

ТРОФИЧЕСКИЙ СТАТУС БУХТЫ БЛАГОПОЛУЧИЯ (СОЛОВЕЦКИЕ ОСТРОВА БЕЛОГО МОРЯ) В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2024 Г.

Н. М. Калинин¹, Н. Е. Галахина¹, Е. А. Костромин², Н. В. Усов³, Ю. Л. Сластина¹

¹ Институт водных проблем Севера — обособленное подразделение
Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Россия)

² Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины (Санкт-Петербург, Россия)

³ Зоологический институт РАН (Санкт-Петербург, Россия)

Статья поступила в редакцию 28 апреля 2025 г.

Для цитирования

Калинкина Н. М., Галахина Н. Е., Костромин Е. А. и др. Трофический статус бухты Благополучия (Соловецкие острова Белого моря) в летний период 2024 г. // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 4. — С. 592—604. — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-4-592-604.

По содержанию биогенных элементов и хлорофилла *a*, видовому составу и количественным показателям фито- и зоопланктона оценен трофический статус бухты Благополучия (Соловецкие острова Белого моря). Высокое содержание в воде $P_{\text{общ}}$ (до 640 мкг/л) и $N_{\text{общ}}$ (до 2,50 мг N/л) свидетельствует о существенной антропогенной нагрузке на залив и определяет его трофический статус как эвтрофный-гипертрофный. Концентрация хлорофилла *a* в воде залива изменялась от 1,23 до 3,73 мкг/л, в соответствии с чем срединная часть бухты была классифицирована как олиготрофная-мезотрофная, кутовая (вершинная) часть — как мезотрофная-эвтрофная. Показатели развития фитопланктона в разных частях бухты Благополучия варьировали в следующих пределах: численность составила 66–2502 тыс. кл./л, биомасса — 372–2059 мг/м³. В составе фитопланктона доминировали представители диатомовых водорослей и динофлагеллят. Наибольшие показатели численности и биомассы фитопланктона отмечались в самой загрязненной кутовой части бухты, где было отмечено доминирование цианобактерий. Обилие зоопланктона на большинстве станций значительно превышало среднемноголетние значения в прибрежной зоне Белого моря в это время года, но было существенно ниже нормы на наиболее загрязненной станции. Состояние бухты Благополучия по химико-биологическим показателям свидетельствует о крайне неблагоприятной экологической ситуации, что определяет необходимость снижения биогенной нагрузки на залив.

Ключевые слова: биогенные элементы, хлорофилл *a*, эвтрофирование, антропогенная нагрузка, зоопланктон, фитопланктон.

Введение

Соловецкий архипелаг Белого моря испытывает интенсивную рекреационную нагрузку, что приводит к загрязнению водоемов и прибрежной части моря. В связи с восстановлением Соловецкого монастыря в последние годы нарастают объемы хозяйственно-бытовых сточных вод, сбрасываемых в залив на Большом Соловецком острове — бухту Благополучия [1; 2]. На берегу бухты расположены Соловецкий кремль и поселок Соловецкий (рис. 1). По данным микробио-

логических исследований [3], бухта Благополучия — наиболее загрязненный участок прибрежной зоны, поскольку в нее поступают неочищенные сточные воды. Исследования химического состава воды, концентрации хлорофилла *a* и характеристик фитопланктона в бухте Благополучия, выполненные в 2009, 2010 и 2016 гг. [2], позволили выявить в заливе превышение ПДК по фенольным соединениям, нефтепродуктам, легкоминерализуемому органическому веществу (по величине БПК₅), а также дефицит кислорода в мелководных участках бухты. По содержанию фосфатов трофический статус кутовой (вершинной) части бухты был определен как эвтрофный, по

степени загрязнения (по значению индекса загрязнения воды) вода в заливе классифицируется как «грязная». Летом 2016 г. в бухте Благополучия было зафиксировано развитие цианобактерий (*Oscillatoria planctonica*), которые доминировали в фитопланктоне по численности и по биомассе [2].

Биогенные элементы (БЭ) (формы азота и фосфора) являются важными показателями химического состава воды, определяющими трофический статус водного объекта и его биопродуктивность. К источникам их поступления в водную среду относятся сточные воды, а также поверхностный сток с сельскохозяйственных и селитебных территорий. По данным [4], в сточных водах поселка Соловецкий среди БЭ отмечается высокая концентрация ионов аммония и фосфатов ($92,0 \pm 19,3$ и $22,5 \pm 2,7$ мг/л соответственно), и они оказывают существенное влияние на трофический статус бухты Благополучия, в которую поступают без предварительной очистки.

Гидробиологические исследования — важнейший элемент системы контроля качества вод, поскольку водные беспозвоночные и их сообщества представляют собой чувствительные индикаторы загрязнения биогенными и токсическими веществами. Фитопланктон, осуществляя фотосинтез, участвует в формировании качества вод и первым реагирует на увеличение концентрации БЭ в воде [5]. Функциональное состояние и обилие фитопланктона в морских экосистемах характеризуются выраженной пространственно-временной изменчивостью структуры, которая определяется как биотическими, так и абиотическими факторами, среди которых одними из наиболее значимых являются структура и динамика вод [6]. Гидрологическому режиму каждого моря, а в ряде случаев и отдельным гидрографическим районам конкретного водоема присущи свои характерные черты, что обуславливает специфичность основных механизмов

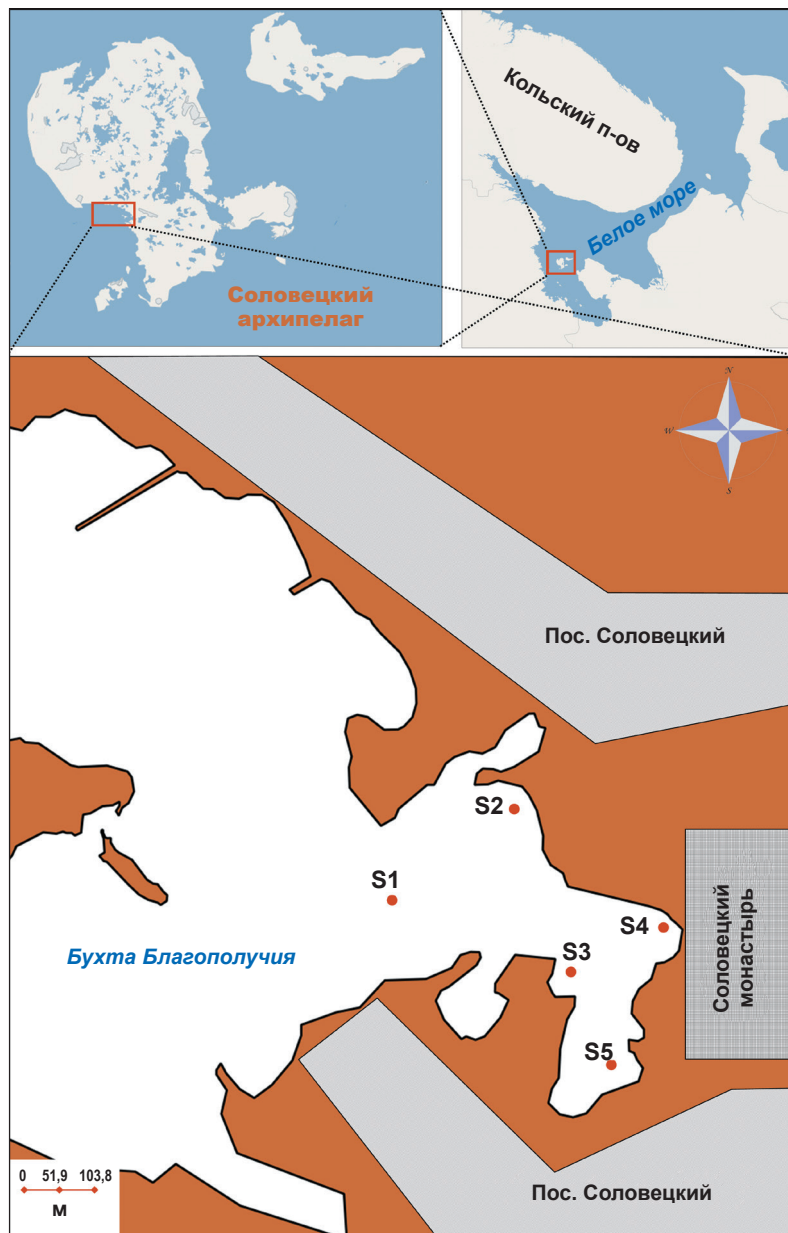


Рис. 1. Карта-схема расположения станций отбора проб в бухте Благополучия в августе 2024 г.

