

Научная статья  
УДК 551.468.6  
EDN RDAHUK

## Изменчивость концентрации биогенных веществ в воде устьевого взморья реки Черной (Севастопольский регион)

С. В. Наривончик

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия  
e-mail: Narivonchik\_s@mail.ru*

### Аннотация

Концентрация биогенных веществ в воде морских устьев рек является лимитирующим фактором жизнедеятельности гидробионтов. Поэтому исследование этого параметра важно для оценки и прогнозирования современного состояния устьевых экосистем. До настоящего времени изменчивость концентрации биогенных веществ анализировали по средним значениям за неоднородные или короткие периоды, экстремумам или данным отдельных съемок, что не отражало режима этих элементов в современный климатический период. Цель работы – дать современную характеристику изменчивости содержания биогенных веществ в воде устьевого взморья р. Черной и оценить качество воды по этим компонентам экосистемы. Для анализа использовались материалы гидрохимических съемок за 1991–2020 гг. Качество воды оценивали по индексу загрязненности воды биогенными веществами, а самоочищающую способность устьевого взморья – по индексу трансформации отдельных биогенных веществ. Установлено, что распределения концентраций биогенных веществ крайне асимметричны. В связи с этим впервые использованы распределения медианных концентраций нитратов, нитритов, аммонийного азота и фосфатов в воде устьевого взморья р. Черной, которые в рассматриваемом районе не превышали предельно допустимых значений. Анализ временной изменчивости средней годовой концентрации биогенных веществ показал отсутствие значимых тенденций. Полученные результаты могут использоваться в балансовых оценках и расчетах ассимиляционной емкости устьевого взморья р. Черной.

**Ключевые слова:** Севастопольский регион, устье реки, река Черная, концентрация биогенных веществ, биогенные вещества, индекс загрязненности воды, качество воды

**Благодарности:** работа выполнена в рамках темы *FNNN-2021-0005* «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (шифр «Прибрежные исследования»). Автор благодарит с. н. с. д. г. н. Р. Я. Миньковскую за помощь в работе над статьей, а также директора СО ГОИН к. г. н. Н. Н. Дьякова за предоставленные данные наблюдений.

© Наривончик С. В., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

**Для цитирования:** Наривончик С. В. Изменчивость концентрации биогенных веществ в воде устьевого взморья реки Черной (Севастопольский регион) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 1. С. 82–97. EDN RDAHUK.

## Variability of Nutrient Concentration in Waters of the Chernaya River Estuarine Zone (Sevastopol Region)

S. V. Narivonchik

*Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia  
e-mail: Narivonchik\_s@mail.ru*

### Abstract

Nutrient concentration in the water of sea mouths of rivers is a limiting factor in the life activity of hydrobionts. Therefore, studying this parameter is important for assessing the current state of mouth ecosystems and its forecasting. Until now, the variability of nutrients has been analysed by their average concentrations over heterogeneous or short-term periods, extremes or individual surveys, which do not reflect the regime of these elements in the modern climatic period. The paper aims to give a modern description of the nutrient concentration variability in the Chernaya River estuarine zone and to assess water quality based on these components of the ecosystem. For the analysis, we used data from hydrochemical surveys for 1991–2020. Water quality was assessed by the nutrient water pollution index, whereas self-purifying capacity of the estuarine zone was assessed using a transformation index of selected nutrients. The distributions of nutrient concentrations were found to be extremely asymmetrical. In this regard, we obtained for the first time the distributions of medians of nitrates, nitrites, ammonium nitrogen and phosphates in the water of the Chernaya River estuarine zone. In the study area, these median concentrations of nutrients did not exceed the maximum permissible values. Analysis of the temporal variability of average annual nutrient concentrations showed the absence of significant trends. The obtained results can be used for balance estimates and calculations of the assimilation capacity of the Chernaya River estuarine zone.

**Keywords:** Chernaya River, estuary, Sevastopol region, nutrient concentration variability, nutrients, water pollution index, water quality

**Acknowledgments:** The work was carried out under state assignment on topic 0555-2021-0005 “Complex interdisciplinary studies of oceanological processes that determine the functioning and evolution of ecosystems in the coastal zones of the Black and Azov Seas” (code “Coastal Research”). The author is grateful to senior researcher R. Ya. Minkovskaya, DSc (Geogr.), for her help in working on the article and to the director of the SB SOI N. N. Dyakov, PhD (Geogr.), for providing the observational data.

**For citation:** Narivonchik, S.V., 2024. Variability of Nutrient Concentration in Waters of the Chernaya River Estuarine Zone (Sevastopol Region). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 82–97.

## Введение

От состояния морского устья р. Черной зависит развитие природно-хозяйственного комплекса Севастопольского региона. В современный климатический период 1991–2020 гг., принятый Всемирной метеорологической организацией (ВМО)<sup>1)</sup>, отмечается изменение климата и абиотических компонентов экосистемы [1], кроме того, активно ведется хозяйственная деятельность. Это может негативно влиять на экологическое состояние устья реки, что понизит качество жизни населения региона.

Важнейший для гидробионтов абиотический фактор – содержание в воде лимитирующих их жизнедеятельность и влияющих на качество воды биогенных веществ (БВ). Поэтому исследование изменчивости концентрации БВ, влияющих на трофность водного объекта, и выявление участков экологических рисков являются актуальными.

Содержание БВ как в отдельных частях устья (в б. Севастопольской, низовьях р. Черной) [2–14], так и в устье р. Черной в целом (см. работу<sup>2)</sup> и [15, 16]) активно изучается учеными Морского гидрофизического института.

Основными источниками поступления БВ в приемный водоем является сток р. Черной, интегрирующий БВ, которые выносятся со всего водосбора реки при выпадении осадков, а также сбросы сточных вод, смыв с берега и атмосферные осадки [15, 17]. В работе [15] показано, что с речным стоком на устьевое взморье реки в среднем поступает: 3 т/год фосфатов, 10 т/год аммонийного азота, 1 т/год нитритов, 40 т/год нитратов. В структуре речного выноса БВ нитраты составляют 80–90 % [4].

