

УДК 574.583.033(262.5.04)

**ОБИЛИЕ, ВИДОВОЕ РАЗНООБРАЗИЕ  
И СТРУКТУРА СООБЩЕСТВА МЕТАЗОЙНОГО МИКРОЗООПЛАНКТОНА  
В ГРАДИЕНТЕ БУХТЫ — ВЗМОРЬЕ  
(НА ПРИМЕРЕ СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЫ, ЧЁРНОЕ МОРЕ)**

© 2023 г. С. А. Серегин, Е. В. Попова

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,  
Севастополь, Российская Федерация  
E-mail: [serg-seryogin@yandex.ru](mailto:serg-seryogin@yandex.ru)

Поступила в редакцию 13.02.2021; после доработки 22.04.2021;  
принята к публикации 16.02.2023; опубликована онлайн 31.05.2023.

Цель исследования — выявить закономерные изменения в обилии, видовом разнообразии и структуре сообществ метазойного микрозоопланктона (ММ) в градиентных условиях морского побережья на относительно небольших пространственных масштабах. Актуальность работы определяется малочисленностью подобных исследований, позволяющих опосредованно оценить степень антропогенного воздействия на морскую биоту и установить трофический статус локальных акваторий с помощью индексов видового разнообразия. Проанализированы три акватории побережья города Севастополя: открытое взморье, устье Севастопольской бухты и внутренняя её часть. Локализация станций отбора проб отражает градиент условий среды, характеризующийся разной степенью воздействия на биоту природных и антропогенных факторов. Исследования проведены в летний и осенний периоды года. Пробы ММ отбирали из трёх горизонтов водного столба — поверхностного, 0–5-метрового и 0–10-метрового слоёв. В открытом взморье и устье бухты численность ММ по вертикали была более выравненной, тогда как в глубине бухты различия между слоями могли достигать 5–700 раз. Максимальная численность ММ (1837,1 тыс. экз.·м<sup>-3</sup>) отмечена в начале августа в поверхностном слое во внутренней части бухты. С конца лета происходило снижение обилия во всех исследованных акваториях. Видовое разнообразие сообщества ММ, оценённое с помощью индексов Шеннона, Симпсона, Пиелу и др., уменьшалось в направлении от открытого взморья вглубь бухты. Эта закономерность сохранялась в оба сезона. Наиболее информативными оказались индекс Шеннона, индекс полидоминантности Симпсона и индекс выравненности Пиелу. Они хорошо отражали как сезонные изменения видового разнообразия, так и направленность изменений в градиенте трофности локальных акваторий бухты. С помощью многомерного анализа выявлены случаи существенной трансформации в структуре сообщества ММ придонного слоя вод в глубине бухты. Основной вероятной причиной этих локальных изменений является возникновение в загрязнённых участках бухты гипоксических условий в нижних горизонтах вод, приводящее к деградации численности и видового состава исследуемого зоопланктонного сообщества.

**Ключевые слова:** метазойный микрозоопланктон, обилие, видовое разнообразие, структура сообщества, градиент бухты — взморье, трофический статус акватории

Одним из показателей благополучия экосистемы может служить её видовое разнообразие. В условиях повышенного уровня загрязнения природной среды происходит его снижение — уменьшение видового богатства и изменение распределения видов по их обилию [Мэггаран, 1992]. При этом исчезновение видов отражается на ключевых процессах, важных для продуктивности и устойчивости экосистем. Таким образом, уменьшение биоразнообразия само становится активным фактором, влияющим на функционирование экосистемы, сопоставимым по силе воздействия с такими факторами (драйверами), как глобальное потепление, повышенный уровень CO<sub>2</sub>, эвтрофикация и др. [Cardinale et al., 2012; Hooper et al., 2012]. Именно поэтому одной из важнейших задач экологии является исследование причин деградации и путей сохранения/восстановления естественного уровня биоразнообразия в экосистемах, подверженных существенному антропогенному воздействию.

Севастопольская бухта относится к морским акваториям, интенсивно используемым человеком на протяжении нескольких столетий. Она представляет собой полузамкнутую акваторию, ориентированную в широтном направлении с востока на запад и характеризующуюся затруднённым водообменом с открытой (и менее загрязнённой) частью моря. Бухта отличается мелководностью и интенсивной антропогенной нагрузкой, связанной в том числе со стоком реки Чёрная. Имея значительную протяжённость от кутовой части в месте впадения реки до устья бухты и выхода из неё (около 7 км), её акватория характеризуется наличием естественного градиента природных и антропогенных факторов.

В течение многих лет в акватории бухты специалисты проводят мониторинговые исследования гидролого-гидрохимических и биологических характеристик водной среды. В результате работ выделено несколько характерных зон с разной термогалинной и гидрохимической структурой вод, а также определены их сезонные изменения [Иванов и др., 2006]. Рассчитаны индексы трофности разных частей Севастопольской бухты [Совга и др., 2020]. Показано, что различия в численности и смертности зоопланктона связаны с интенсивностью водообмена, сгонно-нагонными ветрами и сезонными изменениями уровня моря [Репетин и др., 2003]. Одним из биологических объектов исследований в бухте является микрозоопланктон [Серегин, Попова, 2017; Seregin, Popova, 2016, 2019]. Это один из ключевых компонентов морских пищевых цепей, осуществляющий передачу значительной части вещества и энергии от низших трофических уровней (фито- и бактериопланктона) к более высоким [Calbet, 2008]. В частности, метазойный микрозоопланктон (далее — ММ) играет существенную роль в питании молоди рыб в Чёрном море [Климова и др., 2017; Мельников и др., 2015]. Особенно ценна его рачковая фракция — важнейшее звено рациона личинок рыб, обеспечивающее условия воспроизводства рыбных ресурсов моря и его локальных акваторий. Подробное изучение состава, экологических особенностей и количественных характеристик ММ имеет большое значение, в том числе в связи с проблемой антропогенного воздействия на прибрежные акватории. Сообщество ММ, представленное в основном короткоживущими видами, способно быстро реагировать на изменения условий окружающей среды, что делает эти организмы удобным объектом для диагностики таких трансформаций, в частности под влиянием антропогенных факторов [Дятлов, 2000]. Например, ранее нами отмечено, что при загрязнении прибрежных морских вод бытовыми стоками в составе ММ возрастает доля коловраток [Серегин, Попова, 2012].

Целью наших исследований было определить возможные различия обилия, видового разнообразия и структуры сообщества метазойного микрозоопланктона на относительно небольших пространственных масштабах градиента открытое взморье — устье бухты — внутренняя часть бухты, характеризующегося различной степенью воздействия природных и антропогенных факторов. Дополнительно мы попытались оценить применимость некоторых индексов видового разнообразия для анализа его изменений в ряду акваторий с разной трофностью вод.



Результаты количественной обработки проб представляли как концентрацию организмов (экз.·м<sup>-3</sup>) в поверхностном слое, в подлежащем под ним 0,1–5-метровом («среднем», Nm) и в 5–10-метровом («глубоком», Nb) слоях. Расчёт численности ММ (тыс. экз.·м<sup>-3</sup>) в слоях 0,1–5 (Nm) и 5–10 м (Nb) производили по формулам (1, 2):

$$Nm = (N_5 \times 5 - N_0 \times 0,1) / (h_5 - h_0), \quad (1)$$

$$Nb = (N_{10} \times 10 - N_5 \times 5) / (h_{10} - h_5), \quad (2)$$

где  $N_0$  — численность метазойного микрозоопланктона в поверхностном слое;

$N_5$  — численность в слое 0–5 м;

$N_{10}$  — численность в слое 0–10 м;

$h$  — вертикальная протяжённость слоя.