Fig. 1. Location map of sampling stations in Blagopoluchiya Bay in August 2024

формирования пространственной неоднородности фитопланктона [7]. Важными показателями качества воды являются видовой состав фитопланктона, а именно доля цианобактерий, способных к выделению опасных токсических метаболитов [8]. Концентрация хлорофилла *a* является экспрессным индикатором эвтрофирования водоемов [9]. Зоопланктон — важнейшее связующее звено между первичными продуцентами и более высокими трофическими уровнями, в первую очередь рыбами. Структура сообщества планктонных животных определяет потоки вещества и энергии через него, влияя на состав как сообществ потребителей зоопланктона, так и сообществ фитопланктона [10; 11]. Следовательно, состояние сообщества зоопланктона также является важным индикатором экологического благополучия водоемов.

В связи с напряженной экологической ситуацией в бухте Благополучия в рамках выполнения темы НИР «Состояние прибрежной экосисте-

Проблемы регионов

мы Белого моря в пределах Соловецкого архипелага» (FMEN 2024-0016) был оценен ее трофический статус в летний период 2024 г. по гидрохимическим и гидробиологическим показателям.

Методы исследований

Гидрохимические и гидробиологические исследования в бухте Благополучия были проведены в августе 2024 г. Пробоотбор был выполнен на 5 станциях (рис. 1) в различные фазы приливного цикла. Частота отбора проб воды была привязана к циклам приливов и отливов, поскольку они могут влиять на распределение показателей химического состава воды и развития биоты по акватории залива, испытывающего существенную антропогенную нагрузку. Поскольку бухта Благополучия является мелководной, на самой глубоководной станции S1 (глубина 7,0 м) отбор был выполнен из поверхностного и придонного горизонтов, на остальных станциях (глубины 1,7—2,7 м) — только с поверхности. Всего было отобрано 12 проб воды, в них определяли содержание биогенных элементов ($N_{\text{общ}}$ и $P_{\text{общ}}$) и хлорофилла a , а также качественные и количественные показатели фито- и зоопланктона.

В нефильтованной воде спектрофотометрическим методом определяли общее содержание азота $N_{\text{общ}}$ [12] и фосфора $P_{\text{общ}}$ [13]. Пробы воды на анализ $P_{\text{общ}}$ консервировали 4 М раствором серной кислоты.

Для определения концентрации хлорофилла a спектрофотометрическим методом [14] были отобраны пробы воды объемом 1 л. Погрешность этого метода в диапазоне концентраций 1,5—10 мкг/л составляет 15% [15]. Пробы фитопланктона фиксировали 40%-ным раствором формалина.

Пробы зоопланктона отбирали с использованием сети Джели с диаметром входного отверстия 26 см и ячейей фильтрующего сита 100 мкм, фиксировали формалином (2—4%) и обрабатывали счетным методом. Для этого объем пробы доводили до 200 мл, брали из нее 3 аликвоты по 1 мл, в которых подсчитывали массовые формы (более 5—10 экз. на аликвоту), затем во всей пробе считали менее многочисленных животных. На станции S1 пробы отбирали вертикальной протяжкой сети в слое 0—5 м. На остальных станциях пробы отбирали с поверхности ведром объемом 10 л, проливая воду через планктонную сеть. На каждой станции фильтровали 0,25 м³ воды, что приблизительно равно объему воды, проходящему через сеть при протяжке с пятиметровой глубины.

Вертикальные зондирования температуры, солености, мутности и солнечной фотосинтетически активной радиации проведены мультипараметрическими зондами CTD-90M (Sea&SunTechnology, Германия) и RBR-Concerto (RBR Ltd., Канада).

Результаты и обсуждение

Содержание биогенных элементов и хлорофилла a . Концентрация $P_{\text{общ}}$ в воде бухты Благополучия на отливе изменялась в пределах 22—640 мкг/л,

$N_{\text{общ}}$ — 1,14—2,50 мг/л, в приливную фазу диапазон варьирования этих показателей уменьшался и составлял 40—216 мкг/л и 1,25—1,58 мг/л соответственно (табл. 1). Максимальное содержание $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ наблюдалось во время отлива на станции S4, где сточные воды поселка Соловецкий сбрасываются в залив. На полной воде их концентрации на этой станции снижались, при этом содержание $P_{\text{общ}}$ сохранялось на высоком уровне (216 мкг/л) в сравнении с остальными станциями, тогда как концентрация $N_{\text{общ}}$ уменьшалась до минимальных значений (1,25 мг/л). При сравнении содержания $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ в воде бухты Благополучия и в Западной Соловецкой Салме [16] установлено, что в прибрежной зоне Соловецких островов оно в разы выше, чем в примыкающем участке акватории Онежского залива Белого моря (15—28 мкг P/л и 0,69—0,86 мг N/л), что свидетельствует об антропогенной нагрузке на бухту.

Концентрация хлорофилла a в воде бухты Благополучия варьировала в пределах 1,23—3,73 мкг/л (см. табл. 1). Наибольшее его содержание на малой воде было отмечено на станции S5 (3,62 мкг/л), расположенной на выходе стоянки судов, на полной воде — на станции S3, находящейся напротив причала. Минимальная концентрация хлорофилла a была зафиксирована на малой и на полной воде на станции S1, расположенной на выходе из залива. По результатам дисперсионного анализа различия в содержании хлорофилла a между станциями и в разные фазы приливного цикла были незначимы ($p > 0,05$).

По данным [17—19], в 1990-е годы в районе Соловецких островов отмечалась высокая концентрация хлорофилла (3—4 мкг/л). В весенний, летний и осенний периоды 2001—2014 гг. она была существенно ниже — 0,2—1,0 мкг/л [20]. Результаты детальных исследований по оценке качества воды и трофического статуса бухты Благополучия, выполненные в 2009, 2010 и 2016 гг. [2], показали, что по содержанию хлорофилла a вода в бухте Благополучия характеризуется как мезотрофная. Результаты исследований хлорофилла a , полученные в августе 2024 г., превышают данные 2016 г. в 2—10 раз, что свидетельствует об эвтрофировании исследованного залива. Необходимо отметить, что значительный разброс значений кратности превышения концентрации хлорофилла a в августе 2024 г. связан с небольшим числом наблюдений в 2016 г., когда содержание хлорофилла a было определено в поверхностном слое воды только для двух станций — кутовой части бухты Благополучия (0,851 мкг/л) и у монастырского причала (0,359 мкг/л) [2]. Кроме того, в исследованиях 2016 г. не было учтено влияние приливо-отливных циклов. Столь большая межгодовая изменчивость концентрации хлорофилла a в бухте Благополучия определяет актуальность проведения регулярного экологического мониторинга на акватории этого водоема.

