

УДК 504.4.054

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОДЫ ГОРОДСКОЙ РЕКИ ПО ГИДРОХИМИЧЕСКИМ ИНДЕКСАМ (РЕКА ОХТА, САНКТ-ПЕТЕРБУРГ)

А. М. Белякова, Н. В. Зуева

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

Для оценки качества воды р. Охта в период с 2016 по 2020 г. был применен покомпонентный метод, а также использованы три гидрохимических индекса: индекс загрязненности воды (ИЗВ), удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ) и индекс качества воды канадского Совета министров по окружающей среде (CCME WQI – Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index). По результатам покомпонентной оценки сделаны следующие выводы: реакция среды (рН) нейтральная-слабощелочная, по показателю общей жесткости – вода мягкая. Весь период исследований на большинстве станций фиксировался дефицит растворенного в воде кислорода. По течению реки содержание растворенного кислорода снижается. В устьевом отрезке кислородная ситуация немного улучшается в связи с затоком вод р. Нева. По БПК₅, повсеместно превышающему ПДК, сделан вывод о загрязнении вод р. Охта легкоокисляемым органическим веществом. Содержание железа в воде многократно превышало ПДК. Также выявлено увеличенное содержание различных форм азота. За весь период наблюдений постоянно фиксировались повышенные концентрации нефтепродуктов (с неоднократным превышением 50 ПДК в разные годы). По рассчитанным значениям указанных индексов воды р. Охта охарактеризованы как «грязные» и «чрезвычайно грязные», качество воды – «очень плохое». Отдельно была рассмотрена методика малоизвестного в России CCME WQI, проведено его сравнение с ИЗВ и УКИЗВ, выявлены определенные преимущества. Показано, что между индексами существует связь. Дана рекомендация к использованию CCME WQI в оценке качества поверхностных вод наряду с УКИЗВ.

Ключевые слова: малый водоток; антропогенное воздействие; ИЗВ; УКИЗВ; CCME WQI.

A. M. Belyakova, N. V. Zueva. ASSESSMENT OF RIVER WATER QUALITY IN THE CITY BY HYDROCHEMICAL INDICES (THE OKHTA RIVER, ST. PETERSBURG)

The Okhta River water quality was assessed in the period 2016–2020 using the component-wise assessment method and three hydrochemical indices (Water Pollution Index (WPI), Specific Combinatorial Water Pollution Index (SCWPI), and Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI)). The component-wise assessment demonstrated that the pH was neutral or slightly alkaline, and water hardness was low. Dissolved oxygen deficit was observed at most stations during the entire research period. The content of dissolved oxygen declined downstream along the river. At the river mouth, the oxygen situation is slightly better due to the inflow of the Neva River water.

The BOD₅ exceeded the MPC at all sampling stations, suggesting the Okhta River water was polluted with readily oxidizable organic matter. The iron content in the water exceeded the MPC manifold. An elevated content of various forms of nitrogen was also revealed. Over the entire observation period, increased concentrations of oil products were constantly recorded (exceeding MPC more than 50-fold in different years). The Okhta River water was characterized as “dirty” and “extremely dirty”, and the water quality was “poor” according to the calculated values of the indices – WPI, SCWPI and CCME WQI. The methodology of the little-known in Russia CCME WQI is considered separately. It was compared with the WPI and SCWPI. The relationship between the indices is clarified. The use of CCME WQI for surface water quality assessment along with SCWPI is recommended.

Key words: small watercourse; anthropogenic impact; Water Pollution Index (WPI); Specific Combinatorial Water Pollution Index (SCWPI); Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI).

Введение

Оценка степени загрязненности любого водного объекта по гидрохимическим данным проще всего производится в виде покомпонентного анализа. Однако отдельные гидрохимические характеристики не могут дать полного представления о состоянии водного объекта. К тому же большое число химических компонентов создает проблему, связанную со сложностью анализа большого объема данных. Для ее решения используются различные гидрохимические индексы. Они дают возможность обобщения результатов покомпонентной оценки и приводят их к наглядному, просто понимаемому виду.

В настоящее время ИЗВ (индекс загрязненности воды) и УКИЗВ (удельный комбинаторный индекс загрязненности воды) являются наиболее популярными методами оценки степени загрязненности водных объектов в Российской Федерации [Методические..., 1988; РД..., 2002]. Причем с 2002 г. УКИЗВ используется в системе Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет).

В других странах также разработаны различные методики, позволяющие оценить качество воды по химическим данным [Sutadian et al., 2016]. Одной из них является CCME WQI – Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (индекс качества воды канадского Совета министров по окружающей среде [CCME..., 2017]). Он был разработан и введен в использование в Канаде в 2001 году. CCME WQI обрел большую популярность и потому широко используется по всему миру [Lumb et al., 2006; Gyamfi et al., 2013; Munna et al., 2013; Bilgin, 2018]. Есть опыт его применения в том числе российскими исследователями [Ерина и др., 2017; Заславская и др., 2019; Белякова и др., 2020].

Сопоставляя данный индекс CCME WQI с УКИЗВ, можно отметить ряд его преимуществ:

1) метод гибок в отношении выбора параметров, используемых в расчете, т. е. пользователи индекса могут легко изменять и адаптировать их в зависимости от условий и целей исследования;

2) в отношении нормативных значений данный метод также гибок, и он позволяет использовать не только ПДК (как УКИЗВ), но и какие-либо другие значения, необходимые для выполнения целей исследования;

3) процесс расчета CCME WQI довольно прост. Стоит отметить, что разработан специальный калькулятор, находящийся в свободном доступе, позволяющий производить расчеты индекса автоматически [CCME..., 2017].

Таким образом, вышеперечисленные преимущества CCME WQI над УКИЗВ делают данную методику более удобной для оценки качества воды.

Апробация методики расчета CCME WQI выполнена для р. Охта. Этот водоток является крупнейшим правым притоком р. Нева в черте Санкт-Петербурга. Длина реки 90 км, последние 9 км из которых она течет в городе. Водосборная площадь 768 км². Сток зарегулирован плотиной Охтинского водохранилища. Режим уровня и расхода воды в нижнем течении реки зависит от работы гидротехнических сооружений и колебаний уровня воды р. Нева. Средний расход воды в устье 7,2 м³/с.

На всем своем протяжении р. Охта принимает воды более чем пятидесяти крупных и мелких предприятий. Несмотря на то что основной объем сточных вод поступает на очистные сооружения, ежегодно часть бытовых и производственных стоков попадает в реку (в том числе в результате аварий или несанкционированных сбросов). В связи с этим состояние реки вызывает серьезные опасения.

Сложившаяся напряженная экологическая обстановка стала причиной того, что р. Охта

признана одной из самых загрязненных рек Санкт-Петербурга и Ленинградской области [Водные..., 2002]. По данным Гидрохимического института Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, воды р. Охта по УКИЗВ с 2010 по 2019 г. классифицировались как грязные [Качество..., 2011–2020]. Из-за столь высокого уровня загрязненности р. Охта привлекает внимание многих исследователей [Алексеев и др., 2010; Зуева и др., 2011; Беляков и др., 2015; Павлова, 2016; Фураева, Урусова, 2017; Зуева, Бобров, 2018; Белякова, 2019; Белякова, Пашукова, 2019; Белякова и др., 2020; Опекунов и др., 2020]. Таким образом, для исследуемой реки необходима расширенная оценка степени загрязненности ее вод. Поэтому целью данного исследования является оценка качества вод р. Охта в пределах Санкт-Петербурга с помощью гидрохимических индексов.

