



Среда обитания водных биологических ресурсов

Состояние зообентоса и экологический статус вод вдоль центрального разреза Финского залива в 2020 г., Балтийское море

А.А. Гусев^{1,2}, Е.С. Бубнова²

¹ Атлантический филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АтлантНИРО»), ул. Дм. Донского, 5, Калининград, 236022

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ФГБУН «ИО РАН»), Нахимовский проспект, д. 36, Москва, 117997

E-mail: andgus@rambler.ru, bubnova.kat@gmail.com

Цель работы: оценить состояние морской среды в Финском заливе летом 2020 г. с применением бентических индексов соотношения оппортунистических полихет/амфипод (BOPA) и оппортунистических аннелид/амфипод (BO2A).

Используемые материал и методы: материал был собран в 55 рейсе ПС «Академик Иоффе» в июле 2020 г. Для оценки экологического статуса вод Финского залива были использованы данные CTD-зондирований, количественные характеристики и видовой состав сообществ макрозообентоса. На основе первичных данных были рассчитаны индексы BOPA и BO2A.

Результаты: полученные величины экологического статуса вод на основе индексов BOPA и BO2A в данном исследовании характеризуют качество вод вдоль центрального разреза в Финском заливе. Установлена отрицательная статистически значимая корреляционная связь между индексами BOPA, BO2A и концентрацией растворённого кислорода.

Практическая значимость: получена оценка экологического статуса вод Финского залива в 2020 г. Представленные данные показали, что концентрация растворённого кислорода в придонном слое, в условиях непостоянной солёностной стратификации, оказывает влияние на значения индексов BOPA и BO2A через толерантность различных таксономических групп. Индексы BOPA и BO2A могут быть использованы при оценке качества воды.

Ключевые слова: Финский залив, совместные исследования, макрозообентос, придонный слой моря, экологический статус вод.

State of zoobenthos and marine ecological status along the central part of the Gulf of Finland in 2020, Baltic Sea

Andrey A. Gusev^{1,2}, Ekaterina S. Bubnova²

¹ Atlantic branch of «VNIRO» («AtlantNIRO»), 5, Dm. Donskoy str., Kaliningrad, 236022, Russia

² P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS («IO RAS»), 36, Nakhimovskiy prospect, Moscow, Russia, 117997

The aim: to assess the ecological state of the Gulf of Finland in the summer of 2020 using the benthic index of the ratio of opportunistic polychaetes/amphipods (BOPA) and the benthic index of the ratio of opportunistic annelids/amphipods (BO2A).

Research material and methods: the material was collected during the 55th cruise of the PV *Akademik Ioffe* in July 2020. To assess the ecological state of the Gulf of Finland CTD-soundings and macrozoobenthos data were used, the BOPA and BO2A indices were calculated.

Results: the obtained values of the ecological state of water body based on the BOPA and BO2A indices in this study characterize the quality of the sea along the central part in the Gulf of Finland. The negative statistically significant correlation between indices BOPA, BO2A and concentration of the dissolved oxygen are established.

Practical significance: a complete picture of the ecological state of the Gulf of Finland in 2020 was obtained. The presented data showed that the concentration of dissolved oxygen in the bottom layer, under conditions of unstable salinity stratification, affects the values of the BOPA and BO2A indices through the tolerance of various taxonomic groups. BOPA and BO2A indices can be used in assessing water quality.

Keywords: Gulf of Finland, collaborative research, macrozoobenthos, near-bottom layer, ecological statute of water.

ВВЕДЕНИЕ

В придонном слое вод Финского залива с середины 1960-х до середины 1970-х гг. были зарегистрированы низкие значения концентрации растворённого кислорода в глубоководной части, сероводород от-

мечался на глубине 65 м и более. В то время бентическая фауна была скудной или отсутствовала, встречались единичные особи *Macoma balthica* и *Bylgides sarsi* [Ярвекюльг, 1979, 1984]. На глубинах 58–65 м макрофауна была обильна (более 2000 экз./м²) толь-

ко в центральной части Финского залива [Andersin et al., 1978; Andersin, Sandler, 1991; Laine et al., 1997]. Солёность в Финском заливе в течение 1965–1995 гг. снижалась [Perttinen et al., 1995; HELCOM, 1996], благодаря чему в середине 1980-х гг. галоκлин стал менее выраженным, и кислородные условия в глубоководных районах (60–80 м) улучшились за счёт вертикального перемешивания. С середины 1980-х до начала 1990-х гг. в западной и центральной частях Финского залива была отмечена обильная макрофауна со средней биомассой более 50 г/м² и численностью до 4500 экз./м² [Perttinen et al., 1995; Laine et al., 1997]. В 1996–1997 гг. произошло резкое снижение обилия макрофауны в глубоководных районах из-за понижения концентрации кислорода в придонном слое, вызванного более резкой стратификацией вод. Мощный заток североморских вод в Балтику произошёл зимой 1993–1994 гг., что привело к повышению солёности придонного слоя воды в Финском заливе. Тёплое и безветренное лето 1996 г. ещё больше усилило стратификацию вод в Финском заливе, что уменьшило вертикальное перемешивание вод. Вместе с эвтрофикацией это создало благоприятные условия для развития гипоксических условий на значительных глубинах [Karlson et al., 2002]. Чередование периодов восстановления (1999–2000, 2005, 2010–2015 гг.) и периодического вымирания (2001–2004 и 2006 гг.) донной фауны в глубоководных районах Финского залива продолжались, а их последствия наблюдаются до сих пор [Laine et al., 2007; Norkko et al., 2007; Raateoja, Setälä, 2016; Максимов, 2018].

