

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-2-274-287>

УДК 574+556.53(268.46)



Оценка экологического состояния бухты Благополучия (Соловецкий архипелаг, Белое море) на основе гидрохимических, гидробиологических и микробиологических исследований 2025 г.

Е.М. Макарова, Н.Е. Галахина, Н.М. Калинин✉, Ю.Н. Лукина

*Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук,
Петрозаводск, Россия*

✉kalina@nwpi.krc.karelia.ru

EMM, 0000-0003-0219-8092; НЕМ, 0000-0003-4435-6095; НМК, 0000-0001-6363-0470;
ЮНЛ, 0000-0002-0429-3600

Аннотация. Интенсивное загрязнение бухты Благополучия (Соловецкий архипелаг Белого моря) коммунально-бытовыми сточными водами приводит к утере рекреационной значимости залива и снижению качества воды в результате массового развития зеленых макроводорослей. Целью работы стала оценка экологической ситуации в заливе, которая была выполнена на основе гидрохимических, гидробиологических и микробиологических исследований в июне и августе 2025 г. В районе сброса сточных вод поселка Соловецкий обнаружены высокие концентрации биогенных элементов — 121–1058 мкг/л общего фосфора и 1,21–1,58 мг/л общего азота. Наблюдаемые значения общих колиформных бактерий (до 90 000 КОЕ/100 см³) свидетельствуют о критической санитарной ситуации. Несмотря на высокое содержание общего фосфора, указывающее на эвтрофный и даже гипертрофный статус бухты, концентрации хлорофилла «а» в районе сброса сточных вод были невысокими и соответствовали мезотрофному уровню (2,07–3,29 мкг/л). На станциях, удаленных от места сброса сточных вод, концентрации хлорофилла «а» соответствовали олиготрофному уровню (0,97–2,0 мкг/л). Такая ситуация объясняется массовым развитием в бухте макроводорослей, перехватывающих минеральные формы биогенных элементов, что препятствует интенсивному развитию фитопланктона. Результаты мониторинга свидетельствуют о неблагоприятной экологической ситуации в бухте Благополучия, что требует незамедлительных мер по очистке сточных вод.

Ключевые слова: Белое море, Соловецкий архипелаг, бухта Благополучия, биогенные элементы, хлорофилл «а», трофический статус, макроводоросли, общие колиформные бактерии, санитарная ситуация

Для цитирования: Макарова Е.М., Галахина Н.Е., Калинин Н.М., Лукина Ю.Н. Оценка экологического состояния бухты Благополучия (Соловецкий архипелаг, Белое море) на основе гидрохимических, гидробиологических и микробиологических исследований 2025 г. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2026;72(2):274–287. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-2-274-287>

Поступила 16.04.2026

После переработки 01.06.2026

Принята 20.06.2026

© Авторы, 2026

© Authors, 2026

Assessment of the environmental situation in Blagopoluchiya Bay (the Solovetsky Archipelago, White Sea) based on hydrochemical, hydrobiological and microbiological studies in 2025

Elena M. Makarova, Natalia E. Galakhina,
Nataliia M. Kalinkina✉, Yulia N. Lukina

*Northern Water Problems Institute Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences,
Petrozavodsk, Russia*

✉kalina@nwpi.krc.karelia.ru

EMM, 0000-0003-0219-8092; NEG, 0000-0003-4435-6095; NMK, 0000-0001-6363-0470;
YNL, 0000-0002-0429-3600

Abstract. Blagopoluchiya Bay (the Solovetsky Archipelago, White Sea) is a recipient of wastewater from the Solovetsky settlement and is susceptible to pollution by nutrients and organic matter. Anthropogenic impact leads to decreasing of the recreational value of the Bay and deterioration in water quality as a result of intensive growth of green macroalgae, so-called “green tides”. The aim of the work was to assess the environmental situation in the Bay. The assessment was performed on the basis of hydrochemical, hydrobiological and microbiological studies in June and August 2025 during various phases of the tidal cycle. Blagopoluchiya Bay is a relatively shallow area with depths in the northern and southern parts of no more than 2 m, while at the entrance to the bay, the depths reach 8–9 m. The tidal range in the bay varies between 0.5 and 0.7 m. The current velocities at different tidal phases are relatively slow, not exceeding 10–15 cm/s. High concentrations of nutrients (121–1058 µg/L total phosphorus and 1.21–1.58 mg/L total nitrogen), as well as total coliform bacteria (up to 90000 CFU/100 cm³) were detected in the area of the Solovetsky settlement wastewater discharge. The data characterize the sanitary situation as critical. At other stations in Blagopoluchiya Bay, the content of nutrients was 2–20 times lower, and the number of total coliform bacteria was 4–1800 times lower. Despite the high concentrations of total phosphorus, indicating the eutrophic and even hypertrophic status of the Bay, chlorophyll “a” concentrations in the wastewater discharge area were low and corresponded to the mesotrophic level (2.07–3.29 µg/l). At the exit from the bay, the concentrations of chlorophyll “a” corresponded to the oligotrophic level (0.97–2.0 µg/l). This situation is explained by the widespread development of macroalgae in the bay, including representatives of the genus *Ulva*, which contribute to the formation of “green tides”. Phosphorus content in macroalgae mass at different stations in Blagopoluchiya Bay varied between 0.24–0.36 % (of dry weight). The interception of nutrients by macroalgae results in low concentrations of their mineral forms, which hinders the intensive development of phytoplankton. Consequently, low levels of chlorophyll “a” are observed. The monitoring results indicate an unfavorable environmental situation in Blagopoluchiya Bay, requiring immediate wastewater treatment. An important measure to improve the situation in the Bay is the removal of macroalgae from the areas where they grow.