Материалы и методы

В работе использованы данные полевых мониторинговых исследований на р. Охта, выполненных в летний период 2016–2020 гг. Ежегодно осуществлялась одна съемка на 13 станциях водотока в пределах Санкт-Петербурга (рис. 1). Эти исследования – часть регулярных работ, проводимых с 1997 г. на р. Охта, ее притоках и Охтинском водохранилище кафедрой прикладной и системной экологии РГГМУ [Алексеев и др., 2020].

В ходе исследований 2016–2020 гг. определен следующий перечень химических показателей: рН, общая жесткость, растворенный кислород, БПК₅, суммарное железо, нефтепродукты, фосфор фосфатов, азот аммонийный (2016–2018, 2020), азот нитритов (2016, 2017, 2019, 2020) и азот нитратов (2016–2018).

Оценка степени загрязненности р. Охта по химическим данным производилась поком-

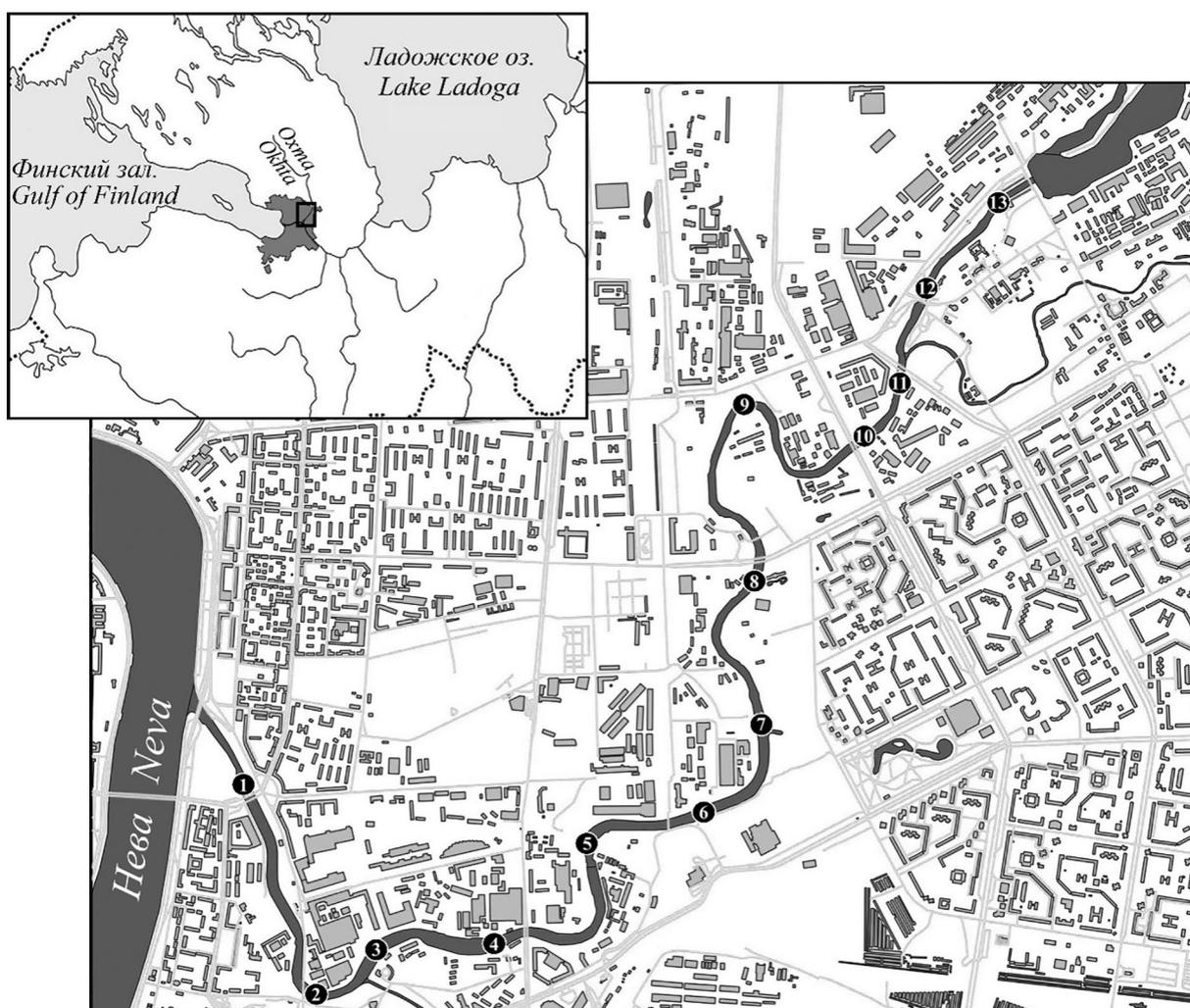


Рис. 1. Станции отбора проб на р. Охта

Fig. 1. The Okhta River sampling stations

понтентно и по индексам (ИЗВ, УКИЗВ, ССМЕ WQI). В качестве нормативов для анализируемых гидрохимических показателей использованы рыбохозяйственные предельно допустимые концентрации (ПДК) [Приказ..., 2016]. А именно: растворенный кислород – не менее 6 мг/дм³, БПК₅ – 2,1 мгО₂/дм³, железо общее – 0,1 мг/дм³, фосфор фосфатов – 0,15 мг/дм³, азот аммонийный – 0,4 мг/дм³, азот нитритов – 0,02 мг/дм³, азот нитратов – 9 мг/дм³, нефтепродукты – 0,05 мг/дм³.

Стоит уточнить, что расчет каждого из индексов был произведен по одинаковым наборам химических параметров в отдельно взятые годы исследований.

Методика расчета ССМЕ WQI не является широко известной в нашей стране, поэтому приведем ее алгоритм. Она основана на сочетании трех факторов: Score (Объем), Frequency (Частота) и Amplitude (Амплитуда), которые объединяются, в результате чего получается одно значение от 0 до 100, описывающее качество воды [ССМЕ..., 2017].

На первом этапе определяется F₁ (Объем), который представляет собой процент параметров, не соответствующих их нормативам хотя бы один раз в течение рассматриваемого периода времени (вненормативные параметры) относительно общего количества измеренных параметров:

$$F_1 = \frac{\text{число вненормативных параметров}}{\text{общее число параметров}} * 100.$$

Второй этап подразумевает расчет F₂ (Частоты). Она вычисляется как процент отдельных измерений, которые не соответствуют нормативам (вненормативные измерения) относительно общего количества измерений:

$$F_2 = \frac{\text{число вненормативных измерений}}{\text{общее число измерений}} * 100.$$

Третий этап – это расчет F₃ (Амплитуды), представляющей собой величину, на которую «вненормативные» измеренные значения не соответствуют нормативам. Расчет F₃ требует дополнительных шагов:

– Расчет отклонения (excursion) – величины, на которую отдельная концентрация больше норматива (или меньше, когда измерение не должно опускаться ниже норматива). В случае, если измеренное значение не должно превышать норматив, отклонение рассчитывается по формуле:

$$\text{отклонение}_i = \left(\frac{\text{величина вненормативного измерения}_i}{\text{норматив}_j} \right) - 1,$$

а в случае, когда измеренное значение не должно опускаться ниже норматива, по формуле:

$$\text{отклонение}_i = \left(\frac{\text{норматив}_j}{\text{величина вненормативного измерения}_i} \right) - 1.$$

– Расчет нормализованной суммы отклонений (normalized sum of excursions, nse) – общей величины, на которую отдельные измерения не соответствуют нормативам. Она рассчитывается путем суммирования отклонений отдельных измерений от их нормативов и деления на общее количество измерений (как тех, которые соответствуют требованиям, так и тех, которые не соответствуют требованиям). Этот параметр рассчитывается по формуле:

$$nse = \frac{\sum_{i=1}^n \text{отклонение}_i}{\text{общее число измерений}}.$$

После расчета отклонений и величины nse вычисляется F₃ с помощью асимптотической функции, которая масштабирует нормализованную сумму отклонений от нормативов (nse), чтобы получить значение от 0 до 100, по формуле:

$$F_3 = \frac{nse}{0,01 * nse + 0,01}.$$

После того как получены значения факторов, можно рассчитать сам индекс:

$$CCMEWQI = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1,732} \right).$$

Делитель 1,732 нормализует результирующие значения в диапазоне от 0 до 100, где 0 представляет наихудшее качество воды, а 100 – наилучшее качество воды (табл. 1) [ССМЕ..., 2017].

