемого света, температура воды, мутность, наличие биогенных элементов, продук-

тов жизнедеятельности самих водорослей, морфометрических особенностей водоисточников и их гидрологического режима. Для фитопланктона характерно сезонное развитие, когда в течение года изменяются его таксонометрический состав, структура, численность и биомасса.

В качестве примера была проанализирована динамика изменения численности и доминант фитопланктона в поверхностном водоисточнике, используемом для хозяйственно-питьевого водоснабжения и расположенном в западном регионе.

В период с января по март в речной воде обнаруживались преимущественно диатомовые водоросли (до 97%) и следы зелёных, пиррофитовых и прочих водорослей (рис. 2). С апреля общая численность водорослей постепенно увеличивалась с 1609–2250 кл/см³ в марте до 15981–22814 кл/см³ в июле. Преобладали

На этапе обоснования технологии очистки воды и разработки проектных решений в каждом случае необходимо выполнять детальный анализ по численности, биомассе и видовому составу водорослей, учитывать определяющие факторы и особенности развития фитопланктона

Рецензия эксперта на статью получена 10.01.2019 [Expert review on the article received January 10, 2019].

УДК 628.16. Научная специальность: 05.23.04.

Влияние фитопланктона на формирование качества воды и методы его удаления. Часть 1

Жанна М. Говорова, д.т.н., профессор, кафедра «Водоснабжение и водоотведение», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); **Олег Б. Говоров**, к.т.н., главный специалист технологического отдела АО «МосводоканалНИИпроект»

Приведён анализ влияния фитопланктона на формирование качества воды источника питьевого водоснабжения. Показано, что развитие фитопланктона носит сезонный характер, продукты его жизнедеятельности и отмирания являются продуцентами пахнущих веществ и предшественниками тригалогенметанов. Приведены результаты изучения динамики фитопланктона. Выполнен анализ методов удаления фитопланктона и продуктов его жизнедеятельности. Показано, что применение префильтров с крупногранульной загрузкой является перспективным направлением.

Ключевые слова: природные воды, запах, фитопланктон, коэффициент корреляции, тригалогенметаны, методы очистки, префильтр.

UDC 628.16. Number of scientific specialty: 05.23.04.

The influence of phytoplankton on the formation of water quality and methods of its removal. Part 1

Zhanna M. Govorova, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Water supply and Sanitation, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSEU); **Oleg B. Govorov**, PhD, Chief Specialist of the technology department of "MosvodokanalNIIproject Institute", JSC

The article analyzes the influence of phytoplankton on the formation of the water quality of the drinking water supply source. It is shown that the development of phytoplankton is seasonal, its metabolic products and dying off are producers of smelling substances and precursors of trihalomethanes. The results of studying the dynamics of phytoplankton are presented. The analysis of the methods of phytoplankton removal and its metabolic products has been performed. It is shown that the use of prefilters with a large granular load is a promising direction.

Key words: natural waters, odor, phytoplankton, correlation coefficient, trihalomethanes, purification methods, prefilter.