Так как ранее исследовали (например, в работах [3, 4, 15]) преимущественно изменчивость концентрации БВ в вершине морского устья р. Черной и на ее устьевом участке, а также вынос БВ с речным стоком, основное внимание в данной статье уделяется анализу изменчивости концентрации БВ в поверхностном и придонном слоях устьевое взморья р. Черной.

Связь между концентрацией неорганического азота и суммой осадков, установленная в работе [17], свидетельствует о значительной роли атмосферных поступлений в балансе БВ прибрежных вод. Увеличение количества осадков приводит к уменьшению концентрации азота в атмосфере и увеличению его содержания на площади водосбора, в воде р. Черной и ее устье. Поскольку площадь зеркала вод устья р. Черной примерно в 16 раз меньше водосборной площади (площади смыва), то основной приходной составляющей баланса БВ устьевое взморье реки является ее сток.

Анализ пространственной и временной изменчивости концентрации БВ в рассматриваемом устье за 1980–2004, 1978–2016, 2007–2016 и 1976–2012 гг. выполнялся ранее в [3–6, 15, 16]. При этом схемы распределения этих ингредиентов были построены по средним арифметическим значениям их концентраций. Кроме того, указано, что концентрации БВ значимых тенденций в рассматриваемые периоды не имели [5], были разнонаправленными [15] – положитель-

---

<sup>1)</sup> Руководство по климатологической практике. Женева : ВМО, 2014. 156 с. (ВМО-№ 100).

<sup>2)</sup> Иванов В. А., Миньковская Р. Я. Морские устья рек Украины и устьевые процессы. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. Часть 1. 448 с.

ными [6] или отрицательными [16]. Периоды осреднения в этих работах были неодинаковыми и не охватывали целиком современный климатический период, 1991–2020 гг. (ВМО), не учитывался различный уровень хозяйственной деятельности или выполнялся анализ отдельных гидрохимических съе­мок [7, 8]. Такой подход не давал достоверной оценки современного режима БВ в устье р. Черной, поэтому в ряде исследований обоснована необходимость замены среднего значения концентрации на медианное и учета природно-антропогенных изменений состояния водного объекта (см. работу<sup>3)</sup> и [15]).

Биогеохимическое районирование поверхности воды Севастопольской бухты по картам распределения БВ и взвешенного вещества за 1998–2004 гг. приводится в работах [7, 9, 11]. В этих работах показано, что наиболее загрязненной БВ является вода Южной бухты и центрального района Севастопольской бухты.

Внутригодовая изменчивость индекса трофности *E-TRIX*, характеризующего качество воды по содержанию БВ и других компонентов экосистемы, представлена в работе [9]. Но эта работа не дает представления о среднем многолетнем содержании БВ в воде бухты и подтверждает выводы работы [7] о наиболее существенном загрязнении БВ Южной бухты. При этом, в отличие от результатов, приведенных в работе [7], в работе [9] установлено, что в 1998–2012 гг. центральная часть Севастопольской бухты была менее всего загрязнена минеральными формами азота. К такому же выводу приходят и авторы работы [13].

В фундаментальной работе [2] анализируется изменчивость концентраций БВ в Черном море без детализации их содержания в воде устьевого взморья, где их концентрация обычно выше, чем в морской среде.

Способность различных частей Севастопольской бухты к самоочищению от БВ и факторы, влияющие на нее, рассмотрены в [10–14]. В качестве причин низкой способности Южной бухты к самоочищению от неорганических форм азота авторы назвали затрудненный водообмен и сбросы сточных вод.

Для оценки качества воды авторы работы<sup>2)</sup> и [15] использовали индекс загрязненности воды (ИЗВ), рассчитываемый по показателям содержания химических ингредиентов разных групп (кислород, БВ, фенолы, нефтяные углеводороды). Ранее интегральной оценки загрязненности воды по содержанию БВ не проводилось.

Эпизодичность наблюдений за концентрацией БВ при существенной временной изменчивости этих ингредиентов делает оценки средней годовой концентрации недостаточно обоснованными, поэтому в качестве центра группирования данных вместо среднего арифметического значения в работе<sup>2)</sup> предложено использовать медиану. В этой же работе на основе анализа закона распределения концентраций БВ приводится обоснование этой методики. В работе<sup>3)</sup> тоже рекомендуется использовать медиану, так как среднее арифметическое значение является смещенной оценкой центра выборки.

Таким образом, анализ предшествующих работ выявил ряд недостатков методов исследования: использование среднего арифметического значения

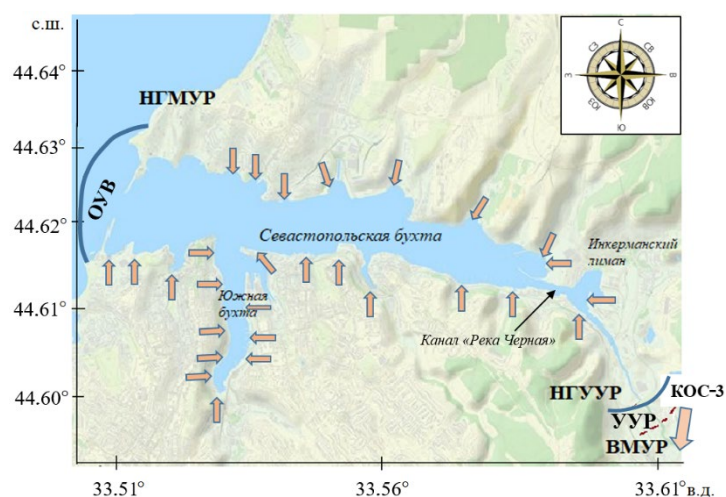
---

<sup>3)</sup> Гагарина О. В. Оценка и нормирование качества природных вод: критерии, методы, существующие проблемы : учебно-методическое пособие. Ижевск : Удмуртский университет, 2012. 199 с.

концентраций для анализа пространственной изменчивости; выбор для обобщения результатов исследования временной изменчивости коротких рядов наблюдений или необоснованно длинных, не учитывающих климатические факторы и уровень хозяйственной деятельности; некорректное использование статистических методов (отсутствие статистических оценок однородности и стационарности рядов, значимости тенденций и обеспеченности полученных зависимостей). Это затрудняет достоверную современную оценку качества воды.