Обработка полученных данных проведена в программе PRIMER v5 [Clarke et al., 2014]. Исходные данные по численности ММ для включения в общую матрицу результатов предварительно  $\sqrt{\quad}$ -трансформированы для снижения возможного влияния значительно более высокой численности массовых видов. Программа позволяет рассчитывать, в частности, индексы видового разнообразия, из которых мы использовали несколько наиболее употребляемых [Мэгарран, 1992; Шитиков и др., 2003]:

1. Информационный индекс Шеннона,  $H' = -\sum p_i \ln p_i$ , где  $H'$  — численное значение индекса Шеннона;  $i = 1, 2 \dots S$ ;  $S$  — количество видов;  $p_i$  — доля в пробе особей  $i$ -го вида;  $p_i = n_i / N$ ;  $n_i$  — численность  $i$ -го вида;  $N$  — общая численность.
2. Индекс Симпсона,  $D$ , в двух формах:
  - 2.1. Вероятность межвидовых встреч,  $PIE$  (probability of interspecific encounters),  $PIE = 1 - D = 1 - \sum (p_i^2)$ , где  $D$  — вероятность того, что две подряд изъятые особи принадлежат одному виду (остальные обозначения — те же, что в индексе Шеннона).
  - 2.2. Индекс полидоминантности,  $1 / D$ .
3. Индекс выравнивания Пиелу,  $E = H' / H_{max} = H' / \ln S$ .
4. Индекс видового богатства Маргалефа,  $D_{Mg} = (S - 1) / \ln N$ .
5. Индекс Бриллюэна,  $HB = (\ln N! - \sum \ln n_i!) / N$ .

Относительно большое количество использованных индексов продиктовано следующими соображениями. Несмотря на то, что оценки различных индексов для одних и тех же сообществ часто коррелируют друг с другом, некоторые исследователи применение какого-либо одного из них (богатства, разнообразия, выравнивания) без параллельных сведений о поведении индексов других типов или даже близких по смыслу считают неправильным [Песенко, 1982]. В частности, ранее нами было показано, что для оценки короткопериодной динамики изменения видового разнообразия сообщества ММ более информативным оказался индекс Шеннона, значение которого на несколько дней раньше, чем таковое индекса Симпсона, отреагировало на изменение видовой структуры сообщества [Серегин, Попова, 2017].

Сходство/различие структуры сообщества ММ на разных станциях, глубинах и в разные моменты времени оценивали по коэффициенту Брея — Кёртиса. Для графического отображения меры сходства/различия использовали кластерный анализ (по методу групповых средних, group average) и метод многомерного масштабирования (multidimensional scaling, MDS-анализ). Оценку вклада разных видов в сходство и различие структуры ММ на различных станциях и горизонтах отбора проб в разное время проводили с помощью программы SIMPER из пакета PRIMER v5.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Характеристика погодных и гидрологических условий во время отбора проб.** Сборы 7 и 29 августа почти не различались по метеоусловиям. Температура воздуха (ночью...днём) составляла +19...+29 и +20,5...+30,5 °С соответственно (<http://www.sevmeteo.info>). В обоих случаях ветер был северо-западного направления и незначительной скорости — менее 1 м·с<sup>-1</sup> в начале месяца и 1–2 м·с<sup>-1</sup> в конце. При этом на станции в глубине бухты (на траверзе Сухарной бухты) в обе даты зарегистрированы штилевые условия. Температура верхнего 10-метрового слоя вод в начале августа характеризовалась следующими цифрами (на глубине 10 м и на поверхности): +21,3 и +25,7 °С в открытом побережье; +18,0 и +25,6 °С в устье бухты; +24,0 и +26,1 °С в глубине бухты. Солёность поверхностного слоя варьировала незначительно — 18,00–18,03 и 18,06 ‰. В конце августа температура составляла +24,2 и +24,4 °С; +24,1 и +24,5 °С; +23,8 и +24,6 °С соответственно.

В октябре ветер характеризовался некоторым увеличением скорости (до 2–4 м·с<sup>-1</sup>) и почти тем же направлением (северо-северо-западным). Температура воздуха изменялась от +13,0 °С ночью до +25,0 °С днём. Температура воды на глубине 10 м и на поверхности заметно снизилась и составляла +17,4 и +18,1 °С в открытом побережье; +17,2 и +17,8 °С в устье бухты; +17,4 и +17,7 °С в глубине бухты. Солёность поверхностного слоя воды — 18,28–18,09 и 17,89 ‰ соответственно.

Начало ноября было отмечено усилением ветров южного направления до 6–7 м·с<sup>-1</sup> и дальнейшим понижением температуры воды: значения составили +16,0 и +17,0 °С в открытом побережье; +16,5 и +16,8 °С в устье бухты; +14,3 и +15,2 °С в глубине бухты. Температура воздуха варьировала от +16,0 до +22,0 °С.

**Показатели обилия метазойного микрозоопланктона.** Общая численность ММ в открытом побережье в начале августа составляла 331,7 тыс. экз·м<sup>-3</sup> в поверхностном слое; 110,9 тыс. экз·м<sup>-3</sup> в слое 0,1–5 м; 312,5 тыс. экз·м<sup>-3</sup> в слое 5–10 м. В устье бухты значения обилия ММ были следующими: 138,1; 216,1; 103,0 тыс. экз·м<sup>-3</sup> соответственно. В глубине бухты численность ММ достигала 1837,1; 340,2; 2,6 тыс. экз·м<sup>-3</sup> соответственно. Таким образом, в море и устье бухты численность ММ по вертикали была более выравненной, тогда как в глубине бухты различия между слоями достигали 5–700 раз. Максимальная численность была зарегистрирована в глубине бухты в поверхностном слое и стала рекордной за 10-летний период наблюдений в Севастопольской бухте [Seregin, Popova, 2019].

В конце месяца численность ММ значительно изменилась как по станциям, так и по глубинам. Относительно неизменным оставалось только обилие ММ в поверхностном слое открытого взморья — 311,5 тыс. экз·м<sup>-3</sup>. В подстилающих слоях обилие снизилось на порядок и составило 24,4 и 24,7 тыс. экз·м<sup>-3</sup>. В итоге средневзвешенная численность в столбе воды уменьшилась более чем в 7 раз. В устье бухты численность ММ возросла на поверхности в несколько раз по сравнению со значением в начале месяца (до 708,4 тыс. экз·м<sup>-3</sup>), а в нижних слоях была в 20 раз меньше поверхностной. Средневзвешенное содержание ММ уменьшилось по сравнению с таковым для начала месяца примерно в 4 раза. В глубине бухты численность на поверхности значительно понизилась, а средневзвешенная численность во всём исследованном слое возросла примерно в 6 раз, прежде всего за счёт её увеличения в придонном слое; в целом распределение обилия по вертикали стало более равномерным (табл. 1).

В осенний период происходило дальнейшее снижение общей численности ММ в столбе воды на каждой из исследованных станций. Вертикальная структура микропланктонного сообщества в большинстве случаев характеризовалась уменьшением обилия от поверхности к более глубоким слоям воды. В ноябре на ст. 3 повторилась ситуация начала августа, когда в нижнем слое концентрация ММ была очень низкой — на 2 с лишним порядка ниже поверхностной (табл. 1).

**Таблица 1.** Общая численность ( $\times 10^3$  экз. $\cdot$ м $^{-3}$ ) метазойного микрозоопланктона в прибрежье Севастополя по датам отбора проб**Table 1.** Metazoan microzooplankton total abundance ( $\times 10^3$  ind. $\cdot$ м $^{-3}$ ) in Sevastopol coastal area by sampling dates

| Станция                     | Слой        | Лето       |            | Осень      |            |
|-----------------------------|-------------|------------|------------|------------|------------|
|                             |             | 07.08.2019 | 29.08.2019 | 24.10.2019 | 06.11.2019 |
| Ст. 1<br>(открытое взморье) | Поверхность | 331,7      | 311,5      | 132,5      | 110,3      |
|                             | 0,1–5 м     | 111,0      | 24,4       | 55,9       | 14,5       |
|                             | 5–10 м      | 306,8      | 24,7       | 37,5       | 18,2       |
| Ст. 2<br>(устье бухты)      | Поверхность | 138,1      | 708,4      | 420,0      | 136,6      |
|                             | 0,1–5 м     | 215,7      | 30,7       | 185,5      | 28,1       |
|                             | 5–10 м      | 88,3       | 29,8       | 9,4        | 46,3       |
| Ст. 3<br>(в глубине бухты)  | Поверхность | 1830,2     | 291,1      | 274,0      | 309,1      |
|                             | 0,1–5 м     | 314,4      | 78,2       | 182,6      | 182,6      |
|                             | 5–10 м      | 2,6        | 125,8      | 171,7      | 1,2        |

**Характеристика видового разнообразия.** В составе ММ в анализируемый период выделяли рачковую и нерачковую фракции. Первая состояла из науплиусов и копеподитных стадий черноморских копепод — рода *Acartia* Dana, 1846, *Paracalanus parvus* (Claus, 1863), *Pseudocalanus elongatus* (Boeck, 1865), *Centropages ponticus* Karavaev, 1895, *Oithona davisae* Ferrari F. D. & Orsi, 1984, *Oithona similis* Claus, 1866, *Pseudodiaptomus marinus* Sato, 1913, *Calanus euxinus* Hulsemann, 1991, гарпактицид. Также в рачковую фракцию входили науплиусы и циприсы усонюгих раков, клadoцеры *Pleopis polyphemoides* (Leuckart, 1859), очень редко — малоразмерные *Penilia avirostris* Dana, 1849. В нерачковой фракции доминировали велигеры двустворчатых и брюхоногих моллюсков и личинки полихет; в малых количествах встречались коловратки, личинки аппендикулярий *Oikopleura dioica* Fol, 1872, гребневиков *Beroe ovata* Bruguière, 1789 и *Pleurobrachia pileus* (O. F. Müller, 1776), форонид, а также некоторые другие организмы.