По данным содержания хлорофилла a и БЭ в воде бухты Благополучия, полученным в августе 2024 г.,

Таблица 1. Содержание $P_{\text{общ}}$, $N_{\text{общ}}$ и хлорофилла a в воде бухты Благополучия в августе 2024 г.
Table 1. Content of TP, TN and chlorophyll- a in the water of Blagopoluchiya Bay in August 2024

Станция	Горизонт, м	Малая вода			Полная вода		
		$P_{\text{общ}}$, мкг/л	$N_{\text{общ}}$, мг/л	Хлорофилл a , мкг/л	$P_{\text{общ}}$, мкг/л	$N_{\text{общ}}$, мг/л	Хлорофилл a , мкг/л
S1	0,5	35±6,2	1,52±0,2	1,42	73±8,6	1,57±0,2	1,34
	6,0	22±5,4	1,57±0,2	1,35	58±7,7	1,58±0,2	1,23
S2	0,5	85±9,4	1,39±0,2	1,72	73±8,6	1,49±0,2	1,59
S3	0,5	80±9,0	1,34±0,2	1,98	58±7,7	1,42±0,2	3,73
S4	0,5	640±44	2,50±0,3	2,75	216±18	1,25±0,2	1,96
S5	0,5	42±6,6	1,14±0,1	3,62	40±6,5	1,27±0,2	3,06

выполнена оценка ее трофического статуса. Согласно классификациям состояния морских экосистем [21—23], выделяются следующие типы вод: малопродуктивные (олиготрофные) воды со средневзвешенным содержанием хлорофилла a в фотической зоне менее 0,2 мкг/л, воды средней продуктивности (мезотрофные) (содержание хлорофилла a 0,5—1,0 мкг/л), высокопродуктивные воды (эвтрофные) (концентрация хлорофилла a более 1 мкг/л). По упомянутым классификациям статус бухты Благополучия оценивается как эвтрофный, поскольку концентрация хлорофилла в разных ее районах превышала 1 мкг/л. В то же время по другой классификации трофности морских прибрежных вод с соленостью более 20‰ [24] в олиготрофных водах содержание хлорофилла не должно превышать 2 мкг/л, в мезотрофных оно составляет 2—6 мкг/л, в эвтрофных — 6—20 мкг/л, в гипертрофных — выше 20 мкг/л. В соответствии с данной классификацией [20] вода на станциях S1, S2 и S3 является олиготрофной, на станциях S4 и S5 — мезотрофной.

В соответствии с классификацией [24] установленное в воде бухты Благополучия содержание $N_{\text{общ}}$ (см. табл. 1) свидетельствует о ее гипертрофном статусе, тогда как наблюдаемая концентрация $P_{\text{общ}}$ классифицирует бухту Благополучия как эвтрофную, а в районе станции S4 — как гипертрофную.

Состояние фитопланктона бухты Благополучия. В пробах фитопланктона, отобранных в бухте Благополучия в августе 2024 г., обнаружено 62 таксона водорослей из 6 отделов: по разнообразию преобладали диатомовые (36 видов) и динофлагелляты (12 видов), в небольшом количестве присутствовали цианобактерии — 5 видов, зеленые и золотистые водоросли — по 4 вида, эвгленовые — 1 вид.

На станции S1 (поверхностный слой) в фитопланктоне обнаружено 24 таксона водорослей из 2 отделов (табл. 2). По численности доминировали диатомовые (59 тыс. кл./л, 89% общего показателя) и динофлагелляты (7 тыс. кл./л, 11% общего показателя). Массовыми видами были представители диатомовых — *Thalassionema nitzschioides* (11 тыс. кл./л),

Paralia sulcata (10 тыс. кл./л), *Thalassiosira* sp. 2 (7 тыс. кл./л). Основной вклад в биомассу осуществляли также диатомовые (905 мг/м³, 95% общего показателя) и динофлагелляты (49 мг/м³, 5% общего показателя), доминантами по биомассе были диатомовые *Coscinodiscus* sp. (694 мг/м³), *Thalassiosira* spp. (116 мг/м³). На этой же станции на глубине 6 м в фитопланктоне обнаружено 25 таксонов водорослей из 4 отделов. По численности доминировали диатомовые (95 тыс. кл./л, 80% общего показателя) и динофлагелляты (12 тыс. кл./л, 10%), массовыми видами были диатомовые *Thalassionema nitzschioides* (23 тыс. кл./л), *Skeletonema costatum* (23 тыс. кл./л), *Thalassiosira* sp. 2 (10 тыс. кл./л). Основной вклад в биомассу осуществляли диатомовые водоросли (987 мг/м³, 86% общего показателя), доминантами по биомассе были диатомовые *Thalassiosira* spp. (687 мг/м³).

На станции S2 в фитопланктоне обнаружено 23 таксона водорослей из 3 отделов. По численности доминировали диатомовые (85 тыс. кл./л, 85% общего показателя) и динофлагелляты (10 тыс. кл./л, 10%). Массовыми видами по численности были диатомовые *Melosira moniliformis* (21 тыс. кл./л), *Paralia sulcata* (17 тыс. кл./л) и *Tabularia* sp. (12 тыс. кл./л). Основная доля биомассы также приходилась на диатомовые (341 мг/м³, 65% общего показателя) и динофлагелляты (169 мг/м³, 33%), доминантами по биомассе были диатомовые *Melosira moniliformis* (63 мг/м³) и *Thalassiosira* sp. 1 (121 мг/м³), а также динофлагелляты *Protoperidinium pentagonum* (80 мг/м³).

На станции S3 в фитопланктоне обнаружено наибольшее среди всех станций число таксонов (35) водорослей из 5 отделов. По численности доминировали диатомовые (132 тыс. кл./л, 91% общего показателя). Массовым видом по численности была диатомовая *Fragilaria* sp. (38 тыс. кл./л). Основной вклад в биомассу осуществляли диатомовые (271 мг/м³, 73%) и динофлагелляты (72 мг/м³, 19%), доминантами по биомассе были диатомовые *Chaetoceros compressus* (33 мг/м³), *Licthophora* sp. 1 (52 мг/м³) и *Thalassiosira* sp. 1 (40 мг/м³).

Таблица 2. Численность и биомасса фитопланктона в бухте Благополучия в августе 2024 г.
 Table 2. Phytoplankton abundance and biomass in Blagopoluchiya Bay in August 2024

Отдел	Численность, тыс. кл./л	Численность, %	Биомасса	
			мг/м³	%
Станция S1 (0 м)				
Отдел Bacillariophyta (диатомовые)	58,7	89	905,5	95
Отдел Dinoflagellata	7,2	11	48,7	5
Всего	66		954	
Станция S1 (6 м)				
Отдел Bacillariophyta (диатомовые)	94,7	80	986,6	86
Отдел Dinoflagellata	12,2	10	68,2	6
Отдел Ochrophyta (золотистые)	10,2	9	89,8	8
Отдел Euglenophyta (эвгленовые)	1,3	1	9,2	1
Всего	118		1154	
Станция S2 (0 м)				
Отдел Cyanobacteria (цианобактерии)	5,4	5	10,6	2
Отдел Bacillariophyta (диатомовые)	84,8	85	340,6	65
Отдел Dinoflagellata	9,7	10	169,1	33
Всего	100		520	
Станция S3 (0 м)				
Отдел Cyanobacteria (цианобактерии)	2,9	2	16,2	4
Отдел Bacillariophyta (диатомовые)	131,6	91	271,4	73
Отдел Dinoflagellata	7,6	5	72,1	19
Отдел Ochrophyta (золотистые)	1,1	1	10,7	3
Отдел Chlorophyta (зеленые)	1,4	1	1,5	0
Всего	145		372	
Станция S4 (0 м)				
Отдел Cyanobacteria (цианобактерии)	121,9	5	740,9	36
Отдел Bacillariophyta (диатомовые)	2377,9	95	1314,3	64
Отдел Dinoflagellata	1,7	0	3,6	0
Всего	2502		2059	
Станция S5 (0 м)				
Отдел Cyanobacteria (цианобактерии)	33,4	17	202,5	25
Отдел Bacillariophyta (диатомовые)	153,7	79	481,6	58
Отдел Dinoflagellata	2,2	1	11,1	1
Отдел Ochrophyta (золотистые)	0,7	0	8,3	1
Отдел Chlorophyta (зеленые)	5,0	3	123,0	15
Всего	195		827	

На станции S4 в фитопланктоне обнаружено минимальное среди всех станций число таксонов (17) водорослей из 3 отделов. По численности доминировали диатомовые (2378 тыс. кл./л, 95% общего показателя). Массовым видом по численности была диатомовая *Fragilaria* sp. (1823 тыс. кл./л). Основной вклад в биомассу осуществляли диатомовые (1314 мг/м³, 64%) и цианобактерии (741 мг/м³, 36%), доминантами по биомассе были диатомовые *Melosira moniliformis* (525 мг/м³) и *Tabularia tabulata* (292 мг/м³), а также представитель цианобактерий *Pseudoanabaena* sp. (683 мг/м³).