Таблица 1. Категории качества воды по ССМЕ WQI
Table 1. CCME WQI water quality categories

ССМЕ WQI	Качество воды Water quality
95–100	отличное excellent
80–94	хорошее good
65–79	удовлетворительное satisfactory
45–64	плохое bad
0–44	очень плохое very bad

Результаты и обсуждение

В первую очередь была проведена покомпонентная оценка состояния вод р. Охта. По реакции среды (рН) в течение исследуемого периода наблюдений воды реки характеризовались в диапазоне нейтральные-слабощелочные, а по показателю общей жесткости воды – как мягкие. Такая ситуация является характерной для большинства рек Карельского перешейка [Ресурсы..., 1972].

За весь период исследований на всех 13 станциях р. Охта в воде наблюдался дефицит кислорода (рис. 2 и 3). Его концентрации в большинстве случаев не достигали нормативных значений (за исключением ст. 12 и 13 в 2018 г. и ст. 13 в 2020 г.).

Стоит отметить схожую пространственную динамику содержания растворенного кислорода в воде р. Охта во все годы наблюдений, причем как в поверхностном, так и в придонном горизонте (рис. 2 и 3). От ст. 13 до ст. 4 происходит неуклонное уменьшение средних концентраций растворенного кислорода, а на отрезке от ст. 4 до устьевой области (ст. 1) – некоторое повышение содержания кислорода в воде.

Станция 13 из-за своего расположения в начале городского участка реки, сразу после водосброса плотины Охтинского водохранилища, характеризуется наилучшими для изученного отрезка водотока кислородными условиями. Однако водохранилище, по литературным данным, отличается очень низким содержанием кислорода в воде [Игнатьева и др., 2011]. По всей видимости, главную роль в обогащении кислородом играет аэрация воды при прохождении плотины. В 2018 и 2019 гг. после водослива даже наблюдалась кислородная инверсия, когда на дне концентрации растворенного кислорода были больше, чем на поверхности.

Затем содержание в воде кислорода неуклонно снижается, достигая минимума на ст. 4. По-видимому, это происходит из-за того, что водоток принимает сточные воды, содержащие органические вещества, на окисление которых и расходуется растворенный кислород.

На последнем участке реки содержание кислорода увеличивается от ст. 4 к ст. 1. Это, по-видимому, связано с разбавлением вод р. Охта гораздо более чистыми водами р. Нева.

Значения БПК₅ (биохимическое потребление кислорода за 5 суток) практически повсеместно превышают ПДК (за исключением ст. 7–13 в 2020 г.). Поэтому можно сделать вывод о большом содержании легкоокисляе-

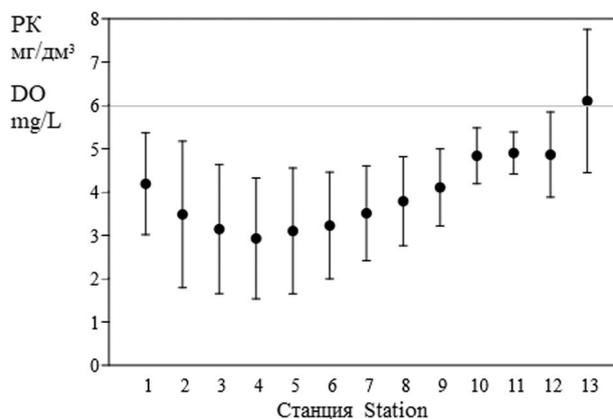


Рис. 2. Средние концентрации растворенного кислорода в поверхностном горизонте р. Охта с отметками среднеквадратического отклонения (2016–2020 гг.).

Здесь и на рис. 3: серая линия – норматив содержания растворенного кислорода

Fig. 2. Average dissolved oxygen concentrations in the surface layer of the Okhta River with standard deviation marks (2016–2020).

Here and in Fig. 3: gray line – dissolved oxygen standard

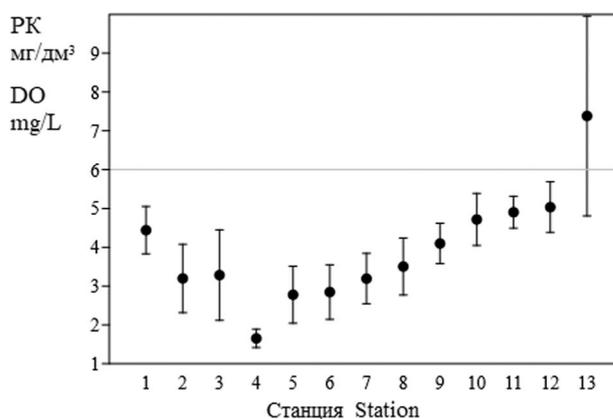


Рис. 3. Средние концентрации растворенного кислорода в придонном горизонте р. Охта с отметками среднеквадратического отклонения (2018–2020 гг.).

Fig. 3. Average dissolved oxygen concentrations in the bottom layer of the Okhta River with standard deviation marks (2018–2020).

мого органического вещества в воде р. Охта (рис. 4 и 5).

Для средних значений БПК₅ в р. Охта также характерна хорошо выраженная пространственная динамика за весь период исследования (для обоих горизонтов). На ст. 13 наблюдались наибольшие значения БПК₅. Это связано с высоким содержанием органических веществ в воде Охтинского водохранилища [Игнатьева и др., 2011]. Затем величина БПК₅ плавно уменьшалась вплоть до ст. 7, после чего значения резко увеличиваются на ст. 6 с последующим уменьшением к устьевой зоне р. Охта.

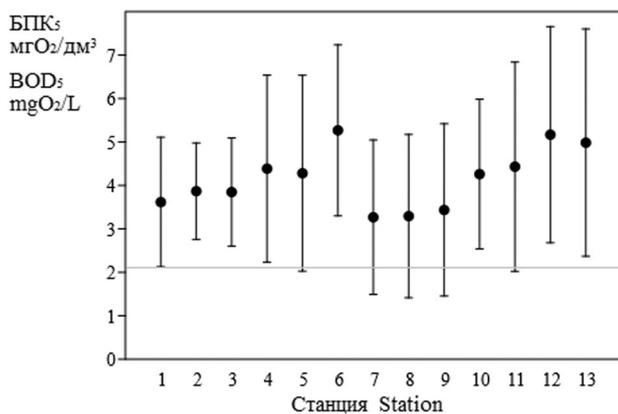


Рис. 4. Средние значения БПК₅ в поверхностном горизонте р. Охта с отметками средноквадратического отклонения (2016–2020 гг.).

