

УДК 556.5:550.4

О.А. Липатникова¹, Т.Н. Лубкова², Е.М. Хавина³**ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ КАНАЛА ИМЕНИ МОСКВЫ И ВОЛГО-БАЛТИЙСКОЙ СИСТЕМЫ***ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,**119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1**ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт»,**141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9**Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1**Moscow Institute of Physics and Technology, 141701, Moscow Region, Dolgoprudny, Institutskiy per., 9*

По результатам экспедиционных исследований в летний период 2018 г. дана гидрохимическая характеристика современного состояния водных объектов канала имени Москвы и Волго-Балтийской системы. Проанализировано пространственное изменение ионного состава воды и содержания растворенных форм микроэлементов на участке от Москвы до Петрозаводска. По результатам сопоставления с литературными данными охарактеризована динамика микроэлементного состава и показана устойчивость ионного состава воды в течение многолетнего периода наблюдений.

Ключевые слова: водохранилище, ионный состав воды, микроэлементы, канал имени Москвы, Волго-Балтийская система.

Based on the results of field research in the summer of 2018 a hydrochemical characteristic of the current state of the Moscow Canal and the Volga-Baltic system was carried out. The spatial change in the ionic composition of water and the content of dissolved forms of trace elements in the area from Moscow to Petrozavodsk was analyzed. The dynamics of the microelement composition was characterized and the stability of the ionic composition of water over a long-term observation period was shown.

Key words: water reservoir, ionic water composition, trace elements, channel them. Moscow, Volga-Baltic system.

Введение. В 1930–1970-е гг. были созданы уникальные межбассейновые соединения (Волго-Балтийский, Беломоро-Балтийский, Волго-Донской каналы, канал имени Москвы) и цепи водохранилищ, благодаря чему удалось соединить в единую судоходную систему все крупные реки европейской части России. Не только Москва, но и десятки других российских городов получили право именовать себя «портами пяти морей», поскольку появилась возможность беспрепятственной и экономически доступной доставки грузов и пассажиров по рекам до Балтийского, Белого, Черного, Азовского и Каспийского морей.

Канал имени Москвы, построенный в 1932–1937 гг. и протянувшийся от Волги до Москвы, — сооружение, которое комплексно решает несколько крупных водохозяйственных задач: водоснабжение столицы, обеспечение водно-транспортной связи с Волгой, улучшение санитарного состояния рек в пределах города, выработка электроэнергии на попутных и оставшихся расходах воды, а также создание зон отдыха [Канал им. Москвы..., 1987]. Волго-Балтийский канал представляет собой

крупнейшее гидротехническое сооружение: он соединяет Онежское озеро с Рыбинским водохранилищем. Воротами Волго-Балта считают Вытегорский гидроузел, где был воздвигнут комплекс гидротехнических сооружений: судоходный шлюз, водосброс, совмещенный с гидроэлектростанцией; земляная плотина, перегородившая русло реки, а также подходные каналы, дамбы, металлический мост для движения транспорта. Непосредственно от устья р. Вытегра до Рыбинского водохранилища канал протянулся на 367 км [Золотова, Скупинова, 2010].

Исследования водохранилищ Волги и Волго-Балтийского канала активно проводятся сотрудниками Института биологии внутренних вод РАН (ИБВВ РАН) и Института водных проблем РАН (ИВП РАН). Начиная с конца 1950-х гг. и по настоящее время опубликованы многочисленные работы о гидрохимических исследованиях Угличского, Рыбинского, Шекснинского водохранилищ [Гапеева, 2013; Григорьева и др., 2011; Дебольский и др., 2010; Современное..., 2002; Структура..., 2018; Экологические..., 2001]. Экосистема Онеж-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геохимии, науч. с.; e-mail: lipatnikova_oa@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геохимии, ст. науч. с.; e-mail: tanya_lubkova@mail.ru

³ Физтех-школа аэрокосмических технологий Московского физико-технического института (научно-исследовательского университета), аспирант; e-mail: khavina.lx@phystech.edu



Рис. 1. Схема расположения точек опробования

ского озера со середины 1960-х гг. и по настоящее время исследуется сотрудниками Института водных проблем Севера КарНЦ РАН [Онежское озеро, 2010; Сабылина и др., 2010; Тимакова и др., 2011]. Мониторинг водохранилищ канала имени Москвы (Клязьминское, Пестовское, Икшинское и др.) осуществляется Бассейновой гидрохимической лабораторией ФГБУ «Центррегионводхоз» [<http://fgwu.ru>], но научно-исследовательских работ по этим объектам немного [Волков, 2011; Мосин, 2009]. Опубликованные исследования экосистемы водохранилищ участка Волго-Балтийского канала на р. Вытегра единичны [Гапеева и др., 2018] и не включают гидрохимическую характеристику воды.

Комплексную сравнительную гидрохимическую характеристику водных объектов канала имени Москвы и Волго-Балтийской системы при движении от Москвы до Петрозаводска также ранее не проводили, что определяет актуальность научных исследований в этом направлении.

Материалы и методы исследований. Для гидрохимической характеристики водных объектов канала имени Москвы и Волго-Балтийской системы в июле 2018 г. было проведено опробование Клязьминского, Пестовского, Икшинского, Угличского, Рыбинского, Шекснинского, Белоусовского, Вытегорского водохранилищ и Онежского озера. Основные морфометрические характеристики объектов приведены в табл. 1. Опробование выполняли в рамках проекта «Gea Sailing Science» в июле 2018 г. Пробы воды отбирали из поверхностного горизонта с борта маломерной яхты «Гея». Схема отбора проб представлена на рис. 1. Непосредственно на судне определяли следующие показатели: температуру воды, pH, электропроводность с использованием портативных pH-метра PH-200 и кондуктометра COM-100 («НМ Digital», Южная Корея). Для определения содержания анионов и окисляемости (ХПК) воду отбирали в емкости из полиэтилена «под крышку».