Keywords: White Sea, Solovetsky Archipelago, Blagopoluchiya Bay, biogenic elements, chlorophyll “a”, trophic status, macroalgae, total coliform bacteria, sanitary situation

For citation: Makarova E.M., Galakhina N.E., Kalinkina N.M., Lukina Yu.N. Assessment of the environmental situation in Blagopoluchiya Bay (the Solovetsky Archipelago, White Sea) based on hydrochemical, hydrobiological and microbiological studies in 2025. *Arctic and Antarctic Research*. 2026;72(2):274–287. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-2-274-287>

Received 16.04.2026

Revised 01.06.2026

Accepted 20.06.2026

Введение

Остров Соловецкий является самым большим островом Соловецкого архипелага. В 1967 г. на острове был создан Соловецкий историко-архитектурный музей-заповедник как филиал Архангельского областного краеведческого музея. В 1974 г. был основан государственный историко-архитектурный и природный музей-заповедник.

Культурно-исторический ансамбль Соловецких островов был включен в Список всемирного природного и культурного наследия ЮНЕСКО в 1992 г., что определяет необходимость контроля состояния природно-территориального комплекса, входящего в состав памятника культуры.

Бухта Благополучия — наиболее посещаемая акватория на Соловецком острове — расположена на западном берегу острова Соловецкий, в охранной зоне. Это закреплено приказом Министерства культуры РФ от 24 декабря 2013 г. № 2333 «Об утверждении границ зон охраны объекта культурного наследия федерального значения “Ансамбль Соловецкого монастыря и отдельные сооружения островов Соловецкого архипелага, XVI век — первая половина XX века”». Акватория бухты Благополучия находится под постоянным антропогенным прессом. В связи с увеличением туристической нагрузки возрастает поток водного транспорта, в том числе маломерного. В 2023 г. музей-заповедник посетило около 70 тыс. туристов¹. Бухта Благополучия — приемник сточных вод поселка Соловецкий, которые поступают в нее без очистки. Несмотря на приливные и отливные явления, влияние сточных вод непосредственно проявляется как сильный неприятный запах в районе сброса, что ухудшает рекреационные возможности прилегающей территории.

Гидрофизический режим бухты формируется под влиянием приливной циркуляции в процессе смешивания морских вод и пресных неочищенных сточных вод поселка Соловецкий [1, 2]. В зимний период 2025 г. было установлено, что сточные воды поселка, поступающие в южную часть бухты, распространяются на 300 м. В период отлива происходит частичный вынос сточных вод из залива. Зона наибольшего антропогенного воздействия обнаружена в южной части бухты, в районе сброса сточных вод.

В результате комплексных исследований экосистемы Белого моря [3] в весенне-летний период 1991 г. установлено содержание минерального и общего фосфора во внешней части бухты Благополучия в отливной фазе, оно составило 4 и 8 мкг/л соответственно, эти значения можно принять в качестве фоновых концентраций для данного района Белого моря. В более поздний период эпизодические гидрохимические исследования бухты Благополучия (у Монастырского причала) проводились в октябре 2009 г., июле 2010 и 2016 гг. [4], а также в августе 2019 г. [5], они выявили следующее содержание биогенных элементов (БЭ) в воде залива рядом с выпуском сточных вод: $P_{\text{мин}}$ — 19–97 мкг/л, $P_{\text{общ}}$ — 44–133 мкг/л, $N-NH_4$ — до 0,05 мг/л, $N-NO_3$ — до 0,08 мг/л, $N_{\text{общ}}$ — 0,26–1,23 мг/л [4, 5]. По содержанию хлорофилла «а» трофический статус бухты Благополучия соответствовал мезотрофному [4]. Данные предшествующих наблюдений свидетельствуют об интенсивном антропогенном воздействии на бухту Благополучия, в результате которого произошли изменения в химическом составе ее воды (увеличилось содержание БЭ), что определило необходимость мониторинга состояния этого залива.

Химико-биологические исследования в бухте Благополучия, выполненные в августе 2024 г. [6], подтвердили неблагоприятную экологическую ситуацию. Высокое содержание в воде общего фосфора (до 640 мкг/л) и общего азота (до 2,50 мг N/л) указывает на эвтрофный-гипертрофный статус, что свидетельствует об

¹ Соловецкий музей-заповедник. Публичный отчет. 2023. 38 с. Режим доступа: https://www.solovky.ru/sites/default/files/pdf/publicnyy_otchet_2023_0.pdf (дата обращения: 15.04.2026).

интенсивном антропогенном влиянии на залив. При этом концентрация хлорофилла «а» в воде залива (1,23–3,73 мкг/л) и показатели фитопланктона (численность 66–2502 тыс. кл./л и биомасса — 372–2059 мг/м³) характеризуют его трофический статус на среднем и низком уровне.

В апреле 2025 г. в бухте Благополучия был исследован физико-химический состав донных отложений. Слабовосстановленные осадки и существенная доля минерального фосфора в их составе свидетельствовали о загрязнении южной части бухты сточными водами поселка Соловецкий. Здесь же в донных осадках отмечались наибольшие концентрации органического углерода, аммонийного и общего азота, общего фосфора и содержания хлорофилла «а», что указывало на активные продукционные процессы и интенсивное разложение органического вещества в донных отложениях [7]. Именно в этом районе бухты массово развиваются зеленые макроводоросли, отмирающие в конце лета.

