

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО И ГИДРОХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМОВ БУХТЫ БЛАГОПОЛУЧИЯ (СОЛОВЕЦКИЕ ОСТРОВА БЕЛОГО МОРЯ) В АВГУСТЕ 2024 Г.

Ю. Н. Лукина, Р. Э. Здорovenнов, А. В. Толстиков, Н. Е. Галахина, С. Р. Богданов, А. В. Сабылина, Г. Э. Здорovenнова

Институт водных проблем Севера — обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (Петрозаводск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 28 января 2025 г.

Для цитирования

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.

По данным измерений в августе 2024 г. выявлены особенности гидродинамики и определен химический состав воды бухты Благополучия (Соловецкие острова Белого моря), испытывающей выраженное антропогенное воздействие. Наибольшее воздействие испытывает кутовая часть бухты в фазе отлива, куда поступают сточные воды муниципального образования «Поселок Соловецкий». Загрязняющие вещества переносятся по акватории бухты и осаждаются в локальных глубоководных зонах. Выявлено увеличение концентрации общего фосфора в открытой части бухты в четыре раза за 30 лет. Содержание фосфора в настоящее время характеризует воды бухты как высокоэвтрофные.

Ключевые слова: Белое море, Соловецкие острова, природная среда Арктики, антропогенное воздействие, гидрологический режим, приливные явления, гидрохимия, экологические проблемы.

Введение

Регион Белого моря исключительно значим для Российской Федерации в контексте национальных стратегических задач, связанных с развитием добывающей и транспортной инфраструктуры Северного морского пути, освоением природных ресурсов Арктики, реализацией рекреационного потенциала [1—3].

Соловецкие острова — самый крупный по площади архипелаг Белого моря, расположенный в наиболее глубоководной северной части Онежского залива. Особенности островной территории, расположенной в пределах Арктической зоны России, являются сложные природно-климатические усло-

вия и высокая чувствительность экосистем к внешним воздействиям.

В 2024 г. Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН в рамках темы НИР «Состояние прибрежной экосистемы Белого моря в пределах Соловецкого архипелага» (FMEN 2024-0016) начал комплексные междисциплинарные исследования прибрежной акватории Соловецкого архипелага (бухты Благополучия). Современное состояние вод бухты формируется под влиянием многофакторного антропогенного воздействия (рекреационная нагрузка от паломническо-туристического потока, хозяйственная деятельность муниципального образования (МО) «Сельское поселение Соловецкое»), что актуализирует необходимость организации долгосрочного мониторинга для оценки текущего состояния и прогноза изменений качества

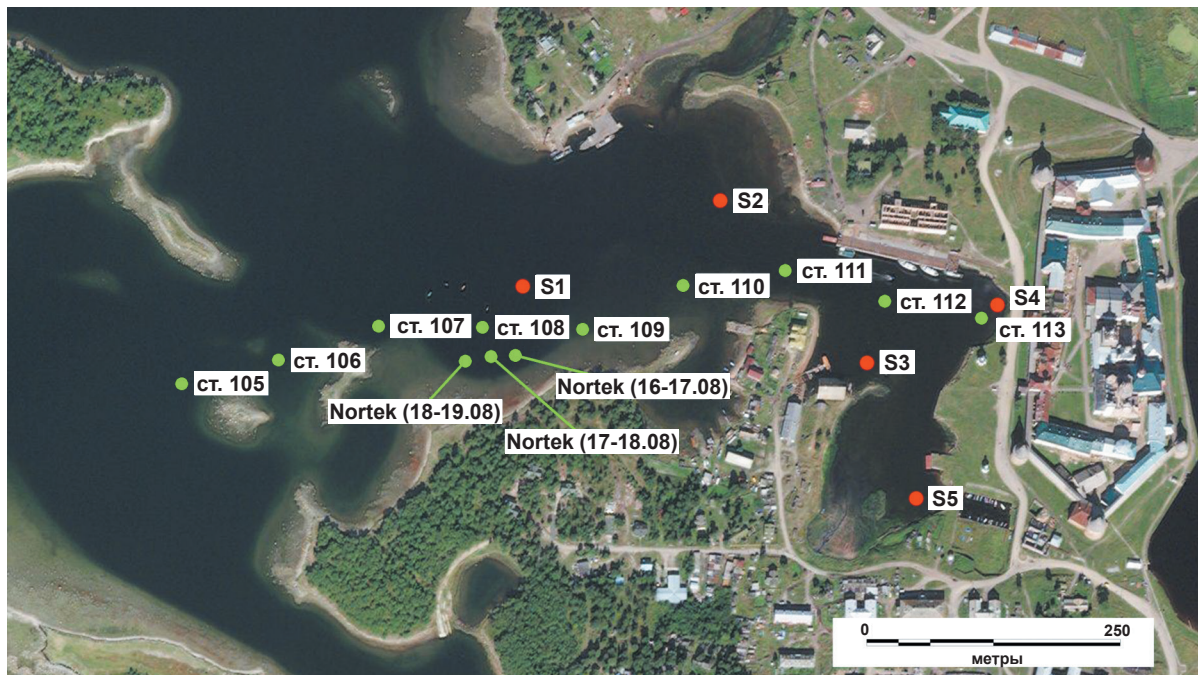


Рис. 1. Схема положения станций отбора проб и измерений в бухте Благополучия: станции S1–S5 — гидрофизические измерения, отбор гидрохимических проб; станции 105–113 — гидрофизические измерения на разрезе; Nortek — станции измерения течений

Fig. 1. Scheme of location of sampling and measurement stations in Blagopoluchiya Bay: stations S1–S5 — hydrophysical measurements, collection of hydrochemical samples; stations 105–113 — hydrophysical measurements on the section; Nortek — current measurement stations

поверхностных вод этой акватории. Анализ условий функционирования прибрежной экосистемы наряду с инвентаризацией всех существующих антропогенных источников позволит оценить предельно допустимую антропогенную нагрузку на природный комплекс Соловецкого архипелага и обосновать охраненный статус территории, что определяет научную новизну и практическую значимость исследований.

Тема исследования согласуется с «Морской доктриной Российской Федерации» в контексте обеспечения экологической безопасности в Мировом океане, предотвращения загрязнений морской среды и сохранения ее обитателей, развития Арктической зоны как стратегической ресурсной базы, развития Северного морского пути в качестве национальной транспортной коммуникации.