Цель работы – дать современную характеристику изменчивости содержания БВ в воде устьевого взморья р. Черной и оценить качество воды по этим компонентам экосистемы. Для этого систематизирована база данных, получены статистические характеристики концентраций БВ, проанализирована их изменчивость в пространстве и во времени, а также выполнена оценка качества и самоочищающей способности воды.

Объект исследования – подверженное влиянию речного стока и сточных вод устьевое взморье, составляющее большую часть морского устья р. Черной (рис. 1).



Р и с . 1 . Морское устье р. Черной (стрелками показаны стационарные источники загрязнения воды из работы [4]). НГМУР – нижняя граница морского устья реки; ОУВ – открытая часть устьевого взморья р. Черной; НГУУР – нижняя граница устьевого участка реки; УУР – устьевой участок реки; ВМУР – вершина морского устья реки; КОС-3 – канализационное очистное сооружение в п. Сахарная Головка. Синей линией показаны границы устьевого взморья р. Черной

Fig. 1. Sea mouth of the Chernaya River (arrows show constant sources of water pollution taken from paper [4]). НГМУР – lower boundary of the river's sea mouth; ОУВ – open part of the estuarine zone of the Chernaya River; НГУУР – lower boundary of the river mouth zone; УУР – river mouth; ВМУР – the top of the river's sea mouth; КОС-3 – sewage treatment plant in the village of Sakharnaya Golovka. The blue line shows the boundaries of the Chernaya River estuarine zone

Морское устье р. Черной (рис. 1) включает:

- устьевой участок реки (УУР);
- сложное устьевое взморье, состоящее из Севастопольской бухты с комплексом более мелких бухт, Инкерманского лимана, созданного искусственно в середине 1950-х гг., и открытой части устьевое взморья (ОУВ) [15].

Из-за недостатка данных об ОУВ р. Черной объект нашего исследования ограничен Инкерманским лиманом, Севастопольской и Южной бухтами. Предметом исследования является изменчивость содержания неорганических форм азота (нитратов, нитритов, аммонийного азота) и фосфора (фосфатов) в воде устьевое взморья р. Черной в 1991–2020 гг.

Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшей работе для балансовых расчетов, моделирования эволюции экосистемы и оценки будущего состояния абиотических и биотических компонентов устья р. Черной.

### Материалы и методы

Мониторинг Севастопольской бухты и прилегающей части моря проводился научными и контролирующими организациями с 1951 г., при этом с 1960-х гг. – на регулярной основе [15]. Сеть наблюдений неоднократно оптимизировалась. На рис. 2 показано ее современное состояние на устьевом взморье р. Черной.

В качестве исходной информации использованы результаты натурных наблюдений Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова» (СО ГОИН) и Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» (МГИ РАН) за 1991–2020 гг. Наблюдения выполняли в границах морского устья р. Черной (рис. 1), включая ее устьевое взморье (рис. 2).

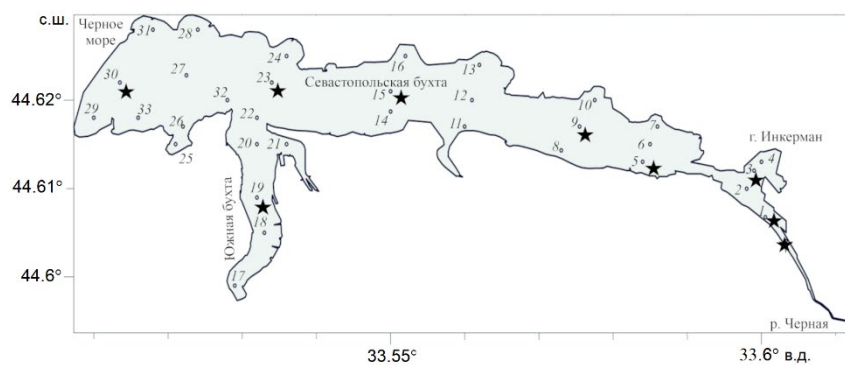


Рис. 2. Схема станций гидрохимических наблюдений МГИ РАН и СО ГОИН в устьевом взморье р. Черной в 1991–2020 гг. Точками отмечены станции гидролого-гидрохимических съемок МГИ РАН с 1998 г., а звездочками – СО ГОИН с 1961 г.

Fig. 2. Map of hydrochemical observational stations of MHI RAS and SB SOI in the Chernaya River estuarine zone in 1991–2020. The dots are for hydrological and hydrochemical surveys carried out by MHI RAS from 1998; the stars are for those carried out by the SB of SOI from 1961

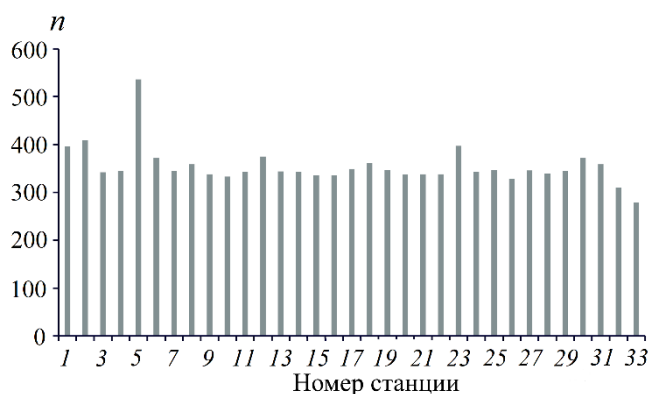
Обеспеченность первичными гидрохимическими данными достаточна для оценки изменчивости концентрации БВ в пространстве и времени. Период обобщения выбран в соответствии с рекомендациями <sup>1)</sup> с учетом изменений в экономике региона, произошедших в 1990-е гг. Правильность такого выбора подтверждается ранее выполненным анализом климатических и антропогенных изменений в рассматриваемом регионе [1].