До настоящего времени отсутствовали актуальные данные о санитарной обстановке в бухте Благополучия, загрязняемой бытовыми сточными водами. Кроме того, необходимо было уточнить трофический статус залива с учетом широко распространенного развития макроводорослей. В связи с этим целью исследований 2025 г. стала оценка экологической ситуации в бухте Благополучия по гидрохимическим, гидробиологическим и микробиологическим показателям.

Материал и методы исследования

Бухта Благополучия представляет собой относительно мелководный район с глубинами в северной и южной части не более 2 м, на выходе из бухты глубины достигают 8–9 м. По данным [1], амплитуда прилива в бухте варьирует в пределах 0,5–0,7 м, скорости течений на разных фазах прилива не превышают 10–15 см/с. Исследования на акватории бухты в июне и августе 2025 г. были выполнены на



Рис. 1. Карта-схема отбора проб в бухте Благополучия в 2025 г.:
1 — станции отбора проб, 2 — территория монастыря

Fig. 1. Map showing sampling stations in Blagopoluchiya Bay in 2025:
1 — sampling stations, 2 — monastery territory

станциях S1, S2, S3, S4 и S5 (рис. 1) с глубинами 1,5–8 м, которые не осушаются во время отлива. Расстояние между станциями варьирует в пределах 100–200 м.

Для оценки трофического статуса и санитарной ситуации в бухте Благополучия в разные фазы приливно-отливного цикла в воде, отобранной на 5 станциях, определяли микробиологические показатели, содержание биогенных элементов и хлорофилла «а». На мелководных станциях S2, S3, S4, S5 с глубинами 1,7–2,7 м, с учетом прозрачности воды по диску Секки, достигающей дна, пробы воды отбирали только в поверхностном слое, на глубоководной станции S1 (глубина 7–8 м) — из поверхностного и придонного горизонтов. Таким образом, в июне и августе 2025 г. всего было отобрано 24 пробы воды, из них только в 12 пробах, взятых в июне, проведен микробиологический анализ.

Определение концентраций биогенных элементов (общий азот ($N_{\text{общ}}$) и его минеральных форм ($N\text{-NH}_4$, $N\text{-NO}_3$), минеральный ($P_{\text{мин}}$) и общий ($P_{\text{общ}}$) фосфор) выполнено в нефильтованной воде в соответствии с методиками [8]. Содержание органического азота $N_{\text{орг}}$ рассчитывали по разности между $N_{\text{общ}}$ и суммой минеральных его форм. Содержание хлорофилла «а» определяли спектрофотометрическим методом [9].

Общую численность бактерий (ОЧБ) определяли методом прямого счета на черных поликарбонатных трековых мембранах ($D_{\text{пор}} = 0,2$ мкм) производства Whatman на люминесцентном микроскопе МИКМЕД-2 (увеличение $\times 1600$) с предварительным окрашиванием клеток акридиновым оранжевым [10]. Учет общих колиформных бактерий (ОКБ) проводили согласно МУК 4.2.3963-23²: каждую пробу



Рис. 2. Вершинная часть бухты Благополучия (район расположения станций S4 и S5) с массовым развитием макроводорослей. Август 2025 г. Фото А.В. Толстикова

Fig. 2. The upper part of Blagopoluchiya Bay (area of stations S4 and S5) with intensive development of macroalgae. August 2025. Photo by A.V. Tolstikov

² МУК 4.2.3963-23. Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. Бактериологические методы исследования воды. 2023. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1304575302/titles> (дата обращения: 15.04.2026).

воды фильтровали через мембранные фильтры ($D_{\text{пор}} = 0,45$ мкм). Колонии росли на фильтрах, помещенных на агаризованную среду Эндо при 37 °С в течение 24 ч. После инкубации выполнялся цитохромоксидазный тест, учет ОКБ осуществляли по отрицательному оксидазному тесту.

Отбор проб макроводорослей для определения их видового состава производился из плавающих матов в зоне сублиторали в период максимального их развития, в августе, на трех станциях S2, S4 и S5 на фазе малой воды (рис. 2). Образцы макроводорослей, согласно рекомендациям [11], промывали дистиллированной водой и высушивали при 55 °С. Часть образцов макроводорослей была использована для определения содержания в них фосфора методом ICP-OES (оптико-эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой).

Статистическая обработка данных осуществлялась в лицензированном пакете Statistica Advanced 10 for Windows Ru. Применяли непараметрические методы статистики (критерий Манна–Уитни) для сравнения выборок по содержанию хлорофилла «а», а также результатов микробиологических анализов. Оценивали статистическую значимость различий при сравнении данных за 2024 г. и 2025 г. и для выявления градиента показателей в разные фазы прилива на акватории бухты Благополучия. Для оценки достоверности различия применяли уровень статистической значимости 0,05.

Результаты и их обсуждение

Трофический статус бухты Благополучия с учетом массового развития макроводорослей

По содержанию биогенных элементов среди исследованных станций бухты Благополучия выделялась ст. S4, расположенная вблизи выпуска сточных вод поселка Соловецкий, на которой в июне 2025 г. в обе фазы приливного цикла наблюдалось высокое содержание минерального и общего фосфора, а в августе еще и аммонийного азота (табл. 1). Их концентрации на ст. S4 в августе были выше по сравнению с данными, полученными в июне 2025 г., что может свидетельствовать об увеличении объема сточных вод, поступающих в бухту за счет существенного возрастания туристического потока в это время года.