Основываясь на данных о количественных характеристиках и видовом составе донных сообществ, можно судить об экологическом состоянии водоёмов. Соотношение характеристик обилия различных так-

сономических групп зообентоса позволяет оценить как меру участия донных беспозвоночных в процессах самоочищения воды, так и объём кормовой базы рыб-бентофагов. Бентический индекс соотношения оппортунистических полихет/амфипод (ВОРА) и бентический индекс соотношения оппортунистических аннелид/амфипод (ВО2А) признаны эффективными индикаторами для оценки экологического качества прибрежных вод во многих регионах [Dauvin, 2018]. Впервые они были применены для оценки состояния окружающей среды в Балтийском море для российской части Финского залива (наиболее восточной) по данным 2019–2020 гг. [Maximov, Berezina, 2023]. Цель данной работы – оценить состояние морской среды в Финском заливе летом 2020 г. с применением индексов ВОРА и ВО2А.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материал был собран в 55 рейсе ПС «Академик Иоффе» 03–07 июля 2020 г. Вдоль центральной части Финского залива было выполнено 12 станций: 8 в российской части залива и 4 – в исключительной экономической зоне Финляндии (рис. 1) [Крек и др., 2021].

СТД-зондирование выполняли зондом Idronaut Ocean Seven 316 Plus. Зондирования осуществляли от поверхности до дна в режиме свободного падения. Точность измерения температуры $\pm 0,003$ °C, точность измерения электропроводности (для дальнейшего пересчёта в солёность) – 3 $\mu\text{C}/\text{cm}$.

Отбор проб макрозообентоса выполнен утяжелённым дночерпателем Ван Вина (площадь захвата

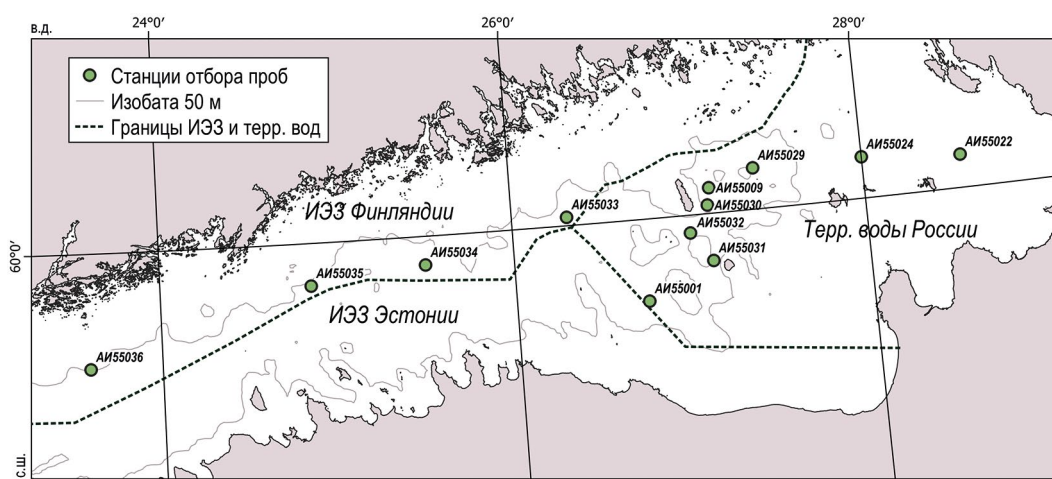


Рис. 1. Схема расположения бентосных станций в Финском заливе (Балтийское море) в июле 2020 г.

Fig. 1. Location of benthic stations in the Gulf of Finland (Baltic Sea) in July 2020

0,1 м², масса 60 кг). В каждой точке осуществляли по 3 результативных захвата грунта.

Пробы макрозообентоса промывали на борту судна в бентосном мешке с размером ячеек 0,4 мм. Промытый остаток проб помещали в ёмкости для хранения и транспортировки, где их фиксировали 4%-ным раствором формальдегида, нейтрализованным гидрокарбонатом натрия. Дальнейшая обработка проходила в лабораторных условиях [Методические ..., 1983¹; Романова, 1983²; Dybern et al., 1976; HELCOM, 1988].

Лабораторное определение видового состава выполняли под микроскопом Olympus SX51 при 10-кратном увеличении. Макрозообентос идентифицировали до вида или таксономической группы (подсемейства Tubificinae Claus, 1876). Отдельно подсчитывали количество особей каждого вида или таксономической группы. После подсчёта их просушивали на фильтровальной бумаге и взвешивали. Определение массы производили групповым методом для каждого вида или таксономической группы на аналитических весах AND DX-300 WP с точностью до 0,001 г. Полученные данные о количестве особей и массу одного вида или таксономической группы пересчитывали на 1 м² площади дна.

Индексы. Бентический индекс соотношения оппортунистических полихет (Polychaeta)/амфипод (Amphipoda) (BOPA) был рассчитан [Dauvin, Ruellet, 2007]:

$$BOPA...index = \log_{10} \left(\frac{f_p}{f_A + 1} + 1 \right), \quad (1)$$

где f_p — частота встречаемости оппортунистических видов полихет, т.е. отношение числа оппортунистических полихет к общему числу особей в выборке; f_A — частота встречаемости амфипод (за исключением представителей рода *Jassa* Leach, 1814), т.е. отношение числа амфипод к общему числу особей в выборке. Два члена «+1» в уравнении необходимы, если f_p или f_A равны нулю, чтобы разрешить операцию деления и логарифмическое преобразование.

Бентический индекс соотношения оппортунистических аннелид (Polychaeta+Clitellata)/амфипод (Amphipoda) (BO2A) после добавления представителей класса Clitellata (т.е. Hirudinea и Oligochaeta) имеет вид [Dauvin, Ruellet, 2009]:

$$BO2A...index = \log_{10} \left(\frac{f_{p+o}}{f_A + 1} + 1 \right), \quad (2)$$

где f_{p+o} — частота встречаемости оппортунистических видов полихет и олигохет, т.е. отношение суммы оп-

портунистических полихет и олигохет к общему числу особей в выборке; f_A — как в формуле (1).