Мониторинг и оценка состояния прибрежной акватории Белого моря в районе Соловецких островов предполагают проведение комплексных исследований по разным направлениям. На первом этапе они включают изучение состояния и функционирования водной экосистемы (гидрохимический и термодинамический режимы) и сообществ гидробионтов (фито-, зоопланктон, продукционно-деструкционный потенциал). В данной статье приведены результаты оценки гидродинамических особенностей бухты Благополучия и химического состава вод по данным экспедиционных исследований в августе 2024 г.

Методы исследований

Бухта Благополучия расположена на западном берегу острова Большой Соловецкий. Береговая полоса бухты сильно изрезана небольшими губами и мысами. В акватории бухты находится морской причал; впадает несколько водотоков, включая неочищенные сточные воды МО «Сельское поселение Соловецкое», ежегодный объем которых составляет 52 тыс. м³ [4]. Основу экономики МО «Сельское поселение Соловецкое» составляют паломническо-туристическая деятельность, работа строительных и реставрационных организаций, рыболовство, водорослеводство.

С 15 по 20 августа 2024 г. в бухте Благополучия осуществлены экспедиционные изыскания. Проведена батиметрическая съемка и сформирована сетка станций отбора проб (рис. 1), максимально полно охватывающая акваторию. Установлено, что к большим пристаням подходит фарватерный ход с глубинами 5—6 м; в северной и южной части бухты на входе в сухой док глубины не превышают 2 м. На входе в бухту глубины достигают 8—9 м с существенным свалом глубин у южного берега. Резкий свал глубин до 3—4 м наблюдается и на восточном берегу бухты.

Выбор станций определялся их расположением относительно моря и источников антропогенного воздействия: станции S1 и S2 расположены на входе в бухту, станции S3—S5 — во внутренней части бух-

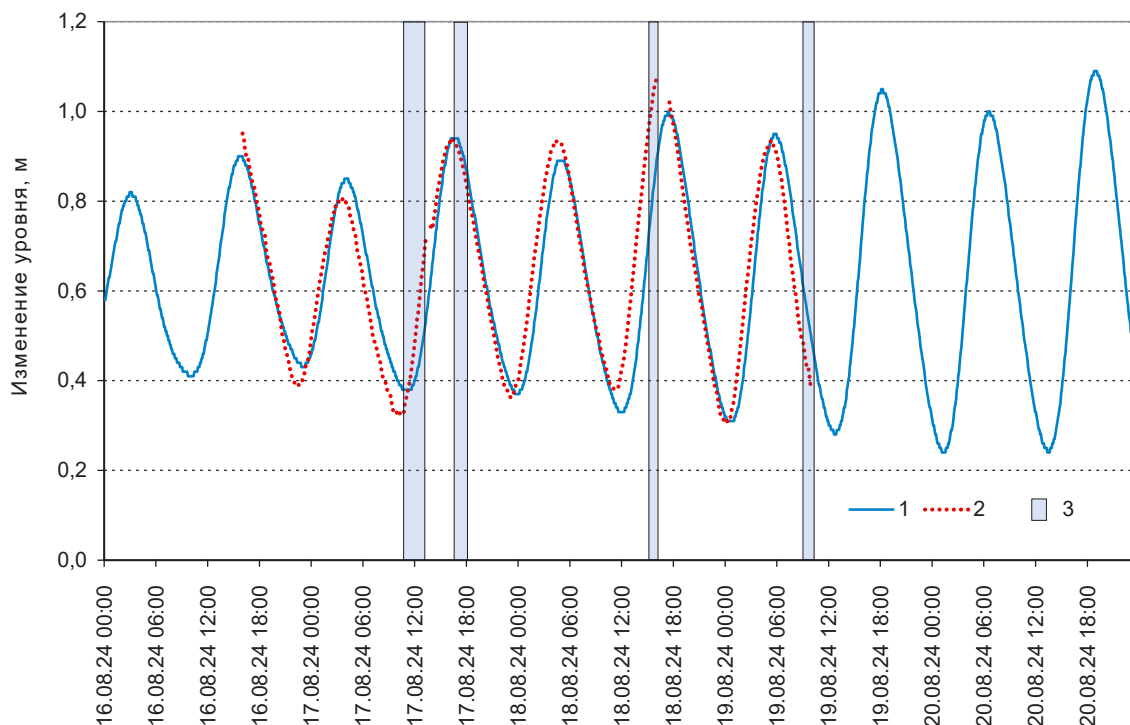


Рис. 2. Изменение уровня, предвычисленного по программе WXTide32 (v. 4.7) (1) и измеренного прибором ADCP (2) в бухте Благополучия в августе 2024 г. 3 — периоды зондирования
Fig. 2. Change in the level predicted by the WXTide32 program (v. 4.7) (1) and measured by the ADCP device (2) in Blagopoluchiya Bay in August 2024. 3 — sounding periods

ты, при этом станция S4 расположена вблизи сброса сточных вод МО «Сельское поселение Соловецкое».

Комплексные исследования включали измерения гидрофизических параметров (температура, соленость, мутность воды, течения, потоки солнечной радиации) и отбор проб воды на химический анализ на пяти станциях S1—S5 в фазах полной и малой воды. Измерения течений и уровня воды проводили на станциях Nortek, зондирования выполняли также на станциях разреза 105—113 (см. рис. 1) на разных фазах приливного цикла.

Изучение течений и распределения мутности важно для установления возможных направлений переноса сточных вод, осаждения и накопления взвешенного вещества. Изучение вертикальных профилей температуры и солености воды на разных фазах приливного цикла направлено на выявление воздействия приливной волны.

Вертикальные зондирования мультипараметрическими зондами CTD-90M и RBR-Concerto проводены на станциях S1—S5 17 августа 2024 г. последовательно в фазах малой (11:00—12:50) и полной (16:52—17:57) воды (рис. 2). Измерения на девяти станциях разреза 105—113 проведены в фазе прилива 18 августа 2024 г. с 15:35 по 15:52 и в фазе отлива 19 августа 2024 г. с 9:29 по 9:51. Фазу прилива определяли с помощью программы WXTide32 (v. 4.7).

В России в качестве официальной единицы измерения мутности используют ЕМФ (единицы мутности по формазину на литр), в английском варианте — Formazin Turbidity Unit (FTU), также используется единица измерения мутности мг/л (по каолину). Мультипараметрический зонд CTD-90m определяет мутность в единицах FTU. Численно мутность, выраженная в единицах FTU, отличается от измеренной в единицах мг/л: 1 FTU = 0,58 мг/л каолина.