На станциях S1, S2, S3 и S5 концентрации $P_{\text{мин}}$ и $P_{\text{общ}}$ в обе фазы приливного цикла составили: в июне — 8–24 и 44–88 мкг/л и августе — 10–49 и 42–79 мкг/л соответственно. В июне доля $P_{\text{мин}}$ в воде бухты была сравнительно ниже (в 1,5–3,7 раза), чем в августе 2025 г., за исключением ст. S1, где во время прилива в придонном слое, а во время отлива в поверхностном они были одинаковыми. Существенное увеличение доли $P_{\text{мин}}$ может свидетельствовать об усилении антропогенной нагрузки, связанной с поступлением хозяйственно-бытовых сточных вод, а также в результате отмирания макроводорослей. В августе ее значение превышало 50 % от $P_{\text{общ}}$ практически на всех исследованных станциях, кроме ст. S1, тогда как в июне повышенная доля $P_{\text{мин}}$ наблюдалась только на ст. S5 во время прилива.

Содержание $N_{\text{общ}}$ в воде бухты Благополучия в июне изменялось в узких пределах — 1,08–1,97 мг/л. В августе диапазон колебаний его концентраций был значительно шире — 1,13–5,87 мг/л, максимальное значение было отмечено на ст. S4 во время прилива за счет высокого содержания аммонийного азота. Среди форм азота в воде залива, как правило, доминировал $N_{\text{орг}}$, его доля варьировала от 91 до 100 % от $N_{\text{общ}}$, за исключением ст. S4 в августе, когда доля минеральных его форм за счет

высокой концентрации аммонийного азота составила во время отлива 43 % от $N_{\text{общ}}$, а во время прилива повышалась до 79 % от $N_{\text{общ}}$. Содержание минеральных форм азота в большинстве проб воды было либо на пределе обнаружения методик, либо ниже него, за исключением концентрации аммонийного азота на станциях S4 и S5.

Содержание БЭ, наблюдаемое на ст. S4 в районе сброса сточных вод, в августе 2025 г. было выше по сравнению с данными, полученными в августе 2024 г., когда содержание $P_{\text{общ}}$ достигало 640 мкг/л, а концентрация $N_{\text{общ}}$ составила 2,50 мг/л [6].

Сравнительный анализ данных содержания БЭ в воде бухты и Западной Соловецкой Салмы ($P_{\text{мин}}$ — 5–12 мкг/л, $P_{\text{общ}}$ 15–28 мкг/л, $N-NH_4$ — до 0,01 мг/л, $N_{\text{орг}}$ — 0,62–0,83 мг/л и $N_{\text{общ}}$ 0,69–0,86 мг/л), примыкающего участка акватории Онежского залива Белого моря [12], показывает их существенное различие, что также является доказательством антропогенной нагрузки на бухту Благополучия.

Содержание хлорофилла «а» в июне 2025 г. во время прилива и отлива изменялось в пределах 0,75–3,12 мкг/л, в августе — 1,31–3,62 мкг/л (см. табл. 1). При сравнении полученных данных с результатами исследований в бухте Благополучия в 2024 г. [6] выявлены близкие уровни содержания хлорофилла «а». Во все периоды исследований в разных районах залива сохранялся градиент содержания хлорофилла «а» с достоверно ($p < 0,05$) более высокими его концентрациями в районе сброса сточных вод.

Таблица 1

Содержание биогенных элементов и хлорофилла «а» (Хл «а») в воде бухты Благополучия в 2025 г.

Table 1

Nutrient and chlorophyll “a” (chl “a”) content in Blagopoluchiya Bay water in 2025

	Июнь					Август				
	S1*	S2	S3	S4	S5	S1*	S2	S3	S4	S5
	Отлив					Отлив				
$P_{\text{мин}}$, мкг/л	10/8	22	19	68	16	10/16	33	49	90	25
$P_{\text{общ}}$, мкг/л	70/62	64	88	174	41	69/75	66	78	121	42
$P_{\text{мин}} / P_{\text{общ}}$, %	14/13	34	22	39	39	14/21	50	63	74	60
$N-NH_4$, мг/л	<0,01/<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,04	<0,01/<0,01	<0,01	<0,01	0,59	0,02
$N-NO_3$, мг/л	<0,01/0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,01/<0,01	<0,01	0,01	0,01	<0,01
$N_{\text{орг}}$, мг/л	1,41/1,56	1,58	1,21	1,57	1,04	1,30/1,41	1,30	1,32	0,78	1,10
$N_{\text{общ}}$, мг/л	1,41/1,57	1,58	1,21	1,58	1,08	1,31/1,41	1,31	1,33	1,38	1,13
Хл «а», мкг/л	1,37/0,75	1,89	2,01	1,93	3,12	1,31/2,32	1,80	2,13	2,01	2,97
	Прилив					Прилив				
$P_{\text{мин}}$, мкг/л	9/14	11	12	36	24	22/16	37	49	583	34
$P_{\text{общ}}$, мкг/л	76/71	64	44	234	46	65/79	60	72	1058	55
$P_{\text{мин}} / P_{\text{общ}}$, %	12/20	17	27	15	52	34/20	62	68	55	62
$N-NH_4$, мг/л	<0,01/<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,08	<0,01/<0,01	<0,01	<0,01	4,63	0,09
$N-NO_3$, мг/л	<0,01/<0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	<0,01/0,01	0,02	0,01	<0,01	0,01
$N_{\text{орг}}$, мг/л	1,60/1,63	1,49	1,20	1,96	1,05	1,42/1,45	1,43	1,33	1,24	1,14
$N_{\text{общ}}$, мг/л	1,60/1,63	1,80	1,21	1,97	1,15	1,43/1,46	1,45	1,34	5,87	1,24
Хл «а», мкг/л	0,84/0,91	1,10	1,66	2,31	2,92	1,82/2,39	2,10	2,20	2,13	3,62

Примечание. * — поверхностный/придонный горизонт.