Для определения содержания главных катионов и микроэлементов пробы фильтровали через стерильные фильтрующие насадки из ацетата целлюлозы с диаметром пор 0,45 мкм (CHROMAFIL CA-45/25-S, «Macherey-Nagel», Германия) в пробирки из полипропилена вместимостью 15 мл и подкисляли фильтрат HNO_3 (ос.ч.) до pH 2.

Анионный состав и ХПК определяли на кафедре геохимии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Содержание хлорид-ионов и гидрокарбонат-ионов оценивали методами объемного титрования, нитрат-ионов — методом потенциометрии согласно [Количественный..., 1978]. Содержание сульфат-ионов определяли рентгенофлуоресцентным анализом на спектрометре «Thermo Scientific Niton» FXL-950 с предварительным концентрированием аликвоты по методу «высушенной капли» с использованием внутреннего стандарта (Ti) и калибровкой по ра-

Таблица 1

Основные морфометрические характеристики объектов исследования, по [Дебольский и др., 2010; <http://voda.mnr.gov.ru>; Современное..., 2002; Золотов, Скупинова, 2010; Сабылина и др., 2010; Онежское озеро, 2010]

Водохранилище	НПУ ¹ , м	Год заполнения	Объем, км ³	Площадь зеркала, км ²	Длина, км	Ширина максимальная, км	Глубина, м
			полный/полезный				средняя/максимальная
Клязьминское	162	1937	0,087/0,027	15,16	16	1,2	5,5/16
Пестовское	162	1937	0,0543/0,0200	11,6	6	2	4,7/14
Икшинское	162	1937	0,015/0,008	8,1	5,6	1,5	—/8
Угличское	124	1940	1,245/0,809	249	143	5,0	5,0/23,3
Рыбинское	109	1941–1947	25,42/16,67	4550	250	56	5,6/30,4
Шекснинское	113	1963	6,521/1,850	1665	262	33	3,9/20
Белоусовское	60 ²	1961	—/—	6,8 ³	11 ³	0,9 ³	4/15
Вытегорское	47 ²	1961	—/—	17 ³	9 ³	1,95 ³	4/12
Онежское озеро	33,3 ⁴	нет	295/нет	9720	248	96	30/120

Примечания. ¹ Нормальный подпорный уровень; ² расчет в соответствии с абсолютной отметкой Онежского озера на основании известного перепада высот в шлюзах 1 и 2 Волго-Балтийского канала; ³ расчет с использованием сервиса Google Earth; ⁴ высота над уровнем моря. Прочерк — данные отсутствуют.

бочим растворам, подготовленным из стандартного образца состава раствора сульфат-иона (1 мг/см³, ГСО 8746-2006). Оценку ХПК выполняли фотометрическим методом согласно [ГОСТ 31859-2012] с использованием анализатора «Эксперт-003-ХПК».

Содержание главных катионов (Ca, Mg, Na, K) и микроэлементов (Al, Ti, Sr, Ba, Rb, Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, V, Cr, As, Mo) анализировали методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП–МС) в Отделе научно-производственных аналитических работ ФГБУ ИМГРЭ на масс-спектрометре ELAN-6100. Калибровку осуществляли по растворам мультиэлементного стандарта (набор ICP-MS-68B, «High-Purity Standards», США). Правильность измерений контролировали использованием внутреннего стандарта (Indium ICP Standard CertiPUR 1002 мг/л±0,4%, «Merck», Германия). Контроль точности проводили измерением стандартного раствора CRM–TMDW (Trace Metals in Drinking Water Standard, «High Purity Standards», США).

Результаты исследований и их обсуждение. При систематизации результатов в соответствии с географической привязкой к водным объектам все проанализированные образцы были разделены на 6 групп: 1) водохранилища канала им. Москвы, а также воды непосредственно самого канала и незарегулированного участка р. Волга в зоне влияния канала (точки 1–6); 2) Угличское водохранилище (точки 7–10); 3) Рыбинское водохранилище (точки 11–15); 4) Шекснинское водохранилище, включая оз. Белое (точки 16–19); 5) водохранилища Волго-Балтийского канала — Вытегорское и Белоусовское (точки 20–21); 6) Онежское озеро (точки 22–31).

Макрокомпонентный (ионный) состав вод представлен на рис. 2, а также обобщенно, в соответствии с указанным делением, в табл. 2. По классификации О.А. Алекина [Алекин, 1970] воды во всех точках опробования относятся к гидро-

карбонатному классу, кальциевой группе, второму типу. Воды околонеутральные (рН 6,2–7,3), ультрапресные и пресные (с минерализацией 40–280 мг/л). Обращает внимание присутствие в водах водохранилищ канала имени Москвы в заметном количестве нитрат-иона (9–35 мг/л), что при относительно невысокой общей минерализации воды (в среднем 240 мг/л) обуславливает вхождение нитрат-иона в состав главных анионов.

Для исследованных объектов характерно в целом закономерное уменьшение минерализации при движении от Москвы до Петрозаводска. Рост содержания растворимых солей и величины рН наблюдается в водах Белоусовского и Вытегорского водохранилищ Волго-Балтийского канала (рис. 2). Воды Онежского озера имеют наименьшую минерализацию (40–48 мг/л) и более кислые значения рН (6,2–6,7 ед.).