Здесь и на рис. 5: серая линия – ПДК

Fig. 4. Average BOD₅ values in the surface layer of the Okhta River with standard deviation marks (2016–2020).

Here and in Fig. 5: gray line – MPC

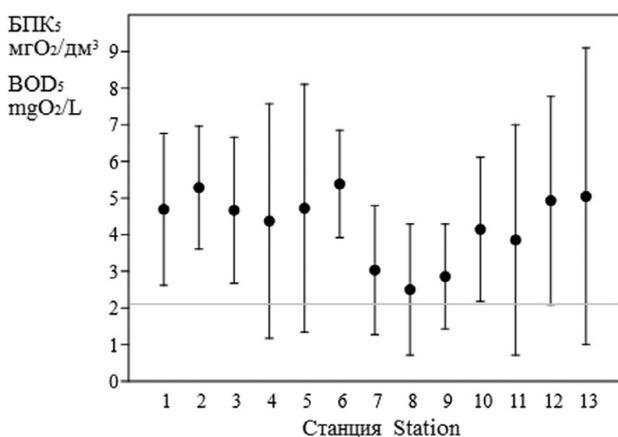


Рис. 5. Средние значения БПК₅ в придонном горизонте р. Охта с отметками средноквадратического отклонения (2018–2020 гг.).

Fig. 5. Average BOD₅ values in the bottom layer of the Okhta River with standard deviation marks (2018–2020)

Вероятно, скачки БПК₅ между ст. 6 и 7 вызваны точечным сбросом вод, содержащих большое количество органических веществ, непосредственно в р. Охта. На этом участке существует три организованных сброса сточных вод. Уменьшение величины БПК₅ по мере приближения к устьевой зоне, как и для содержания растворенного кислорода, объясняется влиянием р. Нева.

Как дефицит кислорода, так и высокие концентрации легкоокисляемых органических веществ в воде р. Охта описаны в более ранние годы исследований водотока [Гальцова, Полковническая, 2002; Фураева, Урусова, 2017].

Концентрации общего железа в р. Охта многократно превышают установленные нормативные значения. Однако такая ситуация характерна для большинства водных объектов Карельского перешейка в связи с гидрогеохимическими особенностями данной территории [Ресурсы..., 1972].

Концентрации фосфатов в р. Охта не превышали предельно допустимых значений в течение всего периода исследований, кроме 2017 г., когда достигали 1,5 ПДК.

Для реки характерно повышенное содержание азота, в особенности аммонийного. Наиболее высокие концентрации аммонийного азота зафиксированы в 2018 г. (вплоть до 35 ПДК) и в 2020 г. (до 10 ПДК). В 2016 г. выявлены высокие концентрации азота нитритного (14 ПДК). За весь исследуемый период концентрации азота нитратного не превышали 1,5 ПДК.

Чрезвычайно сильно загрязнение р. Охта нефтепродуктами в 2016–2020 гг. на всем исследуемом участке (рис. 6). Максимальные значения концентраций достигали 50 ПДК в 2018 г. (ст. 4), 98 ПДК в 2019 г. (ст. 7), 189 ПДК в 2020 г. (ст. 8).

В период проведения полевых работ на реке визуально фиксировались разливы нефтепродуктов, а в 2019 и 2020 гг. выше ст. 8 находились боновые ограждения для сбора нефтяных пленок. Пространственное распределение нефтепродуктов в р. Охта неравномерное, в нем не обнаружено закономерностей. Вероятнее всего, это связано с аварийным характером поступления этих загрязняющих веществ. Повышенные концентрации нефтепродуктов в р. Охта фиксировались и ранее [Гальцова, Полковническая, 2002; Фураева, Урусова, 2017].

Нужно отметить, что полученные в ходе работ материалы хорошо согласуются с данными Гидрохимического института Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Так, в 2010–2019 гг. основными загрязняющими веществами р. Охта называются медь, железо, цинк, марганец, аммонийный и/или нитритный азот. Регулярно превышаются ПДК для таких показателей, как БПК₅, ХПК, и отмечается глубокий дефицит растворенного в воде кислорода, особенно в летний период.

Таким образом, результаты покомпонентной оценки состояния вод р. Охта по некоторым основным загрязняющим веществам демонстрируют, что воды реки в 2016–2020 гг. и более ранние годы были подвержены сильной антропогенной нагрузке. Вследствие этого

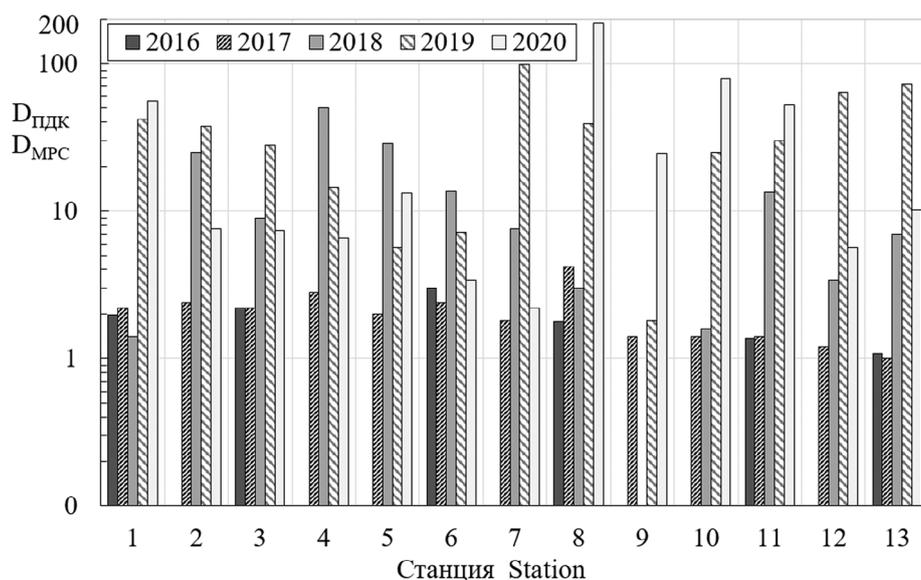


Рис. 6. Превышения ПДК нефтепродуктов (логарифмическая шкала) в воде р. Охта в долях (2016–2020 гг.)

Fig. 6. Excess MPC of oil products (logarithmic scale) in the Okhta River water (2016–2020)

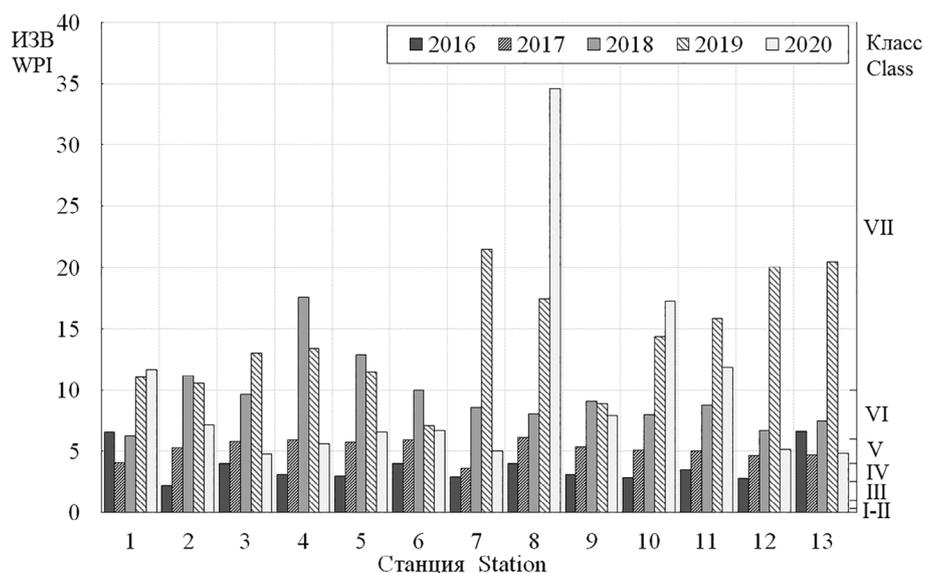


Рис. 7. Значения ИЗВ для исследованных станций р. Охта в 2016–2020 гг. и класс качества вод: I–II – чистые; III – умеренно загрязненные; IV – загрязненные; V – грязные; VI – очень грязные; VII – чрезвычайно грязные