В начале августа в открытом прибрежье отмечено от 22 до 34 видов и жизненных форм ММ, причём на поверхности их зарегистрировано заметно меньше, чем в более глубоких слоях. Сходная зависимость распределения ММ выявлена на станции в устье бухты: зафиксировано от 19 до 35 видов и стадий с максимальным количеством видов в среднем слое. На ст. 3 (в глубине бухты) учитываемое разнообразие варьировало от 15 до 30 видов, а распределение по горизонтам было прямо противоположным таковому на ст. 1 и 2: максимальное число видов отмечено в поверхностном слое, их количество снижалось с глубиной. В нижнем слое обнаружено в 2 раза меньше видов, чем в верхних слоях. Рачковый планктон в нижнем слое был представлен младшими стадиями копепод *O. similis*, *P. parvus* и *P. elongatus* (все — относительно холодноводные), науплиусами гарпактицид и клadoцерами *P. polyphemoides*; в нерачковом зафиксированы *O. dioica*, гребневики *B. ovata* и *P. pileus*, турбеллярии.

В конце августа зарегистрирована более выравненная картина с распределением видов как по станциям, так и по глубинам. Ситуация с резким уменьшением количества видов в придонном слое повторилась в конце октября на ст. 2 и в начале ноября — на ст. 3. В табл. 2 представлены средние по сезонам индексы видового разнообразия, рассчитанные в программе PRIMER с учётом всех дат, станций и слоёв водного столба.

Индекс Маргалефа отражает видовое богатство в определённом местообитании по соотношению числа видов и их численности: чем выше индекс, тем бóльшим видовым богатством характеризуется данный биотоп [Шитиков и др., 2003]. Таким образом, максимальное видовое богатство в летний период отмечено на ст. 1 (в открытом прибрежье): средневзвешенный

индекс Маргалефа в толще водного столба составлял 2,71. Величины для устья бухты и её внутренней части — 2,23 и 2,02 соответственно. Осенью зафиксировано небольшое уменьшение видового богатства при сохранении закономерности в градиенте открытое взморье — устье — бухта: средневзвешенные показатели индекса Маргалефа составляли 2,52 – 2,10 – 1,85 соответственно.

**Таблица 2.** Средние за сезон величины индексов видового разнообразия

**Table 2.** Seasonal mean values of species diversity indices

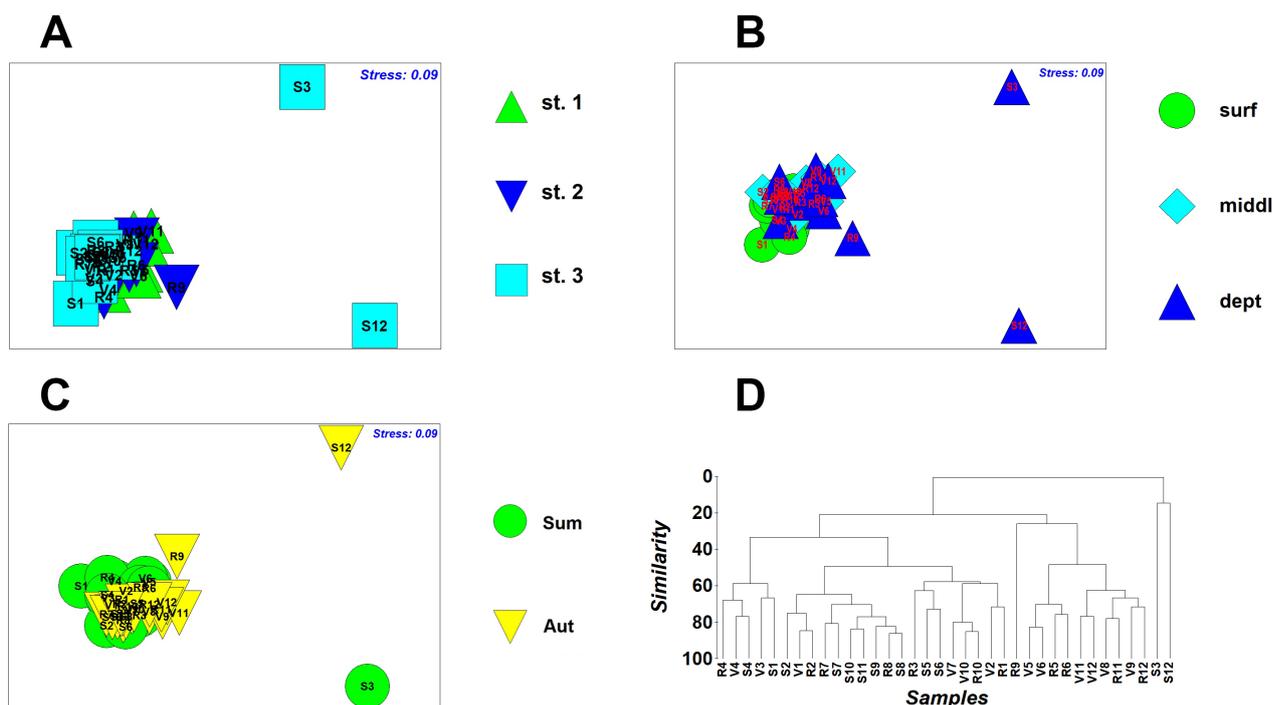
| Сезон        | Станция | Слой, м | Средние за сезон индексы видового богатства и разнообразия |                  |                    |                    |                    |               |
|--------------|---------|---------|--|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|
|              |         |         | Маргалефа,<br>$D_{Mg}$                                     | Шеннона,<br>$H'$ | Симпсона,<br>$PIE$ | Симпсона,<br>$1/D$ | Бриллуэна,<br>$HB$ | Пиелу,<br>$E$ |
| Позднелетний | 1       | 0       | 1,85   | 1,17             | 0,45               | 1,83               | 1,17               | 0,36          |
|              |         | 0,1–5   | 2,72   | 2,09             | 0,79               | 4,64               | 2,09               | 0,61          |
|              |         | 5–10    | 2,74   | 2,21             | 0,82               | 6,20               | 2,21               | 0,64          |
|              | 2       | 0       | 1,58   | 0,97             | 0,38               | 1,78               | 0,96               | 0,33          |
|              |         | 0,1–5   | 2,49   | 1,90             | 0,70               | 4,18               | 1,9                | 0,58          |
|              |         | 5–10    | 2,01   | 1,60             | 0,64               | 2,90               | 1,59               | 0,51          |
|              | 3       | 0       | 1,96   | 1,27             | 0,49               | 2,54               | 1,26               | 0,39          |
|              |         | 0,1–5   | 2,27   | 1,49             | 0,59               | 2,46               | 1,49               | 0,45          |
|              |         | 5–10    | 1,78   | 1,56             | 0,62               | 3,36               | 1,54               | 0,55          |
| Осенний      | 1       | 0       | 1,80   | 1,81             | 0,74               | 3,91               | 1,81               | 0,59          |
|              |         | 0,1–5   | 2,83   | 1,75             | 0,71               | 3,53               | 1,74               | 0,52          |
|              |         | 5–10    | 2,24   | 1,77             | 0,72               | 4,17               | 1,76               | 0,56          |
|              | 2       | 0       | 1,94   | 1,90             | 0,77               | 4,28               | 1,90               | 0,59          |
|              |         | 0,1–5   | 2,28   | 1,80             | 0,71               | 3,63               | 1,80               | 0,57          |
|              |         | 5–10    | 1,93   | 1,73             | 0,74               | 3,85               | 1,73               | 0,59          |
|              | 3       | 0       | 1,59   | 1,72             | 0,70               | 3,48               | 1,73               | 0,57          |
|              |         | 0,1–5   | 2,22   | 1,68             | 0,70               | 3,45               | 1,68               | 0,51          |
|              |         | 5–10    | 1,50   | 1,37             | 0,58               | 2,4                | 1,36               | 0,53          |