Акустический доплеровский измеритель течений Aquadopp Current Profiler 2.0MHz (ADCP) устанавливался для измерений последовательно на трех станциях (см. рис. 1). Измерения компонент скорости на станции Nortek (16—17.08) проводились в период с 15:55 16 августа до 13:20 17 августа, на станции Nortek (17—18.08) — в период с 13:50 17 августа до 16:11 18 августа 2024 г., на станции Nortek (18—19.08) — в период с 16:30 18 августа до 10:10 19 августа 2024 г. ADCP устанавливался на дно таким образом, что расстояние от дна до излучателя прибора составляло примерно 1 м, излучатель был направлен вверх. Размер ячейки измерений при первой постановке составлял 0,50 м, при двух последующих постановках — 0,25 м. Таким образом удалось получить практически полный вертикальный профиль скоростей и направлений течений. При помощи датчика давления этого прибора также были получены сведения о ходе уровня (см. рис. 2).

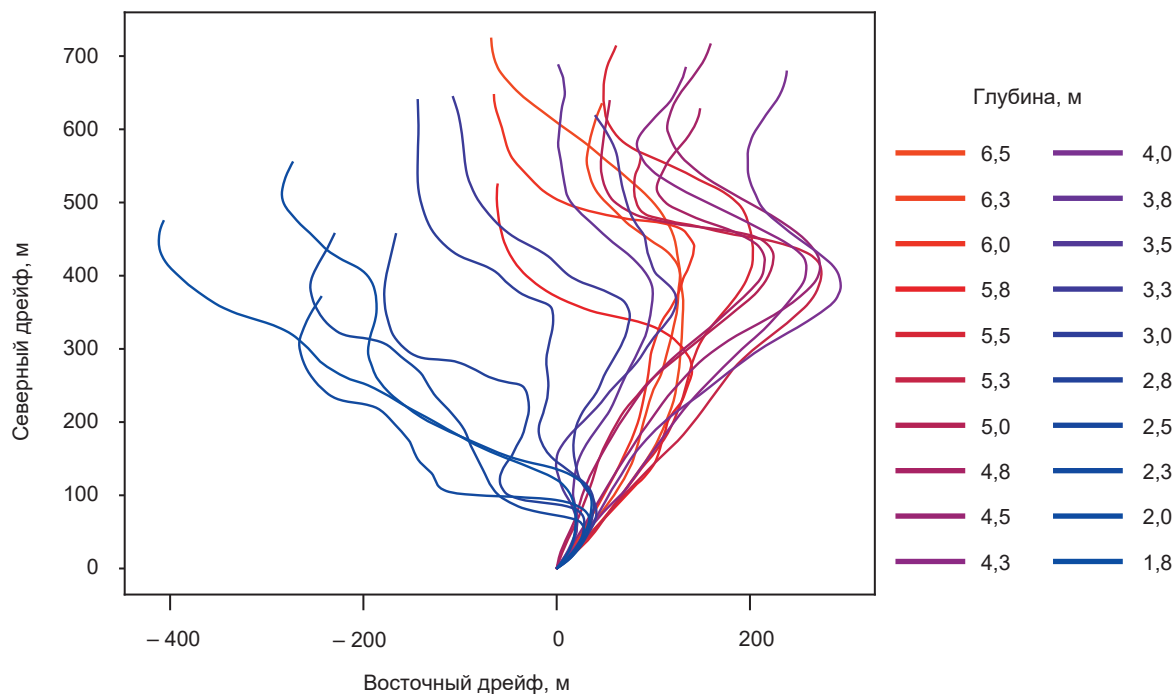


Рис. 3. Прогрессивно-векторные диаграммы за второй этап измерений (17–18.08.2024), построенные в горизонтальной плоскости

Fig. 3. Progressive vector diagrams for the second stage of measurements (17–18.08.2024), constructed in the horizontal plane

Промеры глубин осуществлялись при помощи картплоттера Garmin echoMAP 50s (с датчиками эхолота и GPS). Характеристики эхолота (сонара) — двухлучевой излучатель с рабочими частотами 200/77 кГц. Эхолот был настроен на измерения глубин с пространственным шагом 10 м.

Перечень химических показателей формировался с учетом особенностей антропогенной нагрузки на акваторию бухты Благополучия и в целях комплексного представления об уровне загрязнения прибрежных вод в результате рекреационной и хозяйственной деятельности МО «Сельское поселение Соловецкое». Химический анализ воды включал определение содержания биогенных элементов (азота аммонийного, азота нитратного, азота нитритного, азота общего $N_{\text{общ}}$, фосфора общего $P_{\text{общ}}$, фосфора минерального $P_{\text{мин}}$) и нефтепродуктов в соответствии с аттестованными методиками [5–11] и был выполнен в нефilterованной воде. Отбор проб на станции S1 осуществлялся с поверхностного и придонного горизонтов, на станциях S2–S5 — с поверхностного. Общее количество проб воды на химический анализ составило 12 единиц.

Результаты и обсуждение

Гидрофизические измерения. Как известно, Белое море является приливным морем с приливной волной, имеющей полусуточный характер. Амплитуда прилива в бухте Благополучия в период измерений 16–19 августа 2024 г. составляла 0,5–0,7 м (см. рис. 2). Сравнение хода уровня, из-

меренного ADCP и предвычисленного с помощью программы WXTide32 (v. 4.7), показало хорошую сходимость: отклонения уровня полной и малой вод не превышали 3–8 см, время наступления фаз прилива отличалось на 20–30 мин. Выявленные изменения обусловлены влиянием батиметрии бухты Благополучия, взаимодействием приливной волны с системой островов. В каждый день измерений наблюдалось полусуточное неравенство прилива, также в период измерений происходило увеличение высоты прилива, обусловленное полумесячным неравенством.

На всех трех станциях измерений (Nortek) выявлены небольшие скорости течений по водному столбу (3–10 см/с), скорости практически не зависят от фазы прилива. Эти особенности связаны с тем, что акватория бухты прикрывается от открытого моря грядой островов, и шхерная система ослабляет приливную деятельность. Таким образом, можно заключить, что влияние приливной волны на водообмен бухты Благополучия невелико.