Отбор проб воды на содержание БВ производился на 33 станциях устьевого взморья (рис. 2) и 1 станции на нижней границе УУР (рис. 1). Исследовалась концентрация в поверхностном и придонном слоях воды нитратов ( $\text{NO}_3$ ), нитритов ( $\text{NO}_2$ ), аммонийного азота ( $\text{NH}_4$ ) и фосфатов ( $\text{PO}_4$ ).

Выбор исследуемых элементов обусловлен недостатком информации о содержании загрязняющих веществ в воде устьевого взморья. Достоверную статистическую оценку природных данных пока можно сделать только в пределах большей части (90 %) устьевого взморья р. Черной, включающей Севастопольскую бухту и Инкерманский лиман. Поэтому характеристика изменчивости БВ дана для этой части устьевого взморья (рис. 2).

Анализ проб на содержание биогенных элементов был выполнен в соответствии со стандартизированными методиками <sup>4)</sup> в сертифицированных гидрохимических лабораториях СО ГОИН и МГИ РАН.

В среднем на каждой станции в 1991–2020 гг. было отобрано и проанализировано на содержание БВ 360 проб воды (рис. 3). Выполнено по 90 анализов каждого ингредиента, т. е. по 45 проб из поверхностного и придонного слоев воды. Этого достаточно для объективной статистической оценки [18].



Р и с . 3 . Количество проб на содержание БВ ( $n$ ) в воде устьевого взморья р. Черной в 1991–2020 гг. (данные СО ГОИН и МГИ РАН)

Fig. 3. Number of samples for nutrient content ( $n$ ) in the water of the Chernaya River estuarine zone in 1991–2020 (data from SB SOI and MHI RAS)

<sup>4)</sup> Руководство по химическому анализу морских вод : РД 52.10.243-92 (в ред. РД 52.10.735-2010, РД 52.10.739-2010). Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1993. 264 с.

Концентрации БВ в пробах воды определялись СО ГОИН и МГИ РАН на единой методической основе. Поэтому после проверки данных гидрохимических съемок на однородность по критерию Стьюдента [19] для уровня значимости 0.95 ряды значений концентрации БВ были объединены.

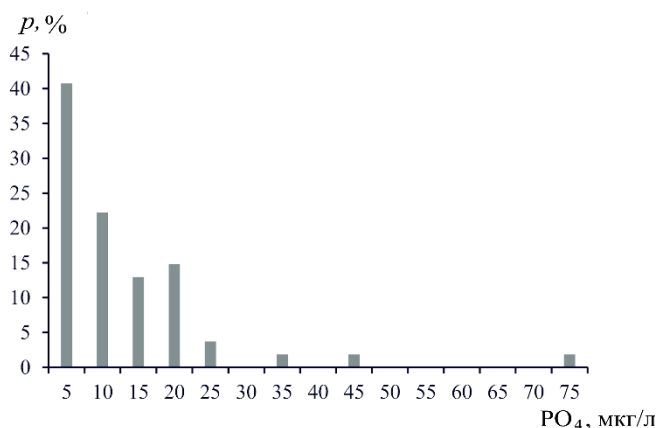
В отличие от предыдущих работ, схемы распределения концентраций БВ в поверхностном и придонном слоях воды были построены по медианам, так как установлено, что распределение этих характеристик качества воды крайне асимметричное на всех станциях. Пример гистограммы распределения фосфатов на ст. 30 приводится на рис. 4. Следовательно, в этом случае среднее арифметическое значение не является достаточно представительным параметром центра выборки и целесообразно использовать медиану, как указано в работах<sup>2),3)</sup> и [15, 18]. В рассматриваемый период из-за правосторонней асимметрии (рис. 4) медианы концентраций на всех станциях устьевого взморья р. Черной были на 15–95 % меньше их средних арифметических значений.

Для расчета статистических характеристик использовали стандартные статистические методы обобщения [19], а для построения схем распределения концентраций БВ – стандартный программный комплекс *Surfer 13*.

Применение интегральных и комплексных индексов оценки качества воды (коэффициент загрязненности, индекс качества воды, индекс загрязнения воды, комбинаторный индекс загрязненности воды, удельный комбинаторный индекс загрязненности воды и др.), рассматриваемых в работе<sup>3)</sup>, затруднительно из-за недостатка данных о многих показателях, поэтому применялся упрощенный вариант оценки качества воды по индексу загрязненности воды БВ (ИЗВ<sub>БВ</sub>) в следующей редакции:

$$\text{ИЗВ}_{\text{БВ}} = \left( \sum_{i=1}^4 \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \right) / 4, \quad (1)$$

где  $C_i$  – средняя многолетняя концентрация БВ;  $\text{ПДК}_i$  – его предельно допустимая концентрация.



Р и с . 4 . Повторяемость концентрации фосфатов в западной части Севастопольской бухты

F i g . 4 . Repeatability of phosphate concentration at the western Sevastopol Bay



ИЗВ<sub>БВ</sub> характеризует суммарное влияние БВ на водную среду без учета влияния других показателей качества воды.

Для приближенной оценки средней многолетней трансформации БВ в воде устьевого взморья р. Черной под влиянием гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических факторов использовался индекс трансформации веществ (ИТВ<sub>БВ</sub>, %/км), показывающий, на сколько процентов в среднем изменялась концентрация отдельного БВ на каждый километр продольного осевого разреза устьевого взморья. В работе [4, с. 291] предложена формула расчета ИТВ<sub>БВ</sub>

$$\text{ИТВ} = \left( \frac{\Delta C}{C_{\text{нач}} \cdot L} \right) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $\Delta C$  – разность между средней многолетней концентрацией БВ в конечном и начальном створах участка исследования;  $L$  – расстояние между створами.

Значимость тенденций концентрации исследуемых ингредиентов оценивалась по  $F$ -критерию (критерию Фишера) для вероятности неравенства нулю углового коэффициента на уровне 95 % [20].