Fig. 7. Water Pollution Index (WPI) for the studied stations of the Okhta River in 2016–2020 and the class of water quality: I–II – clean; III – moderately contaminated; IV – contaminated; V – polluted; VI – very polluted; VII – extremely polluted

уровень загрязненности р. Охта носит устойчивый характер.

Результаты оценки степени загрязненности р. Охта по ИЗВ в 2016–2020 гг. представлены на рис. 7. По полученным значениям ИЗВ вода р. Охта была классифицирована как «загрязненная» (4 класс) и «очень грязная» (6 класс) в 2016 г.; «чрезвычайно грязная»

(7 класс) в 2017 г.; «очень грязная» и «чрезвычайно грязная» в 2018 и 2019 гг.; «грязная» (5 класс), «очень грязная» и «чрезвычайно грязная» в 2020 г.

Результаты оценки степени загрязненности р. Охта по УКИЗВ в 2016–2020 гг. представлены на рис. 8. По полученным значениям УКИЗВ вода р. Охта была классифицирована как «гряз-

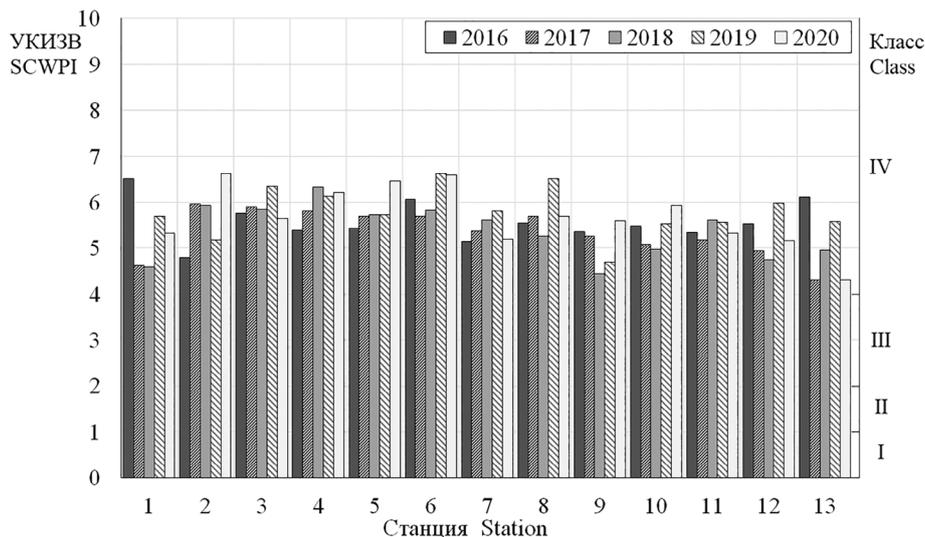


Рис. 8. Значения УКИЗВ для исследованных станций р. Охта в 2016–2020 гг. и класс качества вод: I – чистые; II – слабозагрязненные; III – загрязненные; IV – грязные

Fig. 8. Specific Combinatorial Water Pollution Index (SCWPI) for the studied stations of the Okhta River in 2016–2020 and the class of water quality: I – clean; II – moderately contaminated, III – contaminated; IV – polluted

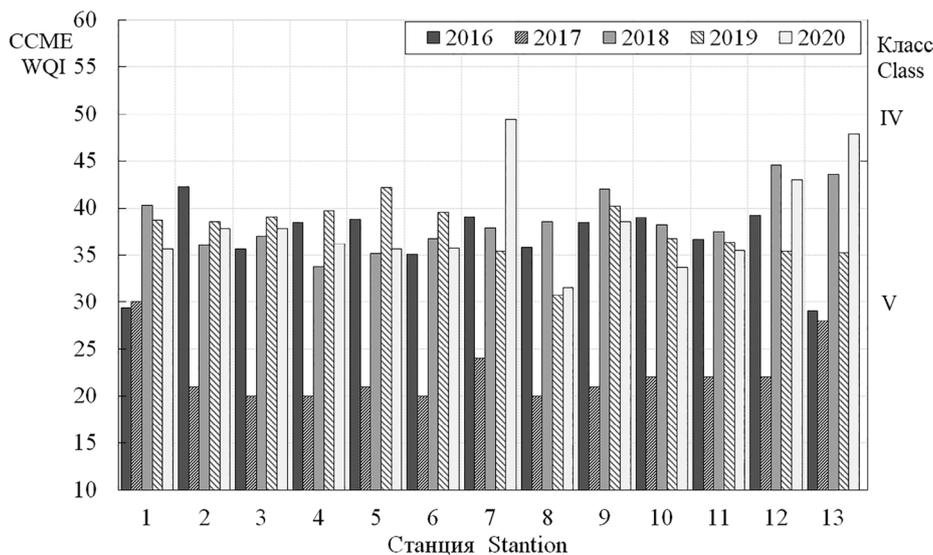


Рис. 9. Значения CCME WQI для исследованных станций р. Охта в 2016–2020 гг. и класс качества вод: IV – плохое; V – очень плохое

Fig. 9. CCME WQI for the studied stations of the Okhta River in 2016–2020 and the class of water quality: IV – marginal; V – poor

ная» (класс 4, разряды «а» и «б») на протяжении всего периода исследования.

Как и в случае с покомпонентной оценкой, качество воды р. Охта, оцененное при помощи ИЗВ и УКИЗВ, остается в целом на том же уровне, что и в предыдущие годы [Качество..., 2011–2020; Фураева, Урусова, 2017].

Результаты оценки степени загрязненности р. Охта по CCME WQI в 2016–2020 гг. представ-

лены на рис. 9. По полученным значениям CCME WQI качество воды р. Охта в 2016–2020 гг. классифицировано как «плохое» и «очень плохое» (на большинстве исследуемых станций).

Были рассчитаны коэффициенты парной линейной корреляции между индексами для выявления связи между ними (табл. 2).

Незначимость коэффициентов корреляции в паре ИЗВ – УКИЗВ объясняется основным

Таблица 2. Значения коэффициента парной линейной корреляции между ИЗВ, УКИЗВ и CCME WQI

Table 2. Pair linear correlation coefficient between WPI, SCWPI and CCME WQI

Год Year	ИЗВ – УКИЗВ WPI – SCWPI	CCME WQI – ИЗВ CCME WQI – WPI	CCME WQI – УКИЗВ CCME WQI – SCWPI
2016	0,88	-0,99	-0,91
2017	0,66	-0,73	-0,84
2018	0,76	-0,75	-0,86
2019	0,12*	-0,73	-0,27*
2020	0,04*	-0,58	-0,62

Примечание. * – коэффициенты парной линейной корреляции незначимы при уровне значимости $p = 0,05$ (использовался t-критерий Стьюдента).