Информационный индекс Шеннона (см. табл. 2) объединяет видовое богатство и выравненность в одну величину и количественно дифференцирует системы с одинаковым видовым богатством, но с разной степенью доминирования тех или других видов [Шитиков и др., 2003]. Для летнего периода средневзвешенные значения индекса в исследуемом 10-метровом слое вод в градиенте открытое взморье — устье — бухта составляли 2,14 – 1,74 – 1,52; это подтверждало, что наибольшее видовое разнообразие характерно для морских вод за пределами бухты, а по мере продвижения вглубь бухты видовое богатство и выравненность снижаются. В осеннее время показатели индекса Шеннона составили 1,76 – 1,77 – 1,52, свидетельствуя о статус-кво биоразнообразия в глубине бухты, а также о более высоком (и одинаковом) его состоянии в территориально наиболее близких акваториях устья бухты и открытого взморья. При этом уровень видового разнообразия в открытых водах несколько снизился по сравнению с таковым для летнего периода. Такой же результат засвидетельствовал индекс Симпсона,  $PIE$ . Средневзвешенные показатели летом составили 0,80 – 0,67 – 0,60, а осенью — 0,72 – 0,72 – 0,64.

Индекс Бриллуэна, который применяется в случае, если не гарантируется случайный отбор объектов или же не учитываются все виды сообщества, использован нами в качестве контроля. Его величины практически полностью совпадают со значениями индекса Шеннона и отражают уже отмеченные закономерности изменения биоразнообразия в исследованных акваториях (табл. 2).

Для оценки выравненности распределения видов нами дополнительно использован индекс Пиелу, *E*. Бóльшее его значение соответствует бóльшей выравненности распределения видов по их относительному обилию. Средневзвешенные показатели индекса Пиелу для станций в градиенте открытое взморье — устье — бухта летом составляли 0,62 – 0,54 – 0,50, а осенью — 0,54 – 0,58 – 0,52. Таким образом, в летний период распределение видов в открытом взморье более выравнено, чем в устье бухты и тем более в её внутренней части. В осеннее время бóльшая выравненность была характерна для устья бухты; минимальной она оставалась во внутренней её части.

**Сходство/различие структуры сообщества.** Рассчитанные величины коэффициентов Брея — Кёртиса свидетельствуют на первый взгляд о довольно значительном варьировании уровня сходства сообщества ММ на разных станциях и горизонтах в различные периоды времени. В целом по всем данным коэффициент сходства изменялся от 0,5 до 85,1 %. Значения коэффициента сходства до 50,0 % составляли 43 % всех случаев; остальные данные свидетельствовали о более высоком уровне сходства. Случаи низкого сходства (не выше 24 %) — около 10 % всех попарных сравнений. Эти исключения составили данные, полученные в нижнем слое ст. 3 в начале августа и в ноябре, а также в этом же слое на ст. 2 в конце октября. Графическое отображение полученных с использованием кластерного и MDS-анализа результатов приведено на рис. 2.



**Рис. 2.** Графический (2D) результат MDS-анализа структуры сообщества метазойного микрозоопланктона на разных станциях (A), глубинах (B) и в зависимости от сезона (C); диаграмма кластерного анализа всей суммы данных (D): V — ст. 1; R — ст. 2; S — ст. 3. Цифрами от 1 до 12 обозначены последовательные номера проб по горизонтам и датам: 1–6 — для летнего сезона; 7–12 — для осеннего

**Fig. 2.** Graphical (2D) result of MDS analysis of the structure of the metazoan microzooplankton community at different stations (A), at different depths (B), and depending on the season (C); diagram of cluster analysis of the entire data set (D): V, sta. 1; R, sta. 2; S, sta. 3. Numbers 1 to 12 are successive sample numbers by horizons and dates: 1–6, for summer season; 7–12, for autumn season

Средний уровень сходства для станций (включая все горизонты и сроки взятия проб) составил: для ст. 1 — 34,4 %; для ст. 2 — 35,8 %; для ст. 3 — 35,0 %. Средний уровень различий между станциями варьировал от 63,2 до 72,1 %. Средний уровень сходства для слоёв облова имел следующие значения: для поверхностного слоя — 41,9 %; для среднего — 41,2 %; для придонного — всего 26,7 %. Уровень различий колебался от 63,8 до 74,4 %. Сходство по сезонам (для всех станций и глубин) составляло 30,8 % для лета и 39,3 % для осени; различия были значительно выше — 67,9 %.

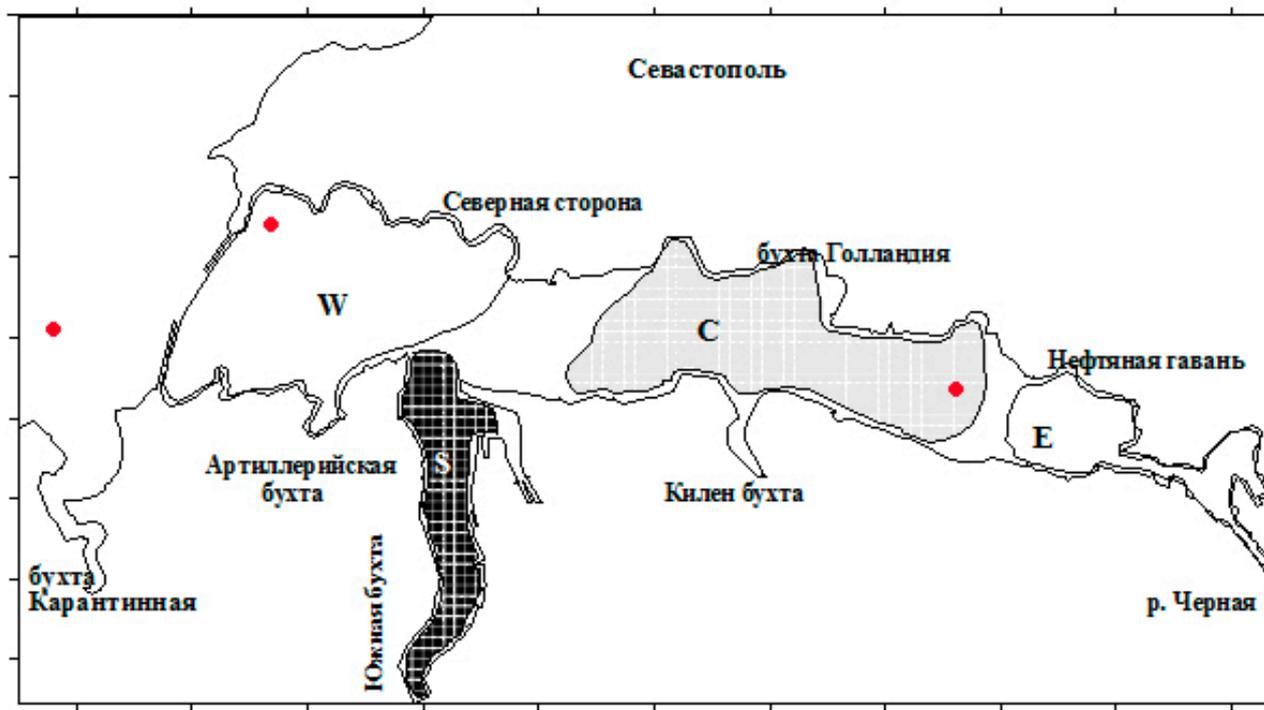
Рассмотрим случаи наиболее низкого сходства. На ст. 3 (в глубине бухты) 7 августа уровень сходства в придонном слое по отношению к поверхностному и среднему был всего 8,2 и 4,4 % соответственно. По отношению к остальным станциям, горизонтам и сезонам он составлял менее 24,0 %. Как продемонстрировано выше, показатели обилия и видовой состав на этой станции в придонном слое были значительно обеднены по сравнению с таковыми для верхних слоёв и остальных станций. Подобная ситуация повторилась для этого же местообитания в начале ноября (06.11.2019): уровень сходства сообщества ММ равнялся 5,2 и 6,7 % по отношению к верхним слоям (между ними уровень сходства по Брею — Кёртису составил 83,7 %) и не превышал 23,0 % по отношению к остальным станциям, горизонтам и сезонам. Количественные и качественные показатели сообщества ММ были также резко обеднены по сравнению с таковыми для остальных станций и глубин отбора проб. Показатели обилия и видового богатства сообщества на ст. 2 в слое 5–10 м 24.10.2019 занимают промежуточное положение между основным массивом данных и вышеуказанными показателями ММ в глубине бухты. Уровень сходства с поверхностным и средним слоем (коэффициент Брею — Кёртиса между ними равен 72,9 %) составлял 33,3 и 29,9 % соответственно, а с остальными показателями он варьировал от 19 до 45 %.