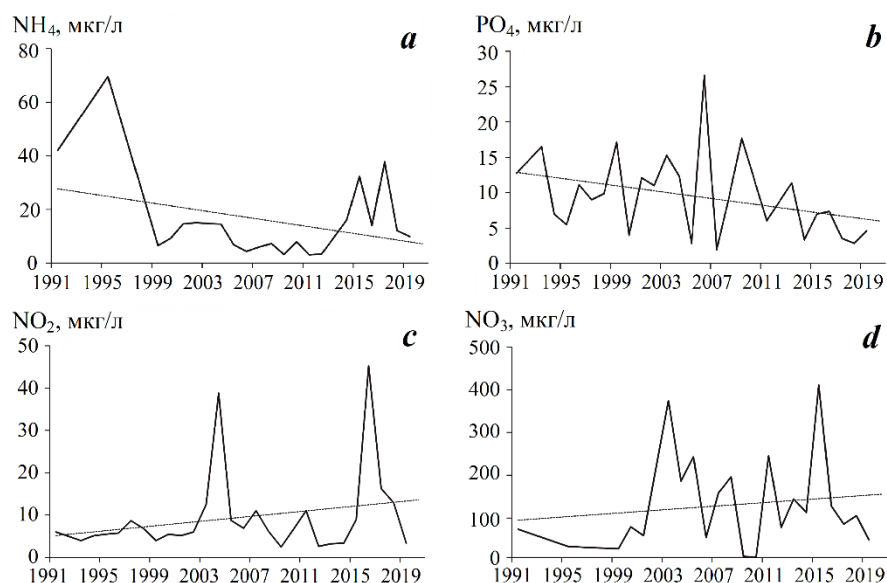
### Обсуждение результатов

*Временная изменчивость.* За 1991–2020 гг. средняя годовая концентрация БВ, рассчитанная по 3–4 гидрохимическим съемкам в год, на всех станциях не превышала ПДК. Хотя в отдельные съемки экстремальные концентрации элементов были выше ПДК в 2–500 раз: 595 мкг/л фосфатов (ПДК 150 мкг/л) (27.04.2016), 10 471 мкг/л нитритов (ПДК 20 мкг/л) (05.09.2016), 17 755 мкг/л нитратов (ПДК 9000 мкг/л) (04.02.2014). Причиной таких аномалий могут быть аварийные сбросы сточных вод и ливневые осадки.

Анализ изменчивости концентрации БВ в придонном и поверхностном слоях воды устьевого взморья р. Черной не выявил значимых тенденций. Типичное распределение концентраций БВ в поверхностном слое воды центральной части устьевого взморья реки (Севастопольской бухты), где происходит наиболее интенсивное взаимодействие разнородных вод (реки, моря, бухты и сточных вод), представлено на рис. 5.

В более ранних работах (например, в [16]) в 1989–2008 гг. отмечалось уменьшение концентрации аммонийного азота (на 10 мкг/л/год) и нитритов (на 2 мкг/л/год), поступающих в воду устьевого взморья со стоком р. Черной, а в работе [6] в воде Севастопольской бухты в 2007–2016 гг. выявлены тенденции к увеличению содержания фосфатов и нитратов с 2012 г.

Отсутствие значимых тенденций концентраций БВ в 1991–2020 гг. подтверждает выводы, сделанные в [5, 15]. В этот же период не наблюдалось значимых тенденций других абиотических компонентов экосистемы, таких как: сток рек, сумма осадков и уровень воды [1]. В сточных водах в этот период были выявлены разнонаправленные тенденции концентрации БВ [4]. Очевидно, интегральное влияние всех указанных факторов (хозяйственная деятельность и потепление) и источников поступления БВ (речной сток и сточные воды) в рассматриваемый период существенно не сказалось на временной изменчивости БВ.



Р и с . 5 . Концентрация БВ, мкг/л, в воде устьевго взморья р. Черной: *a* – аммонийный азот, *b* – фосфаты, *c* – нитриты, *d* – нитраты

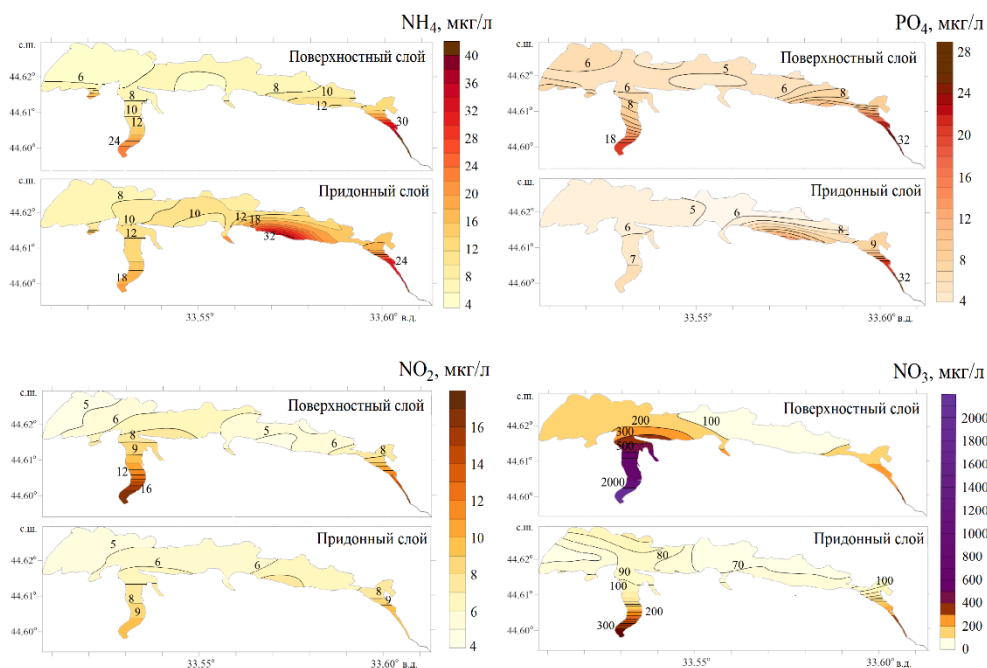
Fig. 5. Nutrient concentrations,  $\mu\text{g/L}$ , in the water of the Chernaya River estuarine zone: *a* – ammonium nitrogen, *b* – phosphates, *c* – nitrites, *d* – nitrates

*Пространственная изменчивость.* Общий характер распределения медиан концентраций БВ (рис. 6) свидетельствует о том, что восточная часть устьевго взморья подвержена влиянию речного стока, выносящего БВ из бассейна реки при смыве во время осадков, и сточных вод.