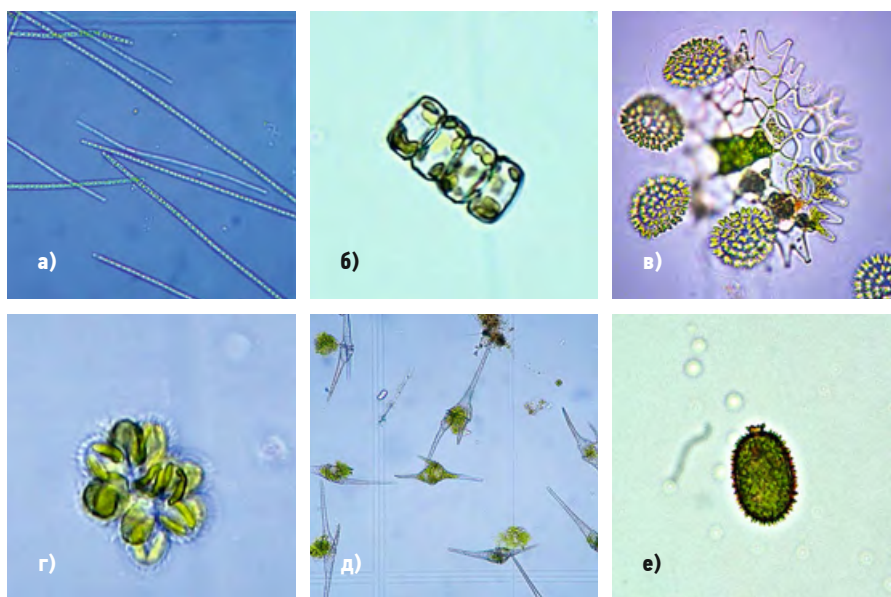


Рис. 1. Водоросли [а — сине-зелёные (*Aphanizomenon*); б — диатомовые (*Cyclotella*), в — зелёные (*Pediastrum*); г — золотистые (*Synura*); д — пиррофитовые (*Ceratium*); е — эвгленовые (*Trachelomonas*)]

сине-зелёные водоросли (от 50 до 90 %), численность диатомовых снижалась и не превышала 30 %, появлялись золотистые водоросли (около 5 %).

С июля по ноябрь (летне-осенний период) наблюдалось максимальное развитие фитопланктона, численность которого в сентябре-октябре достигала в речной воде 145 344–371 875 кл/см³. Со второй декады октября начинался спад в развитии водорослей. Численность преимущественно сине-зелёных водорослей снижалась до 250 кл/см³ в ноябре и до 16–31 кл/см³ в декабре.

Кoeffициенты корреляции* N, кл/см³

табл. 1

Год	Период	Ц–N	ПО–N	М–N	ОМЧ–N	В–N	N–T	Доминанты
2013	Январь–март	–0,15	0,55	0,27	0,04	0,79	0,08	диатомовые
	Апрель–июнь	–0,23	0,32	0,31	0,05	0,74	0,28	сине-зелёные
	Июль–сентябрь	0,50	0,71	0,65	0,72	0,81	–0,83	диатомовые
	Октябрь–декабрь	0,07	0,82	0,90	0,66	1,00	0,76	сине-зелёные
2014	Январь–март	–0,42	–0,10	0,69	0,21	0,91	0,72	диатомовые, зелёные
	Апрель–июнь	0,19	0,38	0,15	0,36	0,34	–0,01	сине-зелёные, диатомовые, зелёные
	Июль–сентябрь	–0,37	0,50	0,48	0,26	0,20	–0,45	сине-зелёные
	Октябрь–декабрь	0,29	0,61	0,62	0,69	1,00	0,67	золотистые, сине-зелёные, зелёные

* Между численностью фитопланктона и физико-химическими показателями качества речной воды: Ц — цветность, град.; ПО — перманганатная окисляемость, мгО/дм³; М — мутность, мг/дм³; ОМЧ — общее микробное число, КОЕ/см³; В — биомасса, мг/дм³; Т — температура, °C.