Результаты анализа видового состава ММ с помощью программы SIMPER свидетельствуют, что наибольшее влияние на сходство/различие структуры исследуемого сообщества оказывали самые массовые виды. Из рачковой фракции к ним относятся различные возрастные стадии копеподы *O. davisae*, науплиальные стадии акарциид и изредка — науплиусы *P. parvus*. Из нерачковой фракции наиболее значимыми были велигеры двустворчатых моллюсков и личинки полихет; менее значимыми — велигеры брюхоногих моллюсков и личинки *O. dioica*. При этом изменения численности *O. davisae* определяли от 73,7 до 84,3 % в доле сходства станций (по всем глубинам и срокам отбора проб), от 65,5 до 81,7 % — в доле сходства глубин (по всем станциям и срокам) и от 69,2 до 82,2 % — в доле сходства сезонов (по всем станциям и глубинам).

## ОБСУЖДЕНИЕ

**Видовое разнообразие и трофические условия акваторий.** Согласно данным многолетних исследований сотрудников ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН», открытая часть моря в непосредственной близости от входа в бухту является менее загрязнённой акваторией, чем воды бухты, в силу затруднённого водообмена между бухтой и морем [Иванов и др., 2006; Кондратьев, Видничук, 2020; Слепчук и др., 2017; Совга и др., 2020]. Если участок акватории у ст. 1 (в открытом побережье) принять за условно чистый, то можно заключить, что район ст. 2 (в устье Севастопольской бухты) характеризуется слабым загрязнением, а местоположение ст. 3 — сильным (рис. 3).

Следует учитывать, что вертикальная структура течений в водах Севастопольской бухты, особенно в её более глубоководной части, характеризуется выраженной двухслойностью: в поверхностном слое течение направлено внутрь бухты, на восток, в придонном слое — к выходу из бухты, на запад [Лемешко и др., 2014]. Таким образом, движение условно чистых вод (при соответствующих гидродинамических и метеорологических условиях) направлено внутрь бухты по поверхности, а распространение загрязнённых и более трофных вод из кутовой и средней части бухты в сторону её устья происходит в нижнем горизонте.



**Рис. 3.** Районирование Севастопольской бухты по уровню загрязнения воды (согласно [Иванов и др., 2006]): районы слабого (W), умеренного (E), сильного (C) и очень сильного (S) загрязнения. Красными кружочками обозначены наши станции отбора проб

**Fig. 3.** Zoning of the Sevastopol Bay by the level of water pollution (according to [Ivanov et al., 2006]): areas of low (W), moderate (E), high (C), and very high (S) pollution. Our sampling stations are marked with red circles

Причиной эвтрофирования водоёмов обычно является избыточное поступление в них биогенных элементов и легкоокисляемой органики, главными источниками которых выступают речной сток и промышленно-бытовые сточные воды. В Севастопольской бухте это сток реки Чёрная, неочищенные или условно очищенные сточные воды, а также ливневые воды с площади водосбора, в результате влияния которых возникают различия в уровне первичного продуцирования органического вещества в разных локациях бухты [Иванов и др., 2006]. С учётом основных источников загрязнения и эвтрофирования трофность вод бухты является более высокой в кутовой и особенно в средней её части и менее значимой в устьевой зоне. В целом уровень трофности вод Севастопольской бухты характеризуется как переходный от низкого к среднему, а основным определяющим его фактором являются неорганические формы азота [Слепчук и др., 2017; Совга и др., 2020].

Применение индексов альфа-разнообразия для водных экосистем даёт возможность не только определить собственно видовое разнообразие биоты водоёма или его части (акватории), но и косвенно оценить их трофический статус. Такой подход реализован в схемах комплексного использования и охраны водных ресурсов (КИОВР) при оценке состояния водных экосистем [2021]. Полученные нами результаты по биоразнообразию сообщества ММ на достаточно малых пространственных масштабах исследованной акватории вполне согласуются с общими положениями этого подхода. Бóльшее биоразнообразие сообщества обнаружено в более чистых акваториях, и наоборот: при более выраженной антропогенной нагрузке на акваторию отмечено снижение биоразнообразия. Учитывая одинаковость систематического состава ММ

в пределах анализируемой акватории, полагаем, что различия в биоразнообразии и структуре сообщества между станциями складывались прежде всего за счёт различий в численности и степени доминирования наиболее массовых видов.

Оценка трофического статуса исследованных акваторий на основе полученных значений индекса Шеннона, используемого в расчётах КИОВР, получается следующей. В летний период для открытого взморья характерен олиготрофный статус вод, для устья бухты — мезотрофный, а для внутренней её части — переходный от мезотрофного к гипертрофному. В осенний период статус трофности в градиенте открытое взморье — устье бухты — бухта характеризовался как мезотрофный — мезотрофный — переходный к гипертрофному. Некоторое повышение трофности открытых вод можно отнести, скорее всего, к росту обилия фитопланктона в Чёрном море в октябре — ноябре [Финенко и др., 2019] и к сопутствующему увеличению концентрации в воде органического вещества. Оценка уровня трофности прибрежных вод Севастополя с помощью индекса эвтрофикации E-TRIX [Vollenweider et al., 1998] также показала, что сезонные максимумы трофности совпадают с пиками цветения фитопланктона — осенним и весенним. Для Севастопольской бухты уровень трофности вод был оценён как переходный от низкого к среднему [Слепчук и др., 2017]. Индекс Шеннона довольно часто используют при мониторинге загрязнений среды обитания и при оценке трофического статуса водных экосистем. Было показано, например, что значение индекса при исследовании разнообразия рыб резко увеличивается по мере удаления от места сбросов в воду отходов [Мэгарран, 1992]. При изучении зоопланктона в озёрах чебаркульской группы прослежена чёткая зависимость индекса Шеннона (по численности разных видов) от трофического статуса водоёма [Пузнецките, Марушкина, 2005]. По результатам проведённых нами исследований видового разнообразия в мае — июне 2013 г. в устье Севастопольской бухты эти воды охарактеризованы как мезотрофные [Серегин, Попова, 2017]. Подобный результат был зафиксирован ранее с использованием индексов загрязнения и индекса трофности E-TRIX [Губанов и др., 2002].

Индекс Симпсона, *PIE*, характеризовал видовое разнообразие сообщества ММ как высокое летом и осенью в открытых водах взморья, а только осенью — в устье бухты. Внутри бухты разнообразие ММ оценено как умеренное. Некоторым неудобством применения этого индекса можно считать его недостаточную наглядность и «разрешающую способность»: его значения имеют узкий размах варьирования даже при сильных изменениях условий обитания и характеристик сообществ, аналогично ситуации с индексом выравненности Пиелу [Пузнецките, Марушкина, 2005]. К тому же, как показало наше изучение короткопериодной изменчивости ММ, индекс *PIE* может с запозданием реагировать на изменение видового состава сообщества по сравнению с индексом Шеннона [Серегин, Попова, 2017]. Многие исследователи считают лучшей мерой оценки альфа-разнообразия индекс полидоминантности Симпсона [Шитиков и др., 2003]. Средневзвешенные его значения для водного столба продемонстрировали более наглядные различия видового разнообразия в градиенте открытое взморье — устье бухты — бухта. Для летнего периода они составляли 5,46 – 3,51 – 2,90, а для осеннего — 3,85 – 3,78 – 2,92 соответственно. Таким образом, в них отразились как различия месторасположения станций в градиенте трофности, так и отчасти сезонные изменения видового разнообразия.