Обобщенные формулы Курлова, характеризующие состав вод изученных объектов, приведены в табл. 3. Сопоставление полученных нами аналитических данных с опубликованными показывает устойчивость ионного состава поверхностных вод за многолетний период.

Анализ микроэлементного состава показал, что содержание растворенных форм большинства потенциальных загрязнителей ниже ПДК вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения [Приказ..., 2016] (табл. 4).

Концентрация Си превышает ПДК в воде всех изученных объектов, однако отметим, что утвержденное нормативное значение (1 мкг/л) ниже, чем среднее содержание растворенной меди в реках мира (1,48 мкг/л, согласно [Gaillardet et al., 2014]). Аналогичная ситуация наблюдается при нормировании содержания Мп в водах водных объектов рыбохозяйственного значения — ПДК элемента составляет 10 мг/л при среднем содержании 34 мкг/л. В исследованных водах содержание Мп варьирует в диапазоне 1–100 мкг/л; наибольшие вариации

Таблица 2

Физико-химические характеристики и ионный состав воды объектов исследования

Показатель	Объекты (номера точек опробования)					
	вдхр канала имени Москвы (1–6)	Угличское вдхр (7–10)	Рыбинское вдхр (11–15)	Шекснинское вдхр (16–19)	Вытегорское и Белоусовское вдхр (20–21)	Онежское озеро (23–31)
$T, ^\circ\text{C}$	$\frac{18,3 \pm 23,3}{21,3}$	$\frac{19,6 \pm 21,4}{20,8}$	$\frac{18,6 \pm 20,2}{19,1}$	$\frac{18,3 \pm 24,4}{21}$	$\frac{18,7 \pm 20,6}{19,7}$	$\frac{18,3 \pm 26,4}{21,7}$
pH	$\frac{6,94 \pm 7,15}{7,03}$	$\frac{7,15 \pm 7,29}{7,22}$	$\frac{7,00 \pm 7,24}{7,11}$	$\frac{6,69 \pm 6,77}{6,73}$	$\frac{7,00 \pm 7,13}{7,07}$	$\frac{6,22 \pm 6,74}{6,49}$
$\sigma, \text{мкСм/см}$	$\frac{238 \pm 360}{288}$	$\frac{236 \pm 273}{247}$	$\frac{178 \pm 209}{195}$	$\frac{116 \pm 140}{129}$	$\frac{207 \pm 216}{212}$	$\frac{46 \pm 61}{54}$
ХПК, мг О/л	$\frac{49 \pm 71}{60}$	$\frac{40 \pm 103}{70}$	$\frac{41 \pm 99}{58}$	$\frac{31 \pm 46}{37}$	$\frac{23 \pm 27}{25}$	$\frac{20 \pm 58}{29}$
Ca^{2+} , мг/л	$\frac{35,5 \pm 42,8}{37,3}$	$\frac{32,5 \pm 35,4}{33,6}$	$\frac{23,1 \pm 28,6}{25,9}$	$\frac{15,4 \pm 21,1}{18,3}$	$\frac{29,6 \pm 32,8}{31,2}$	$\frac{5,4 \pm 6,3}{5,8}$
Mg^{2+} , мг/л	$\frac{7,9 \pm 10,9}{8,9}$	$\frac{7,9 \pm 8,9}{8,2}$	$\frac{6,7 \pm 7,4}{7,0}$	$\frac{5,0 \pm 5,8}{5,4}$	$\frac{6,9 \pm 7,5}{7,2}$	$\frac{2,0 \pm 2,4}{2,2}$
Na^+ , мг/л	$\frac{4,0 \pm 7,5}{4,8}$	$\frac{3,8 \pm 4,3}{4,0}$	$\frac{2,2 \pm 3,4}{2,6}$	$\frac{1,3 \pm 1,5}{1,4}$	$\frac{1,9 \pm 2,3}{2,1}$	$\frac{1,9 \pm 2,6}{2,2}$
K^+ , мг/л	$\frac{2,0 \pm 19,0}{10,2}$	$\frac{3,5 \pm 10,8}{6,1}$	$\frac{0,9 \pm 3,2}{1,8}$	$\frac{0,8 \pm 0,9}{0,8}$	$\frac{0,9 \pm 1,5}{1,2}$	$\frac{0,7 \pm 1,4}{0,9}$
HCO_3^- , мг/л	$\frac{138 \pm 170}{144}$	$\frac{128 \pm 144}{136}$	$\frac{93 \pm 119}{104}$	$\frac{61 \pm 79}{69}$	$\frac{122 \pm 135}{129}$	$\frac{21 \pm 26}{24}$
SO_4^{2-} , мг/л	$\frac{7,2 \pm 11,7}{9,2}$	$\frac{10,9 \pm 16,6}{13,2}$	$\frac{11,7 \pm 14,8}{13,4}$	$\frac{10,2 \pm 14,2}{12,0}$	$\frac{3,0 \pm 3,6}{3,3}$	$\frac{2,6 \pm 8,6}{5,2}$
Cl ⁻ , мг/л	$\frac{7,8 \pm 12,6}{9,5}$	$\frac{8,4 \pm 10,8}{9,7}$	$\frac{3,6 \pm 8,4}{5,6}$	$\frac{3,6 \pm 4,0}{3,8}$	$\frac{3,6 \pm 3,6}{3,6}$	$\frac{2,6 \pm 8,6}{5,2}$
NO_3^- , мг/л	$\frac{9 \pm 35}{15}$	$\frac{\text{н/о} \pm 8}{\text{н/о}}$	н/о	н/о	н/о	н/о
M, мг/л	$\frac{215 \pm 281}{239}$	$\frac{200 \pm 231}{213}$	$\frac{141 \pm 183}{160}$	$\frac{98 \pm 126}{110}$	$\frac{168 \pm 187}{177}$	$\frac{40 \pm 48}{44}$

Примечания. M — общая минерализация воды; н/о — не обнаружено. Над чертой — разброс значений, под чертой — среднее.