На рис. 3 и 4 представлены прогрессивно-векторные диаграммы за второй (17–18.08.2024) и третий (18–19.08.2024) этапы измерений, построенные на основе наблюдений за компонентами течений в горизонтальной плоскости. Установлено, что потенциально возможное смещение частиц за сутки может достигать сотен метров, т. е. существуют предпосылки для переноса консервативной примеси на расстояние, соизмеримое с размерами бухты. На третьем этапе измерений выявлено заметное

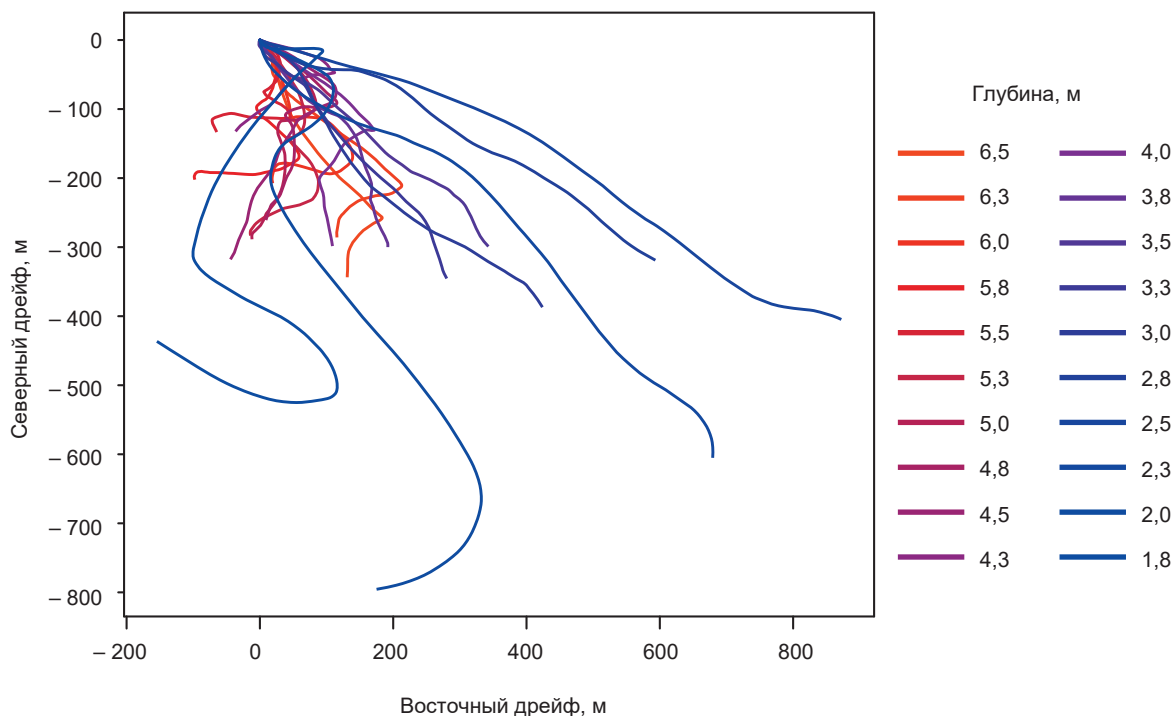


Рис. 4. Прогрессивно-векторные диаграммы за третий этап измерений (18–19.08.2024), построенные в горизонтальной плоскости

Fig. 4. Progressive vector diagrams for the third stage of measurements (18–19.08.2024), constructed in the horizontal plane

отличие в переносе между верхним и придонным слоями (см. рис. 4): чем больше глубина, тем меньше смещение, т. е. перенос осуществлялся главным образом в верхнем слое.

Анализ данных позволяет предположить, что динамика компонент скорости на разных глубинах формируется за счет прохождения внутренних волн. Во второй и третий периоды измерений вертикальная компонента скорости отрицательна на всех глубинах (т. е. направлена вниз) с характерными значениями ~ 10 мм/с. Северная компонента на всех глубинах положительна во второй серии и на всех глубинах отрицательна в третьей серии. Предположительно такой характер изменений компонент скорости во времени можно объяснить присутствием длинных волн с большим периодом. О присутствии внутренних волн свидетельствуют также профили восточной компоненты скорости. В частности, есть знакопеременность на разных глубинах для второй и третьей серий измерений. Возможный механизм генерации таких волн: взаимодействие приливной волны с неровностями дна. Мощность генерации (и соответственно последующей диссипации) в этом случае может быть оценена по батиметрическим данным.

Характер влияния приливной волны на особенности распределения температуры, солености, мутности воды в разных районах бухты Благополучия демонстрируют результаты анализа вертикальных STD-профилей (рис. 5).

Наибольшее влияние прилива на температуру и соленость воды проявляется на станциях S1 и S2, расположенных ближе к выходу из бухты: по всей вертикали от малой к полной воде температура воды на этих станциях повысилась на 1,0–1,5°C, а соленость — более чем на 3‰ на станции S1 и примерно на 0,5‰ на станции S2. Разница же в распределении мутности была ощутима только на станции S1, где мутность увеличилась от 0,4–0,6 FTU в малую воду до 0,6–0,8 FTU в полную. На станциях S3 и S4 температура в период от малой до полной воды также повысилась по всей толще примерно на 1°C, на станции S5 повышение произошло только в придонном слое. Существенное увеличение солености на станциях S3–S5 от малой к полной воде происходило только в верхнем метровом слое. Мутность на станциях S3 и S5 незначительно менялась в зависимости от фазы прилива, на станции S4 резко увеличилась на полной воде в тонком поверхностном слое.

Установлено, что потоки солнечной радиации наиболее глубоко (до 4 м) проникают в водную толщу на станции S1, на остальных станциях — до 1,5–3,0 м (см. рис. 5).

Измерения на разрезе проводились дважды — в фазе прилива 18 августа 2024 г. с 15:35 по 15:52 местного времени и в фазе отлива 19 августа с 9:29 по 9:51 местного времени (рис. 6). Повышенные значения мутности характерны для прибрежных станций и для придонных слоев локальных углублений