Note. * – pair linear correlation coefficients are insignificant at the significance level $p = 0.05$ (The Student's t-test is used).

недостатком методики ИЗВ, а именно ограниченным количеством используемых параметров в расчете. По этой причине получаемые значения ИЗВ часто искажают реальную картину загрязненности водного объекта. Незначимость коэффициента корреляции в паре CCME WQI – УКИЗВ получена вследствие особенности методики CCME WQI учитывать в итоговом балле качества воды количество параметров, по которым выявлены превышения нормативных значений («число вненормативных параметров»), чего не делается при расчете УКИЗВ, в котором учитывается только общее количество параметров, по которым производится расчет.

По представленным выше диаграммам на рис. 7–9 и значениям коэффициента корреляции (табл. 2) можно сделать вывод о наличии связи между использованными гидрохимическими индексами. В большинстве случаев связь между каждой из пар индексов тесная – абсолютные значения 0,5 и более. Связь CCME WQI с ИЗВ и УКИЗВ – обратная.

Таким образом, в результате оценки степени загрязненности р. Охта по трем индексам (ИЗВ, УКИЗВ и CCME WQI) можно сделать вывод о том, что исследуемый водоток в 2016–2020 гг. характеризуется как сильно загрязненный. Наибольший вклад в значения каждого индекса внесли концентрации нефтепродуктов, суммарного железа, аммонийного азота, а также сильный дефицит растворенного в воде кислорода. Также при сравнении оценок качества воды р. Охта исследуемого периода и оценок прошлых лет видно, что загрязненность исследуемого водотока устойчива.

Каждый из трех рассмотренных индексов имеет как свои плюсы, так и минусы. ИЗВ отличается от УКИЗВ и CCME WQI простотой расчета, однако может сильно исказить оценку загрязненности из-за ограниченного числа используемых параметров. УКИЗВ и CCME WQI,

в отличие от ИЗВ, требуют более трудоемких расчетов (так как используют большее число гидрохимических параметров), но при этом дают более точные результаты, на основании которых можно судить о действительной степени загрязненности водных объектов.

У CCME WQI, в свою очередь, есть еще несколько преимуществ над УКИЗВ: индекс не имеет жестких ограничений на количество параметров, включаемых в расчет, в качестве нормативных значений для гидрохимических показателей может использовать любые нормативы вместо общепринятых ПДК, а также имеет наглядную столбальную шкалу, которая позволяет легко отслеживать изменения качества воды водного объекта. Так как применение CCME WQI для оценки качества вод р. Охта оказалось успешным, данный подход можно рекомендовать для использования в мониторинге степени загрязненности водных объектов в России наряду с УКИЗВ.

Заключение

Река Охта – один из крупнейших водотоков Санкт-Петербурга, который оказывает большое влияние на главную водную артерию города – р. Нева. В результате оценки степени загрязненности р. Охта по трем индексам можно сделать вывод о том, что улучшения качества воды в летние периоды 2016–2020 гг. относительно прошлых лет не произошло. По ИЗВ вода р. Охта была классифицирована как «загрязненная» (4 класс) и «очень грязная» (6 класс) в 2016 г.; «чрезвычайно грязная» (7 класс) в 2017 г.; «очень грязная» и «чрезвычайно грязная» в 2018 и 2019 гг.; «грязная» (5 класс), «очень грязная» и «чрезвычайно грязная» в 2020 г.; по УКИЗВ – «грязная» (класс 4, разряды «а» и «б»); по CCME WQI качество воды р. Охта в 2016–2020 гг. было классифицировано как «плохое» и «очень плохое» (на большинстве исследованных станций).

Несмотря на то что в России ССМЕ WQI применяется узким кругом специалистов, в силу ряда преимуществ над УКИЗВ и успешного использования в оценке степени загрязненности вод р. Охта данная методика может быть рекомендована к использованию для оценки качества вод водных объектов в России наряду с УКИЗВ.

В целом загрязнение р. Охта носит устойчивый характер. Наибольший вклад в значения каждого индекса внесли концентрации нефтепродуктов, суммарного железа, аммонийного азота, а также сильный дефицит растворенного в воде кислорода. Таким образом, р. Охта продолжает быть одним из самых загрязненных водных объектов Санкт-Петербурга.

Отдельно стоит отметить, что пункт государственного мониторинга, расположение которого совпадает с исследованной ст. 2, находится в области значительного влияния водных масс р. Нева, вследствие чего здесь может не фиксироваться реальная загрязненность р. Охта.

Мы очень признательны за помощь на разных этапах работ нашим коллегам: Д. К. Алексееву, А. В. Козловой, Е. С. Урусовой, Е. Н. Романовой, Ю. А. Пашуковой и Ю. А. Зуеву.

Полевые исследования 2016–2017 гг. выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00382 мол_а. Работы 2019–2020 гг. проведены при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-00683 а.

Литература

Алексеев Д. К., Гальцова В. В., Куличенко А. Ю. Экологические проблемы водотоков и водоемов Санкт-Петербурга и пути их решения // Географические и экологические аспекты гидрологии. СПбГУ, 2010. С. 116–121.

Алексеев Д. К., Шелутко В. А., Зуева Н. В., Колесникова Е. В., Урусова Е. С., Примак Е. А. Результаты исследований в области прикладной и системной экологии в РГГМУ // Гидрометеорология и экология. СПб.: РГГМУ, 2020. № 60. С. 306–324. doi: 10.33933/2074-2762-2020-60-306-324

Беляков В. П., Бажора А. И., Сотников И. В. Мониторинг экологического состояния городских водоемов Санкт-Петербурга по показателям зообентоса // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17, № 6. С. 51–56.

Белякова А. М. Гидрохимические и токсикологические характеристики реки Охты в летний период 2018 года // Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития: Труды III Всероссийской конференции. СПб.: Химиздат, 2019. С. 111–114.

Белякова А. М., Зуева Н. В., Урусова Е. С. Качество вод р. Охты: оценка по гидрохимическим индек-

сам (ИЗВ, УКИЗВ и ССМЕ WQI) // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению: Сб. докладов междунар. науч. конф. СПб., 2020. С. 555–560.

Белякова А. М., Пашукова Ю. В. Качество вод реки Охта по гидрохимическим и токсикологическим данным // Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации: Сб. тезисов Всерос. науч.-практ. конф. СПб.: РГГМУ, 2019. С. 786–788.

Водные объекты Санкт-Петербурга. СПб.: Символ, 2002. 348 с.

Гальцова В. В., Полковницкая А. В. Оценка экологического состояния реки Охта на основе гидрохимических методов и биоиндикации // Вопросы прикладной экологии. СПб.: РГГМУ, 2002. С. 39–45.

Заславская М. Б., Ерина О. Н., Ефимова Л. Е. Сопоставление эффективности параметризации качества речных вод различными методами в условиях значительного антропогенного воздействия // География и природные ресурсы. 2019. № 2. С. 30–37. doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-2(30-37)

Зуева Н. В., Бобров А. А. Использование макрофитов в оценке экологического состояния малой реки (на примере реки Охты, Санкт-Петербург) // Биология внутр. вод. 2018. № 1. С. 45–54. doi: 10.7868/S0320965218010060

Зуева Н. В., Мостовая М. А., Лешукова А. И. Характеристики макрофитов в оценке качества воды малых рек Санкт-Петербурга // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем. СПб.: Любавич, 2011. С. 137–142.