Невысокие величины индекса выравненности Пиелу свидетельствовали в целом о выраженной степени доминирования массовых видов в сообществе ММ побережья Севастополя. Действительно, в летнем и осеннем зоопланктоне изучаемых акваторий в последние годы доминирует недавний вселенец в Чёрное море — неритический вид копепод *O. davisae*. Численность разновозрастных стадий этого вида, особенно внутри бухты, может достигать 90 % и большего процента общей численности ММ, сильно воздействуя на показатели выравненности видового состава сообщества [Seregin, Popova, 2016, 2019]. Ранее для прибрежных вод Средиземного моря было

показано, что высокая численность представителей семейства Oithonidae часто связана с повышенным уровнем антропогенного прессинга на морские прибрежные акватории, а эти виды могут являться биоиндикаторами антропогенного загрязнения [Dřira et al., 2018; Serranito et al., 2016]. В нашем случае доля влияния *O. davisae* на показатель сходства структуры сообщества в исследованном градиенте станций увеличивалась от 73,7 % на ст. 1 (в открытом побережье) до 79,3 % на ст. 2 (в устье бухты) и 84,3 % на ст. 3 (в глубине бухты). Данный вид обладает биоиндикаторными свойствами, поскольку параметры его численности способны отражать повышенный уровень трофности акваторий. Отметим, что одновременно с увеличением вклада *O. davisae* по градиенту открытое взморье — устье бухты — бухта снижалась доля влияния акарциид (7,9 – 6,7 – 4,3 % соответственно) и велигеров двустворчатых моллюсков (6,5 – 5,6 – 2,6 %).

**Различия в структуре сообщества и влияние на неё факторов среды.** Результаты исследования показали, что наиболее существенные изменения в структуре сообщества ММ связаны с нижним слоем вод в глубине бухты (ст. 3). Они сопровождались как значительным уменьшением общей численности, так и редукцией обилия видов.

Ситуация в устье бухты (ст. 2) в слое 5–10 м 24.10.2019 занимает промежуточное положение между состоянием сообщества ММ в глубине бухты и в открытых водах. Видовой состав на ст. 2 был богаче, чем на ст. 3 в ноябре, но беднее, чем летом. Рачковая фракция состояла из мелких науплиусов и копеподитов II стадии *P. parvus*, поздних науплиусов и копеподитов II–III *O. davisae*, копеподитов II *A. clausi*, младших копеподитов *P. marinus*, науплиусов гарпактицид, а также кладоцер *P. polyphemoides* и Isopoda. В нерачковой фракции преобладали мелкие велигеры *Bivalvia*. По сравнению с верхними слоями здесь выявлено отсутствие циррипедий, копеподитных стадий гарпактицид, полного спектра стадий *P. parvus*, *O. davisae*, *A. clausi* и *P. marinus*, а из нерачкового планктона — отсутствие *O. dioica*, *Pleurobrachia*, полихет и гидромедуз. Коэффициенты различий с вышележащими слоями составляли 66,7 % с поверхностью и 70,1 % со средним слоем; они были ниже, чем соответствующие коэффициенты на ст. 3 (91,7 и 95,6 % летом; 94,8 и 93,3 % осенью). Данный факт может быть объяснён меньшей интенсивностью отрицательного воздействия неблагоприятных факторов среды на ММ в устье бухты, чем в её внутренней части.

Анализируя погодные и гидрологические условия во время сбора проб, следует отметить, что на ст. 3 в начале августа зафиксированы самая высокая температура (+24...+26,1 °C) и штиль. Такие условия при развитой летней вертикальной стратификации вод бухты могут способствовать меньшему содержанию кислорода в более глубоких слоях воды. «...В годы с жаркими, маловетренными летними сезонами из-за ослабления динамических процессов обостряются негативные для экосистемы явления. В частности, явления гипоксии отмечались в придонных слоях бухты, когда насыщение вод кислородом было менее 50 %» [Иванов и др., 2006, с. 24]. Этому способствует сброс неочищенных бытовых стоков и так называемый летний пик развития фитопланктона, не свойственный открытым районам моря, а характерный только для загрязнённых акваторий [Иванов и др., 2006]. Процесс деоксигенации морских прибрежных вод в результате человеческой деятельности — проблема для всего Мирового океана [Rabalais et al., 2014]. Анализ данных летних съёмок за последние 10 лет в Севастопольской бухте показал регулярное возникновение гипоксических условий и образование сероводорода у дна на соседней со ст. 3 станции 8 [Кондратьев, Видничук, 2020]. По их же данным, относительное содержание кислорода в придонном слое на ст. 3 в августе 2019 г. также было пониженным и составляло всего 56 % насыщения. Вполне вероятно, что ситуация со снижением численности и видового богатства ММ на ст. 2 (в устье бухты) в октябре связана с распространением загрязнённых вод из средней части Севастопольской бухты с придонной струёй течения в ней [Лемешко и др., 2014]. По пути к устью бухты концентрация контаминантов уменьшалась вследствие разбавления; соответственно, снижалось деградирующее воздействие на структуру сообщества. Возникновению подобных

негативных явлений в сообществе ММ в осенний период могут способствовать и сезонные изменения уровня Чёрного моря, которые играют наибольшую роль в процессах водообмена Севастопольской бухты. Многолетние исследования показали, что чаще всего минимальные уровни моря наблюдаются в октябре — ноябре [Горячкин, Иванов, 2006]. В это время снижается поступление более чистых вод открытого моря в бухту, что может приводить к общему уменьшению биомассы и численности зоопланктонных организмов [Репетин и др., 2003].

**Вывод.** Летом в поверхностном слое вод открытого побережья численность метазойного микрозоопланктона (ММ) характеризовалась относительной стабильностью и составляла от  $310 \times 10^3$  до  $330 \times 10^3$  экз. $\cdot$ м<sup>-3</sup>. Колебания численности ММ в устье бухты в этом слое были значительно больше — от  $140 \times 10^3$  до  $700 \times 10^3$  экз. $\cdot$ м<sup>-3</sup>. Максимальная численность была отмечена на поверхности в глубине Севастопольской бухты и являлась рекордной за весь период 10-летних наблюдений в ней. Численность ММ по вертикали в открытом море и устье бухты была более выравненной, тогда как в глубине бухты различия между слоями достигали в определённые моменты 5–700 раз. В осенний период зафиксировано снижение общей численности ММ в столбе воды для всех исследованных станций. Вертикальная структура в большинстве случаев характеризовалась уменьшением обилия от поверхности к более глубоким слоям воды.

Направленность изменений видового разнообразия сообщества ММ характеризовалась уменьшением в градиенте открытое взморье — устье бухты — внутренняя её часть в соответствии с возрастающей загрязнённостью и трофностью вод бухты вследствие повышения антропогенного воздействия на биоту. Эта закономерность сохранялась и в летний, и в осенний сезон. Наиболее информативными из использованных оказались индекс Шеннона, индекс полидоминантности Симпсона и индекс выравненности Пиелу. Они хорошо отражали сезонные изменения видового разнообразия и направленность в градиенте трофности локальных акваторий бухты. Средневзвешенные показатели индекса биоразнообразия для всего столба воды свидетельствовали о том, что статус открытых вод характеризовался чаще всего как олиготрофный, в устье бухты — мезотрофный, а в её глубине — как переходный от мезо- к гипертрофному.

Невысокие значения индекса выравненности Пиелу указывали в целом на выраженную степень доминирования массовых видов в сообществе ММ побережья города Севастополя, в частности копеподы *Oithona davisae* — недавнего вселенца в Чёрное море. Вид обладает биоиндикаторными свойствами, и его количественные характеристики могут быть использованы в оценке трофического статуса акваторий. Его вклад в показатель сходства структуры сообщества в исследованном градиенте от открытых вод до глубины бухты увеличивался от 73,7 % на ст. 1 (в открытом взморье) до 79,3 % на ст. 2 (в устье бухты) и до 84,3 % на ст. 3 (в глубине бухты). Одновременно по градиенту снижалась доля влияния акарциид (7,9 – 6,7 – 4,3 % соответственно) и велигеров двустворчатых моллюсков (6,5 – 5,6 – 2,6 %).