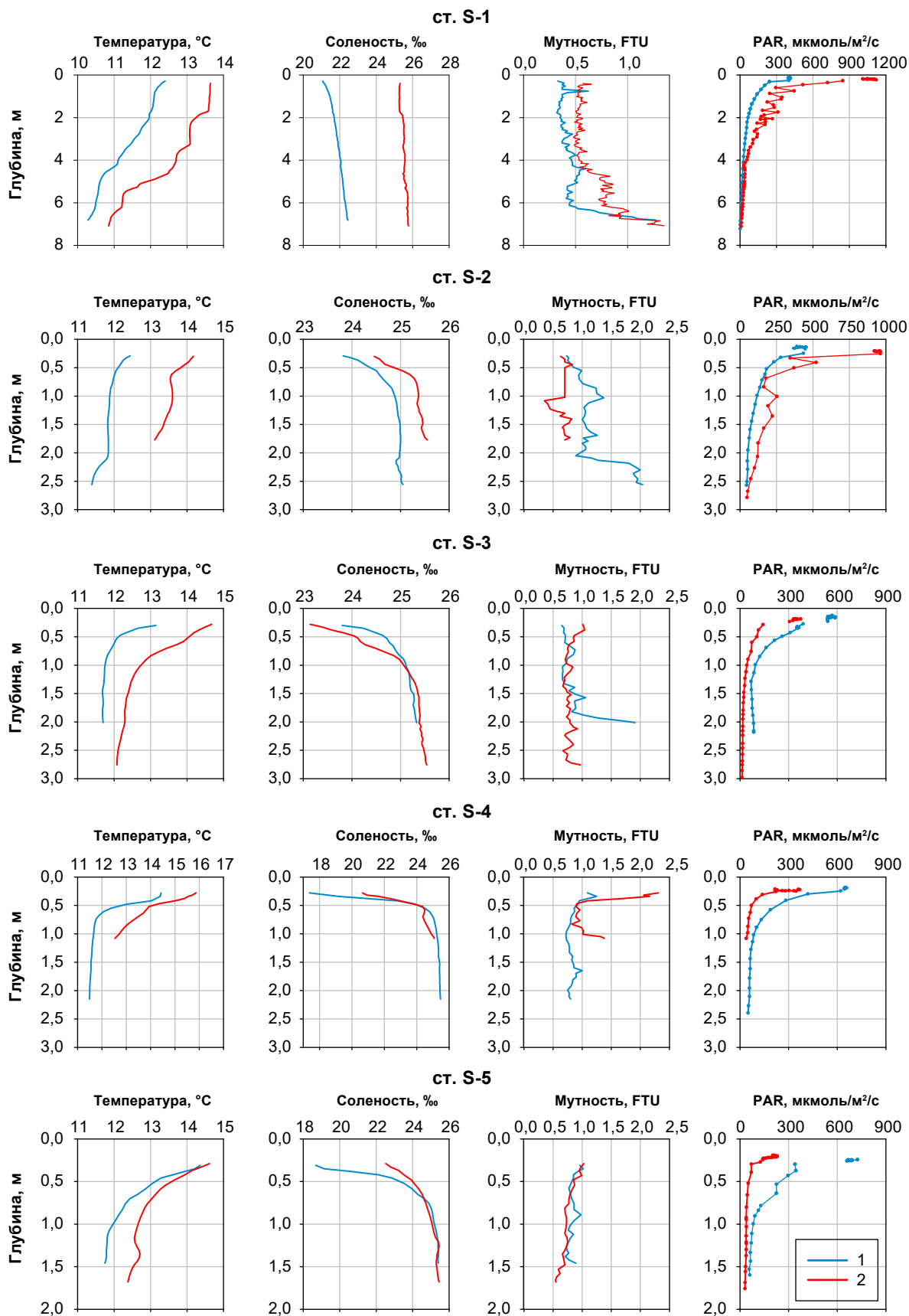


Рис. 5. Температура, соленость, мутность и потоки ФАР на станциях S1–S5 в фазах малой (1) и полной (2) воды
Fig. 5. Temperature, salinity, turbidity and PAR fluxes at stations S1–S5 during low (1) and high (2) water phases

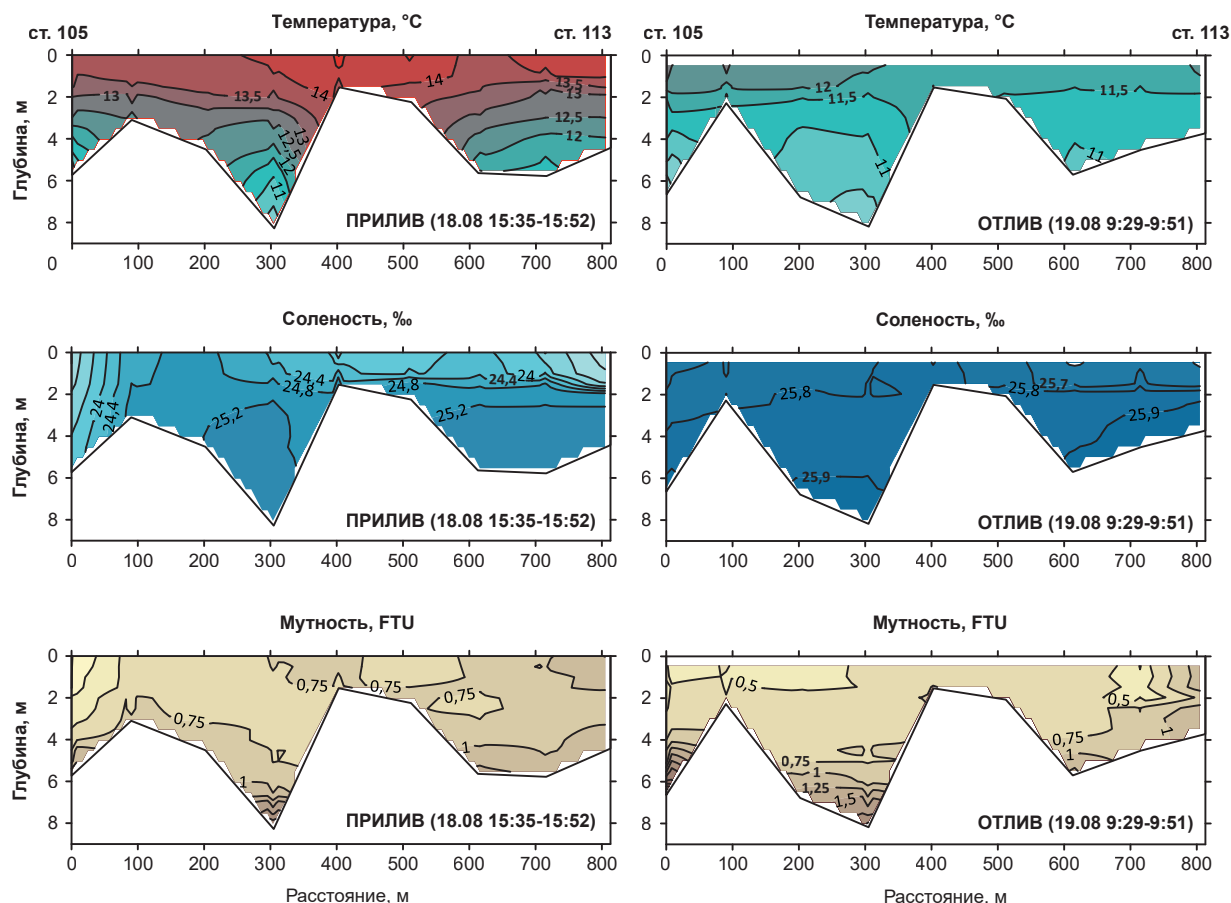


Рис. 6. Распределение температуры, солёности и мутности на разрезе (станции 105–113) в фазе прилива 18 августа 2024 г. и отлива 19 августа 2024 г.