Note. * — surface/bottom horizon.

Оценка трофического статуса бухты Благополучия в 2025 г. была выполнена по концентрации хлорофилла «а» и содержанию $N_{\text{общ}}$ и $P_{\text{общ}}$. С учетом показателя солености, варьирующего в пределах 20–26 ‰ [1], была использована классификация трофности морских вод, разработанная для прибрежных районов с соленостью более 20 ‰ [13]. В июне и августе 2025 г. в разные фазы приливо-отливного цикла уровень трофии бухты Благополучия по концентрации хлорофилла «а» был оценен как олиго-мезотрофный, тогда как содержание общего фосфора и общего азота соответствовали эвтрофному и гипертрофному статусу. Таким образом, было выявлено противоречие между характеристиками трофического статуса по концентрации общего фосфора и общего азота, с одной стороны, и содержанию хлорофилла «а», с другой стороны. Объяснить расхождение оценок помогли данные по макроводорослям, в большом количестве обнаруженным в августе 2025 г. в бухте Благополучия (см. рис. 2). Видовой состав макроводорослей представлен в табл. 2.

Среди обнаруженных в бухте Благополучия видов макроводорослей представители рода *Ulva* присутствовали на всех трех станциях (S2, S4 и S5). Представители этого рода участвуют в образовании так называемых «зеленых приливов» — массовых скоплениях макроводорослей, которые в последние десятилетия стали часто наблюдаться в прибрежье морей самых разных регионов мира [14–17]. Основной причиной «зеленых приливов» является антропогенное эвтрофирование вследствие увеличения биогенной нагрузки на прибрежные воды. Источником биогенного загрязнения бухты Благополучия являются сточные воды поселка Соловецкий.

Для распределения потоков азота и фосфора между фитопланктоном и макроводорослями и образования «зеленого прилива» большое значение имеет локализация источников загрязнения [17, 18]. Так, если в приливо-отливную зону залива

Таблица 2

**Видовой состав макроводорослей в бухте Благополучия
на станциях S2, S4 и S5 в августе 2025 г.**

Table 2

**Species composition of macroalgae in Blagopoluchiya Bay
at stations S2, S4, and S5 in August 2025**

Таксон	Вид	Ст. S2	Ст. S4	Ст. S5
Chlorophyta	<i>Percursaria percursa</i>	+	+	+
	<i>Ulva intestinalis</i>	+	+	
	<i>Ulva prolifera</i>	+	+	+
	<i>Rhizoclonium riparium</i>	+	+	+
	<i>Urospora peniciliformis</i>	+		+
	<i>Chaetomorpha tortuosa</i>	+	+	+
	<i>Spongomorpha aeruginosa</i>	+		
	<i>Cladophora sericea</i>	+	+	
	<i>Acrosiphonia flagellata</i>		+	
Phaeophyta	<i>Pylaiella littoralis</i>		+	+
	<i>Ectocarpus siliculosus</i>			+
Rhodophyta	<i>Ceramium deslongchampsii</i>			+

Примечание. + — присутствие вида на станции.

Note. + — presence of the species at the station.

поступают сточные воды или обогащенные биогенными элементами притоки, это благоприятствует массовому развитию донных водорослей рода *Ulva*. В этих условиях макроводоросли сразу перехватывают потоки азота и фосфора в прибрежной зоне, поглощают и накапливают биогенные элементы, что определяет низкие концентрации минеральных форм азота и фосфора в воде [11, 19].

Сходная ситуация сложилась в бухте Благополучия. На рис. 3 представлены потоки биогенных элементов с учетом возможных источников их поступления. Прибрежное поступление азота и фосфора со сточными водами поселка Соловецкий, а также из донных отложений обуславливает их активное использование макроводорослями. В результате эффективного перехвата биогенных элементов концентрации минеральных форм азота на большей части акватории бухты Благополучия оказались невысокими. Так, в июне 2025 г. содержание нитратного и аммонийного азота на станциях S1–S4 оказалось ниже пределов определения используемого метода (менее