Таблица 3

Обобщенная формула Курлова для поверхностных вод объектов исследования

Объект	Формула Курлова	
	по данным авторов	по литературным данным
Вдхр канала имени Москвы	$M_{0,24} \frac{\text{Ca } 61 \text{ Mg } 24 \text{ K } 8 \text{ Na } 7}{\text{HCO}_3 \text{ 79 Cl } 10 \text{ NO}_3 \text{ 8 SO}_4 \text{ 6}} \text{ pH } 7,2$	—
Угличское вдхр	$M_{0,21} \frac{\text{Ca } 63 \text{ Mg } 25 \text{ Na } 7 \text{ K } 6}{\text{HCO}_3 \text{ 79 Cl } 10 \text{ SO}_4 \text{ 10}} \text{ pH } 7,2$	$M_{0,21} \frac{\text{Ca } 62 \text{ Mg } 26 \text{ Na } 9 \text{ K } 2}{\text{HCO}_3 \text{ 77 Cl } 13 \text{ SO}_4 \text{ 10}} \text{ [1]}$
Рыбинское вдхр	$M_{0,16} \frac{\text{Ca } 64 \text{ Mg } 28 \text{ Na } 6 \text{ K } 2}{\text{HCO}_3 \text{ 80 SO}_4 \text{ 13 Cl } 7} \text{ pH } 7,1$	$M_{0,17} \frac{\text{Ca } 65 \text{ Mg } 28 \text{ Na } 6 \text{ K } 1}{\text{HCO}_3 \text{ 82 SO}_4 \text{ 14 Cl } 4} \text{ [2]}$
Шекснинское вдхр	$M_{0,11} \frac{\text{Ca } 63 \text{ Mg } 31 \text{ Na } 4 \text{ K } 1}{\text{HCO}_3 \text{ 76 SO}_4 \text{ 17 Cl } 7} \text{ pH } 6,7$	$M_{0,12} \frac{\text{Ca } 61 \text{ Mg } 32 \text{ Na+K } 7}{\text{HCO}_3 \text{ 76 SO}_4 \text{ 16 Cl } 8} \text{ [3]}$
Вытегорское и Белоусовское вдхр	$M_{0,18} \frac{\text{Ca } 69 \text{ Mg } 26 \text{ Na } 4 \text{ K } 1}{\text{HCO}_3 \text{ 93 Cl } 4 \text{ SO}_4 \text{ 3}} \text{ pH } 7,1$	—
Онежское озеро	$M_{0,044} \frac{\text{Ca } 49 \text{ Mg } 30 \text{ Na } 17 \text{ K } 4}{\text{HCO}_3 \text{ 62 SO}_4 \text{ 19 Cl } 19} \text{ pH } 6,5$	$M_{0,045} \frac{\text{Ca } 47 \text{ Mg } 34 \text{ Na } 16 \text{ K } 3}{\text{HCO}_3 \text{ 68 SO}_4 \text{ 13 Cl } 11 \text{ A}_{\text{орг}} \text{ 8}} \text{ [4]}$

Примечания. [1] — усредненный состав за 1980–1990 гг. наблюдений [Экологические..., 2001]; [2] — усредненный состав за 2004–2013 гг. наблюдений [Структура..., 2018]; [3] — усредненный состав за 1988–2000 гг. наблюдений [Современное..., 2002]; [4] — усредненный состав за 1985–2008 гг. наблюдений [Сабылина и др., 2010]. Прочерк — данные отсутствуют.