Fig. 6. Distribution of temperature, salinity and turbidity at the section (stations 105–113) during the high tide phase on August 18, 2024 and during the low tide phase on August 19, 2024

дна как на приливе, так и на отливе. Отличия в характеристиках температуры, солёности и мутности между верхними и придонными слоями на станциях с максимальными глубинами (6–8 м) сохраняются на всех фазах приливного цикла.

В бухте Благополучия в период измерений (16–19 августа 2024 г.) амплитуда полусуточного прилива достигала 50–70 см. Наблюдалось полусуточное неравенство прилива. Также происходило постепенное увеличение амплитуды прилива. Значения горизонтальных и вертикальной компонент скорости на разных глубинах, как правило, не превышали нескольких сантиметров в секунду. Даже при столь низких скоростях потенциально возможное смещение частиц за сутки может достигать сотен метров (см. рис. 3 и 4), т. е. в исследуемой акватории существуют предпосылки для переноса консервативной примеси на расстояние, соизмеримое с размерами бухты. Однако в периоды измерений направление переноса существенно варьировалось в суточном масштабе с преимущественно северо-западного 17–18 августа до юго-восточного 18–19 августа.

Такие вариации могут быть связаны с крупномасштабными циркуляциями, обусловленными взаимодействием приливной волны с неоднородностями дна, а также наличием островов, отделяющих бухту от открытого моря. В таких условиях вынос примесей в открытую акваторию может быть существенно затруднен, что может приводить к появлению застойных зон и накоплению загрязняющих веществ в придонных слоях бухты. Косвенно индикатором накопления взвешенного вещества служат обнаруженные повышенные значения мутности в локальных углублениях дна, сохраняющиеся на всех фазах приливного цикла (см. рис. 6).

Остается открытым вопрос об интенсивности вертикального переноса примеси вследствие приливо-отливных процессов, способствующих вертикальному перемешиванию. В частности, характер изменения компонент скорости на разных глубинах указывает на возможное присутствие внутренних волн. Как известно, взаимодействие и разрушение этих волн могут приводить к перемежающейся турбулентности в придонных слоях и соответственно к существенному усилению вертикального переноса.

Таблица 1. Содержание биогенных элементов и нефтепродуктов в воде бухты Благополучия в августе 2024 г.

Table 1. Biogenic elements and oil products in the water of Blagopoluchiya Bay in August 2024

Станция	Горизонт, м	P _{мин}	P _{общ}	N-NH ₄	N-NO ₂	N-NO ₃	N _{орг}	N _{общ}	Нефтепродукты
		мкг/л		мг N/л					мг/л
Малая вода									
S1	0,5	15	35	< 0,01	0,001	< 0,01	1,52	1,52	0,07
	6,0	10	22	< 0,01	0,001	< 0,01	1,57	1,57	0,03
S2	0,5	23	85	< 0,01	0,001	0,01	1,38	1,39	0,05
S3	0,5	25	80	< 0,01	0,001	0,01	1,33	1,34	0,04
S4	0,5	433	640	1,70	0,003	< 0,01	0,78	2,50	0,04
S5	0,5	10	42	< 0,01	0,001	0,01	1,13	1,14	0,06
Полная вода									
S1	0,5	7	73	< 0,01	< 0,001	< 0,01	1,57	1,57	0,02
	6,0	8	58	< 0,01	< 0,001	< 0,01	1,58	1,58	Н. д.
S2	0,5	9	73	< 0,01	0,001	0,01	1,48	1,49	0,04
S3	0,5	16	58	< 0,01	< 0,001	0,01	1,41	1,42	0,04
S4	0,5	15	216	0,01	0,001	0,01	1,23	1,25	0,13
S5	0,5	10	40	0,03	< 0,001	0,01	1,23	1,27	0,05

Возможный механизм возникновения таких волн — взаимодействие прилива с неровностями дна.

Необходимо продолжить измерения гидрофизических параметров в разные фазы прилива на станциях мониторинга в бухте Благополучия. Измерения течений планируется проводить в прибрежной зоне вершинной части бухты, а их длительность будет увеличена до 3—4 сут для уточнения характера переноса частиц и выявления мест потенциально возможного накопления загрязняющих веществ. Планируется оценить мощность генерации (и соответственно последующей диссипации) внутренних волн с учетом полученных батиметрических данных.

Химический состав воды в бухте Благополучия. Трофический статус водоема можно оценить по концентрации общего фосфора [12—14]. Для оценки современного уровня трофии прибрежной зоны Белого моря в бухте Благополучия и понимания тенденций его изменения важны сведения о содержании биогенных элементов и прежде всего фосфора. Именно за счет увеличения его содержания происходит рост биопродуктивности водоема, испытывающего антропогенное воздействие.

Гидрохимические исследования Белого моря, начатые в 1920—1930-х годах, были продолжены в 1950-х годах [15; 16]. В июне-июле 1991 г. Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии провел ком-

плексные исследования экосистемы Белого моря [17], по результатам которых было установлено, что концентрация минерального и общего фосфора во внешней части бухты Благополучия в отливной фазе составляла 4 и 8 мкг/л соответственно. Полученные данные являлись точкой отсчета для наших исследований.

В 2024 г. в районе выпуска сточных вод (станция S4) выявлены крайне высокие концентрации минерального и общего фосфора: в период малой воды они составили 433 и 640 мкг/л, в период полной воды — 15 и 216 мкг/л соответственно (табл. 1). Кроме того, установлено, что содержание $P_{\text{мин}}$ и $P_{\text{общ}}$ в бухте зависит от фазы приливного цикла: во время прилива концентрация $P_{\text{мин}}$ уменьшается в 29 раз, а $P_{\text{общ}}$ — в 3 раза.