На станции S5 в фитопланктоне обнаружено 24 таксона водорослей из 5 отделов. По численности доминировали диатомовые (154 тыс. кл./л, 79% общего показателя) и цианобактерии (34 тыс. кл./л, 17%). Доминантами по численности были диатомовые *Melosira moniliformis* (79 тыс. кл./л) и *Aulacoseira* sp. (46 тыс. кл./л), а также представитель цианобактерий *Pseudoanabaena* sp. (25 тыс. кл./л). Основной вклад в биомассу осуществляли диатомовые (482 мг/м³, 58% общего показателя), цианобактерии (203 мг/м³, 25%) и зеленые водоросли (123 мг/м³, 15%), доминантами по биомассе были диатомовые *Melosira moniliformis* (242 мг/м³) и *Aulacoseira* sp. (122 мг/м³), представитель цианобактерий *Pseudoanabaena* sp. (196 мг/м³), а также неидентифицированная зеленая водоросль *Chlorophyceae* gen. sp. (104 мг/м³).

Сравнительный анализ в ретроспективном аспекте свидетельствует о сокращении разнообразия фитопланктона в районе Соловецких островов в 2024 г. (62 таксона из 6 отделов) по сравнению с 1992—1993 гг. (195 видов диатомовых водорослей, в том числе 128 видов в фитопланктоне) [25]. Значительно сократилось число видов в обнаруженных родах. Ретроспективный анализ по показателю общей численности фитопланктона и видов-доминантов не выявил различий за тридцатилетний период (1993 г. — 50—300 тыс. кл./л, 2024 г. — 66—195 тыс. кл./л.). Исключение составляет акватория кутовой части бухты (станция S4), где отмечены повышенные значения численности и биомассы фитопланктона, а также большее количество цианобактерий, свидетельствующее об эвтрофировании данного района. Увеличение количества цианобактерий в августе 2024 г. (по сравнению с предшествующим периодом) может свидетельствовать не только о сильном биогенном загрязнении бухты Благополучия, но и о влиянии климатических изменений, при которых усиливается прогрев воды в заливе, что стимулирует развитие цианобактерий. В связи с высокой опасностью цианобактерий, способных выделять токсичные метаболиты, весьма актуальным становится проведение регулярного биомониторинга экологической ситуации в бухте Благополучия.

Состояние зоопланктона в бухте Благополучия. В мезозоопланктоне бухты Благополучия было выявлено 24 таксона истинно планктонных организмов и личинок донных беспозвоночных (табл. 3). Следует отметить, что таксоны, встреченные только

в одной пробе, присутствовали там в единственном экземпляре кроме *Asplanchna* sp., которая была отмечена на станции S5 на фазе отлива в количестве 5 особей.

Максимальные значения численности отмечены на мористой станции S1 на малой воде и на станции S3 на полной воде (35 720 и 35 160 экз./м³ соответственно, рис. 2), что почти в два раза выше среднеемноголетних значений в прибрежье Белого моря в это время года [26; 27]. В конце прилива численность зоопланктона несколько снизилась на мористой станции и возросла практически на всех станциях во внутренней части бухты Благополучия. Наименьшая численность зоопланктона, около 3500 экз./м³ как на малой, так и на полной воде, отмечена в кутовой части бухты, рядом с выходом сточных вод (станция S4). Эти значения в 3—4 раза ниже характерных для прибрежья Белого моря. Вероятная причина — значительная эвтрофикация на этой станции, достигающая уровня гипертрофности (см. выше). Кроме того, на статус зоопланктонного сообщества может влиять состав фитопланктона: на станции S4 на несколько порядков возрастает обилие цианобактерий, прежде всего *Pseudanabaena* sp., которые могут содержать токсины [28]. Высокого содержания биогенов (общего фосфора и азота) и токсичных водорослей достаточно для заметного угнетения зоопланктонного сообщества [28; 29]. На остальных станциях на малой воде численность зоопланктона была в пределах характерных для прибрежья значений, на полной воде несколько превышала их.

Самым многочисленным видом на всех станциях в бухте Благополучия была *Acartia longiremis*, только на самых кутových станциях уступая по численности *Eurytemora* sp. (рис. 3). На малой воде максимальная численность *A. longiremis* наблюдалась на станции S3 (8332 экз./м³), с приливом численность на этой и более кутových станциях снижалась, но значительно возросла на мористых станциях S1 и S2 (21 590 и 24 260 экз./м³). Этот вид в массе развивается в прибрежной зоне Белого моря в летний период [30; 31]. *A. longiremis* является эвригалинным видом [30], однако в Белом море избегает сильно опресненных участков моря, в частности внутренних частей эстуариев, где преобладает другой вид этого рода — *A. biflosa* [33; 34]. Последний встречался в единичных количествах на разных станциях на полной воде, максимум — на станции S2 (20 экз./м³). Распределение *A. longiremis* в бухте Благополучия, вероятно, связано с распределением другого массового вида, *Eurytemora* sp.

Распределение второго по обилию вида, *Eurytemora* sp., по акватории бухты крайне неравномерно и подвержено значительным изменениям в течение приливного цикла (см. рис. 3). Распределение этого вида было обратным таковому *Acartia longiremis*: *Eurytemora* sp. доминировал на кутových станциях. Это, скорее всего, следствие различий экологических особенностей двух таксонов: в Белом море *A. longiremis* встречается по всей акватории

Таблица 3. Список таксонов мезозоопланктона в бухте Благополучия в августе 2024 г.
Table 3. List of mesozooplankton taxa in Blagopoluchiya Bay in August 2024

Таксон	Малая вода					Полная вода				
	S1	S2	S3	S4	S5	S1	S2	S3	S4	S5
Hydrozoa										
<i>Sarsia</i> sp.					+		+	+	+	
<i>Obelia longissima</i> (Pallas, 1766)		+								
Ctenophora										
Личинки	+			+	+				+	
Rotifera										
<i>Synchaeta</i> sp. Ehrenberg, 1832	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
<i>Asplanchna</i> sp. Gosse, 1850					+					
Polychaeta										
Личинки		+								
Cladocera										
<i>Evadne nordmanni</i> Lovén, 1836	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Podon leuckarti</i> (Sars G.O., 1862)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Pleopis polyphemoides</i> (Leuckart, 1859)									+	
Copepoda										
<i>Pseudocalanus</i> spp. (<i>P. acuspes</i> (Giesbrecht, 1881) и <i>P. minutus</i> (Krøyer, 1845))	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Acartia longiremis</i> (Lilljeborg, 1853)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Acartia biflosa</i> (Giesbrecht, 1881)	+	+				+	+	+	+	+
<i>Centropages hamatus</i> (Lilljeborg, 1853)	+	+	+	+		+	+	+	+	
<i>Temora longicornis</i> (Müller, 1792)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Eurytemora affinis affinis</i> (Poppe, 1880)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Oithona similis</i> Claus, 1866	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Triconia borealis</i> (Sars, 1918)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Microsetella norvegica</i> (Boeck, 1864)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Cirripedia										
Науплии	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Циприсовидные личинки	+	+	+	+			+	+		
Mollusca										
Личинки <i>Bivalvia</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Личинки <i>Gastropoda</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Bryozoa										
Личинки	+	+	+	+	+	+		+	+	
Appendicularia										
<i>Fritillaria borealis</i> Lohman, 1896	+	+	+			+				

в отличие от *Eurytemora* sp., которая отмечена практически только в эстуарных районах [35]. На отливе наибольшая его численность наблюдалась на самой кутовой станции S5 на малой воде (9200 экз./м³), на остальных она не превышала 700 экз./м³. На приливе численность *Eurytemora* sp. резко возрастала на станции S3 (18 590 экз./м³), сохраняясь высокой на станции S5 (13 100 экз./м³). На этих же точках *Eurytemora* sp. составляла более 50% суммарной численности зоопланктона.

Рассмотрены факторы среды, которые могут определять распределение двух самых массовых видов (рис. 4). Соленость на поверхности в бухте Благополучия изменялась в пределах 21,1—25,3‰, при этом на станциях, где наблюдалась высокая численность *Eurytemora* sp., имели место как низкие (21,1‰ на станции S5 на отливе), так и средние (23,7‰ и 23,2‰ на станциях S3 и S5 на приливе) значения солености. Однако такие значения солености являются нормальными для поверхностного слоя Белого моря в это время года [26]. Разброс значений содержания хлорофилла *a* в поверхностном слое воды на обеих фазах приливного цикла достигал 300% (1,23—3,73 мкг/л, см.