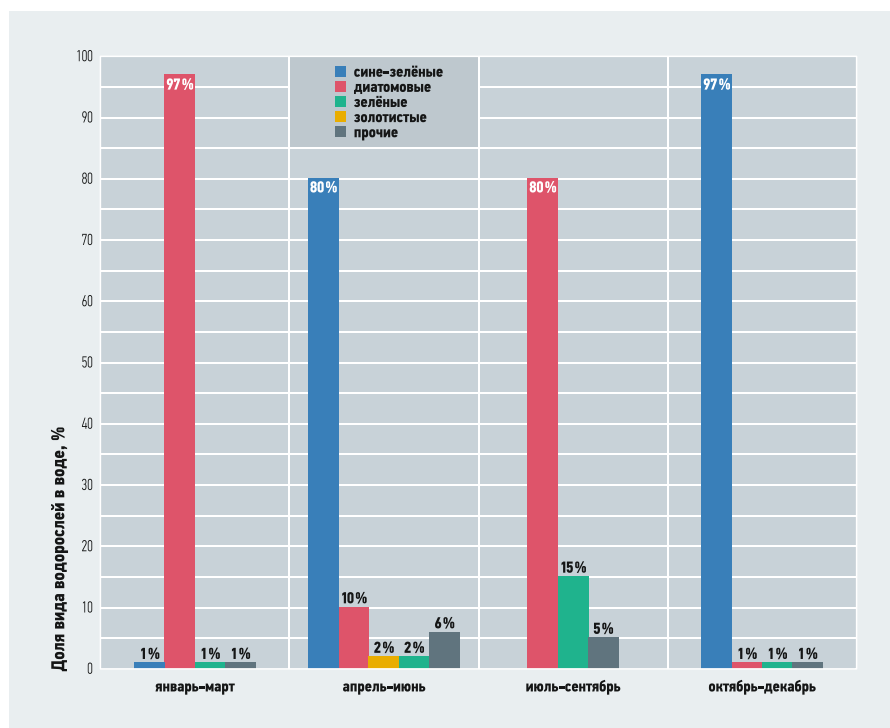


Рис. 2. Видовой состав водорослей (%) в речной воде, поступающей на ВОС

Массовое развитие, особенно в летне-осенний период, отдельных представителей альгофлоры (цветение воды) является следствием нарушения процесса саморегулирования в водных биоценозах. В пресных водоёмах цветение в основном обуславливают зелёные, диатомовые и сине-зелёные водоросли [1]. Для рассматриваемого водоисточника в наиболее неблагоприятный период цветение воды оценивалось как интенсивное, при этом максимальная концентрация биомассы водорослей достигала 24 мг/дм³. В остальные периоды года цветение воды характеризовалось как слабое (от 0,5 до 1 мг/дм³) и умеренное (от 1 до 10 мг/дм³).

Массовое развитие, отмирание клеток фитопланктона в поверхностных источниках водоснабжения ухудшает качество речной воды, приводит к появлению интенсивного запаха, повышению мутности и цветности воды, увеличению кон-

центрации органических веществ; способствует выносу водорослей с водой на водопроводные очистные сооружения (ВОС) и увеличению «грязевой» нагрузки на сооружения.

Корреляционный анализ, выполненный на основании многолетних данных мониторинга качества речной воды, поступающей на водопроводные очистные сооружения, показал сильную (коэффициент корреляции изменялся в пределах от $\pm 0,71$ до $\pm 1,00$) положительную (прямую) корреляционную связь (табл. 1) между численностью фитопланктона и его биомассой, перманганатной окисляемостью, мутностью и температурой и среднюю связь (коэффициент корреляции изменялся в пределах от $\pm 0,31$ до $\pm 0,69$) между численностью фитопланктона и цветностью, общим микробным числом. Обращает на себя внимание то, что корреляционная связь, как её усиление, так и ослабление, неоднозначна по сезонам года и годам в пределах анализируемого периода наблюдений.



•• Колония золотистых водорослей (хризифитов) вида *Synura uvella*

В период интенсивного роста водорослей и после отмирания их клеток в воду попадают различные химические вещества. Спектр метаболитов водорослей очень широк — от низкомолекулярных летучих соединений до каротиноидов ($C_{40}H_{56}O_2$ и $C_{40}H_{56}$). Часть из этих веществ характерна практически для всех отделов водорослей, другая часть очень специфична и найдена лишь у отдельных представителей определённых отделов, классов и родов водорослей. Многие метаболиты проявляют высокую биологическую активность (терпены и их производные, изопреноиды, диметилсульфоксид, галлоидированные лактоны и кетоны, гетероциклические, ароматические и серосодержащие углеводороды) [2].

Сине-зелёные водоросли, широко представленные в озёрах, водохранилищах и медленно текущих реках, производят «цианотоксины», концентрация которых возрастает в период интенсивного размножения водорослей. Это явление характерно для многих водоисточников и в последнее время служит объектом пристального внимания при проведении исследований.

По данным [3], водорослями родов *Microcystis*, *Anabaena*, *Aphanizomenon* и пр. продуцируются гепатоксины (в частности, микроцистины), встречающиеся в концентрациях свыше 1 мкг/дм^3 и признанные опасными для здоровья человека (поражают печень, нервную систему, вызывают дерматиты). Гепатоксины могут оставаться в воде после отмирания водорослей ещё в течение месяца.

Сезонные изменения качества воды, развитие фитопланктона, антропогенная и техногенная нагрузка на водоисточник, биологическое преобразование органических соединений, присутствующих в воде, обуславливают появление запахов.

Некоторые виды микроводорослей в результате своей жизнедеятельности, а также при отмирании и разложении являются продуцентами пахнущих веществ. К таким микроскопическим водорослям могут относиться виды *Oscillatoria agardhii*, *Aphanizomenon flos-aqua*, *Microcystis aeruginosa*, *Anabaena flos-aqua*, *Melosira granulata*, *Nodularie* и др.