Перенос сточных вод отливной волной проявляется на станции S2 повышенным содержанием минерального (23 мкг/л) и общего (85 мкг/л) фосфора. Во внешней части бухты (станция S1) их концентрации составили 15 и 35 мкг/л в фазе отлива, а в приливной фазе — 7 и 73 мкг/л соответственно. В настоящее время содержание $P_{\text{мин}}$ и $P_{\text{общ}}$ в воде бухты Благополучия существенно увеличилось по сравнению с более ранними исследованиями [17]. Высокие концентрации фосфора свидетельствуют о значимом антропогенном воздействии на акваторию на современном этапе и могут оказывать негативное вли-

Таблица 2. Содержание биогенных элементов в воде бухты Благополучия [18; 19] и Западной Соловецкой Салмы [20]

Table 2. Content of biogenic elements in the water of Blagopoluchiya Bay [18; 19] and Western Solovetskaya Salma [20]

Район исследования	Период исследований	P _{мин}	P _{общ}	N-NH ₄	N-NO ₂	N-NO ₃	N _{орг}	N _{общ}
		мкг/л		мг N/л				
Бухта Благополучия	Октябрь 2009 г.	34	45	—	0,003	0,04	—	0,44
	Июль 2010 г.	—	—	0,007	0,012	0,03	1,18	1,23
	Июль 2016 г.	97	133	0,004	0,004	0,01	0,54	0,56
	Август 2019 г.	19—40	44—47	0,03—0,05	0,003—0,003	< 0,01	0,21—0,30	0,26—0,34
Западная Соловецкая Салма	Сентябрь 2019 г.	5—12	15—28	0,005—0,011	0,002—0,003	< 0,01—0,08	0,62—0,83	0,69—0,86

яние на биоту. В частности, минеральный фосфор является маркером хозяйственно-бытовых сточных вод, а концентрация общего фосфора 160 мкг/л резко подавляет биопродуктивность водоема [12].

Вторым биогенным элементом, влияющим на продукционные процессы водоема, является азот, главным образом его минеральные формы. В настоящее время нитрат-ионы на всей акватории бухты Благополучия не обнаружены (см. табл. 1), а преобладающей его формой является органическая, высокая концентрация которой отмечена во всех фазах приливного цикла: в период малой воды — 0,78—1,57 мгN/л, в период полной воды — 1,23—1,57 мгN/л. Отсутствие минерального азота и высокое содержание органического азота свидетельствуют о высокой продукционной деятельности биоценоза в бухте Благополучия.

Аммонийный азот не выявлен в мористой части бухты Благополучия (станции S1—S3). Исключение составила кутовая часть бухты (станции S4, S5), где зафиксирована его высокая концентрация (см. табл. 1), свидетельствующая о значительном влиянии хозяйственно-бытовых сточных вод на этот район акватории.

Ретроспективный анализ данных химического состава вод бухты Благополучия [18—20] свидетельствует о повышенном содержании фосфора и азота в первой и второй декадах XXI в. (2009, 2010, 2016, 2019 гг.) по сравнению с 1991 г. [17] (табл. 2). Сравнительный анализ пространственного распределения биогенных веществ выявил существенное различие по акваториям: концентрация P_{мин}, P_{общ}, N-NH₄, N_{орг} и N_{общ} в прибрежной зоне Соловецких островов (табл. 1) в разы выше, чем в воде Западной Соловецкой Салмы (примыкающего участка Онежского залива Белого моря), что также свидетельствует об антропогенной нагрузке на акваторию бухты.

Содержание нефтепродуктов в воде бухты Благополучия в 2024 г. во всех фазах приливного цикла

было ниже или незначительно превышало ПДК для рыбохозяйственных водоемов (0,05 мг/л): в период малой воды оно составило 0,03—0,07, а в период полной воды — 0,02—0,13 мг/л, тогда как в 1991 г. их концентрация не превышала 0,02 мг/л [17]. Максимальное содержание нефтепродуктов обнаружено в кутовой части (станция S4) вблизи сброса сточных вод МО «Сельское поселение Соловецкое», что идентифицирует сточные воды как один из источников нефтепродуктов в акватории бухты.

Ретроспективный анализ данных химического анализа свидетельствует о высоких концентрациях биогенных элементов в воде бухты Благополучия в современный период по сравнению с 1991 г. В частности, концентрация общего фосфора в 2024 г. в четыре раза превышала таковую в 1991 г., что свидетельствует об усилении антропогенной нагрузки на акваторию в результате сброса неочищенных хозяйственно-бытовых сточных вод.

Согласно существующим классификациям, воды бухты Благополучия по содержанию общего фосфора относятся к высокоэвтрофным [12—14]. Самая неблагоприятная ситуация складывается в районе выпуска хозяйственно-бытовых сточных вод (станция S4, кутовая часть бухты). В фазе отлива в этой акватории концентрация минерального фосфора достигает критических значений — более 400 мкг/л. В фазе прилива происходит разбавление загрязненных вод бухты морскими водами, концентрация минерального фосфора также очень высокая — более 200 мкг/л, что свидетельствует о стабильно высоком уровне антропогенного воздействия на данную акваторию. Максимальная концентрация нефтепродуктов (0,13 мг/л) в районе выпуска сточных вод обнаруживается в период полной воды.

Поскольку сброс неочищенных сточных вод в этом районе производится в течение длительного времени, дополнительным источником биогенных элемен-

тов могут являться донные отложения, накапливающие загрязняющие вещества в районе их сброса. В условиях расходования кислорода на окисление органического вещества в придонных слоях может формироваться острый дефицит кислорода, при котором начинают развиваться процессы редукции: нитраты восстанавливаются до нитритов, а нитриты до аммонийного азота; трехвалентное железо восстанавливается до двухвалентного, при этом в воду высвобождаются сорбированные на железо-гуматах ортофосфаты. Таким образом, мобилизованный фосфор из донных отложений создает дополнительную (внутреннюю) фосфорную нагрузку, что увеличивает эвтрофирование водного объекта. В связи с этим проведение наблюдений в зимний период на расширенный перечень показателей приобретает особую актуальность.