Индексы BOPA и BO2A основаны на принципе антагонизма между чувствительными видами (амфипод) и оппортунистическими видами (полихет и олигохет) [Dauvin, 2018]. Индексы BOPA и BO2A равны нулю только тогда, когда отсутствуют оппортунистические полихеты и олигохеты, что указывает на область с очень низким содержанием органического вещества. Эти показатели низки, когда окружающая среда характеризуется хорошим состоянием, с небольшим количеством оппортунистических видов; и они увеличиваются по мере того, как возрастает количество органического вещества и ухудшается состояние окружающей среды. Их значения варьируют от 0 (когда $f_p = 0$) до lg2 (около 0,30103, когда $f_A = 0$) [Dauvin, Ruellet, 2009].

Пороговые значения для пяти классов экологического статуса вод представлены в табл. 1 [Dauvin, Ruellet, 2007, 2009].

Таблица 1. Пороговые значения экологического статуса вод по индексам BOPA и BO2A [Dauvin, Ruellet, 2007; Dauvin, 2018]

Table 1. Threshold values of the ecological status of water according to the BOPA and BO2A indices [Dauvin, Ruellet, 2007; Dauvin, 2018]

Экологический статус вод	Минимальное значение	Максимальное значение
Высокий	0,00000	0,02452
Хороший	0,02453	0,13002
Средний	0,13003	0,19884
Низкий	0,19885	0,25512
Плохой	0,25513	0,30103

Аналитические методы. Для определения взаимосвязи между параметрами среды, зообентоса и индексами была рассчитана ранговая корреляция Спирмена в статистическом пакете Statistica версии 6.0. Уровень значимости был установлен $\alpha = 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Параметры среды. Вдоль разреза в центральной части Финского залива донные осадки в основном представлены илами, спорадически встречаются включения железо-марганцевых конкреций. На станциях АИ55024 и АИ55030 были отмечены пески. Глубины в точках отбора варьировали от 31,3 до 80,0 м. В момент отбора проб придонная температура воды изменялась от +3,54 °C до +5,48 °C, солёность — от 5,42 единиц практической солёности (епс) на вос-

токе залива до 9,69 епс на западе, концентрация растворённого кислорода — от 0,62 до 8,03 мл/л (табл. 2).

Зообентос. Всего на обследованных станциях было отмечено 9 таксонов зообентоса, из которых 8 были определены до видового уровня, один таксон имел более высокий систематический ранг (*Tubificinae* gen. spp.). Группы: многощетинковые черви (*Polychaeta*), бокоплавы (*Amphipoda*) и двустворчатые моллюски (*Bivalvia*) были представлены двумя видами, тогда как приапиды (*Priapulida*), равноногие раки (*Isopoda*) и малощетинковые черви (*Oligochaeta*) — одним видом (табл. 3).

Наибольшая частота встречаемости отмечена для полихет *M. arctica*. На 50% станций также были отмечены амфиподы *M. affinis*. У остальных видов частота

встречаемости была ниже 25%. В зообентосе по численности доминировали полихеты (65,0%), по биомассе — двустворчатые моллюски (67,2%). Субдоминирующими группами по численности были олигохеты (20,5%), по биомассе — полихеты (24,6%) (табл. 3).

Численность и биомасса на станциях варьировали от 0 до 6930 экз./м² и от 0 до 136,41 г/м² (табл. 4). Средние значения численности и биомассы составили 1149 экз./м² и 24,48 г/м² (табл. 3). Наибольшие численности (более 1000 экз./м²) были зарегистрированы в восточной части Финского залива на глубинах от 31,3 до 54,6 м, что соответствовало концентрации растворённого кислорода в придонном слое выше 6 мл/л. На станциях в центральной и западной частях разреза с глубинами 53,5–80,0 м и концентрацией кислорода менее 6 мл/л, численность зообентоса

Таблица 2. Характеристики станций и условия среды в придонном слое в Финском заливе (Балтийское море), июль 2020 г.

Table 2. Station characteristics and environmental conditions in the nearbottom layer in the Gulf of Finland (Baltic Sea), July 2020

Станция	Координаты	Глубина, м	T, °C	S, епс	Концентрация растворённого кислорода, мл/л	Тип донных осадков
АИ55001	59° 46,12' N 26° 44,34' E	80,0	5,38	9,47	2,72	ил
АИ55009	60° 04,36' N 27° 07,55' E	62,8	4,78	8,50	2,92	ил
АИ55022	60° 05,61' N 28° 33,47' E	31,3	3,54	5,42	7,19	ил
АИ55024	60° 07,00' N 28° 00,08' E	35,4	3,74	6,23	7,74	песок
АИ55029	60° 07,00' N 27° 23,02' E	54,6	4,44	7,72	6,84	ил
АИ55030	60° 01,46' N 27° 06,55' E	32,9	3,91	6,25	8,03	песок
АИ55031	59° 52,01' N 27° 07,03' E	73,9	4,93	8,62	3,26	ил
АИ55032	59° 57,00' N 27° 00,02' E	67,2	5,09	8,98	3,16	ил
АИ55033	60° 01,44' N 26° 18,73' E	61,1	5,29	9,25	2,21	ил
АИ55034	59° 55,16' N 25° 30,01' E	72,0	5,48	9,69	0,62	ил
АИ55035	59° 52,81' N 24° 51,06' E	53,5	5,17	8,69	3,24	ил
АИ55036	59° 40,44' N 23° 35,76' E	57,4	4,98	8,05	5,62	ил

Таблица 3. Видовой состав, частота встречаемости (F), численность (N) и биомасса (B) зообентоса вдоль центральной части Финского залива (Балтийское море), июль 2020 г.