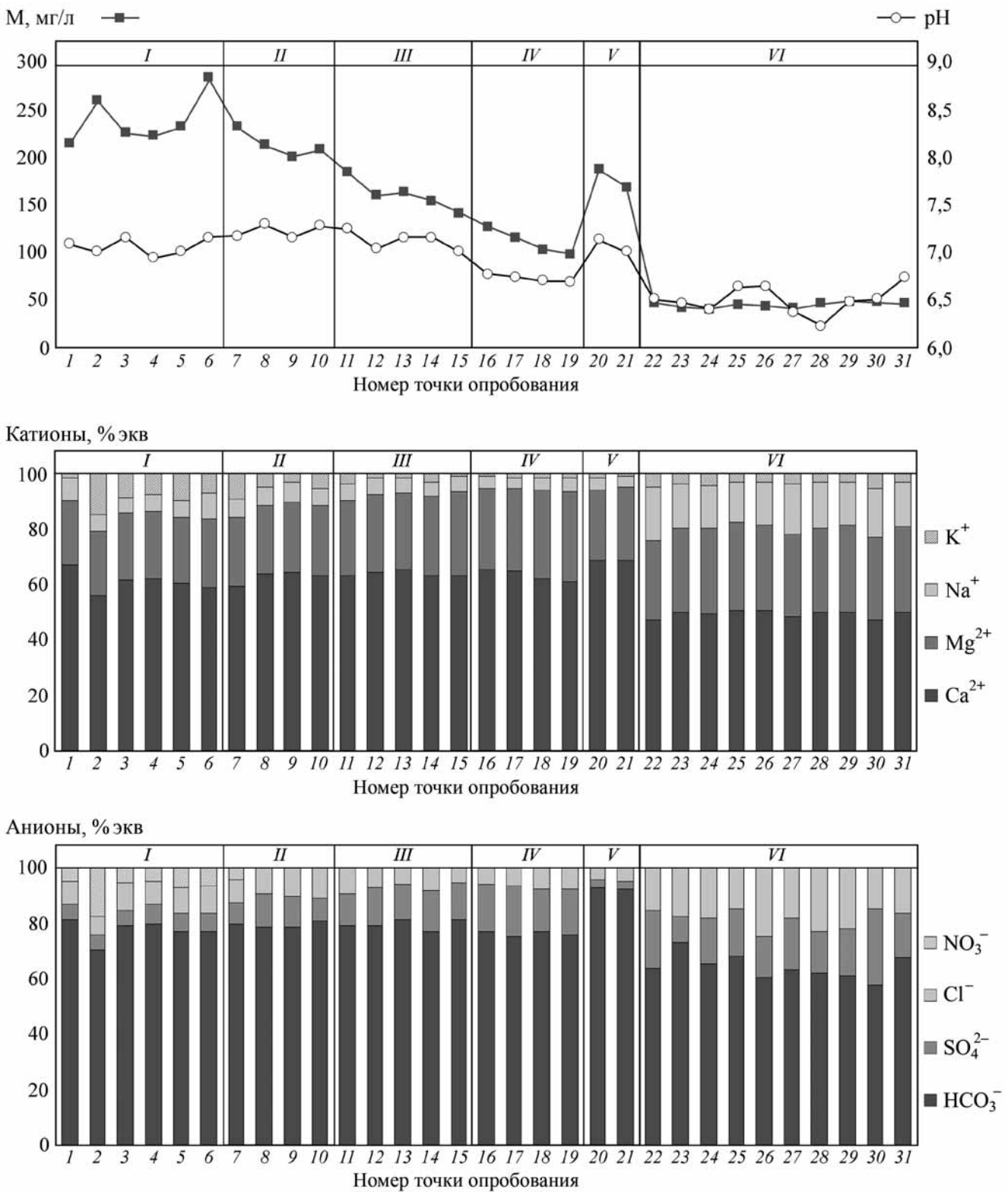


Рис. 2. Минерализация, рН и ионный состав поверхностных вод: I — канал имени Москвы, II — Угличское вдхр, III — Рыбинское вдхр, IV — Шекснинское вдхр, V — вдхр Волго-Балтийского канала (Вытегорское и Белоусовское), VI — Онежское озеро

наблюдаются в водах водохранилищ канала имени Москвы (2,9–99,8 мкг/л, в среднем 9,7 мг/л).
Содержание растворенных форм Fe до 3 раз превышает ПДК в водах Рыбинского, Шекснинского, Вытегорского и Белоусовского водохранилищ, локально — в водах Онежского озера. Вместе

с тем полученные оценки содержания железа ординарные для водоемов лесной зоны, сток которых формируется на залесенных и заболоченных водосборах с преобладанием оподзоленных и торфянистых почв [Современное..., 2002]. Для Шекснинского водохранилища также характерно