В придонном слое воды содержание всех БВ меньше, чем в поверхностном, исключая концентрацию аммонийного азота, особенно в районе ст. 8 (см. рис. 2). В глубоководной части бухты в анаэробных условиях усиливается аммонификация, поэтому в придонном слое воды отмечается повышенная концентрация аммонийного азота.

По сравнению с предшествующими работами [5, 15], распределение концентрации БВ по глубине менее однородное (рис. 6). Очевидно, это связано с использованием для анализа медиан, а не менее точных средних арифметических значений концентрации БВ, на которые существенно влияют экстремальные значения ингредиентов.

Наибольшая концентрация всех БВ отмечалась в воде Южной бухты, подверженной влиянию ливневых стоков, аварийных сбросов канализационных вод, подрусового стока и др. Загрязнению этой части устьевго взморья БВ способствует затрудненный водообмен с Севастопольской бухтой из-за ее геоморфологических особенностей (см. рис. 2). Очищающий эффект морской воды с более низкой концентрацией БВ распространяется на западную часть устьевго взморья, но в то же время более плотная морская вода, а также преобладающее направление ветров (вдоль оси устьевго взморья) затрудняет водообмен между Южной и Севастопольской бухтами. Это способствует аккумуляции загрязняющих веществ в вершине застойной Южной бухты.



Р и с . 6 . Распределение медиан концентрации аммонийного азота ( $\text{NH}_4$ ), фосфатов ( $\text{PO}_4$ ), нитритов ( $\text{NO}_2$ ) и нитратов ( $\text{NO}_3$ ) в поверхностном и придонном слоях воды устьевого взморья р. Черной

Fig. 6. Distribution of median concentrations of ammonium nitrogen ( $\text{NH}_4$ ), phosphates ( $\text{PO}_4$ ), nitrites ( $\text{NO}_2$ ) and nitrates ( $\text{NO}_3$ ) in the surface and bottom layers of water in the Chernaya River estuarine zone

Медианы значений концентраций БВ на всех станциях не превышали ПДК (рис. 6). Их наибольшие значения выявлены на ст. 17 (см. рис. 2) в Южной бухте: 18 мкг/л – для фосфатов и нитритов, 2346 мкг/л – нитратов, 25 мкг/л – аммонийного азота.

Наибольший вклад в поступление БВ в воду вносят нитраты. Они поступают с речным стоком в количестве, на порядок превышающем количество остальных поступающих БВ [4, 15], а также с атмосферными осадками [17], сточными водами [4] и при внутриводоемных гидрохимических и гидробиологических процессах [2].

Анализ распределения медиан концентраций БВ в воде устьевого взморья р. Черной (рис. 7) показал, что под действием различных факторов самоочищения (смешение с более чистой морской водой, седиментация, биогеохимическое преобразование веществ и другие гидрофизические, гидрохимические и гидробиологические процессы) концентрации БВ в основном уменьшались вдоль оси устьевого взморья, за исключением нитратов. Содержание нитратов уменьшалось от вершины до середины устьевого взморья реки, а затем увеличивалось (рис. 7), что обусловлено их поступлением со сточными водами в южную и западную части устьевого взморья.

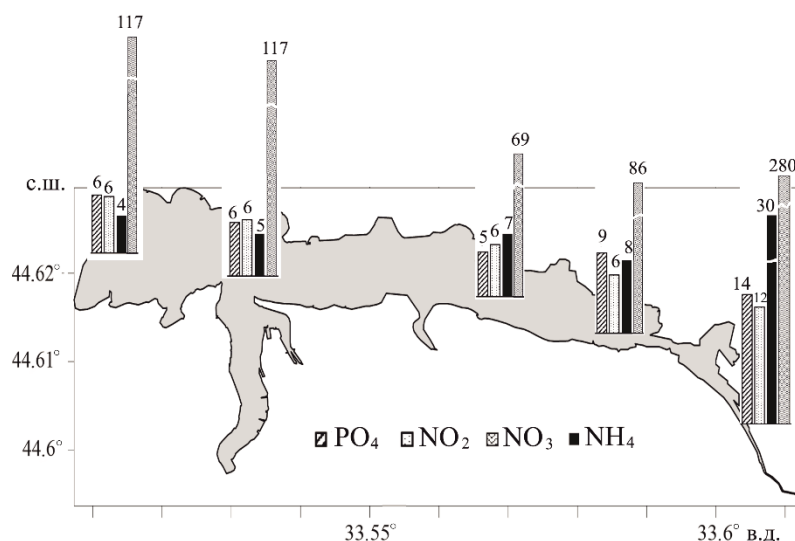


Рис. 7. Изменчивость медианы концентрации БВ в поверхностном слое воды устьевого взморья р. Черной, мкг/л

Fig. 7. Variability of the median concentration of the nutrients in the surface water layer in the Chernaya River estuarine zone, µg/L

Из рис. 7 видно, что наиболее интенсивно концентрация всех БВ снижалась в Инкерманском лимане и прилегающей к нему части бухты, в зоне фронтального раздела разнородных вод, где процессы самоочищения наиболее активны. Вдоль оси устьевого взморья р. Черной концентрация нитратов уменьшалась в 2.4, аммонийного азота – в 7.5, нитритов – в 2.0 и фосфатов – в 2.3 раза. При этом по оси Севастопольской бухты (основной части устьевого взморья) концентрация фосфатов и нитритов изменялась несущественно.

Полученные схемы могут использоваться для районирования устьевого взморья р. Черной по гидрохимическим показателям, выявления наиболее уязвимых экологических районов, комплексной оценки качества воды, а также расчета баланса БВ и аккумулятивной емкости этого приемного водоема.