Table 3. Species composition, frequency of occurrence (F), abundance (N) and biomass (B) of zoobenthos along the central part of the Gulf of Finland (Baltic Sea), July 2020

Группа	Вид	F, %	N, экз./м ²	N, %	B, г/м ²	B, %
Priapulida	<i>Halicryptus spinulosus</i> von Siebold, 1849	8	1	0,1	0,024	0,1
Polychaeta	<i>Bylgides sarsi</i> (Kinberg in Malmgren, 1865)	8	5	0,4	0,029	0,1
	<i>Marenzelleria arctica</i> (Chamberlin, 1920)	83	742	64,6	5,991	24,5
Oligochaeta	<i>Tubificinae</i> gen. spp.	25	236	20,5	0,113	0,5
Amphipoda	<i>Gammarus salinus</i> Spooner, 1947	17	51	4,4	0,224	0,9
	<i>Monoporeia affinis</i> (Lindström, 1855)	50	59	5,1	0,112	0,5
Isopoda	<i>Saduria entomon</i> (Linnaeus, 1758)	25	18	1,6	1,536	6,3
Bivalvia	<i>Macoma balthica</i> (Linnaeus, 1758)	25	36	3,1	16,446	67,2
	<i>Mytilus trossulus</i> Gould, 1850	8	1	0,1	0,001	0,004
Итого		-	1149	100,0	24,48	100,0

Таблица 4. Численность (N, экз./м²) в таксономических группах макрозообентоса и биомасса (B, г/м²), бентический индекс соотношения оппортунистических полихет/амфипод (BOPA) и бентический индекс соотношения оппортунистических аннелид/амфипод (BO2A) на станциях Финского залива (Балтийское море), июль 2020 г.

Table 4. Abundance (N, ind./m²) in the taxonomic groups of macrozoobenthos and biomass (B, g/m²), benthic index of the ratio of opportunistic polychaetes/amphipods (BOPA) and benthic index of the ratio of opportunistic annelids/amphipods (BO2A) at the stations of the Gulf of Finland (Baltic Sea), July 2020

Станция	Polychaeta	Oligochaeta	Amphipoda	Bivalvia	Прочие	N	B	BOPA	BO2A
АИ55001	0	0	0	0	0	0	0	-	-
АИ55009	10	0	0	0	0	10	0,02	0,30103	0,30103
АИ55022	800	1600	330	0	0	2730	7,39	0,10087	0,25147
АИ55024	943	170	30	260	40	1443	116,57	0,21492	0,24444
АИ55029	1387	0	117	0	0	1503	17,94	0,26857	0,26857
АИ55030	4720	1067	800	177	167	6930	136,41	0,20699	0,24269
АИ55031	10	0	30	0	0	40	0,16	0,05799	0,05799
АИ55032	687	0	10	0	3	700	7,97	0,29383	0,29383
АИ55033	15	0	0	0	0	15	0,07	0,30103	0,30103
АИ55034	0	0	0	0	0	0	0	-	-
АИ55035	297	0	7	3	10	317	5,61	0,28274	0,28274
АИ55036	93	0	0	0	0	93	1,58	0,30103	0,30103

была менее 1000 экз./м². Максимальные биомассы установлены на станциях с песчаным грунтом (более 100 г/м²), где по биомассе доминировали двусторчатые моллюски *M. balthica*. На станциях с илистыми осадками биомасса зообентоса не превышала 20 г/м², и доминировали полихеты *M. arctia* (табл. 2 и 4).

Индексы. Рассчитанные значения BOPA и BO2A (от 0,05799 до 0,30103) охватывали почти весь теоретически возможный диапазон изменения этого показателя (табл. 4) от хорошего до плохого экологического статуса вод (табл. 2). На станциях АИ55001

и АИ55034 зообентос отсутствовал (рис. 2 и 3). Согласно полученным значениям индекса BOPA, хороший экологический статус вод отмечен на станциях АИ55022 и АИ55031, низкий – на станциях АИ55024 и АИ55030, на остальных станциях был зафиксирован плохой экологический статус (рис. 2). Индекс BO2A показал, что хороший экологический статус вод наблюдается только на станции АИ55031, низкий – на АИ55022, АИ55024 и АИ55030, на остальных станциях экологический статус вод был определён как плохой (рис. 3).

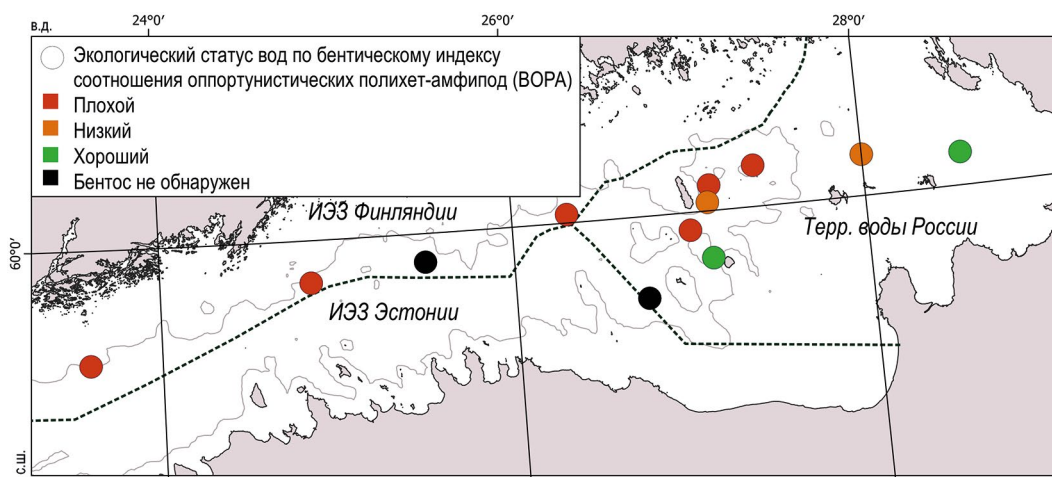


Рис. 2. Экологический статус вод по бентическому индексу соотношения оппортунистических полихет/амфипод (BOPA) в Финском заливе (Балтийское море) в июле 2020 г.