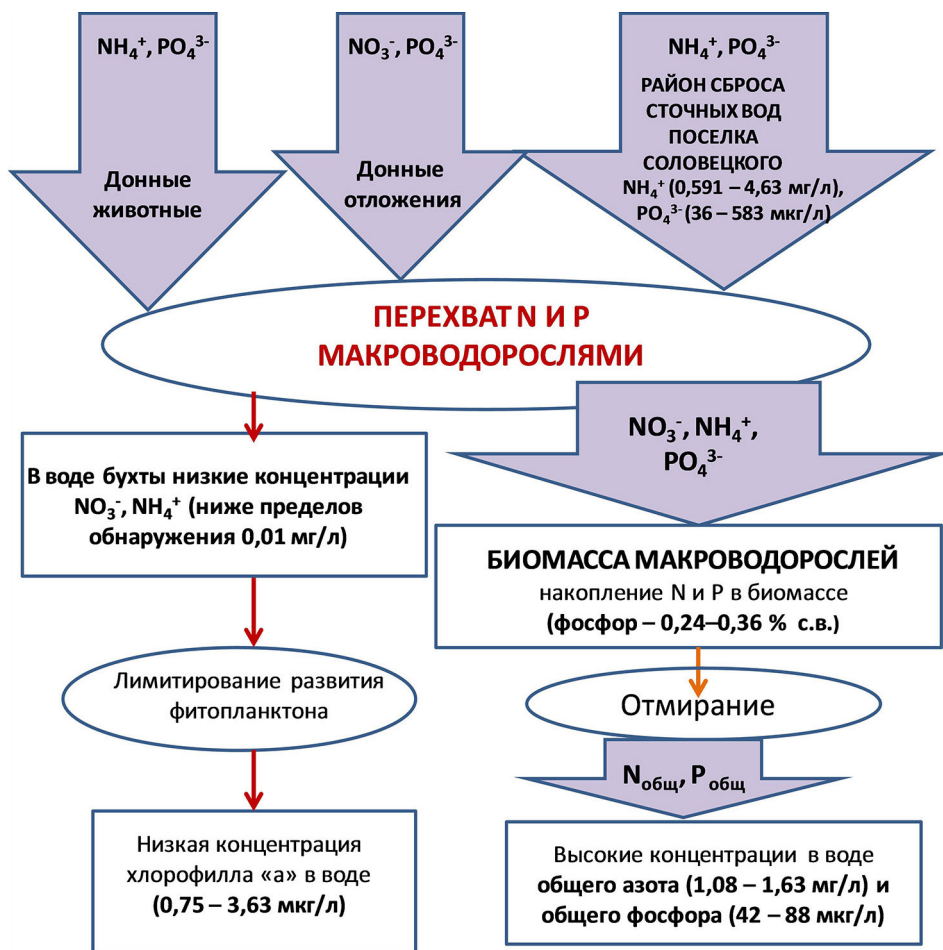


Рис. 3. Схема потоков биогенных элементов в бухте Благополучия

Fig. 3. Diagram of biogenic substance flows in Blagopoluchiya Bay

0,01 мг/л). Исключение составила станция S5, наиболее загрязненный район, где было обнаружено 0,04–0,08 мг/л аммонийного азота. В августе 2025 г. на всех станциях содержание нитратного азота было на пределе чувствительности метода или составляло всего 0,02 мг/л. На станциях S1–S3 концентрация аммонийного азота оказалась ниже пределов определения используемого метода. Лишь в районе станции S4 были обнаружены высокие концентрации аммонийного азота (0,59–4,63 мг/л), что объясняется сбросом коммунальных сточных вод. Таким образом, активное использование макроводорослями биогенных элементов объясняет невысокие уровни развития фитопланктона, который был лимитирован дефицитом минеральных форм азота. Это определило низкие концентрации хлорофилла «а» в бухте Благополучия.

По результатам ИСР-анализа, содержание фосфора в массе макроводорослей на разных станциях в бухте Благополучия варьировало в пределах 0,24–0,36 % (от сухого веса). С учетом огромных количеств макроводорослей можно предположить, что существенная часть фосфора, поступающая из антропогенных источников, накапливается в плавающих матах макроводорослей.

Для целей экологического мониторинга, в связи с тем, что поступающие в воду азот и фосфор перехватываются макроводорослями, надежным индикатором эвтрофирования залива является определение содержания в их тканях биогенных элементов, как это предложено в работах [11, 20]. Согласно рекомендациям [18], исследование экологической ситуации в эвтрофируемых морских заливах должно включать оценку водорослевых матов (толщина, покрытие) и признаков гипоксии.

Санитарная ситуация в бухте Благополучия

Важнейшим направлением экологического мониторинга являются микробиологические исследования, позволяющие оценить санитарную ситуацию. В июне 2025 г. значение ОЧБ в бухте Благополучия варьировало в пределах 1,60–14,05 млн кл./мл. Наибольшая концентрация ОЧБ отмечена на ст. S4, вблизи места впадения сточных вод, наименьшие значения — в придонном горизонте станции S1, наиболее удаленной от района сброса (табл. 3). На большинстве станций ОЧБ была выше во время отлива, за исключением ст. S5. Результаты непараметрического анализа Манна–Уитни показывают, что различия по содержанию ОЧБ в бухте Благополучия в разные фазы были незначимы ($p > 0,05$). Полученные результаты по ОЧБ в бухте Благополучия на станциях S1–S3 соответствуют ОЧБ прибрежных районов Гданьского бассейна Балтийского моря, испытывающих нагрузку от поступления стока крупных рек, дренирующих загрязненные территории [21].

Численность ОКБ в воде бухты Благополучия варьировала от 49 до 90000 КОЕ/100 см³ (см. табл. 3). Нами впервые выявлены такие высокие концентрации ОКБ, поскольку, по данным исследований в 2020 г., эта группа бактерий, в том числе в открытой части бухты Благополучия, отсутствовала³. Пространственное распределение ОКБ было схоже с ОЧБ: максимальные значения отмечены на ст. S4, минимальные — в придонном горизонте на ст. S1. Различия по численности ОКБ в разные фазы в бухте Благополучия не были обнаружены ($p > 0,05$).

³ Квашнинова Е.А., Юницына О.А., Рудакова В.А., Терентьев К.Ю. Оценка бактериального загрязнения природных водоемов Соловецкого архипелага в районе поселка Соловецкий. В кн. *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.

Таблица 3

**Показатели бактериопланктона и ОКБ в бухте Благополучия
в разные фазы приливного цикла в июне 2025 г.**

Table 3

**Bacterioplankton and TCB indicators in Blagopoluchiya Bay
during different phases of the tidal cycle in June 2025**

Фаза прилив. цикла	Станция	ОЧБ, млн кл./мл	ОКБ, КОЕ/*100 см ³
Отлив	S1*	6,87/1,60	82/49
	S2	3,69	4806
	S3	7,50	10500
	S4	14,05	90000
	S5	6,24	25000
Прилив	S1*	3,85/1,71	1646/62
	S2	3,14	4581
	S3	6,24	12833
	S4	7,54	90000
	S5	11,19	12800

Примечание. * — поверхностный/придонный горизонт.