Таблица 4

Содержание микроэлементов (мкг/л) в водах изученных объектов

Элемент (класс опасности)	ПДК	вдхр канала имени Москвы	Угличское вдхр	Рыбинское вдхр	Шекснинское вдхр	Вытегорское и Белоусовское вдхр	Онежское озеро
Элементы-гидролизаты							
Al (4)	40	$\frac{6 \pm 18}{10}$	$\frac{13 \pm 25}{17}$	$\frac{13 \pm 42}{23}$	$\frac{34 \pm 74}{55}$	$\frac{19 \pm 19}{19}$	$\frac{12 \pm 29}{18}$
Ti (4)	60	$\frac{0,5 \pm 0,9}{0,7}$	$\frac{0,9 \pm 1,5}{1,1}$	$\frac{1,0 \pm 1,6}{1,4}$	$\frac{2,0 \pm 3,5}{2,9}$	$\frac{1,1 \pm 1,2}{1,1}$	$\frac{0,5 \pm 0,9}{0,6}$
Щелочные и щелочноземельные элементы							
Sr (3)	400	$\frac{100 \pm 178}{116}$	$\frac{89 \pm 108}{99}$	$\frac{65 \pm 78}{71}$	$\frac{34 \pm 60}{52}$	$\frac{43 \pm 47}{45}$	$\frac{16 \pm 17}{16}$
Ba (4)	740	$\frac{41 \pm 46}{44}$	$\frac{40 \pm 43}{41}$	$\frac{19 \pm 35}{27}$	$\frac{16 \pm 18}{17}$	$\frac{29 \pm 32}{30}$	$\frac{11 \pm 12}{11}$
Rb (4)	100	$\frac{1,5 \pm 2,4}{2,1}$	$\frac{1,5 \pm 2,0}{1,7}$	$\frac{1,0 \pm 1,6}{1,4}$	$\frac{0,8 \pm 0,9}{0,9}$	$\frac{1,1 \pm 1,7}{1,4}$	$\frac{1,1 \pm 1,7}{1,3}$
Тяжелые металлы							
Pb (2)	6	$\frac{0,10 \pm 0,31}{0,15}$	$\frac{0,10 \pm 0,15}{0,12}$	$\frac{0,11 \pm 0,26}{0,17}$	$\frac{0,29 \pm 0,34}{0,31}$	$\frac{0,18 \pm 0,44}{0,31}$	$\frac{0,08 \pm 0,75}{0,30}$
Cd (2)	5	$\frac{0,01 \pm 0,02}{0,02}$	$\frac{0,01 \pm 0,02}{0,01}$	$\frac{0,01 \pm 0,02}{0,01}$	$\frac{0,01 \pm 0,02}{0,01}$	$\frac{0,04 \pm 0,06}{0,05}$	$\frac{0,01 \pm 0,13}{0,05}$
Zn (3)	10	$\frac{6,1 \pm 15,7}{9,7}$	$\frac{6,0 \pm 8,4}{6,9}$	$\frac{4,2 \pm 18,7}{10,8}$	$\frac{7,8 \pm 10,0}{9,2}$	$\frac{5,0 \pm 17,4}{11,2}$	$\frac{3,4 \pm 18,6}{9,0}$
Cu (3)	1	$\frac{1,9 \pm 2,3}{2,1}$	$\frac{1,7 \pm 2,2}{1,9}$	$\frac{0,9 \pm 2,1}{1,4}$	$\frac{1,3 \pm 2,0}{1,6}$	$\frac{1,6 \pm 3,3}{2,4}$	$\frac{0,9 \pm 5,1}{1,9}$
Ni (3)	10	$\frac{1,6 \pm 2,1}{1,7}$	$\frac{1,6 \pm 1,9}{1,8}$	$\frac{1,2 \pm 1,6}{1,4}$	$\frac{1,1 \pm 1,4}{1,2}$	$\frac{1,4 \pm 3,3}{2,3}$	$\frac{0,6 \pm 1,1}{0,8}$
Co (3)	10	$\frac{0,12 \pm 0,18}{0,15}$	$\frac{0,15 \pm 0,16}{0,15}$	$\frac{0,10 \pm 0,13}{0,11}$	$\frac{0,08 \pm 0,13}{0,11}$	$\frac{0,10 \pm 0,15}{0,13}$	$\frac{0,02 \pm 0,05}{0,03}$
Mn (4)	10	$\frac{2,9 \pm 99,8}{9,7}$	$\frac{3,2 \pm 16,1}{6,9}$	$\frac{3,0 \pm 35,7}{20,9}$	$\frac{3,4 \pm 42,5}{9,8}$	$\frac{5,2 \pm 6,1}{5,6}$	$\frac{0,8 \pm 4,2}{1,7}$
Fe (4)	100	<50	<50	$\frac{137 \pm 225}{185}$	$\frac{201 \pm 302}{260}$	$\frac{111 \pm 159}{135}$	$\frac{51 \pm 195}{72}$
Аниогенные элементы							
Mo (2)	1	$\frac{0,34 \pm 0,43}{0,39}$	$\frac{0,30 \pm 0,32}{0,31}$	$\frac{0,21 \pm 0,25}{0,23}$	<0,2	$\frac{0,26 \pm 0,29}{0,28}$	<0,2
As (3)	50	$\frac{1,01 \pm 1,49}{1,19}$	$\frac{1,07 \pm 1,17}{1,13}$	$\frac{0,59 \pm 1,06}{0,77}$	$\frac{0,66 \pm 0,77}{0,70}$	$\frac{0,77 \pm 0,87}{0,82}$	$\frac{0,23 \pm 0,33}{0,28}$
V (3)	1	$\frac{0,71 \pm 1,00}{0,87}$	$\frac{0,71 \pm 0,90}{0,82}$	$\frac{0,62 \pm 0,70}{0,66}$	$\frac{0,74 \pm 0,84}{0,80}$	$\frac{0,56 \pm 0,66}{0,61}$	$\frac{0,08 \pm 0,21}{0,11}$
Cr (3)	20	$\frac{0,34 \pm 0,70}{0,56}$	$\frac{0,49 \pm 0,64}{0,56}$	$\frac{0,46 \pm 0,49}{0,47}$	$\frac{0,46 \pm 0,55}{0,52}$	$\frac{0,54 \pm 0,78}{0,66}$	$\frac{0,34 \pm 0,63}{0,47}$

Примечания. Полужирным выделены значения, превышающие ПДК вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения [Приказ..., 2016]. Над чертой — разброс значений, под чертой — среднее.

повышенное относительно других объектов и ПДК содержание растворенных форм Al.

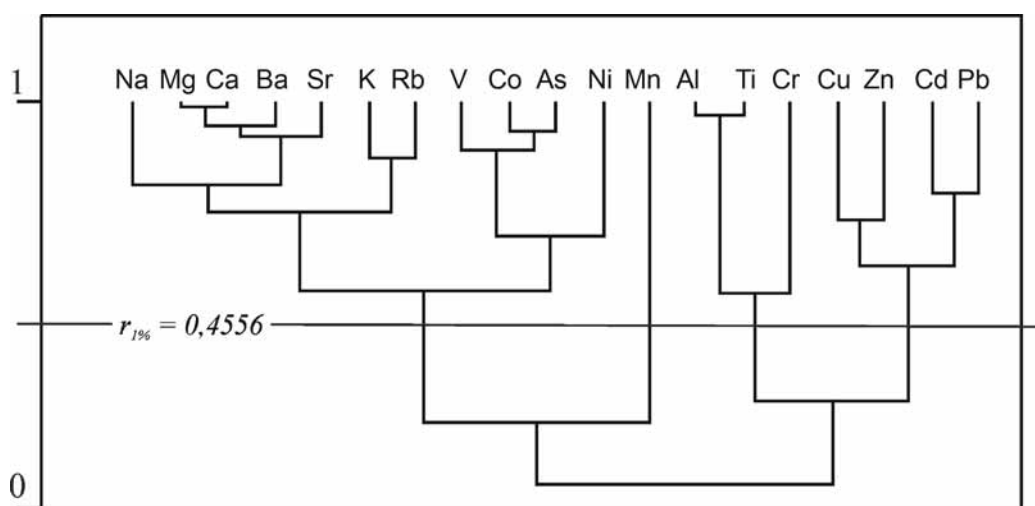
Содержание Zn превышает ПДК (до 2 раз) в единичных точках опробования, что может быть связано с локальными источниками загрязнения. Максимальные значения концентрации установлены в районе г. Череповец (точка 15).