Fig. 2. Ecological status of waters according to the benthic index of the ratio of opportunistic polychaetes/amphipods (BOPA) in the Gulf of Finland (Baltic Sea) in July 2020

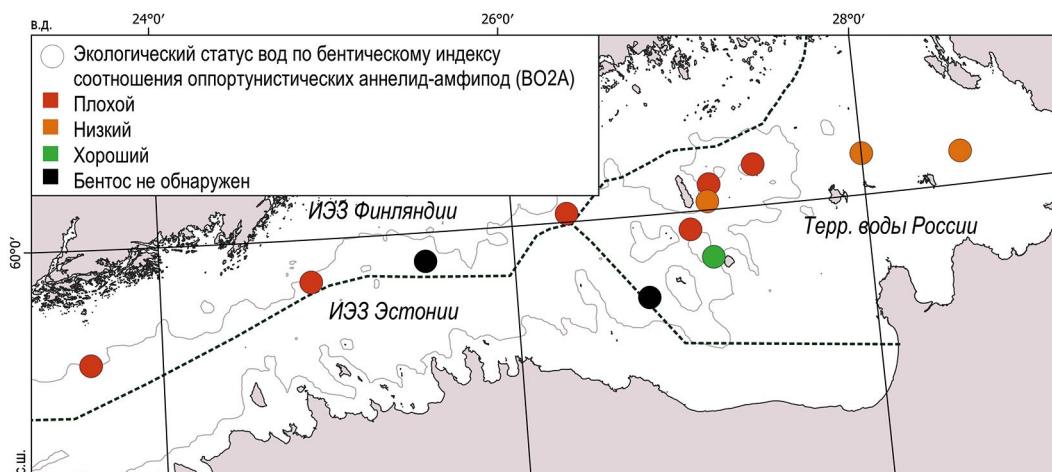


Рис. 3. Экологический статус вод по бентическому индексу соотношения оппортунистических аннелид/амфипод (BO2A) в Финском заливе (Балтийское море) в июле 2020 г.

Fig. 3. Ecological status of waters according to the benthic index of the ratio of opportunistic annelids/amphipods (BO2A) in the Gulf of Finland (Baltic Sea) in July 2020

Корреляции между параметрами среды, зообентосом и индексами. С помощью ранговой корреляция Спирмена показано, что на глубинах более 30 м в Финском заливе (табл. 2), с увеличением глубины повышаются температура и солёность воды в придонном слое, тогда как концентрация кислорода снижается. Между индексами BOPA, BO2A и концентрацией растворённого кислорода установлена отрицательная статистически значимая корреляционная связь (табл. 5).

Численности Polychaeta, Oligochaeta и Amphipoda отрицательно коррелировали с глубиной, температурой и солёностью воды в придонном слое, и положительно с концентрацией растворённого кислорода. Отмечены положительные статистически значи-

мые корреляционные связи между численностями Polychaeta, Oligochaeta и Amphipoda. Отрицательная статистически значимая корреляционная связь была между индексом BOPA и численностью Amphipoda (табл. 5).

ОБСУЖДЕНИЕ

Зообентос мористой глубоководной части Финского залива отличается низким видовым разнообразием по сравнению с прибрежными мелководными участками [Балушкина и др., 2008; Максимов, 2018; Norkko et al., 2007; Raateoja, Setälä, 2016; Крек и др., 2021]. Все обследованные станции располагались глубже термоклина, т.е. в пределах холодного промежуточного слоя. Наибольшее влияние на распределение зообентоса оказывала концентрация растворён-

Таблица 5. Корреляционные связи между параметрами среды, индексами BOPA и BO2A, численностью Polychaeta, Oligochaeta и Amphipoda (ранговая корреляция Спирмена, жирным цветом выделены связи на уровне статистической значимости $p < 0,05$)

Table 5. Correlations between environmental variables, BOPA and BO2A indices, abundances of the Polychaeta, Oligochaeta and Amphipoda (Spearman's rank correlations at the level of statistical significance $p < 0,05$ are highlighted in bold)

Параметр	Глубина, м	T, °C	S, епс	O ₂ , мл/л	BOPA	BO2A	Polychaeta	Oligochaeta	Amphipoda
Глубина, м	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T, °C	0,73	-	-	-	-	-	-	-	-
S, епс	0,81	0,97	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , мл/л	-0,76	-0,88	-0,92	-	-	-	-	-	-
BOPA	0,35	0,62	0,53	-0,67	-	-	-	-	-
BO2A	0,23	0,39	0,52	-0,71	0,52	-	-	-	-
Polychaeta	-0,74	-0,72	-0,67	0,73	-0,49	-0,01	-	-	-
Oligochaeta	-0,76	-0,75	-0,75	0,73	-0,60	-0,32	0,63	-	-
Amphipoda	-0,63	-0,78	-0,73	0,84	-0,86	-0,40	0,86	0,71	-

ного кислорода в придонном слое воды. На глубинах более 60 м на одной станции наблюдались условия гипоксии (содержание растворённого кислорода менее 2 мл/л), на остальных станциях содержание растворённого кислорода в придонном слое было немного выше: 2,21–3,26 мл/л. На станциях с глубинами менее 60 м содержание растворённого кислорода в придонном слое было выше 5 мл/л (табл. 2), что значительным образом влияло на структурные характеристики зообентоса (число видов, численность и биомассу).