На интенсивность образования пахнущих веществ в процессе жизнедеятельности микроводорослей влияет стадия их роста, а также условия среды обитания — освещённость и температура окружающей среды, причём при снижении последних двух параметров интенсивность образования одорирующих веществ увеличивается [4].

Основные проблемы запаха водопроводной воды чаще других возникают в связи с веществами, выделяемыми актиномицетами и цианобактериями родов *Oscillatoria*, *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Synplocia* и др.

Актиномицеты продуцируют геосмин и 2-метилизоборнеол (МИБ). Чистые культуры актиномицетов производят запахи, которые характеризуются как землистый, древесный, затхлый, «запах картофельного погреба», медовый, рыбный, травяной. Причиной этих запахов, помимо геосмина и МИБ, могут быть продуцируемые актиномицетами изопропилметоксипиразин (ИППМ) и изобутилметоксипиразин (ИБМП) [5]. Цианобактерии (сине-зелёные водоросли) видов *Anabaena laxa* и *Anabaena flos-aquae* продуцируют геосмин, имеющий землистый или сладковато-землисто-кукурузно-травяной запах, а *Oscillatoria tenuis*, помимо геосмина, выделяет и МИБ, производящие сладковато-арбузно-кукурузный и землисто-кукурузнозатхлый запахи. Пахучие вещества выделяются клетками и при жизни, но основной выход происходит при их отмирании — естественном или в результате применения альгицидов.

Из группы диатомовых водорослей пахнущие вещества продуцируют представители родов *Asterionella* (запахи герани и рыбы), *Cyclotella* (травянистый, герани и рыбы), *Tabellaria* (травянистый, герани и рыбы) и *Melosira* (травянистый, герани и затхлости). Зелёные водоросли способны придавать воде запахи травы, иногда — рыбы. Представители золотистых водорослей родов *Synura*, *Dinobryon* и *Uroglenopsis*, которые развиваются в холодное время года, способны придавать воде сильный рыбный запах.

Этот запах, как и в случае диатомовых водорослей, имеют альдегиды и кетоны, образующиеся в результате ферментативного преобразования ненасыщенных жирных кислот при отмирании клеток (гептагienes, нонадиеналы, декадиеналы, декатриеналы и гексаналы).

•• Видовой состав пресноводного фитопланктона

табл. 2

Отдел	Род	Продуцируемый запах
Сине-зелёные	<i>Anabaena</i>	Плесневый, травянистый, отвратительный болотистый
	<i>Aphanizomenon</i>	Плесневый, травянистый, отвратительный болотистый
Диатомовые	<i>Asterionella formosa</i>	Ароматический, травянистый, рыбный
	<i>Melosira</i>	Рыбный
	<i>Navicula</i>	Землистый, ароматический
	<i>Tetrastrum</i>	Болотистый
Зелёные	<i>Actinastrum</i>	Землистый, ароматический
	<i>Dictyosphaerium</i>	Травянистый, настурций, рыбный
Золотистые	<i>Dinobryon</i>	Ароматический, отвратительный рыбный
	<i>Synura</i>	Огуречный, дыни, рыбный
Пирофитовые	<i>Ceratium</i>	Отвратительный рыбный
	<i>Peridinium</i>	Рыбный
Криптофитовые	<i>Cryptomonas</i>	Фиалковый сухой
Эвгленовые	<i>Trachelomonas</i>	Болотистый



В анализируемой речной воде преобладал землистый и болотистый запах интенсивностью от одного до трёх баллов. Данные по видам гидробионтов, встречающихся в природной воде и продуцируемому ими запаху, приведены в табл. 2.

Водоросли (клеточная масса и экстрацеллюлярные продукты жизнедеятельности) наряду с другими веществами являются также и потенциальным источником токсичных канцерогенных продуктов (тригалогенметанов, галоуксусных кислот и других). Тригалогенметаны образуются в процессе водоподготовки при использовании хлорсодержащих реагентов на этапе обеззараживания природной воды [6, 7].