Ерина О. Н., Ефимова Л. Е., Заславская М. Б. Параметризация качества вод водных объектов водораздельного бьефа канала имени Москвы различными методами // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Тр. VI Междунар. науч.-практ. конф. Т. 2: Качество воды. Геоэкология. 2017. С. 67–71.

Игнатъева Н. В., Беляков В. П., Загребин А. О., Капустина Л. Л., Надеждина Н. В., Павлова О. А., Родионова Н. В., Сусарева О. М. Комплексная оценка экологического состояния городских водоемов при антропогенном воздействии // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем. СПб.: Любавич, 2011. С. 59–67.

Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник. 2010–2019. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2011–2020.

Методические рекомендации по формализованной комплексной оценке качества поверхностных и морских вод по гидрохимическим показателям. М.: Госкомитет СССР по гидрометеорологии, 1988. 9 с.

Опекунов А. Ю., Митрофанова Е. С., Спасский В. В., Опекунова М. Г., Шейнерман Н. А., Чернышова А. В. Химический состав и токсичность донных отложений малых водотоков Санкт-Петербурга // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 2. С. 196–207. doi: 10.31857/S032105962002011X

Павлова О. А. Сообщества фитопланктона озерно-речных систем Санкт-Петербурга // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18, № 2–2. С. 462–466.

Приказ Министерства сельского хозяйства РФ 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». М.: Минсельхоз РФ, 2016. 153 с.

РД 52.24.643-2002. Руководящий документ. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2002. 55 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 2. Карелия и Северо-Запад. Ч. 1 / Отв. ред. В. Е. Водогретский. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 528 с.

Фураева Д. И., Урусова Е. С. Оценка загрязненности реки Охта в летний период // Метеорологический вестник. 2017. Т. 9, № 1. С. 52–60.

Bilgin A. Evaluation of surface water quality by using Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) method and discriminant analysis method: a case study Coruh River Basin // Environ. Monit. Assess. 2018. No. 190. Art. 554. doi: 10.1007/s10661-018-6927-5

CCME Water Quality Index user's manual 2017 Update [Электронный ресурс] / Canadian Coun-

cil of Ministers of the Environment, 2017. URL: <https://ccme.ca/en/res/wqimanualen.pdf> (дата обращения: 07.05.2021).

Gyamfi C., Boakye R., Awuah E., Anyemedu F. Application of the CCME-WQI Model in assessing the water quality of the Aboabo River, Kumasi-Ghana // J. of Sustainable Development. 2013. Vol. 6, no. 10. P. 1–7. doi: 10.5539/jsd.v6n10p1

Lumb A., Halliwell D., Sharma T. Application of CCME Water Quality Index to monitor water quality: A case study of the Mackenzie River Basin, Canada // Environ. Monit. Assess. 2006. No. 113. P. 411–429. doi: 10.1007/s10661-005-9092-6

Munna G. M., Chowdhury M. M. I., Masrur Ahmed A. A., Chowdhury S., Alom M. M. A Canadian Water Quality Guideline-Water Quality Index (CCME-WQI) based assessment study of water quality in Surma River // J. of Civil Engineering and Construction Technology. 2013. Vol. 4(3). P. 81–89. doi: 10.5897/JCECT12.074.

Sutadian A. D., Muttill N., Yilmaz A., Perera B. J. C. Development of river water quality indices – a review // Environ. Monit. Assess. 2016. No. 188. Art. 58. doi: 10.1007/s10661-015-5050-0

Поступила в редакцию 09.05.2021

References

Alekseev D. K., Gal'tsova V. V., Kulichenko A. Yu. Ekologicheskie problemy vodotokov i vodoemov Sankt-Peterburga i puti ikh resheniya [Ecological problems of watercourses and reservoirs of St. Petersburg and ways to solve them]. *Geograficheskie i ecol. aspekty gidrol.* [Geographical and ecol. aspects of hydrol.]. St. Petersburg: SPbGU, 2010. P. 116–121.

Alekseev D. K., Shelutko V. A., Zueva N. V., Kolesnikova E. V., Urusova E. S., Primak E. A. Rezul'taty issledovaniy v oblasti prikladnoi i sistemnoi ekologii v RGGMU [Research results in the field of applied and system ecology at RSHU]. *Gidrometeorol. i ecol.* [Hydrometeorol. and Ecol.]. 2020. Art. 60. P. 306–324. doi: 10.33933/2074-2762-2020-60-306-324

Belyakov V. P., Bazhora A. I., Sotnikov I. V. Monitoring ekologicheskogo sostoyaniya gorodskikh vodoemov Sankt-Peterburga po pokazatelyam zoobentosa [Monitoring the ecological state of St. Petersburg city reservoirs by zoobenthos indicators]. *Izv. Samar'skogo nauch. tsentra RAN* [Izvestia RAS SamSC]. 2015. Vol. 17, no. 6. P. 51–56.

Belyakova A. M. Gidrokhimicheskie i toksikologicheskie kharakteristiki reki Okhty v letnii period 2018 goda [Hydrochemical and toxicological characteristics of the Okhta River in the summer of 2018]. *Trudy III Vseross. konf. «Gidrometeorol. i ecol.: dostizheniya i perspektivy razvitiya»* [Hydrometeorol. and ecol.: scientific and educational achievements and perspectives: Proceed. III All-Russ. conf.]. St. Petersburg: Khimizdat, 2019. P. 111–114.

Belyakova A. M., Zueva N. V., Urusova E. S. Kachestvo vod r. Okhty: otsenka po gidrokhimicheskim indeksam (IZV, UKIZV i CCME WQI) [The Okhta River water quality: estimation by hydrochemical indexes (WPI, SCWPI & CCME WQI)]. *Chetvertye Vinogradovskie Chteniya.*

Gidrol.: ot poznaniya k mirovozzreniyu: Sb. dokladov mezhdunar. nauch. konf. [The fourth Vinogradov readings. *Hydrol.: from Learning to Worldview:* Proceed. int. sci. conf. in memory of outstanding Russ. hydrologist Yury Vinogradov]. St. Petersburg, 2020. P. 555–560.

Belyakova A. M., Pashukova Yu. V. Kachestvo vod reki Okhta po gidrokhimicheskim i toksikologicheskim dannym [Assessment of the Okhta River water quality on the basis of hydrochemical and toxicological data]. *Sbornik tezisov Vserossiiskoi nauch.-prakt. konf. «Sovr. probl. gidrometeorol. i ustoichivogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii»* [Modern probl. of hydrometeorol. and sustainable development of the Russian Federation: Proceed. All-Russ. sci.-pract. conf.]. St. Petersburg: RGGMU, 2019. P. 786–788.

Gal'tsova V. V., Polkovnitskaya A. V. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya reki Okhta na osnove gidrokhimicheskikh metodov i bioindikatsii [Assessment of the environmental state of the Okhta River using hydrochemical methods and bioindication]. *Vopr. priklad. ecol.* [Probl. Appl. Ecol.]. St. Petersburg: RGGMU, 2002. P. 39–45.

Erina O. N., Efimova L. E., Zaslavskaya M. B. Parametrizatsiya kachestva vod vodnykh ob'ektov vodorazdel'nogo b'efa kanala imeni Moskvyy razlichnymi metodami [Parameterization of water bodies quality of the watershed downstream of the Moscow Canal by various methods]. *Sovr. probl. vodokhranilishch i ikh vodosborov:* Tr. VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. T. 2: Kachestvo vody. Geokol. [Current issues of reservoirs and their catchment areas: Proceed. VI int. sci.-pract. conf. Vol. 2: Water quality. Geocol.]. 2017. P. 67–71.