Параметры среды оказывают значительное влияние на распределение зообентоса в глубоководной части Финского залива и питающихся ими бентосоядных рыб [Максимов, 2008; Raateoja, Setälä, 2016]. Восточная часть Финского залива (восточнее о. Гогланд) характеризуется отсутствием постоянной солёностной стратификации в отличие от западной. В восточной части залива ежегодные ветровое и конвективное перемешивания в осенне-зимний период обеспечивают аэрацию всей водной толщи. Дефицит кислорода возникает после формирования летнего термоклина, который располагается обычно на глубинах 20–25 м [Максимов, 2006; Еремина и др., 2012]. Доказано, что наиболее интенсивно гипоксия развивается в годы, когда усиленный подток обеднённых кислородом солёных вод из открытой (западной) части Балтийского моря совпадает с холодными зимами, а рано образовавшийся ледяной покров препятствует вертикальному перемешиванию вод [Максимов, 2006]. Для глубоководных районов Финского залива показано, что содержание кислорода имеет чёткую зависимость от солёности. Так при солёности воды более 8 епс концентрация растворённого кислорода резко снижается, а при 9 епс наблюдаются условия гипоксии (менее 2 мл/л) [Norkko et al., 2007; Raateoja, Setälä, 2016].

Полученные нами средние величины численности и биомассы зообентоса, в целом, соответствуют данным за последнее десятилетие для районов с илистыми осадками в российской части залива с глубинами более 25 м и исключительной экономической зоне Финляндии на глубинах более 50 м [Максимов, 2018; Raateoja, Setälä, 2016; Maximov, Berezina, 2023], а незначительные расхождения связаны с меньшим числом станций и не совпадающей сеткой станций.

Впервые выполнена оценка экологического состояния вод западной части Финского залива на основе индексов BOPA и BO2A. Для восточной части Финского залива показано, что соотношения полихет/амфипод и аннелид/амфипод, по-видимому, адекватно отражают экологическое состояние морской среды. Установлено, что индексы BOPA и BO2A не коррелиру-

ют с природными факторами, такими как глубина, температура и солёность, а концентрация растворённого кислорода имеет отрицательную корреляцию с этими индексами. В то же время показано, что содержание кислорода оказывает положительное влияние на распространение и структурные характеристики зообентоса. Таким образом, концентрация растворённого кислорода в придонном слое, в условиях непостоянной солёностной стратификации, оказывает влияние на значения индексов BOPA и BO2A через толерантность различных таксономических групп. Наиболее чувствительной группой к содержанию кислорода в воде являются Amphipoda [Ярвекюльг, 1979; Rousi et al., 2019]. Индекс BOPA также обладает потенциалом для использования при оценке качества воды в прибрежных водах Балтийского моря по содержанию органического вещества [Maximov, Berezina, 2023].

Оценки по индексам BOPA и BO2A показали, что экологический статус вод вдоль центрального разреза Финского залива, в целом, соответствует низкому или плохому, за исключением, станции АИ55031, где численность Polychaeta была ниже численности Amphipoda, а Oligochaeta не обнаружены. Отличие оценок этих индексов было отмечено только на одной наиболее восточной станции, где по индексу BOPA экологический статус вод соответствовал хорошему, а по BO2A — низкому (рис. 2 и 3). Это было связано с тем, что на станции АИ55022 численность Oligochaeta была в 2 раза выше, чем численность Polychaeta, в отличие от других станций (табл. 4).

BO2A рекомендуется применять в зонах эстуариев с низкой солёностью, где олигохеты заменяют полихеты в качестве доминирующих условно-патогенных видов [Dauvin, 2018]. BO2A потенциально может быть использован на почти пресных мелководных участках Финского залива, где полихеты отсутствуют, а олигохеты являются основным оппортунистическим таксоном. Это особенно важно, поскольку в последние годы наблюдается увеличение числа и обилия амфипод в прибрежной зоне восточной части Финского залива в связи с проникновением чужеродных видов [Бережина, Максимов, 2016].

Полученные оценки экологического статуса вод на основе индексов BOPA и BO2A в данном исследовании характеризуют качество вод вдоль центрального разреза в Финском заливе. Сопоставление этих результатов с данными А.А. Максимова и Н.А. Бережиной [Maximov, Berezina, 2023], пересчитанными через \log_{10} , показали хорошую сходимость результатов на участках, где сетки станций перекрывались. Таким образом, была получена более полная картина экологического статуса вод Финского залива в 2020 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным совместных экспедиционных исследований Атлантического филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АтлантНИРО») и Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, рассчитанные для Финского залива бентические индексы показывают, по большей части, плохой и низкий экологический статус вод. Хороший экологический статус был характерен для прибрежных мелководных районов, что можно объяснить лучшей аэрацией водной толщи и доступным органическим веществом из близко расположенного фотического слоя.

Благодарности

Авторы благодарят сотрудников Атлантического филиала ФГБНУ «ВНИРО» и Атлантического отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН за помощь в организации и выполнении экспедиционных исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов при подготовке статьи.

Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы соблюдены.

Финансирование

Исследования макрозообентоса выполнены в рамках госзадания ФГБНУ «ВНИРО» № 076–00004–23–00, гидролого-гидрохимических условий – по теме госзадания ИО РАН (тема № FMWE-2021–0012).