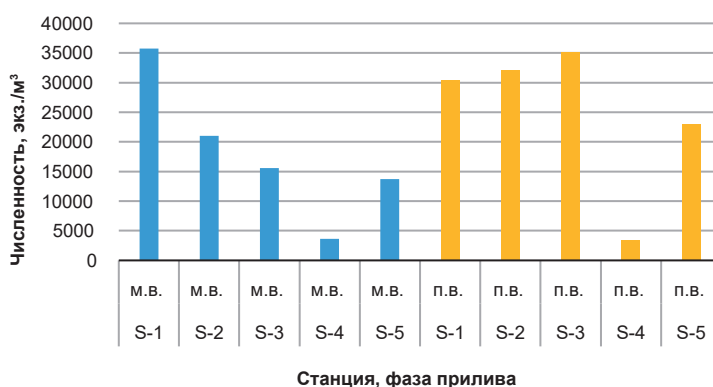


Рис. 2. Распределение мезозоопланктона по акватории бухты Благополучия на малой (м. в.) и полной (п. в.) воде в августе 2024 г.

Fig. 2. Distribution of mesozooplankton in Blagopoluchiya Bay at low and high water in August 2024

табл. 1), максимальные значения наблюдались на станциях S3 (на полной воде) и S5 (на обеих фазах). И именно с этими всплесками фитопланктона связаны скачки численности *Eurytemora* sp. Размах колебаний концентрации взвеси составил 0,4—1,6 ЕМФ (единицы мутности по формазину на литр) [40]. При этом максимальная численность *Eurytemora* sp. наблюдалась при средних значениях этого показателя (0,7—1,0 ЕМФ), а наибольшее обилие *Acartia*

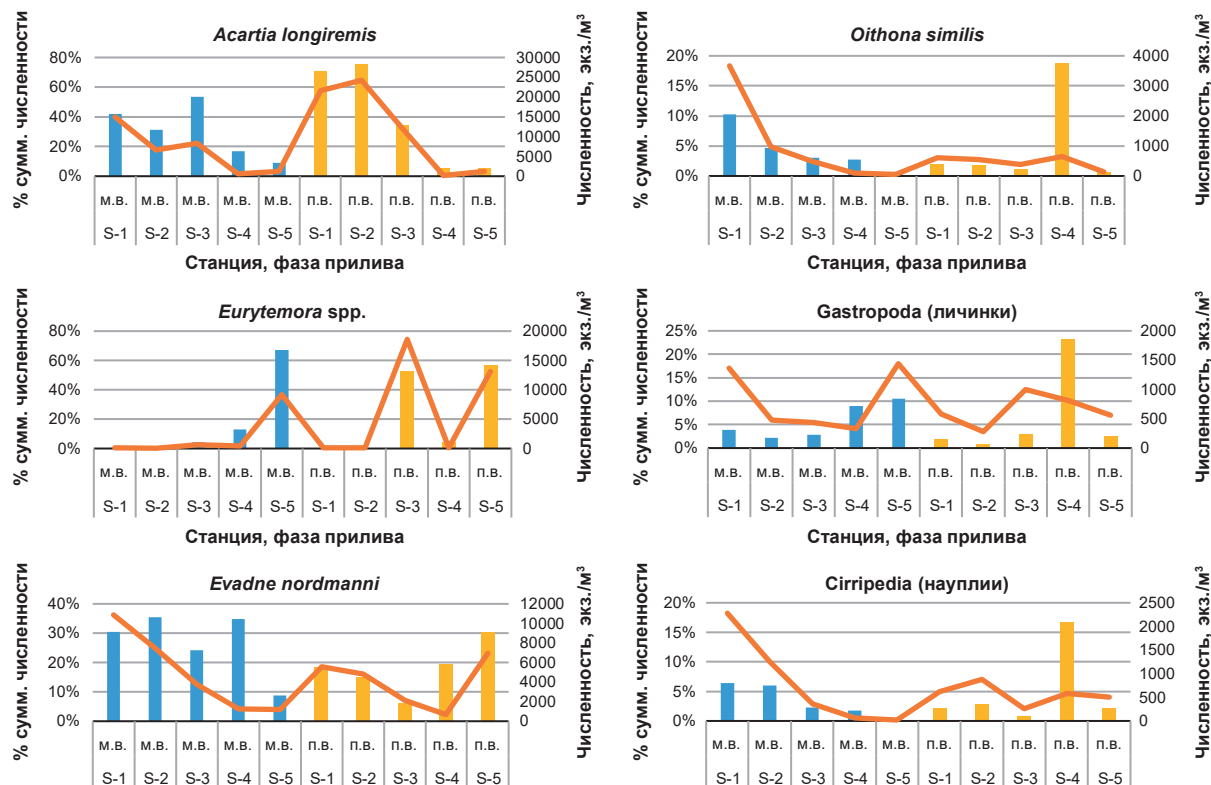


Рис. 3. Распределение наиболее многочисленных видов в бухте Благополучия по малой (м. в.) и полной (п. в.) воде в августе 2024 г. (столбики — доля вида от суммарной численности зоопланктона, линия — его численность)

Fig. 3. Distribution of the most numerous species in Blagopoluchiya Bay at low and high water in August 2024 (columns — the proportion of the species from the total zooplankton abundance, line — its abundance)

Проблемы регионов

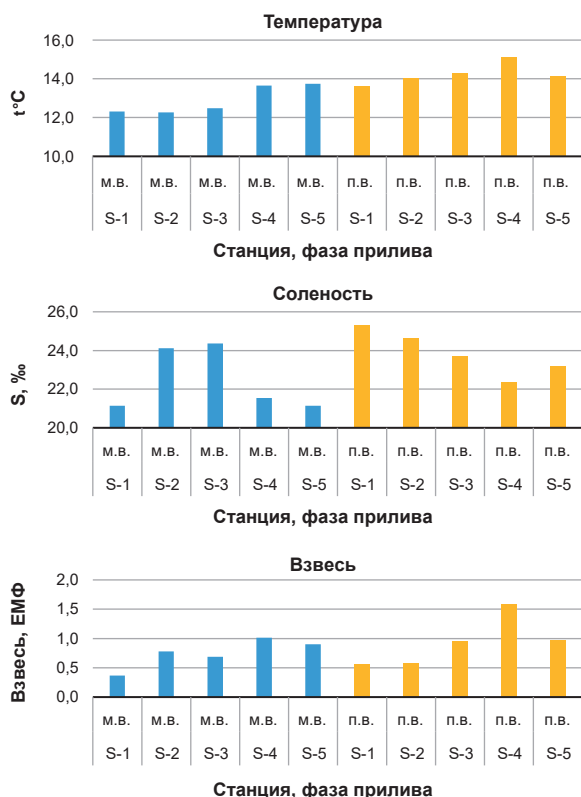


Рис. 4. Градиенты основных параметров среды в бухте Благополучия на малой и полной воде в августе 2024 г. (данные зондов CTD-90M и RBR-Concerto)

Fig. 4. Gradients of the main environmental parameters in Blagopoluchiya Bay in August 2024 at low and high water (data from CTD-90M and RBR-Concerto probes)

longiremis — при более низких (0,6—0,7 ЕМФ). Однако эти различия не позволяют говорить о достоверном различии влияния концентрации взвеси на распределение данных двух видов. По всей видимости, распространение *A. longiremis* и *Eurytemora* sp. в бухте определяется как распределением первичной продукции, так и их конкурентными отношениями, на что указывает практически зеркальное их распространение.

Следующим по численности видом был ветвистый рачок *Evadne nordmanni*. На малой воде его распределение было смещено в сторону мористых станций, на полной воде — в сторону кутовых (см. рис. 3). При этом на станции S4, где численность большинства видов, в том числе и *E. nordmanni*, резко снижается по сравнению с другими точками, этот вид доминировал на малой воде и был среди доминант на полной. *E. nordmanni* является эвригалинным тепловодным видом, обитающая в океане, и в сильно опресненном Балтийском море [36; 37]. Температура и соленость в районе исследований находятся в пределах, оптимальных для данного вида [38; 26]. Вероятно, наблюдаемое распределение *E. nordmanni* определяется иными факторами.