Ситуации значительного изменения структуры сообщества ММ характерны для придонного слоя вод в глубине и устье бухты. Основным фактором, определяющим периодическую деградацию видового состава и обилия ММ в этих местообитаниях, является, по всей видимости, низкая насыщенность вод кислородом, которая вызвана повышенной трофностью вод и нарушениями процесса водообмена в бухте.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по темам «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом» (№ гос. регистрации 121041400077-1) и «Закономерности формирования и антропогенная трансформация биоразнообразия и биоресурсов Азово-Черноморского бассейна и других районов Мирового океана» (№ гос. регистрации 121030100028-0).*

**Благодарность.** Выражаем искреннюю благодарность Т. А. Богдановой за определение солёности в пробах морской воды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Горячкин Ю. Н., Иванов В. А. *Уровень Чёрного моря: прошлое, настоящее и будущее* / под ред. В. Н. Еремеева ; НАН Украины, Мор. гидрофиз. ин-т. Севастополь : [ЭКОСИ-Гидрофизика], 2006. 210 с. [Goryachkin Yu. N., Ivanov V. A. *Uroven' Chernogo morya: proshloe, nastoyashchee i budushchee* / V. N. Eremeev (Ed.) ; NAS of Ukraine, Marine Hydrophysical Institute. Sevastopol : [EKOSI-Gidrofizika], 2006, 210 p. (in Russ.)]
2. Губанов В. И., Стельмах Л. В., Клименко Н. П. Комплексные оценки качества вод сева­стопольского взморья (Чёрное море) // *Экология моря*. 2002. Вып. 62. С. 76–80. [Gubanov V. I., Stelmah L. V., Klimenko N. P. Complex assessments of the Sevastopol offshore water quality (the Black Sea). *Ekologiya morya*, 2002, iss. 62, pp. 76–80. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/4565>
3. Дятлов С. Е. Роль и место биотестирования в комплексном мониторинге загрязнения морской среды // *Экология моря*. 2000. Вып. 51. С. 83–87. [Dyatlov S. Ye. Role and position of bioassays in complex monitoring of pollution of marine environment. *Ekologiya morya*, 2000, iss. 51, pp. 83–87. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/4306>
4. Иванов В. А., Овсяный Е. И., Репетин Л. Н., Романов А. С., Игнатъева О. Г. *Гидролого-химический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов* / НАН Украины, Мор. гидрофиз. ин-т. Севастополь, 2006. 90 с. [Ivanov V. A., Ovsyany E. I., Repetin L. N., Romanov A. S., Ignatyeva O. G. *Hydrological and Hydrochemical Regime of the Sebastopol Bay and Its Changing Under Influence of Climatic and Anthropogenic Factors* / NAS of Ukraine, Marine Hydrophysical Institute. Sevastopol, 2006, 90 p. (in Russ.)]
5. Климова Т. Н., Вдодович И. В., Игнатъев С. М., Серегин С. А., Кузьминова Н. С., Пустоварова Н. И., Попова Е. В. Состояние ихтиопланктона в устьевой части Севастопольской бухты (Чёрное море) // *Журнал Сибирского федерального университета. Биология*. 2017. Т. 10, № 1. С. 74–86. [Klimova T. N., Vdodovich I. V., Ignatiev S. M., Seregin S. A., Kuzminova N. S., Pustovarova N. I., Popova E. V. The ichthyoplankton state in the Sevastopol Bay mouth (Black Sea). *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 74–86. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0009>
6. Кондратьев С. И., Видничук А. В. Локальная сезонная гипоксия и образование сероводорода в придонных водах Севастопольской бухты в 2009–2019 годах // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 2. С. 107–121. [Kondratev S. I., Vidnichuk A. V. Local seasonal hypoxia and hydrogen sulphide formation in the bottom waters of the Sevastopol Bay in 2009–2019. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon morya*, 2020, no. 2, pp. 107–121. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-2-107-121>
7. Лемешко Е. М., Морозов А. Н., Шутов С. А., Зима В. В., Чепыженко А. А. Течения в Севастопольской бухте по данным ADCP-наблюдений, ноябрь 2014 г. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2014. № 28. С. 25–30. [Lemeshko E. M., Morozov A. N., Shutov S. A., Zima V. V., Chepyzhenko A. A. Tcheniya v Sevastopol'skoi bukhte po dannym ADCP-nablyudeni, noyabr' 2014 g. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*, 2014, no. 28, pp. 25–30. (in Russ.)]
8. Мельников В. В., Климова Т. Н., Игнатъев С. М., Вдодович И. В., Серегин С. А., Попова Е. В. Состояние ихтио-, микро- и макропланктонного комплексов Чёрного моря в районе Крымского полуострова в июле 2013 г. // *Системы контроля окружающей среды*. 2015. № 1 (21). С. 94–102. [Melnikov V. V., Klimova T. N., Ignatiev S. M., Vdodovich I. V., Popova E. V., Seregin S. A. Conditions of the ichthyo-, microzoo-, and macroplanktonic complexes in the Crimean Peninsula area in July 2013. *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy*, 2015, no. 1 (21), pp. 94–102. (in Russ.)]
9. *Метод оценки качества вод и состояния водных экосистем в схемах КИОВР* : презентация. [Metod otsenki kachestva vod i sostoyaniya

- vodnykh ekosistem v skhemakh KIOVR* : presentation. (in Russ.)). URL: <https://ppt4web.ru/ehkologija/metod-ocenki-kachestva-vod-i-sostojaniya-vodnykh-ehkosistem-v-skhemakh-kiovr.html> [accessed: 09.02.2021].
10. Мэгарран Э. *Экологическое разнообразие и его измерение* : пер. с англ. Москва : Мир, 1992. 181 с. [Magurran A. E. *Ecological Diversity and Its Measurement* : transl. from English. Moscow : Mir, 1992, 181 p. (in Russ.)]
  11. Песенко Ю. А. *Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях*. Москва : Наука, 1982. 288 с. [Pesenko Yu. A. *Printsipy i metody kolichestvennogo analiza v faunisticheskikh issledovaniyakh*. Moscow : Nauka, 1982, 288 p. (in Russ.)]
  12. Пузнецките К. С., Марушкина Е. В. Применение индексов альфа-разнообразия зоопланктонных сообществ для оценки трофического статуса водоёмов (на примере некоторых озёр чебаркульской группы) // *Вестник Челябинского государственного университета. Серия 12. Экология. Природопользование*. 2005. Т. 12, № 1. С. 22–25. [Puznetskite K. S., Marushkina E. V. *Primenenie indeksov al'fa-raznoobraziya zooplanktonnykh soobshchestv dlya otsenki troficheskogo statusa vodoemov (na primere nekotorykh ozer chebarkul'skoi gruppy)*. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 12. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*, 2005, vol. 12, no. 1, pp. 22–25. (in Russ.)]
  13. Репетин Л. Н., Гордина А. Д., Павлова Е. В., Романов А. С., Овсяный Е. И. Влияние океанографических факторов на экологическое состояние Севастопольской бухты (Чёрное море) // *Морской гидрофизический журнал*. 2003. № 2. С. 66–80. [Repetin L. N., Gordina A. D., Pavlova E. V., Romanov A. S., Ovsyany E. I. *Effect of oceanographic factors upon the ecological state of the Sevastopol Bay (the Black Sea)*. *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2003, no. 2, pp. 66–80. (in Russ.)]
  14. Сажина Л. И. *Науплиусы массовых видов пелагических копепод Мирового океана*. Киев : Наукова думка, 1985. 238 с. [Sazhina L. I. *Naupliusy massovykh vidov pelagicheskikh copepod Mirovogo okeana*. Kyiv : Naukova dumka, 1985, 238 p. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/5670>
  15. Серегин С. А., Попова Е. В. Бактериопланктон и метазойный микрозоопланктон в водах Чёрного моря у побережья Крыма летом 2010 г. // *Морской экологический журнал*. 2012. Т. 11, № 2. С. 65–74. [Seregin S. A., Popova E. V. *Bacterioplankton and metazoan microzooplankton in the Black Sea waters near Crimea coast in summer 2010*. *Morskoi ekologicheskij zhurnal*, 2012, vol. 11, no. 2, pp. 65–74. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/1214>
  16. Серегин С. А., Попова Е. В. Короткопериодная изменчивость метазойного микрозоопланктона в прибрежье Чёрного моря: закономерности и определяющие факторы // *Морской биологический журнал*. 2017. Т. 2, № 1. С. 56–65. [Seregin S. A., Popova E. V. *Short-term variation of metazoan microzooplankton in a coastal area of the Black Sea: The regularities and determining factors*. *Morskoi biologicheskij zhurnal*, 2017, vol. 2, no. 1, pp. 56–65. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21072/mbj.2017.02.1.06>
  17. Слепчук К. А., Хмара Т. В., Маньковская Е. В. Сравнительная оценка уровня трофности Севастопольской и Южной бухт с использованием индекса E-TRIX // *Морской гидрофизический журнал*. 2017. № 5 (197). С. 67–78. [Slepchuk K. A., Khmara T. V., Man'kovskaya E. V. *Comparative assessment of the trophic level of the Sevastopol and Yuzhnaya bays using E-TRIX index*. *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2017, no. 5 (197), pp. 67–78. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-5-67-78>
  18. Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Слепчук К. А. Сравнение ассимиляционной ёмкости и индекса трофности различных частей акватории Севастопольской бухты // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 3. С. 63–76. [Sovga E. E., Mezentseva I. V., Slepchuk K. A. *Comparison of assimilative capacity and trophic index for various parts of the Sevastopol Bay water area*. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon morya*, 2020, no. 3, pp. 63–76. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-3-63-76>
  19. Финенко З. З., Мансурова И. М., Суслин В. В. Динамика концентрации хлорофилла *a* в Чёрном море по спутниковым измерениям // *Морской биологический журнал*.