ЛИТЕРАТУРА

- Балушкина Е.В., Максимов А.А., Голубков С.М., Ципленкина И.Г. 2008. Зообентос открытых вод эстуария реки Невы // Экосистема эстуария реки Невы: биологическое разнообразие и экологические проблемы. М.: Товарищество научных изданий КМК. С. 156–183.
- Березина Н.А., Максимов А.А. 2016. Количественные характеристики и пищевые предпочтения бокоплавов (Crustacea: Amphipoda) в восточной части Финского залива Балтийского моря // Журнал СВУ. Биология. Т. 9. № 4. С. 409–426. DOI 10.17516/1997–1389–2016–9–4–409–426.
- Еремина Т.Р., Максимов А.А., Волощук Е.В. 2012. Влияние изменчивости климата на кислородный режим глубинных вод восточной части Финского залива // Океанология. Т. 52. № 6. С. 836–845.
- Крек А.В., Крек Е.В., Ежова Е.Е., Пака В.Т., Кондрашев А.А., Данченко А.Р., Багиров Н.Э., Кудрявцева Е.А., Бубнова Е.С., Сергеев А.Ю., Александров С.В. Экспедиционные исследования в Балтийском море в 55-м рейсе ПС «Академик Иоффе» // Океанология. Т. 61. № 4. С. 662–665. <https://doi.org/10.31857/S0030157421040067>
- Максимов А.А. 2006. Причины возникновения придонной гипоксии в восточной части Финского залива Балтийского моря // Океанология. Т. 46. № 2. С. 204–210.
- Максимов А.А. 2008. Влияние климатических факторов на динамику зообентоса // Экосистема эстуария реки Невы: биологическое разнообразие и экологические проблемы. М.: Товарищество научных изданий КМК. С. 346–355.
- Максимов А.А. 2018. Межгодовая и многолетняя динамика макрозообентоса на примере вершины Финского залива. СПб.: Нестор-История. 260 с.
- Яркевюльз А.А. 1979. Донная фауна восточной части Балтийского моря. Состав и экология распределения. Таллинн: Валгус. 382 с.
- Яркевюльз А.А. 1984. Зообентос Центральной и Восточной Балтики // Очерки по биологической продуктивности Балтийского моря. М.: Т. 3. С. 155–256.
- Andersin A.-B., Lassig J., Parkkonen L., Sandler H. 1978. The decline of macrofauna in the deeper parts of the Baltic proper and Gulf of Finland // Kieler Meeresforschungen. V. 4. P. 23–52.
- Andersin A.-B., Sandler H. 1991. Macrobenthic fauna and oxygen deficiency in the Gulf of Finland // Memoranda Societatis pro Fauna et Flora Fennica. V. 67. P. 3–10.
- Dauvin J.-C. 2018. Twenty years of application of Polychaete/Amphipod ratios to assess diverse human pressures in estuarine and coastal marine environments: A review // Ecological Indicators. V. 95. № 1. P. 427–435. DOI 10.1016/j.ecolind.2018.07.049.
- Dauvin J.-C., Ruellet T. 2007. Polychaete/amphod ratio revisited // Marine Pollution Bulletin. V. 55. № 1–6. P. 215–224. DOI 10.1016/j.marpolbul.2006.08.045.
- Dauvin J.-C., Ruellet T. 2009. The estuarine quality paradox: is it possible to define an ecological status for specific modified and naturally stressed estuarine ecosystems? // Marine Pollution Bulletin. V. 59. № 1–3. P. 38–47. DOI 10.1016/j.marpolbul.2008.11.008.
- Dybern B.I., Ackefors H., Elmgren R. 1976. Recommendations on methods for marine biological studies in the Baltic Sea // Baltic Marine Biologists. № 1. 98 p.
- HELCOM. 1996. Third periodic assessment of the state of the marine environment of the Baltic Sea // Baltic Sea Environment Proceedings. № 64B.
- HELCOM. 1988. Guidelines for the Baltic monitoring programme for the third stage: Part D. Biological determinants // Baltic Sea Environment Proceedings. № 27D. P. 1–161.
- Karlson K., Rosenberg R., Bonsdorff E. 2002. Temporal and spatial large-scale effects of eutrophication and oxygen deficiency on benthic fauna in Scandinavian and Baltic waters – a review // Oceanography and Marine Biology: an Annual Review. V. 40. P. 427–489.
- Laine A. O., Andersin A.-B., Leiniö S., Zuur A. F. 2007. Stratification-induced hypoxia as a structuring factor of macrozoobenthos in the open Gulf of Finland (Baltic Sea) // J. of Sea Research. V. 57. № 1. P. 65–77. DOI 10.1016/j.seares.2006.08.003.