Furaeva D. I., Urusova E. S. Otsenka zagryaznenosti reki Okhta v letnii period [Assessment of the Okhta River pollution in summer]. *Meteorol. vestnik* [Meteorol. Bull.]. 2017. Vol. 9, no. 1. P. 52–60.

Ignat'eva N. V., Belyakov V. P., Zagrebin A. O., Kapustina L. L., Nadezhdina N. V., Pavlova O. A., Rodionova N. V., Susareva O. M. Kompleksnaya otsenka ekologicheskogo sostoyaniya gorodskikh vodoemov pri antropogennom vozdeistvii [Integrated assessment of ecological state of urban waterbodies under anthropogenic impact]. *Bioindikatsiya v monitoringe presnovod. ekosistem* [Bioindication in monitoring of freshwater ecosystems]. St. Petersburg: Lyubavich, 2011. P. 59–67.

Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiiskoi Federatsii. Ezhegodnik. 2010–2019 [The quality of surface waters of the Russian Federation. A yearbook. 2010–2019]. Rostov-on-Don: Rosgidromet, 2011–2020.

Metodicheskie rekomendatsii po formalizovanoi kompleksnoi otsenke kachestva poverkhnostnykh i morskikh vod po gidrokhimicheskim pokazatelyam [Guidelines on formalized comprehensive assessment of the quality of surface and marine waters by hydrochemical parameters]. Moscow: Goskomitet SSSR po gidrometeorologii, 1988. 9 p.

Opekunov A. Yu., Mitrofanova E. S., Spasskii V. V., Opekunova M. G., Sheinerman N. A., Chernyshova A. V. Khimicheskii sostav i toksichnost' donnykh otlozhenii malykh vodotokov Sankt-Peterburga [Chemistry and toxicity of bottom sediments in small watercourses of St. Petersburg]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2020. Vol. 47, no. 2. P. 196–207. doi: 10.31857/S032105962002011X

Pavlova O. A. Soobshchestva fitoplanktona ozero-rechnykh sistem Sankt-Peterburga [Phytoplankton communities of St. Petersburg lake-river systems]. *Izv. Samarskogo nauch. tsentra RAN* [Izvestia RAS SamSC]. 2016. Vol. 18, no. 2–2. P. 462–466.

Prikaz Ministerstva sel'skogo khozyaistva RF ot 13.12.2016 № 552 "Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnykh ob'ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predel'no dopustimyykh kontsentratsii vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh ob'ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya" [Order of the Ministry of agriculture of the Russian Federation No. 552 dated 13.12.2016 *On approval of water quality standards for fisheries water bodies, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of fisheries water bodies*]. Moscow: Min-sel'khoz RF, 2016. 153 p.

RD 52.24.643–2002. Rukovodyashchii dokument. Metod kompleksnoi otsenki stepeni zagryaznennosti poverkhnostnykh vod po gidrokhimicheskim pokazatelyam [The method of integrated assessment of the degree of pollution of surface waters by hydrochemical indicators]. Rostov-on-Don: Rosgidromet, 2002. 55 p.

Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. T. 2. Kareliya i Severo-Zapad. Ch. 1 [Surface water resources of the USSR. Vol. 2. Karelia and the North-West. Part 1]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972. 528 p.

Vodnye ob'ekty Sankt-Peterburga [Water bodies in St. Petersburg]. St. Petersburg: Simvol, 2002. 348 p.

Zaslavskaya M. B., Erina O. N., Efimova L. E. Sopostavlenie effektivnosti parametrizatsii kachestva rechnykh vod razlichnymi metodami v usloviyakh znachitel'nogo antropogennogo vozdeistviya [Comparing the efficiency of river water quality parameterization by different methods under a significant human-induced impact]. *Geografiya i prirod. resursy* [Geography and Nat. Resources]. 2019. No. 2. P. 30–37. doi: 10.21782/GIPRO206-1619-2019-2(30-37)

Zueva N. V., Bobrov A. A. Ispol'zovanie makrofitov v otsenke ekologicheskogo sostoyaniya maloi reki (na primere reki Okhty, Sankt-Peterburg) [Use of macrophytes in assessing the ecological status of a small river (by the example of the Okhta River, St. Petersburg)]. *Biol. vnutr. vod* [Inland Water Biol.]. 2018. No. 1. P. 45–54. doi: 10.7868/S0320965218010060

Zueva N. V., Mostovaya M. A., Leshukova A. I. Kharakteristiki makrofitov v otsenke kachestva vody malykh rek Sankt-Peterburga [Characteristics of macrophytes in assessing the water quality of small rivers in St. Petersburg]. *Bioindikatsiya v monitoringe presnovod. ekosistem* [Bioindication in monitoring freshwater ecosystems]. St. Petersburg: Lyubavich, 2011. P. 137–142.

Bilgin A. Evaluation of surface water quality by using Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCMEWQI) method and discriminant analysis method: a case study Coruh River Basin. *Environ. Monit. Assess.* 2018. No. 190. Art. 554. doi: 10.1007/s10661-018-6927-5

CCME Water Quality Index user's manual 2017 Update. Canadian Council of Ministers of the Environment. 2017. URL: <https://ccme.ca/en/res/wqimanualen.pdf> (accessed: 07.05.2021).

Gyamfi C., Boakye R., Awuah E., Anyemedu F. Application of the CCME-WQI Model in assessing the water quality of the Aboabo River, Kumasi-Ghana. *J. of Sustainable Development*. 2013. Vol. 6, no. 10. P. 1–7. doi: 10.5539/jsd.v6n10p1

Lumb A., Halliwell D., Sharma T. Application of CCME Water Quality Index to monitor water quality: A case study of the Mackenzie River Basin, Canada. *Environ. Monit. Assess.* 2006. No. 113. P. 411–429. doi: 10.1007/s10661-005-9092-6

Munna G. M., Chowdhury M. M. I., Masrur Ahmed A. A., Chowdhury S., Alom M. M. A Canadian Water Quality Guideline-Water Quality Index (CCME-WQI) based assessment study of water quality in Surma River. *J. of Civil Engineering and Construction Technology*. 2013. Vol. 4(3). P. 81–89. doi: 10.5897/JCECT12.074

Sutadian A. D., Muttill N., Yilmaz A., Perera B. J. C. Development of river water quality indices – a review. *Environ. Monit. Assess.* 2016. No. 188. Art. 58. doi: 10.1007/s10661-015-5050-0

Received May 09, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Белякова Анна Михайловна

магистрант кафедры прикладной и системной экологии
Российский государственный гидрометеорологический
университет
ул. Воронежская, 79, Санкт-Петербург, Россия, 192007
эл. почта: annabell1997a@gmail.com
тел.: +79817573209

Зуева Надежда Викторовна

доцент кафедры прикладной и системной экологии, к. г. н.
Российский государственный гидрометеорологический
университет
ул. Воронежская, 79, Санкт-Петербург, Россия, 192007
эл. почта: nady.zuyeva@ya.ru

CONTRIBUTORS:

Belyakova, Anna

Russian State Hydrometeorological University
79 Voronezhskaya St., 192007, St. Petersburg, Russia
e-mail: annabell1997a@gmail.com
tel.: +79817573209

Zueva, Nadezhda

Russian State Hydrometeorological University
79 Voronezhskaya St., 192007 St. Petersburg, Russia
e-mail: nady.zuyeva@ya.ru