*Оценка качества и самоочищения воды.* Оценка качества воды устьевого взморья р. Черной по содержанию БВ выполнена по формуле (1) с использованием средних (рис. 8, *a*) и медианных (рис. 8, *b*) значений концентраций. Из рис. 8 видно, что  $IЗВ_{БВ}$ , рассчитанный по средним арифметическим концентрациям, в 2–6 раз больше  $IЗВ_{БВ}$ , рассчитанного по медианам концентраций. Наибольшее значение  $IЗВ_{БВ}$ , рассчитанного по медианным концентрациям (рис. 8, *b*), отмечается в поверхностном слое воды Инкерманского лимана, так как основным источником поступления БВ является сток р. Черной.

В 1991–2020 гг. средний многолетний  $IЗВ_{БВ}$  в придонном слое был в 2.5 раза меньше, чем в поверхностном слое воды устьевого взморья р. Черной. Это связано с тем, что нитраты в структуре загрязнения воды БВ вносят наибольший вклад: в анаэробных условиях в придонном слое воды активнее протекают процессы денитрификации, уменьшающие концентрацию нитратов, а в поверхностный слой поступают нитраты из различных источников,

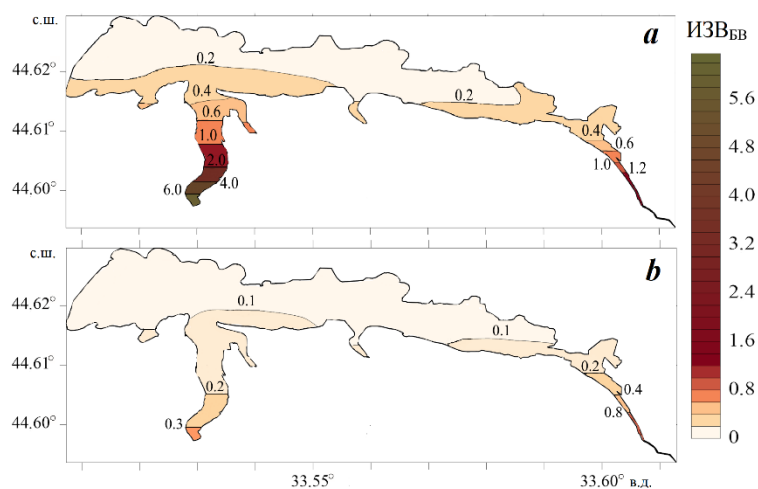


Рис. 8. Индекс загрязненности воды БВ (ИЗВ<sub>БВ</sub>) устьевого взморья р. Черной, рассчитанный по средним (а) и медианным (б) значениям концентраций за 1991–2020 гг.

Fig. 8. Distribution of the index of water pollution with nutrients (IWP<sub>N</sub>) in the Chernaya River estuarine zone calculated using average (a) and median (b) concentration values for 1991–2020

и их концентрация увеличивается вследствие процессов нитрификации. Содержание БВ в воде западной и центральной частей устьевого взморья было наименьшим (рис. 8), так как в западную часть взморья поступала обедненная БВ морская вода, а в его центральной части функционирует меньшее количество коллекторов сточных и ливневых вод (см. рис. 1).

Полученная оценка качества воды по ИЗВ<sub>БВ</sub> совпадает с выводами в работах [7, 15], в которых ИЗВ был рассчитан по общепринятой методике [18] с учетом не только биогенных, но и загрязняющих веществ. Распределение ИЗВ<sub>БВ</sub> (рис. 8) соответствует наличию источников загрязняющих веществ в устье р. Черной, указанных на рис. 1 и рассмотренных в работе [15]. Следовательно, наибольшему риску эвтрофикации может подвергаться поверхностный слой воды Инкерманского лимана и Южной бухты, являющихся частями устьевого взморья р. Черной с наименьшей самоочищающей способностью водной среды.

Для количественной оценки трансформации БВ вдоль продольной оси устьевого взморья реки использовался упрощенный метод расчета среднего многолетнего ИТВ<sub>БВ</sub> по формуле (2). Этот показатель характеризует способность воды к самоочищению от БВ, учитывая комплексное влияние абиотических и биотических факторов на концентрацию отдельных БВ.

В наибольшей степени вода устьевого взморья р. Черной очищалась от аммонийного азота: его концентрация уменьшалась в среднем на 11.4 %/км. Концентрация нитратов уменьшалась на 7.7 %/км, фосфатов – на 7.3 %/км и нитритов – на 6.8 %/км.

В современный период, по сравнению с ранее полученными результатами [15], самоочищение воды от фосфатов улучшилось (на 3.5 %/км), а от нитратов ухудшилось (на 2.6 %/км).

ИТВ<sub>БВ</sub> можно использовать для приближенных оценок изменения концентрации в любой точке устьевого взморья в зависимости от концентрации у источника поступления БВ.

### **Заключение**

В многочисленных предшествующих исследованиях анализ изменчивости содержания БВ в воде устьевого взморья р. Черной за весь современный период (1991–2020 гг.) был выполнен на основе среднего арифметического значения, что является недостаточно корректной статистической оценкой первичной информации.

Впервые гидрохимические данные наблюдений, накопленные в фондах МГИ РАН и СО ГОИН за 1991–2020 гг., были систематизированы, проверены на однородность и стационарность и объединены в один ряд, что позволило получить современную характеристику изменчивости БВ.

Установлено, что качество воды по содержанию фосфатов, нитратов, нитритов и аммонийного азота в 1991–2020 гг. в основном соответствовало нормативному. Значимых тенденций средних многолетних значений концентрации БВ не обнаружено.

Так как распределения срочных значений концентрации БВ крайне асимметричны на всех станциях, полученные схемы распределения медиан их концентраций в поверхностном и придонном слоях воды устьевого взморья р. Черной более достоверны по сравнению с предшествующими работами, в которых использовались менее точные средние арифметические значения.

Для оценки интегрального загрязнения водной среды комплексом БВ предложено использовать индекс загрязненности воды (ИЗВ<sub>БВ</sub>). Впервые показаны различия между ИЗВ<sub>БВ</sub>, рассчитанными по медианам и средним арифметическим концентрациям. Установлено, что при использовании для расчета ИЗВ<sub>БВ</sub> медиан концентраций наибольшее содержание БВ определяется для воды восточной части устьевого взморья. В дальнейшем можно будет установить классы качества воды по ИЗВ<sub>БВ</sub> и районировать по ним акваторию устьевого взморья.