Основными структурообразующими органическими веществами клеток водорослей являются протеины, углеводы и липиды, соотношение которых зависит от разновидности организма и стадии роста [8]. В табл. 3 приведены данные по относительному содержанию биополимеров по классам, причём суммарное содержание органических веществ в клетке во-

дорослей принимается за 100%. Липиды и протеины играют более значимую роль в образовании тригалогенметанов и галоуксусных кислот, чем углеводы. В работе [2] выдвинуто предположение, что количественный и качественный состав побочных продуктов хлорирования зависит от соотношения трёх основных видов биополимеров в клетках водорослей.

Представляло интерес изучение динамики образования хлорорганических соединений в процессе обработки речной воды, содержащей микроводоросли.

На действующих ВОС обработка воды производилась по традиционной двухступенчатой реагентной технологии

Основными структурообразующими органическими веществами клеток водорослей являются протеины, углеводы и липиды, соотношение которых зависит от разновидности организма и стадии роста

●● Соотношение биополимеров в клетках различных отделов водорослей

табл. 3

Органические вещества клеток водорослей	Относительное содержание биополимеров в клетках водорослей, %		
	Сине-зелёные	Зелёные	Диатомовые
Протеины	51,2–82	35,1–68,1	19,2–58,4
Углеводы	14,5–41	13,6–33,0	8,1–36,3
Липиды	3,6–24,5	3,8–43,9	15,8–71,6

●● Показатели качества исходной и очищенной на ВОС воды

табл. 4

Вода	Показатель	Проба №1*	Проба №2*
Исходная	Биомасса, кл/см ³	0,02	0,03
	Численность водорослей (сине-зелёные / диатомовые / прочие), кл/см ³	102 (100 %) / 78 (76,5 %) / 24 (23,5 %) / –	40 (100 %) / – / 32 (80 %) / 8 (20 %)
	Хлороформ, мкг/л	отс.	отс.
	Бромдихлорметан, мкг/л	отс.	отс.
Очищенная	Биомасса, мг/дм ³	0,01	0,01
	Численность водорослей (сине-зелёные / диатомовые / прочие), кл/см ³	8 (100 %) / – / 8 (100 %) / –	8 (100 %) / – / 8 (100 %)
	Хлороформ, мкг/дм ³	117,6	68
	Бромдихлорметан, мкг/дм ³	8,4	5,2

* Режимы обработки воды и дозы реагентов идентичны.

(горизонтальные отстойники — скорые фильтры), для обеззараживания воды использовался хлор. Доза первичного хлора изменялась в пределах от 1,74 до 2,49 мг/дм³, вторичного — от 1,08 до 1,34 мг/дм³. Время прохождения воды по сооружениям составляло примерно 4,2–4,5 ч.

Исследования, результаты которых приведены в табл. 4, проводились в зимний период с низкой температурой речной воды (1,1–2,7°C), минимальной бактериальной загрязнённостью водисточника и концентрацией органических загрязнений (перманганатная окисляемость — 6,16–6,26 мг/дм³). Мутность воды составляла 0,46–0,63 мг/дм³, цветность — 21–23 град., водородный показатель pH — 7,7–8,1, щёлочность не превышала 3,56 ммоль/дм³.

В воде присутствовали сине-зелёные и диатомовые водоросли.

Было установлено, что в условиях эксплуатации ВОС в штатном режиме при хлорировании воды, содержащей легкоокисляемые органические загрязнения и фитопланктон в малых количествах (40–102 кл/см³), образуются токсичные продукты — хлороформ и бромдихлорметан, концентрация которых по мере обработки воды на сооружениях повышалась и в очищенной воде составляла, соответственно, 68–117,6 (ПДК — 60 мкг/дм³) мкг/дм³ и 8,4–5,2 (ПДК — 30 мкг/дм³) мкг/дм³ (табл. 4). Причём концентрация образовавшегося хлороформа оказалась в 1,7 раза выше в пробе воды, в которой преобладали сине-зелёные водоросли (76,5%). ●

Продолжение следует.