В соответствии с особенностями поведения, подтверждаемыми результатами корреляционного анализа (рис. 3), среди исследуемых микроэлементов можно выделить группы: 1) щелочные

и щелочноземельные микроэлементы — Ba, Sr, Rb, поведение которых тесно связано с главными катионами в ионном составе воды; 2) элементы-гидролизаты — Al и Ti, индикаторные для выявления литогенной составляющей донных отложений водоемов и водотоков; 3) основные тяжелые металлы — Cu, Zn, Cd и Pb; 4) аниогенные элементы — As и V, поведение которых согласуется с миграцией элементов семейства железа — Co и Ni.

Содержание ряда микроэлементов в водах изученных объектов (за исключением Вытегорского и

Рис. 3. Дендрограмма корреляционных зависимостей микро- и макроэлементов в поверхностных водах ($n=31$, $f=29$, $r_{1\%}=0,4556$)



Белоусовского водохранилища) определяли и ранее. В связи с этим проведено сопоставление данных, полученных нами, с уже опубликованными.

В работе [Мосин, 2009] приведено содержание Cd, Cu, Pb и Zn в поверхностных водах канала имени Москвы в 2007–2008 гг. (в среднем 1, 19, 23 и 55 мкг/л соответственно), при этом никакой закономерности в пространственно-временной динамике изменения концентрации тяжелых металлов не выявлено. Наши оценки средних значений содержания указанных металлов в водах объекта значительно ниже (Cd 0,02; Cu 2,1; Pb 0,15; Zn 9,7 мкг/л), а именно в 5 раз для Zn, в 10 раз для Cu, в 50 раз для Cd, в 150 раз для Pb. Отметим, что приведенные в работе [Мосин, 2009] данные могут характеризовать общее содержание элемента (суммарно в растворенной и взвешенной формах); в этом случае наибольшие расхождения закономерно наблюдаются для свинца, основная форма миграции которого в поверхностных водах — взвешенная.

Широкий спектр микроэлементов (Al, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Ba, Pb) в воде Угличского водохранилища определен в 2012–2014 гг. сотрудниками ИБВВ РАН. Согласно данным работы [Гапеева, Законнов, 2016], уровни содержания общих растворенных форм металлов в воде Угличского водохранилища, за исключением Cu, Mn и Fe, не превышают санитарно-гигиенических норм в водоемах России. Рыбохозяйственные ПДК металлов в воде в отдельных точках опробования превышены для Al, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, но превышение средних значений наблюдается только для Mn (12,7 мкг/л), Fe (345 мкг/л), Cu (22 мкг/л) и Zn (20 мкг/л). Сравнение результатов, опубликованных в [Гапеева, Законнов, 2016], с данными, полученными при выполнении аналитических исследований в 2018 г., показало, что содержание Al, Co, Cd, Ba находится на том же уровне, концентрация растворенных форм Mn, Ni и Zn снизилась примерно в 2–3 раза, Pb, Cr, Fe и Cu — в 5–10 раз.

В конце 1980-х гг. появилась первая информация о содержании растворенных форм Cu

(4–8 мкг/л), Zn (16–70 мкг/л) и Pb (3–4 мкг/л) в водах Рыбинского водохранилища [Гапеева, 1993]. В 2009–2010 гг. превышение ПДК вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения наблюдалось по Cu, Mn, Fe и Zn [Григорьева и др., 2011]. По полученным аналитическим данным за 2018 г. содержание этих же четырех элементов в водах Рыбинского водохранилища также превышает ПДК.

В работе [Современное..., 2002] на основании многолетних наблюдений (1994–2000 гг.) приведено содержание Fe, Mn, Zn, Cu, Pb, Cd в воде Шекснинского водохранилища. И ранее, и в настоящее время содержание растворенных форм Pb и Cd не превышает ПДК вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. Концентрация Fe преимущественно составляла 200–320 мкг/л (в среднем 270 мкг/л), Mn — 5–41 мкг/л (в среднем 14 мкг/л), Zn — 5–19 мкг/л (в среднем 9 мкг/л), т.е. находилась на том же уровне, что и сейчас. Лишь содержание Cu по результатам опробования летом 2018 г. снизилось в среднем в 4–6 раз по сравнению с периодом 1994–2000 гг., когда оно варьировало в диапазоне 1–13 мкг/л (в среднем 6 мкг/л).

Согласно данным [Сабылина и др., 2010], концентрация тяжелых металлов в воде Онежского озера изменялась в пределах (мкг/л): 1–15 для Zn, 1–5 для Cu, <1 для Pb и Ni, <0,1 для Cd. Максимальное содержание наблюдалось в вершинных частях губ, подверженных антропогенному воздействию. Полученные авторами данные по этим микроэлементам находятся в тех же диапазонах.