Представляет интерес распределение менее многочисленных видов, обилие которых, однако, может

достигать тысяч на отдельных станциях. *Oithona similis* и личинки усовоногих ракообразных (Cirripedia) на малой воде демонстрируют отрицательный градиент численности по направлению к куту бухты Благополучия (см. рис. 3). В распределении личинок брюхоногих моллюсков (Gastropoda) на малой воде не прослеживается четкий градиент — высокая численность отмечена как на мористой станции S1, так и на кутовой станции S5. На приливе в распределении этих видов не обнаружено каких-либо четких градиентов за исключением одной общей особенности — все они доминировали на станции S4. *Oithona similis* — океанический вид-космополит, один из наиболее массовых в Белом море [39; 31]. Температура и соленость в бухте Благополучия не выходят за пределы оптимальных для этого вида [38; 26]. В данной акватории *O. similis*, по-видимому, вытеснена более многочисленными *Acartia longiremis* и *Eurytemora* sp. Распределение личинок Cirripedia и Gastropoda, по всей видимости, соответствует распределению их взрослых стадий в бентосе.

Выводы

Результаты исследований трофического состояния бухты Благополучия в августе 2024 г. показали, что концентрация хлорофилла *a* превышала данные 2016 г., характеризовавшие статус бухты как мезотрофной, в 2—10 раз, что свидетельствует об эвтрофировании залива, это подтверждают и данные химического состава воды (содержание биогенных элементов). По содержанию $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ в воде статус залива характеризуется как эвтрофный-гипертрофный. Выявлены повышенные значения численности и биомассы фитопланктона в кутовой части бухты Благополучия рядом с выходом сточных вод (станция S4), среди которых массовое развитие получили синезеленые водоросли, свидетельствующие об эвтрофировании данной акватории. Резкое снижение численности зоопланктона (в 3—4 раза ниже характерной для побережья Белого моря) и сокращение видового разнообразия фитопланктона в районе Соловецких островов в 2024 г. по сравнению с 1992—1993 гг. также указывают на неблагоприятные условия для функционирования гидробионтов.

В связи с крайне неблагоприятной экологической ситуацией, выявленной в бухте Благополучия, необходимы немедленные меры по снижению биогенной нагрузки на залив. Важнейшим мероприятием является строительство очистных сооружений. Организация экологического мониторинга должна включать проведение сезонных гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических исследований, так как только обеспеченные достаточным количеством измерений данные могут послужить надежным показателем состояния экосистемы. При этом важнейшим разделом мониторинга должно стать исследование развития цианобактерий, которые представляют особую опасность для экосистемы бухты Благополучия.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках госзадания Карельского научного центра РАН «Состояние прибрежной экосистемы Белого моря в пределах Соловецкого архипелага» FMEN 2024-0016.

Литература/References

1. Игловский С. А. Геоэкологические проблемы Соловецкого архипелага // Проблемы изучения, рационального использования и охраны ресурсов Белого моря. Материалы IX международной конференции 11—14 октября 2004 г., Петрозаводск, Карелия, Россия. — Петрозаводск, 2005. — С. 136—140.
2. Iglovskii S. A. Geoecological problems of the Solovetsky Archipelago. Problems of studying, rational use and protection of the White Sea resources. Proceedings of the IX International Conference, October 11—14, 2004, Petrozavodsk, Karelia, Russia. Petrozavodsk, 2005, pp. 136—140. (In Russian).
3. Мохова О. Н., Македонская И. Ю., Новикова Ю. В., Мельник Р. А. Оценка экологического состояния вод бухты Благополучия о. Соловецкий по гидрохимическим и гидробиологическим показателям // Эколог. химия. — 2018. — Вып. 27, № 5. — С. 270—279.
4. Mokhova O. N., Makedonskaya I. Yu., Novikova Yu. V., Melnik R. A. Estimation of Hydrochemical and Hydrobiological Aspects of the Environment in the Blagopoluchiya Bay of Solovetsky Island. Ecological Chemistry, 2018, vol. 27, no. 5, pp. 270—279. (In Russian).
5. Квашнинова Е. А., Юницына О. А., Рудакова В. А., Терентьев К. Ю. Оценка бактериального загрязнения природных водоемов Соловецкого архипелага в районе поселка Соловецкий // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности. Материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. Бийск, 20—22 мая 2020 г. — Барнаул, 2020. — С. 253—257.
6. Kvashninova E. A., Yunitsyna O. A., Rudakova V. A., Terent'ev K. Yu. Assessment of bacterial pollution of natural water bodies of the Solovetsky Archipelago in the area of the village of Solovetsky. Technologies and equipment for the chemical, biotechnological and food industries. Proceedings of the XIII All-Russian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists with international participation. Biisk, May 20—22, 2020. Barnaul, 2020, pp. 253—257. (In Russian).
7. Макурина К. А., Попова Л. Ф. Анализ коммунально-бытовых сточных вод поселка Соловецкий // Информация как двигатель научного прогресса: Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции (Пермь, 3 декабря 2018 г.). — Ч. 2. — Стерлитамак: АМИ, 2018. — С. 156—160.
8. Makurina K. A., Popova L. F. Analysis of municipal wastewater in the village of Solovetsky. Information as an engine of scientific progress: Collection of articles based on the results of the International scientific and practical conference (Perm, December 3, 2018). Pt. 2. Sterlitamak, AMI, 2018, pp. 156—160. (In Russian).
9. Reynolds C. S. The Ecology of Phytoplankton. [S. l.], Cambridge Univ. Press, 2006, 535 p. Available at: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511542145>.
10. Конюхов И. В., Котилова А. Ф., Белевич Т. А. и др. Функциональное состояние фитопланктона и оптические характеристики взвеси Онежского залива Белого моря // Океанология. — 2021. — Т. 61, № 2. — С. 264—275. — DOI: 10.31857/S0030157421020076.
11. Konyukhov I. V., Kotikova A. F., Belevich T. A., Ilyash L. V., Kravchishina M. D., Pogosyan S. I. Functional activity of phytoplankton and optical properties of suspended particulate matter in Onega Bay of the White Sea. Oceanology, 2021, vol. 61, no. 2, pp. 264—275. DOI: 10.1134/S0001437021020077.
12. Ferland J., Gosselin M., Starr M. Environmental control of summer primary production in the Hudson Bay system: The role of stratification. J. Marine Systems, 2011, vol. 88, no. 3, pp. 385—400.
13. Toxic cyanobacteria in water. A guide to their public health consequences, monitoring and management. Chorus I., Welker M. (eds). Geneva, CRC Press, 2021, 859 p.
14. Трифонова И. С. Оценка трофического статуса водоема по содержанию хлорофилла «а» в планктоне // Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоемов. — СПб.: Гидрометеоздат, 1993. — С. 158—166.
15. Trifonova I. S. Assessment of the trophic status of a reservoir based on the content of chlorophyll “a” in plankton. Methodological issues of studying the primary production of plankton in inland waters. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1993, pp. 158—166. (In Russian).
16. Casini M., Cardinale M., Arrhenius F. Feeding preferences of herring (*Clupea harengus*) and sprat (*Sprattus sprattus*) in the southern Baltic Sea. ICES J. of Marine Science, 2004, vol. 61, no. 8, pp. 1267—1277. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2003.12.011>.
17. Fuchs H. L., Franks P. J. S. Plankton community properties determined by nutrients and size-selective feeding. Marine Ecology Progress Series, 2010, vol. 413, pp. 1—15. Available at: <https://doi.org/10.3354/meps08716>.
18. РД 52.24.532-2016. Массовая концентрация общего азота в водах. Методика измерений спектрофотометрическим методом с минерализацией проб в термореакторе. — Ростов н/Д, 2016. — 38 с.
19. RD 52.24.532-2016. Mass concentration of total nitrogen in waters. Methodology of measurements by spectrophotometric method with mineralization of samples in a thermal reactor. Rostov-on-Don, 2016, 38 p. (In Russian).
20. РД 52.24.387-2006. Массовая концентрация фосфора общего в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом после окисления персульфатом калия. — Ростов н/Д, 2006. — 27 с.
21. RD 52.24.387-2006. Mass concentration of total phosphorus in waters. Methodology for performing measurements by photometric method after oxidation with potassium persulfate. Rostov-on-Don, 2006. 27 p. (In Russian).