Note. * — surface/bottom horizon.

Согласно СанПин 1.2.3686-21⁴, количество ОКБ в морской воде в охраняемом районе не должно превышать 1000 КОЕ/100 см³. Численность ОКБ в бухте Благополучия в июне 2025 г. не превышала критического значения только в придонном горизонте на ст. S1 в обе фазы приливного цикла и в поверхностном горизонте на ст. S1 в фазу отлива. На станциях S2, S3, S4, S5 показатели численности ОКБ демонстрируют превышение санитарных норм в 1,5–90 раз, при этом максимальные значения зафиксированы на ст. S4 (район выпуска сточных вод). Такие высокие показатели численности ОКБ свидетельствуют о хроническом загрязнении бухты Благополучия канализационными сточными водами.

Результаты микробиологических исследований бухты Благополучия согласуются с гидрохимическими данными, поскольку максимальные значения концентраций фосфора, аммонийного азота, как и численность ОКБ, установлены вблизи выпуска сточных вод (ст. S4), что указывает на единый источник их происхождения — неочищенные канализационные сточные воды.

Заключение

По итогам исследований бухты Благополучия в 2025 г. ее трофический статус с учетом особенностей формирования потоков биогенных элементов в условиях массового развития макроводорослей определен как эвтрофный-гипертрофный, экологическая ситуация в заливе по количеству общих колиформных бактерий классифицирована как чрезвычайно неблагоприятная. Численность ОКБ превышала

⁴ СанПиН 1.2.3685-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий. 2021. Режим доступа: https://www.rospotrebnadzor.ru/files/news/GN_sreda%20_obitaniya_compressed.pdf (дата обращения: 15.04.2026).

допустимые значения для прибрежных вод в 1,5–90 раз. Для улучшения санитарной ситуации в бухте Благополучия на территории поселка Соловецкий необходима установка канализационных очистных сооружений.

Выявленные в бухте Благополучия большие скопления макроводорослей, в составе которых обнаружены представители рода *Ulva* — основные участники «зеленых приливов», свидетельствуют об интенсивно протекающих процессах эвтрофирования залива. Основной мерой предотвращения «зеленых приливов» является снижение биогенной нагрузки на водную экосистему. Меры ликвидации их последствий включают механическую уборку макроводорослей из районов их развития. Неблагоприятная санитарная ситуация и высокий трофический статус бухты Благополучия, выявленные в 2025 г., требуют постоянного контроля и дальнейшего мониторинга экологической ситуации в заливе.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках госзадания Карельского научного центра РАН «Состояние прибрежной экосистемы Белого моря в пределах Соловецкого архипелага» FMEN-2024-0016 на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук».

Вклад авторов. ЕММ и НЕГ — отбор и камеральная обработка проб; НМК и ЮНЛ — камеральная обработка проб. Все авторы участвовали в написании и обсуждении текста статьи.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность С.В. Бурдюху, руководителю аналитического центра Института геологии КарНЦ РАН, канд. физ.-мат. наук, за определение содержания фосфора в образцах макроводорослей и С.Д. Иванову, аспиранту лаборатории альгологии Ботанического института РАН (Санкт-Петербург), за определение видового состава макроводорослей в бухте Благополучия.

Competing interests. There is no conflict of interest.

Funding. The study was carried out within the framework of the state assignment of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences “The state of the coastal ecosystem of the White Sea within the Solovetsky Archipelago” FMEN-2024-0016 using scientific equipment of the Shared Use Center of the Federal Research Center “Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences”.

Authors' contribution. EMM and NEG — sample collection and office processing, NMK and YNL — office processing of the samples. All the authors contributed to the writing and discussion of the article.

Acknowledgments. The authors express their deep gratitude to S.V. Burdyukh, head of the analytical center at the Institute of Geology of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, PhD in Physics and Mathematics, for determining the phosphorus content in macroalgae samples, and to S.D. Ivanov, a postgraduate student at the algalogy laboratory of the Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences (St. Petersburg), for determining the species composition of macroalgae in Blagopoluchiya Bay.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Лукина Ю.Н., Здорovenнов Р.Э., Толстиков А.В., Галахина Н.Е., Богданов С.Р., Сабылина А.В., Здорovenнова Г.Э. Особенности гидродинамического и гидрохимического режимов бухты Благополучия (Соловецкие острова Белого моря) в августе 2024 г. *Арктика: экология и экономика*. 2025;15(2):287–299. <https://doi.org/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. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2025;15(2):287–299. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2025-2-287-299>