Расчет ИТВ<sub>БВ</sub> (индекса трансформации веществ) показал, что вдоль оси устьевого взморья р. Черной концентрация закономерно уменьшается от реки к морю. Содержание БВ в наиболее обогащенном ими поверхностном слое воды уменьшается в среднем на 8 %/км. ИТВ<sub>БВ</sub> можно использовать для приближенной оценки изменения содержания различных веществ при недостатке натуральных данных.

Полученные результаты применимы для усовершенствования системы мониторинга, балансовых и прогнозных оценок, моделирования эволюции экосистемы устья, разработки научного обоснования хозяйственной деятельности в регионе, а также мероприятий по сохранению и охране природной среды морского устья р. Черной.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изменчивость солености воды устьевого взморья реки Черной (Севастопольский регион) в современный климатический период / С. В. Наривончик [и др.] // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2022. Т. 4, № 4. С. 359–380. EDN PQFUVZ. doi:10.34753/hs.2022.4.4.359
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4 : Черное море. Вып. 2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности / под ред. А. И. Симонова, А. И. Рябинина, Д. Е. Гершановича. Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1992. 220 с.
3. Миньковская Р. Я., Ингеров А. В. Гидрохимическая характеристика рек Севастопольского региона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. Вып. 22. С. 281–295. EDN WTVHNN.
4. Вержевская Л. В., Миньковская Р. Я. Структура и динамика антропогенной нагрузки на прибрежную зону Севастопольского региона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 92–106. EDN XGZGZL. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-92-106
5. Миньковская Р. Я., Рябинин А. И., Демидов А. Н. Результаты государственного мониторинга главных элементов биогенного цикла в воде Севастопольской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. Вып. 15. С. 66–73. EDN YMTPTN.
6. Орехова Н. А., Вареник А. В. Современный гидрохимический режим Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2018. № 2. С. 134–146. EDN YNHCQR. doi:10.22449/0233-7584-2018-2-134-146
7. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / В. А. Иванов [и др.]. Севастополь : МГИ НАНУ, 2006. 90 с. URL: [http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologo-gidrohimicheskij\\_rezhim\\_sevastopolskoj\\_buhty\\_2006.pdf](http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologo-gidrohimicheskij_rezhim_sevastopolskoj_buhty_2006.pdf) (дата обращения: 30.01.2024). EDN YRIOUU.
8. Совга Е. Е., Хмара Т. В. Влияние стока реки Черной в периоды паводка и межени на экологическое состояние кутовой части акватории Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2020. № 1. С. 31–40. EDN NNGSDX. doi:10.22449/0233-7584-2020-1-31-40
9. Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Слепчук К. А. Сравнение ассимиляционной емкости и индекса трофности различных частей акватории Севастопольской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 3. С. 63–76. EDN OHOULJ. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-63-76
10. Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Хмара Т. В. Моделирование сезонной изменчивости гидродинамического режима Севастопольской бухты и оценки самоочистительной способности ее экосистемы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 2. С. 110–123. EDN AWWRHN. doi:10.48612/fpg/92ge-ahz6-n2pt
11. Мезенцева И. В., Совга Е. Е. Самоочистительная способность экосистемы восточной оконечности Севастопольской бухты по отношению к неорганическим формам азота // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 1. С. 71–77. EDN NAGCNQ. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-1-71-77>
12. Совга Е. Е., Мезенцева И. В. Экологическое состояние центральной части акватории Севастопольской бухты в зависимости от уровня антропогенной нагрузки // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 3. С. 52–60. EDN LTIJPQ. doi:10.22449/2413-5577-2019-3-52-60

13. Оценки самоочищающей способности экосистемы Севастопольской бухты по отношению к неорганическим формам азота / В. А. Иванов [и др.] // Процессы в гео-средах. 2015. № 2. С. 55–65. EDN VDGWEN.
14. *Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Хмара Т. В.* Природно-климатические и антропогенные факторы, определяющие самоочистительную способность морских мелководных экосистем в отношении восстановленных форм азота // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 3. С. 23–36. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2021-3-23-36>
15. *Миньковская Р. Я.* Комплексные исследования разнотипных морских устьев рек (на примере морских устьев рек северо-западной части Черного моря). Севастополь : ФГБУН ФИЦ МГИ, 2020. 364 с. doi:10.22449/978-5-6043409-2-9
16. *Миньковская Р. Я.* Оценка состояния морских устьев рек Севастопольского региона // Труды Государственного океанографического института. Москва, 2018. Вып. 219. С. 152–173. EDN XSEMCT.
17. *Вареник А. В., Коновалов С. К.* Многолетние изменения содержания неорганического азота в атмосферных осадках г. Севастополя // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов («Опасные явления-II») : Материалы II Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д. Г. Матишова, Ростов-на-Дону, 06–10 июля 2020 года. Ростов-на-Дону : Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук», 2020. С. 226–230. EDN MJCKPL.
18. *Рождественский А. В., Чеботарев А. И.* Статистические методы в гидрологии. Ленинград : Гидрометеиздат, 1974. 424 с.
19. *Орлов А. И.* Многообразие критериев проверки однородности двух независимых выборок // Статистические методы оценивания и проверки гипотез : межвузовский сборник научных трудов. Пермь : Издательский центр ПГНИУ, 2019. Вып. 29. С. 64–83.
20. *Пановский Г. А., Брайер Г. В.* Статистические методы в метеорологии. Ленинград : Гидрометеиздат, 1972. 209 с.

Поступила 30.10.2023 г.; одобрена после рецензирования 12.12.2023 г.; принята к публикации 27.12.2023 г.; опубликована 25.03.2024 г.

*Об авторе:*

**Наривончик Светлана Витальевна**, старший инженер, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **SPIN-код: 4398-0782**, **ORCID ID: 0009-0004-1428-8284**, *Narivonchik\_s@mail.ru*

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*