2019. Т. 4, № 2. С. 87–95. [Finenko Z. Z., Mansurova I. M., Suslin V. V. Dynamics of chlorophyll *a* concentration in the Black Sea on satellite data. *Morskoy biologicheskij zhurnal*, 2019, vol. 4, no. 2, pp. 87–95. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21072/mbj.2019.04.2.09>
20. Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. *Количественная гидроэкология: методы системной идентификации*. Тольятти : ИЭБВ РАН, 2003. 463 с. [Shitikov V. K., Rozenberg G. S., Zinchenko T. D. *Kolichestvennaya gidroekologiya: metody sistemnoi identifikatsii*. Tolyatti : IEBV RAN, 2003, 463 p. (in Russ.)]
21. Calbet A. The trophic roles of microzooplankton in marine systems. *ICES Journal of Marine Science*, 2008, vol. 65, iss. 3, pp. 325–331. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsn013>
22. Cardinale B. J., Duffy J. E., Gonzalez A., Hooper D. U., Perrings Ch., Venail P., Narwani A., Mace G. M., Tilman D., Wardle D. A., Kinzig A. P., Daily G. C., Loreau M., Grace J. B., Larigauderie A., Srivastava D. S., Naeem Sh. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 2012, vol. 486, pp. 59–67. <https://doi.org/10.1038/nature11148>
23. Clarke K. R., Gorley R. N., Somerfield P. J., Warwick R. M. *Change in Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis and Interpretation*. 3<sup>rd</sup> ed. Plymouth : PRIMER-E, 2014, 260 p.
24. Drira Z., Kmiha-Megdiche S., Sahnoun H., Tedetti M., Pagano M., Ayadi H. Copepod assemblages as a bioindicator of environmental quality in three coastal areas under contrasted anthropogenic inputs (Gulf of Gabes, Tunisia). *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2018, vol. 98, spec. iss. 8, pp. 1889–1905. <https://dx.doi.org/10.1017/S0025315417001515>
25. *ICES Zooplankton Methodology Manual* / R. P. Harris, P. H. Wiebe, J. Lenz, H. R. Skjoldal, M. Huntley (Eds). Bodmin, Cornwall : Academic Press, 2000, 684 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-327645-2.X5000-2>
26. Hooper D. U., Adair E. C., Cardinale B. J., Byrnes J. E. K., Hungate B. A., Matulich K. L., Gonzalez A., Duffy J. E., Gamfeldt L., O'Connor M. I. A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change. *Nature*, 2012, vol. 486, pp. 105–108. <https://doi.org/10.1038/nature11118>
27. Rabalais N. N., Cai W.-J., Carstensen J., Conley D. J., Fry B., Hu X., Quiñones-Rivera Z., Rosenberg R., Slomp C. P., Turner R. E., Voss M., Wissel B., Zhang J. Eutrophication-driven deoxygenation in the coastal ocean. *Oceanography*, 2014, vol. 27, no. 1, pp. 172–183. <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2014.21>
28. Seregin S. A., Popova E. V. Different-scale variations in the abundance and species diversity of metazoan microzooplankton in the coastal zone of the Black Sea. *Water Resources*, 2019, vol. 46, no. 5, pp. 769–779. <https://doi.org/10.1134/S009780781905018X>
29. Seregin S. A., Popova E. V. Long-term dynamics of abundance of the copepod-invader, *Oithona davisae*, in the coastal waters of the Black Sea. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2016, vol. 7, no. 4, pp. 374–382. <https://doi.org/10.1134/S207511171604007X>
30. Serranito B., Aubert A., Stemmann L., Rossi N., Jamet J. L. Proposition of indicators of anthropogenic pressure in the Bay of Toulon (Mediterranean Sea) based on zooplankton time-series. *Continental Shelf Research*, 2016, vol. 121, pp. 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.01.016>
31. Svetlichny L. S., Hubareva E. S., Khanaychenko A. N., Gubanov A. D., Altukhov D. A., Beşiktepe S. Adaptive strategy of thermophilic *Oithona davisae* in the cold Black Sea environment. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2016, vol. 16, pp. 77–90. [https://doi.org/10.4194/1303-2712-v16\\_1\\_09](https://doi.org/10.4194/1303-2712-v16_1_09)
32. Vollenweider R. A., Giovanardi F., Montanari G., Rinaldi A. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: Proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. *Environmetrics*, 1998, vol. 9, iss. 3, pp. 329–357. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-095X\(199805/06\)9:3%3C329::AID-ENV308%3E3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-095X(199805/06)9:3%3C329::AID-ENV308%3E3.0.CO;2-9)

**ABUNDANCE, SPECIES DIVERSITY,  
AND STRUCTURE OF THE METAZOAN MICROZOOPLANKTON COMMUNITY  
IN THE BAY–SEASIDE GRADIENT  
(ON THE EXAMPLE OF THE SEVASTOPOL BAY)**

**S. A. Seregin and E. V. Popova**

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation  
E-mail: [serg-seryogin@yandex.ru](mailto:serg-seryogin@yandex.ru)

The aim of the research is to identify regular changes in the abundance, species diversity, and structure of metazoan microzooplankton (MM) communities under gradient conditions of the sea coast on a relatively small spatial scale. The relevance of the work lies in the paucity of such studies, which allow to assess indirectly the anthropogenic load (pollution, eutrophication) on marine biota and to apply species diversity indices to evaluate the trophic status of local water areas. The investigation covered three coastal areas of the city of Sevastopol: the open seaside, the mouth of the Sevastopol Bay, and its inner area. The localization of sampling stations reflects the gradient of environmental conditions, which is characterized by various degrees of the effect of natural and anthropogenic factors on the biota. The study was carried out in summer and autumn seasons. MM was sampled on three horizons of the water column: surface, 0–5-m, and 0–10-m layers. In the open seaside and at the bay mouth, MM abundance along the vertical was characterized by a greater evenness; in the inner bay area, the differences between the layers could reach 5–700 times. Maximum MM abundance (1,837.1 thousand ind. $\cdot$ m<sup>-3</sup>) was registered in early August in the surface layer in the inner bay area. Since the late summer, the abundance decreased in all the studied water areas. The species diversity of the MM community, which was assessed applying the Shannon, Simpson, Pielou, and other indices, decreases from the open seashore towards the inner bay area. This pattern persisted in both seasons. The most informative indices were the Shannon, Simpson, and Pielou ones. Those reflected well both seasonal changes in species diversity and direction of changes in the trophic gradient of the local bay waters. Applying multivariate analysis, cases of significant alterations in the MM community structure were revealed for the bottom water layer in the inner bay area. The main probable cause of these local changes is the occurrence of hypoxic conditions in the lower water horizons of the polluted bay areas, which leads to the degradation of the abundance and species composition of the studied zooplankton community.

**Keywords:** metazoan microzooplankton, abundance, species diversity, community structure, bay–seaside gradient, trophic status of the water area