2. Здорovenнов Р.Э., Здорovenнова Г.Э., Толстикoв А.В., Новикoва Ю.С., Богданoв С.Р., Лукина Ю.Н. Гидрофизические характеристики морской среды в бухте Благополучия (Соловецкие острова, Белое море): оценка на основе экспедиционных исследований в апреле 2025 года. *Труды Карельского научного центра РАН*. 2025;6:39–56. <https://doi.org/10.17076/lim2118>
Zdorovennov R.E., Zdorovennova G.E., Tolstikov A.V., Novikova I.S., Bogdanov S.R., Lukina Yu.N. Hydrophysical characteristics of the marine environment in Blagopoluchiya Bay (Solovetsky Islands, White Sea): an assessment based on fieldwork in April 2025. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025;6:39–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/lim2118>
3. *Комплексные исследования экосистемы Белого моря*: Сборник научных трудов. М.: ВНИРО; 1994. 123 с.
4. Мохова О.Н., Мельник Р.А. Биогенные веществ в оценке качества поверхностных вод бухты Благополучия о. Соловецкий. В: *Биологическое разнообразие: изучение, сохранение, восстановление, рациональное использование: материалы II Международной научно-практической конференции (Керчь, 27–30 мая 2020 г.)*. Симферополь: ИТ «АРИАЛЬ»; 2020. С. 373–378.
5. Мохова О.Н., Македонская И.Ю., Новикoва Ю.В., Мельник Р.А. Оценка экологического состояния бухты Благополучия о. Соловецкий по гидрохимическим и гидробиологическим показателям. *Экологическая химия*. 2018;27(5):270–279.
6. Калинкина Н.М., Галахина Н.Е., Костромин Е.А., Усов Н.В., Сластина Ю.Л. Трофический статус бухты Благополучия (Соловецкие острова Белого моря) в летний период 2024 г. *Арктика: экология и экономика*. 2025;15(4):592–604. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2025-4-592-604>
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. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2025;15(4):592–604. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2025-4-592-604>
7. Белкина Н.А., Пронина А.В., Гатальская Е.В., Морозова И.В. Оценка биогенного загрязнения донных отложений бухты Благополучия (о. Большой Соловецкий). *Труды Карельского научного центра РАН*. 2025;8:113–126. <https://doi.org/10.17076/eco2196>
Belkina N.A., Pronina A.V., Gatalskaya E.V., Morozova I.V. Assessment of the nutrient pollution of bottom sediments in Blagopoluchiya Bay (Bolshoy Solovetsky Island). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025;8:113–126. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/eco2196>
8. Лозовик П.А., Ефременко Н.А. (ред.) *Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике*. СПб.: Нестор-История; 2017. 272 с.
9. *Determination of photosynthetic pigments in sea waters. SCOR Working Group 17*. Paris, France: UNESCO; 1966. 69 p. <https://doi.org/10.25607/OBP-1940>
10. *Handbook of methods in aquatic microbial ecology*. Washington: Levis Publishers, CRC Press; 1993. 800 p.
11. Cohen R.A., Fong P. Using opportunistic green macroalgae as indicators of nitrogen supply and sources to estuaries. *Ecological Applications*. 2006;16:1405–1420. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[1405:UOGMAI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[1405:UOGMAI]2.0.CO;2)
12. Толстикoв А.В., Галахина Н.Е., Белевич Т.А., Усов Н.В., Здорovenнов Р.Э. Результаты экспедиционных исследований Онежского залива Белого моря в сентябре 2019 года. *Морской гидрофизический журнал*. 2023;39(4):512–527.
Tolstikov A.V., Galakhina N.E., Belevich T.A., Usov N.V., Zdorovennov R.E. Results of expeditionary studies of the Onezhskiy Bay in the White Sea in September, 2019. *Physical Oceanography*. 2023;4:468–483.

13. Håkanson L., 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;379(1):89–108. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.03.009>
14. Schories D. Sporulation of *Enteromorpha* spp. (Chlorophyta) and overwintering of spores in sediments of the Wadden Sea, Island Sylt, North Sea. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*. 1995;29:341–347. <https://doi.org/10.1007/BF02084233>
15. Fletcher R.L. The occurrence of “Green Tides”— a review. In: W. Schramm et al. (eds). *Marine Benthic Vegetation. Ecological Studies*. Vol. 123. Berlin, Heidelberg: Springer; 1996. P. 7–43. https://doi.org/10.1007/978-3-642-61398-2_2
16. Bäck S., Lehvo A., Blomster J. Mass occurrence of unattached *Enteromorpha intestinalis* on the Finnish Baltic Sea coast. *Annales Botanici Fennici*. 2000;37(3):155–161. <http://www.jstor.org/stable/23726896>
17. Gladyshev M.I., Gubelit Y.I. Green tides: new consequences of the eutrophication of natural waters (Invited Review). *Contemporary Problems of Ecology*. 2019;12:109–125. <https://doi.org/10.1134/S1995425519020057>
18. Gubelit Y.I. Opportunistic macroalgae as a component in assessment of eutrophication. *Diversity*. 2022;14:1112. <https://doi.org/10.3390/d14121112>
19. Perrot T., Rossi N., Ménesguen A., Dumas F. Modeling green macroalgal blooms on the coasts of Brittany, France to enhance water quality management. *Journal of Marine Systems*. 2014;132:38–53. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.12.010>
20. Fong P., Kamer K., Boyer K.E., Boyle K.A. Nutrient content of macroalgae with differing morphologies may indicate sources of nutrients for tropical marine systems. *Marine Ecology Progress Series*. 2001;220:137–152. <https://doi.org/10.3354/meps220137>
21. Кудрявцева Е.А., Саввичев А.С., Александров С.В., Канапатский Т.А., Пименов Н.В. Бактериопланктон Гданьского бассейна Балтийского моря. *Микробиология*. 2012;81(3):377–388. Kudryavtseva E.A., Savvichev A.S., Kanapatskii T.A., Pimenov N.V., Aleksandrov S.V. Bacterioplankton of the Gdansk basin, Baltic Sea. *Mikrobiologiya = Microbiology*. 2012;81(3):348–359. <https://doi.org/10.1134/S0026261712030083>