1. Руденко Г.Г., Горонский И.Т. Удаление примесей из природных вод на водопроводных станциях. — Киев: Будівельник, 1976. 208 с.
2. Васильева А.И., Насырова М.Р., Кантор Л.И., Труханова Н.В., Мельницкий И.А. Роль водорослей в образовании побочных продуктов хлорирования воды // Водоснабжение и санитарная техника, 2014. №3. С. 34–38.
3. Мокленко А.В. Цианобактерии как опасные загрязнители поверхностных водоёмов // ВодаMagazine, 2017. №2. С. 20–24.
4. Скрыбин А.Ю., Поповьян Г.В., Тронь И.А. Микроводоросли как фактор, влияющий на органолептические свойства воды реки Дон // Водоснабжение и санитарная техника, 2015. №8. С. 38–43.
5. Гусев Е.Е. Одоорирующие вещества биологического происхождения в природных водах и способы их удаления при водоподготовке: Дис. канд. техн. наук. по спец. 05.23.04. — М.: НИИ ВОДГЕО, 2007. 180 с.
6. Алексеева Л.П. Снижение концентрации хлорорганических соединений, образующихся в процессе подготовки питьевой воды // Водоснабжение и санитарная техника, 2009. №9. С. 27–34.
7. Govorova Zh., Gorenko G., Rudich UL, Govorov V. Evaluation of barrier functions of traditional water supply facilities in relation to toxic trihalomethanes. MATEC Web of Conferences. Vol. 251 (03032). 2018.
8. Hong H.C., Mazumber A., Wong M.H., Liang Y. Yield of trihalomethanes and haloacetic acids upon chlorinating algal cells, and its prediction via algal cellular biochemical composition. Water Research. 2008. No. 42. Pp. 4941–4948. References — see page 94.

The influence of phytoplankton on the formation of water quality and methods of its removal. Part 1. Pp. 32–35.

Zhanna M. Govorova, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Water supply and Sanitation, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU); **Oleg B. Govorov**, PhD, Chief Specialist of the technology department of "MosvodokanalNIIPROJECT Institute", JSC

1. Rudenko G.G., Goronovskij I.T. *Udalenie primesej iz prirodnyh vod na vodoprovodnyh stancijah* [Removal of impurities from natural waters at waterworks]. Kiev. *Budivelnik* ["Budivelnik" ("The Constructor") Magazine]. 1976. 208 p. [In Russian]
2. Vasil'eva A.I., Nasyrova M.R., Kantor L.I., Truhanova N.V., Mel'nickij I.A. *Rol' vodoroslej v obrazovanii pobochnykh produktov hlorigovaniya vody* [The role of algae in the formation of water chlorination by-products]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* ["Water supply and sanitary equipment" Magazine]. 2014. No. 3. Pp. 34–38. [In Russian]
3. Mokienko A.V. *Cianobakterii kak opasnye kontaminanty poverkhnostnykh vodoemov* [Cyanobacteria as dangerous contaminants of surface water bodies]. *VodaMagazine* [WaterMagazine]. 2017. No. 2. Pp. 20–24. [In Russian]
4. Skryabin A.Ju., Popov'jan G.V., Tron' I.A. *Mikrovodorosli kak faktor, vliyashhij na organolepticheskie svoystva vody reki Don* [Microalgae as a factor influencing the organoleptic properties of the water of the Don River]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* ["Water supply and sanitary equipment" Magazine]. 2015. No. 8. Pp. 38–43. [In Russian]
5. Gusev E.E. *Odorirujushhie veshchestva biologicheskogo proishozhdeniya v prirodnyh vodah i sposoby ih udaleniya pri vodopodgotovke* [Odoring substances of biological origin in natural waters and methods for their removal during water treatment]. *Diss. kand. tehn. nauk. po spec. 05.23.04* [The PhD thesis in the specialty No. 05.23.04]. Moscow. NII VODGEO [State Scientific Center of Russia — "VODGEO Research Institute", JSC]. 2007. 180 p. [In Russian]
6. Alekseeva L.P. *Snizhenie koncentracii hlorganicheskikh soedinenij, obrazujushhihsja v processe podgotovki pit'evoy vody* [Reducing the concentration of organochlorine compounds formed in the process of preparing drinking water]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* ["Water supply and sanitary equipment" Magazine]. 2009. No. 9. Pp. 27–34. [In Russian]
7. Zhanna Govorova, Galina Gorenko, Uliana Rudich and Vadim Govorov. Evaluation of barrier functions of traditional water supply facilities in relation to toxic trihalomethanes. MATEC Web of Conferences. Vol. 251 (03032). 2018.
8. Hong H.C., Mazumber A., Wong M.H., Liang Y. Yield of trihalomethanes and haloacetic acids upon chlorinating algal cells, and its prediction via algal cellular biochemical composition. *Water Research*. 2008. No. 42. Pp. 4941–4948.