Закключение. Гидрохимические исследования водоемов и водотоков при движении от Москвы до Петрозаводска в летнюю межень 2018 г. показали, что на всем участке опробования воды относятся к гидрокарбонатному классу, кальциевой группе, второму типу. Воды околонеитральные, пресные до ультрапресных. На пути от Москвы до оз. Белое минерализация вод постепенно снижается от 240 до 110 мг/л, в Вытегре перед входом в Онежское озеро возрастает до 180 мг/л, непосредственно в

Онежском озере снижается до 45 мг/л. Проведенное сравнение с полученными ранее данными показало постоянство ионного состава вод водохранилищ в последние 40 лет.

В соответствии с особенностями поведения, подтвержденными результатами корреляционного анализа, среди исследуемых микроэлементов выделяется группа щелочных и щелочноземельных микроэлементов (Ba, Sr, Rb), поведение которых тесно связано с главными катионами в ионном составе воды, а также литофильных элементов-гидролизатов (Al, Ti), основных тяжелых металлов (Cu, Zn, Cd и Pb) и аниогенных элементов (As, V), сопряженных с элементами семейства железа

(Co, Ni). Содержание большинства изученных микроэлементов ниже ПДК вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. Превышения выявлены преимущественно для Fe, Mn, Cu и Zn. Сравнение с литературными данными показало, что концентрация растворенных форм микроэлементов за годы исследований либо не изменилась по сравнению с 1990-ми гг., либо заметно снизилась.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-05-00519 «Развитие экспериментальных и теоретических основ количественной коллоидной геохимии континентальных вод»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 413 с.

Волков Д.А. Качество вод Клязьминского водохранилища // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2011. № 4. С. 48–52.

Гапеева М.В. Биогеохимическое распределение тяжелых металлов в экосистеме Рыбинского водохранилища // Сб. науч. тр. ИБВВ имени И.Д. Папанина РАН. 1993. Вып. 67 (70). С. 42–49.

Гапеева М.В. Тяжелые металлы в воде и донных отложениях Рыбинского водохранилища // Вода: Химия и Экология. 2013. № 5. С. 3–7.

Гапеева М.В., Законнов В.В. Геохимическая характеристика экосистемы Угличского водохранилища // Сб. науч. тр. ИБВВ имени И.Д. Папанина РАН. 2016. Вып. 75 (78). С. 41–46.

Гапеева М.В., Законнов В.В., Ложкина Р.А. и др. Оценка загрязнения тяжёлыми металлами малонаселённых территорий на примере Северо-Западного региона России // Экология человека. 2018. № 3. С. 4–9.

ГОСТ 31859-2012. Вода. Метод определения химического потребления кислорода. М.: Стандартинформ, 2014. 8 с.

Григорьева И.Л., Лупанова И.А., Нечаева Е.А., Романов С.Н. Пространственно-временная изменчивость показателей химического состава воды Угличского и Рыбинского водохранилищ // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: В 4 т. Т. 2. Химический состав и качество воды. Пермь, 2011. С. 41–46.

Дебольский В.К., Григорьева И.Л., Комиссаров А.Б. и др. Современная гидрохимическая характеристика р. Волги и ее водохранилищ // Вода: Химия и Экология. 2010. № 11. С. 2–12.

Золотова О.А., Скупинова Е.А. От Мариинки до Волго-Балта: эволюция гидротехнических сооружений. Вологда: Вологжанин, 2010.

Канал им. Москвы: 50 лет эксплуатации / Под ред. Л.С. Быкова, А.С. Матросова. М.: Стройиздат, 1987. 240 с.

Количественный анализ / Под ред. А.Ю. Золотова, М.: Мир, 1978. 558 с.

Мосин А.В. Современные проблемы качества воды в канале имени Москвы // Изв. Самарского НЦ РАН. 2009. Т. 11, № 1 (3). С. 320–323.

Онежское озеро. Атлас / Под ред. Н.Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.

Официальный сайт Федерального агентства водных ресурсов. URL: <http://voda.mnr.gov.ru> (дата обращения: 10.07.2019).

Официальный сайт ФГБУ «Центррегионводхоз». URL: <http://fgwu.ru> (дата обращения: 12.08.2019).

Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (Зарегистрировано в Минюсте России 13.01.2017 № 45203). Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://docs.cntd.ru> (дата обращения: 22.06.2019).

Сабылина А.В., Лозовик П.А., Зобков М.Б. Химический состав воды Онежского озера и его притоков // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 6. С. 717–729.

Современное состояние экосистемы Шекснинского водохранилища. Ярославль, 2002. 366 с.

Структура и функционирование экосистемы Рыбинского водохранилища в начале XXI века / Под ред. В.И. Лазарева. М.: РАН, 2018. 456 с.

Тимакова Т.М., Сабылина А.В., Полякова Т.Н. и др. Современное состояние экосистемы Онежского озера и тенденции ее изменения за последние десятилетия // Тр. КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 42–49.

Экологические проблемы Верхней Волги. Ярославль, 2001. 427 с.

Gaillardet Y., Viers Y., Dupre B. Trace elements in river water. Ch. 7.7 // Treatise on Geochemistry: Second ed. H.D. Holland., K.K. Turekian. Elsevier Ltd. 2014. Vol. 7. P. 195–235.

Поступила в редакцию 00.00.2020

Поступила с доработки 00.00.2020

Принята к публикации 00.00.2020