14. Determination of photosynthetic pigments in sea waters. Report of SCOR/UNESCO Working Group 17. Paris, UNESCO, 1966, 69 p. Available at: <https://doi.org/10.25607/OBP-1940>.
15. Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / Под ред. П. А. Лозовика, Н. А. Ефременко. — СПб.: Нестор-История, 2017. — 272 с.
Analytical, kinetic and computational methods in hydrochemical practice. Ed. by P. A. Lozovik, N. A. Efremenko. St. Petersburg, Nestor-Istoriya, 2017, 272 p. (In Russian).
16. Толстиков А. В., Галахина Н. Е., Белевич Т. А. и др. Результаты экспедиционных исследований Онежского залива Белого моря в сентябре 2019 года // Морской гидрофиз. журн. — 2023. — Т. 39, № 4. — С. 512—527.
Tolstikov A. V., Galakhina N. E., Belevich T. A., Usov N. V., Zdrovennov R. E. Results of expeditionary studies of the Onegzhskii Bay in the White Sea in September, 2019. Physical Oceanography, 2023, vol. 39, no. 4, pp. 512—527. (In Russian).
17. Мордасова Н. В., Вентцель М. В. Особенности распределения фитопигментов и биомассы фитопланктона в Белом море в летний сезон // Комплексные исследования экосистемы Белого моря. — М.: ВНИРО, 1994. — С. 83—92.
Mordasova N. V., Ventzel M. V. Features of distribution of phytopigments and phytoplankton biomass in the White Sea in the summer season. Comprehensive studies of the White Sea ecosystem. Moscow, VNIRO, 1994, pp. 83—92. (In Russian).
18. Бобров Ю. А., Максимова М. П., Савинов В. М. Первичная продукция фитопланктона // Белое море. Биологические ресурсы и проблемы их рационального использования. — Ч. 1. — СПб.: ЗИН РАН, 1995. — С. 92—114.
Bobrov Yu. A., Maksimova M. P., Savinov V. M. Primary production of phytoplankton. White Sea. Biological resources and problems of their rational use. Pt. 1. St. Petersburg, ZIN RAS, 1995, pp. 92—114. (In Russian).
19. Бергер В. Я. Продукционный потенциал Белого моря. Исследования фауны морей. — Т. 60 (68). — СПб.: ЗИН РАН, 2007. — 292 с.
Berger V. Ya. Productive potential of the White Sea. Studies of the fauna of the seas. Vol. 60 (68). St. Petersburg, ZIN RAS, 2007, 292 p. (In Russian).
20. Нецветова О. П., Македонская И. Ю., Коробов В. Б., Змётная М. И. Зависимость кислородонасыщения от содержания хлорофилла *a* в поверхностном слое вод Белого моря // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 3 (31). — С. 31—41. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-31-41.
Netsvetaeva O. P., Makedonskaya I. Yu., Korobov V. B., Zmetnaya M. I. Dependence of oxygen saturation on the content of chlorophyll *a* in the surface layer of the White Sea waters. Arctic: Ecology and Economy, 2018, no. 3 (31), pp. 31—41. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-31-41. (In Russian).
21. Мордасова Н. В. Косвенная оценка продуктивности вод по содержанию хлорофилла // Тр. ВНИРО. — 2014. — Т. 152. — С. 41—56.
Mordasova N. V. Indirect assessment of water productivity based on chlorophyll content. Proceedings of VNIRO, 2014, vol. 152, pp. 41—56. (In Russian).
22. Сигарева Л. Е., Коренева Т. Г., Минеева Н. М., Тимофеева Н. А. Сравнительный анализ содержания хлорофилла *a* в пресноводном и морском водоемах // Биология внутр. вод. — 2020. — № 5. — С. 439—449. — DOI: 10.31857/S032096522004018X.
Sigareva L. E., Koreneva T. G., Mineeva N. M., Timofeeva N. A. Comparative analysis of chlorophyll *a* content in freshwater and marine waterbodies. Inland Water Biology, 2020, vol. 13, no. 4, pp. 539—548. DOI: 10.1134/S1995082920030153.
23. Antoine D., Andre J.-M., Morel A. Oceanic primary production: 2. Estimation at global scale from satellite (Coastal Zone Color Scanner) chlorophyll. Global Biogeochem. Cycles, 1996, vol. 10, no. 1, p. 57.
24. Håkanson L., Andreas C. Bryhn A. C., Hytteborn J. K. On the issue of limiting nutrient and predictions of cyanobacteria in aquatic systems. Science of the Total Environment, 2007, iss. 379, pp. 89—108.
25. Гогорев Р. М. Планктонные и эпифитные диатомовые водоросли в прибрежье Соловецких островов Белого моря // Новости систематизации низшей растительности. — 2004. — Т. 37. — С. 35—48.
Gogorev R. M. Planktonic and epiphytic diatoms in the coastal area of the Solovetsky Islands of the White Sea. Novosti systematizatsii nizshei rastitelnosti [News of the lower plant system], 2004, vol. 37, pp. 35—48. (In Russian).
26. Usov N., Kutcheva I., Primakov I., Martynova D. Every species is good in its season: Do the shifts in the annual temperature dynamics affect the phenology of the zooplankton species in the White Sea? Hydrobiologia, 2013, vol. 706, no. 1, pp. 11—33. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1435-z>.
27. Отченаш Н. Г., Остапенко З. В. Видовое разнообразие зоопланктона эстуария р. Онега в районе о. Кий в 2016—2017 гг. // Материалы конференции «Актуальные проблемы биоразнообразия и природопользования», Керчь, 15—17 мая 2019 г. — Керчь, 2019. — С. 618—622.
Otchenash N. G., Ostapenko Z. V. Species diversity of zooplankton in the Onega River estuary in the area of Kiy Island in 2016—2017. Proceedings of the conference "Actual problems of biodiversity and nature management", Kerch, May 15—17, 2019. Kerch, 2019, pp. 618—622. (In Russian).
28. Toxic Cyanobacteria in Water. Chorus I., Welker M. (eds.). CRC Press, Boca Raton (FL), on behalf of the World Health Organization, Geneva, 2021, 859 p.
29. Suikkanen S., Pulina S., Engström-Öst J., Lehtiniemi M., Lehtinen S., Brutemark A. Climate Change and Eutrophication Induced Shifts in Northern Summer Plankton Communities. PLoS ONE, 2013, vol. 8, no. 6, p. e66475. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066475>.