- Laine A.O., Sandler H., Andersin A.-B., Stigzelius J. 1997. Long-term changes of macrozoobenthos in the Eastern Gotland Basin and the Gulf of Finland (Baltic Sea) in relation to the hydrographical regime // *J. of Sea Research*. V. 38. № 1–2. P. 135–159. DOI 10.1016/S1385–1101(97)00034–8.
- Maximov A.A., Berezina N.A. 2023. Benthic opportunistic polychaete/amphipod ratio: an indicator of pollution or modification of the environment by macroinvertebrates? // *J. of Marine Science and Engineering*. V. 11. № 1. 190. DOI 10.3390/jmse11010190.
- Norkko A., Laakkonen T., Laine A. 2007. Trends in soft-sediment macrozoobenthic communities in the open sea areas of the Baltic Sea // *MERI – Report Series of the Finnish Institute of Marine Research*. No. 59. P. 59–64.
- Perttilä P., Niemisto L., Makela K. 1995. Distribution, development and total amounts of nutrients in the Gulf of Finland // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. V. 41. № 3. P. 345–360. DOI 10.1006/ecss.1995.0067.
- Raateoja M., Setälä O. 2016. The Gulf of Finland assessment // *Reports of the Finnish Environment Institute*. Helsinki: No. 27. 363 p.
- Rousi H., Korpinen S., Bonsdorff E. 2019. Brackish-water benthic fauna under fluctuating environmental conditions: the role of eutrophication, hypoxia, and global change // *Frontiers in Marine Science*. V. 6:464. DOI 10.3389/fmars.2019.00464.
- Balushkina E.V., Maximov A.A., Golubkov S.M., Tsiplenkina I.G. 2008. Zoobenthos of the open waters of the Neva River estuary // *Ecosystem of the estuary of the Neva River: biological diversity and environmental problems*. Moscow: Association of Scientific Publications of the KMK. P. 156–183. (In Russ.).
- Berezina N.A., Maximov A.A. 2016. Abundance and food preferences of amphipods (Crustacea: Amphipoda) in the Easter Gulf of Finland, Baltic Sea // *Journal of Siberian University. Biology*. V. 9. № 4. P. 409–426. DOI 10.17516/1997–1389–2016–9–4–409–426. (In Russ.).
- Eremina T.R., Maximov A.A., Voloschuk E.V. 2012. Effects of climatic variability on deep-water oxygen conditions in the Eastern Gulf of Finland // *Okeanologiya*. V. 52. № 6. P. 836–845. (In Russ.).
- Krek A.V., Krek E.V., Ezhova E.E., Paka V.T., Kondrashov A.A., Danchenkov A.R., Bagirov N.E., Kudryavtzeva E.A., Bubnova E.S., Sergeev A. Ju., Aleksandrov S.V. 2021. Field research in the Baltic Sea during 55th cruise of the P/V *Akademik Ioffe* // *Okeanologiya*. Vol. 61. № 4. P. 662–665. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0030157421040067>
- Maximov A.A. 2006. The causes of formation of near-bottom hypoxia in the Eastern Gulf of Finland (Baltic Sea) // *Okeanologiya*. V. 46. № 2. P. 204–210. (In Russ.).
- Maximov A.A. 2008. Influence of climatic factors on the dynamics of zoobenthos // *Ecosystem of the estuary of the Neva River: biological diversity and environmental problems*. Moscow: Association of Scientific Publications of the KMK. P. 346–355. (In Russ.).
- Maximov A.A. 2018. Interannual and long-term dynamics of macrozoobenthos (the case study from the inner Gulf of Finland). Saint-Petersburg: Nestor-Historia. 260 p. (In Russ.).
- Maximov A.A., Berezina N.A. 2023. Benthic opportunistic polychaete/amphipod ratio: an indicator of pollution or modification of the environment by macroinvertebrates? // *J. of Marine Science and Engineering*. V. 11. № 1. 190. DOI 10.3390/jmse11010190.
- Yarvekulg A.A. 1979. Bottom fauna of the eastern part of the Baltic Sea. Composition and ecology of distribution. Tallinn: Valgus. 382 p. (In Russ.).
- Yarvekulg A.A. 1984. Zoobenthos of the Central and Eastern Baltic // *Essays on biological productivity of the Baltic Sea*. Moscow: V. 3. P. 155–256. (In Russ.).
- Andersin A.-B., Lassig J., Parkkonen L., Sandler H. 1978. The decline of macrofauna in the deeper parts of the Baltic proper and Gulf of Finland // *Kieler Meeresforschungen*. V. 4. P. 23–52.
- Andersin A.-B., Sandler H. 1991. Macrobenthic fauna and oxygen deficiency in the Gulf of Finland // *Memoranda Societatis pro Fauna et Flora Fennica*. V. 67. P. 3–10.
- Dauvin J.-C. 2018. Twenty years of application of Polychaete/Amphipod ratios to assess diverse human pressures in estuarine and coastal marine environments: A review // *Ecological Indicators*. V. 95. № 1. P. 427–435. DOI 10.1016/j.ecolind.2018.07.049.
- Dauvin J.-C., Ruellet T. 2009. The estuarine quality paradox: is it possible to define an ecological status for specific modified and naturally stressed estuarine ecosystems? // *Marine Pollution Bulletin*. V. 59. № 1–3. P. 38–47. DOI 10.1016/j.marpolbul.2008.11.008.
- Dauvin J.-C., Ruellet T. 2007. Polychaete/amphod ratio revisited // *Marine Pollution Bulletin*. V. 55. № 1–6. P. 215–224. DOI 10.1016/j.marpolbul.2006.08.045.
- Dybern B.I., Ackefors H., Elmgren R. 1976. Recommendations on methods for marine biological studies in the Baltic Sea // *Baltic Marine Biologists*. № 1. 98 p.
- HELCOM. 1996. Third periodic assessment of the state of the marine environment of the Baltic Sea // *Baltic Sea Environment Proceedings*. № 64B.
- HELCOM. 1988. Guidelines for the Baltic monitoring programme for the third stage: Part D. Biological determinants // *Baltic Sea Environment Proceedings*. № 27D. P. 1–161.
- Karlson K., Rosenberg R., Bonsdorff E. 2002. Temporal and spatial large-scale effects of eutrophication and oxygen deficiency on benthic fauna in Scandinavian and Baltic waters – a review // *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*. V. 40. P. 427–489.
- Laine A.O., Andersin A.-B., Leiniö S., Zuur A.F. 2007. Stratification-induced hypoxia as a structuring factor of macrozoobenthos in the open Gulf of Finland (Baltic Sea) // *J. of Sea Research*. V. 57. № 1. P. 65–77. DOI 10.1016/j.seares.2006.08.003.
- Laine A.O., Sandler H., Andersin A.-B., Stigzelius J. 1997. Long-term changes of macrozoobenthos in the Eastern Gotland Basin and the Gulf of Finland (Baltic Sea) in relation to the hydrographical regime // *J. of Sea Research*. V. 38. № 1–2. P. 135–159. DOI 10.1016/S1385–1101(97)00034–8.

REFERENCES

Norkko A., Laakkonen T., Laine A. 2007. Trends in soft-sediment macrozoobenthic communities in the open sea areas of the Baltic Sea // MERI – Report Series of the Finnish Institute of Marine Research. No. 59. P. 59–64.

Perttilä P., Niemisto L., Makela K. 1995. Distribution, development and total amounts of nutrients in the Gulf of Finland // Estuarine, Coastal and Shelf Science. V. 41. № 3. P. 345–360. DOI 10.1006/ecss.1995.0067.

Raateoja M., Setälä O. 2016. The Gulf of Finland assessment // Reports of the Finnish Environment Institute. Helsinki: No. 27. 363 p.

Rousi H., Korpinen S., Bonsdorff E. 2019. Brackish-water benthic fauna under fluctuating environmental conditions:

the role of eutrophication, hypoxia, and global change // Frontiers in Marine Science. V. 6:464. DOI 10.3389/fmars.2019.00464.

Поступила в редакцию 07.04.2023 г.

Принята после рецензии 15.08.2023 г.