30. Перцова Н. М. Состав и динамика биомассы зоопланктона пролива Великая Салма Белого моря // Биология Белого моря. — Т. 1. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1962. — С. 35—50.
- Pertsova N. M. Composition and dynamics of zooplankton biomass in the Great Salma Strait of the White Sea. Biology of the White Sea. Pt. 1. Moscow, Publish. MSU, 1962, pp. 35—50. (In Russian).
31. Прыгункова Р. В. Некоторые особенности сезонного развития зоопланктона губы Чупа Белого моря // Исслед. фауны морей. — 1974. — Т. 136, № 21. — С. 4—53.
- Prigunkova R. V. Some features of seasonal development of zooplankton of Chupa Bay of the White Sea. Issledovaniya fauny morei [Study of the fauna of the seas], 1974, vol. 13b, no. 21, pp. 4—53. (In Russian).
32. Dutz J., Christensen A. M. Broad plasticity in the salinity tolerance of a marine copepod species, *Acartia longiremis*, in the Baltic Sea. J. of Plankton Research, 2018, vol. 40, no. 3, pp. 342—355. Available at: <https://doi.org/10.1093/plankt/fby013>.
33. Прудковский А. А. Структура сообщества зоопланктона в зоне смешения морских и пресных вод (губа Чернореченская, Кандалакшский залив Белого моря) // Тр. Беломор. биол. станции МГУ. — 2002. — Т. 8. — С. 186—192.
- Prudkovskii A. A. Structure of the zooplankton community in the mixing zone of sea and fresh waters (Chernorechenskaya Bay, Kandalaksha Bay of the White Sea). Trudy Belomorskoi biologicheskoi stantsii MGU [Transactions of the White Sea Biological Station of Moscow State University], 2002, vol. 8, pp. 186—192. (In Russian).
34. Прудковский А. А. Жизненный цикл *Acartia biflosa* (Copepoda, Calanoida) в Белом море (губа Чернореченская, Кандалакшский залив) // Тр. Беломор. биол. станции МГУ. — 2003. — Т. 9. — С. 164—168.
- Prudkovskii A. A. Life cycle of *Acartia biflosa* (Copepoda, Calanoida) in the White Sea (Chernorechenskaya Bay, Kandalaksha Gulf). Trudy Belomorskoi biologicheskoi stantsii MGU [Transactions of the White Sea Biological Station of Moscow State University], 2003, vol. 9, pp. 164—168. (In Russian).
35. Кособокова К. Н., Перцова Н. М. Зоопланктон Белого моря: структура, динамика и экология сообществ // Система Белого моря. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. — Т. 2 / Ред. А. П. Лисицын. — М.: Науч. мир. — 2012. — С. 640—674.
- Kosobokova K. N., Pertsova N. M. Zooplankton of the White Sea: structure, dynamics and community ecology System of the White Sea. Water column in interaction with atmosphere, cryosphere, river inflow and biosphere. Vol. 2. Ed. by A. P. Lisitsin. Moscow, Nauchnyi mir, 2012, pp. 640—674. (In Russian).
36. Gieskes W. W. C. Ecology of the Cladocera of the North Atlantic and the North Sea, 1960—1967. Netherlands J. of Sea Research, 1971, vol. 5, iss. 3, pp. 342—376. Available at: [https://doi.org/10.1016/0077-7579\(71\)90017-2](https://doi.org/10.1016/0077-7579(71)90017-2).
37. Poggensee E., Lenz J. On the population dynamics of two brackish-water Cladocera *Podon leuckarti* and *Evadne nordmanni* in Kiel Fjord. Kieler Meeresforschungen — Sonderheft, 1981, 5, pp. 268—273.
38. Зубаха М. А., Усов Н. В. Температурные оптимумы массовых видов зоопланктона Белого моря // Биология моря. — 2004. — Т. 30, № 5. — С. 347—351.
- Zubakha M. A., Usov N. V. Optimum temperatures for common zooplankton species in the White Sea. Russian J. of Marine Biology, 2004, vol. 30, no. 5, pp. 293—297. DOI: 10.1023/B:RUMB.0000046547.26708.3e.
39. Шувалов В. С. Сезонная изменчивость размеров и некоторые особенности биологии *Oithona similis* Claus (Copepoda, Cyclopoida) в Белом море (Кандалакшский залив) // Океанология. — 1965. — Т. 5, вып. 2. — С. 338—347.
- Shuvalov V. S. Seasonal size variability and some biological features of *Oithona similis* Claus (Copepoda, Cyclopoida) in the White Sea (Kandalaksha Bay). Okeanologiya [Oceanology], 1965, vol. 5, iss. 2, pp. 338—347. (In Russian).
40. Лукина Ю. Н., Здорovenнов Р. Э., Толстиков А. В. и др. Особенности гидродинамического и гидрохимического режимов бухты Благополучия (Соловецкие острова Белого моря) в августе 2024 г. // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 2. — С. 287—299. — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-2-287-299.
- Lukina Yu. N., Zdorovennov R. E., Tolstikov A. V., Galakhina N. E., Bogdanov S. R., Sabylina A. V., Zdorovennova G. E. Features of the hydrodynamic and hydrochemical states of Blagopoluchiya Bay (Solovetsky Islands of the White Sea) in August 2024. Arctic: Ecology and Economy, 2025, vol. 15, no. 2, pp. 287—299. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-2-287-299. (In Russian).

Информация об авторах

Калинкина Наталия Михайловна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (185030, Россия, Петрозаводск, просп. Александра Невского, д. 50), e-mail: cerioda@mail.ru.

Галахина Наталия Евгеньевна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (185030, Россия, Петрозаводск, просп. Александра Невского, д. 50), e-mail: kulakovanata@mail.ru.

Костромин Евгений Александрович, кандидат биологических наук, доцент кафедры аквакультуры и болезней рыб, Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины (196084, Россия, Санкт-Петербург, Черниговская ул., д. 5), e-mail: kostromin.e.a@gmail.com.

Усов Николай Викторович, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Зоологический институт РАН (199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 1), e-mail: Nikolay.Usov@zin.ru.

Сластина Юлия Леонидовна, младший научный сотрудник, Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (185030, Россия, Петрозаводск, просп. Александра Невского, д. 50), e-mail: jls@inbox.ru.

TROPHIC STATUS OF BLAGOPOLUCHIYA BAY (THE SOLOVETSKY ARCHIPELAGO OF THE WHITE SEA) IN THE SUMMER OF 2024

Kalinkina, N. M.¹, Galakhina, N. E.¹, Kostromin, E. A.², Usov, N. V.³, Slastina, Ju. L.¹

¹ Northern water problems Institute Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russia)

² Saint Petersburg State University of Veterinary Medicine (Saint Petersburg, Russia)

³ Zoological Institute of RAS (Saint Petersburg, Russia)

The article was received on April 28, 2025

For citing

Kalinkina N. M., Galakhina N. E., Kostromin E. A., Usov N. V., Slastina Ju. L. Trophic status of Blagopoluchiya Bay (the Solovetsky Archipelago of the White Sea) in the summer of 2024. Ecology and Economy, 2025, vol. 15, no. 4, pp. 592—604. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-4-592-604. (In Russian).

Abstract

The researchers have assessed the trophic status of Blagopoluchiya Bay (the Solovetsky Archipelago of the White Sea) based on the content of nutrients and chlorophyll “a”, species composition and quantitative indices of phytoplankton and zooplankton. High content of total phosphorus (up to 640 µg/L) and total nitrogen (up to 2.50 mg N/L) in water indicates a significant anthropogenic load on the bay and determines its trophic status as eutrophic-hypertrophic. The concentration of chlorophyll “a” in the bay water varied from 1.23 to 3.73 µg/L, according to which the middle part of the bay was classified as oligotrophic-mesotrophic, and the apex part as mesotrophic-eutrophic. The phytoplankton development indicators in different parts of Blagopoluchiya Bay varied within the range: the number was 66—2502 thous. cells/L and the biomass was 372—2059 mg/m³. Diatoms and dinoflagellates dominated in the phytoplankton composition. The highest numbers and biomass of phytoplankton were observed in the most polluted, apex part of the bay, where cyanobacteria dominated. The abundance of zooplankton at most stations significantly exceeded the average long-term values in the coastal zone of the White Sea at this time of year, but was significantly below the norm at the most polluted station. The state of Blagopoluchiya Bay according to chemical and biological indicators shows an extremely unfavorable environmental situation, which determines the need to reduce the nutrient load on the bay.

Keywords: nutrients, chlorophyll “a”, eutrophication, anthropogenic load, zooplankton, phytoplankton.

Funding

The study was carried out within the framework of the state assignment of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences “The state of the coastal ecosystem of the White Sea within the Solovetsky Archipelago” FMEN 2024-0016.

Information about the authors

Kalinkina, Natalia Mikhailovna, Doctor of Biological Science, Northern water problems Institute of KarRC RAS (50, Alexander Nevsky Av., Petrozavodsk, Russia, 185030), e-mail: cerioda@mail.ru.

Galakhina, Natalia Evgen'evna, PhD of Chemistry, Senior Researcher, Northern water problems Institute of KarRC RAS (50, Alexander Nevsky Av., Petrozavodsk, Russia, 185030), e-mail: kulakovanata@mail.ru.

Kostromin, Evgenii Aleksandrovich, PhD of Biological Science, Assistance Professor, Department of aquaculture and fish diseases, Saint Petersburg State University of Veterinary Medicine (5, Chernigovskaya St., Saint Petersburg, Russia, 196084), e-mail: kostromin.e.a@gmail.com.

Usov, Nikolay Viktorovich, PhD of Biological sciences, Researcher, Zoological Institute of RAS (1, Universitetskaya emb., Saint-Petersburg, Russia, 199034), e-mail: Nikolay.Usov@zin.ru.

Slastina, Julia Leonidovna, Junior Researcher, Northern water problems Institute of KarRC RAS (50, Alexander Nevsky Av., Petrozavodsk, Russia, 185030), e-mail: jls@inbox.ru.