Экспедиционные исследования в бухте Благополучия сопряжены с рядом логистических трудностей. В частности, в зимний период добраться на архипелаг можно только самолетом. Для получения сведений о химическом составе воды и гидрофизических параметрах в бухте Благополучия в сезонном и годовом аспектах целесообразно использовать автономные датчики, устанавливаемые на определенные глубины водной толщи. В частности, может использоваться автономная донная станция, предназначенная для длительных измерений гидрофизических параметров и ряда химических показателей, таких как нефтяные углеводороды, растворенный кислород, водородный показатель, хлорированные углеводороды, тяжелые металлы, фенолы, нитритный азот, кремний и др. [21].

Выводы

В настоящее время воды бухты Благополучия испытывают выраженное антропогенное воздействие, обусловленное поступлением сточных вод МО «Сельское поселение Соловецкое», а также нефтепродуктов при использовании наземного и водного транспорта. Наибольшее антропогенное воздействие испытывает кутовая часть бухты в фазе отлива. Сточные воды МО «Сельское поселение Соловецкое» разбавляются приливной волной, загрязняющие вещества переносятся по акватории бухты течениями и осаждаются в локальных глубоководных зонах. По содержанию общего фосфора воды бухты высокоэвтрофные. Усиление антропогенного воздействия на бухту подтверждается сравнительным анализом гидрохимических показателей в ретроспективном аспекте (увеличение концентраций общего фосфора в открытой части губы за 30-летний период в четыре раза).

Планируются организация длительных автономных измерений температуры воды и содержания растворенного кислорода в придонных слоях кутовой части бухты, а также проведение сезонных съемок с отбором проб воды на сетке станций для выявления пространственно-временной изменчиво-

сти термогидрофизических процессов в акватории бухты и динамики загрязняющих веществ.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН «Состояние прибрежной экосистемы Белого моря в пределах Соловецкого архипелага» FMEN 2024-0016.

Литература/References

1. Филатов Н. Н., Карпечко В. А., Литвиненко А. В., Богданова М. С. Водный транспорт и энергетика севера европейской части России (обзор) // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 1 (25). — С. 75—85.
Filatov N. N., Karpechko V. A., Litvinenko A. V., Bogdanova M. S. Water transport and energetic of North European part of Russia (a review). Arctic: Ecology and Economy, 2017, no. 1 (25), pp. 75—85. (In Russian).
2. Иванова М. В., Данилин К. П., Кошкарев М. В. Северный морской путь как пространство согласования интересов для устойчивого социально-экономического развития Арктики // Арктика: экология и экономика. — 2022. — Т. 12, № 4. — С. 538—550. — DOI: 10.25283/2223-4594-2022-4-538-550.
Ivanova M. V., Danilin K. P., Koshkarev M. V. The Northern Sea Route as a coordination of interests' medium for sustainable socio-economic development of the Arctic. Arctic: Ecology and Economy, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 538—550. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-4-538-550. (In Russian).
3. Волков А. Д., Тишков С. В., Дружинин П. В. Природные ресурсы, система расселения и роль моногородов в развитии пространственной организации регионального хозяйства карельской Арктики // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 4. — С. 582—595. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-4-582-595.
Volkov A. D., Tishkov S. V., Druzhinin P. V. Natural resources, settlement system and the role of single-industry towns in the spatial organization development of the Arctic Karelia regional economy). Arctic: Ecology and Economy, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 582—595. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-4-582-595. (In Russian).
4. Стратегия развития Соловецкого архипелага — уникального объекта духовного, историко-культурного и природного наследия, как самостоятельного компонента Стратегии социально-экономического развития Архангельской области до 2030 года. — Принята распоряжением Правительства Архангельской области от 16 июля 2013 г. № 310-РП.
Development Strategy of the Solovetsky Archipelago — a unique object of spiritual, historical, cultural and natural heritage, as an independent component of the Strategy for the Socio-Economic Development of the Arkhangelsk Region until 2030. Adopted by the Order of the Government of the Arkhangelsk Region dated 16.07.2013 no. 310-RP. (In Russian).

5. РД 52.24.383-2018. Массовая концентрация аммонийного азота в водах. Методика измерений фотометрическим методом в виде индофенолового синего. — Ростов н/Д, 2018. — 47 с.
RD 52.24.383-2018. Mass concentration of ammonium nitrogen in waters. Measurement technique by photometric method in the form of indophenol blue. Rostov-on-Don, 2018, 47 p. (In Russian).
6. РД 52.24.518-2008. Массовая концентрация нитритов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с сульфаниламидом и N-(1-нафтил)этилендиамина дигидрохлоридом. — Ростов н/Д, 2008. — 30 с.
RD 52.24.518-2008. Mass concentration of nitrites in waters. Methodology for performing measurements by photometric method with sulfanilamide and N-(1-naphthyl)ethylenediamine dihydrochloride. Rostov-on-Don, 2008, 30 p. (In Russian).
7. РД 52.24.523-2009. Массовая концентрация нитратов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с сульфаниламидом и N-(1-нафтил)этилендиамина дигидрохлоридом после восстановления в кадмиевом редукторе. — Ростов н/Д, 2009. — 34 с.
RD 52.24.523-2009. Mass concentration of nitrates in waters. Methodology for performing measurements by photometric method with sulfanilamide and N-(1-naphthyl)ethylenediamine dihydrochloride after reduction in a cadmium reducer. Rostov-on-Don, 2009, 34 p. (In Russian).
8. РД 52.24.532-2015. Массовая концентрация общего азота в водах. Методика измерений спектрофотометрическим методом с минерализацией проб в термореакторе. — Ростов н/Д, 2015. — 38 с.
RD 52.24.532-2015. Mass concentration of total nitrogen in waters. Methodology of measurements by spectrophotometric method with mineralization of samples in a thermal reactor. Rostov-on-Don, 2015, 38 p. (In Russian).
9. РД 52.24.382-2006. Массовая концентрация фосфатов и полифосфатов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом. — Ростов н/Д, 2006. — 32 с.
RD 52.24.382-2006. Mass concentration of phosphates and polyphosphates in waters. Methodology for performing measurements by photometric method. Rostov-on-Don, 2006, 32 p. (In Russian).
10. 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.
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).
11. РД 52.24.476-2007. Массовая концентрация нефтепродуктов в водах. Методика выполнения измерений ИК-фотометрическим методом. — Ростов н/Д, 2007. — 27 с.
RD 52.24.476-2007. Mass concentration of petroleum products in waters. Methodology for performing measurements by IR photometric method. Rostov-on-Don, 2007, 27 p. (In Russian).
12. Алекин О. А., Драбкова В. Г., Коплан-Дикс И. С. Проблема эвтрофирования континентальных вод // Антропоген. эвтрофирование природных вод Черноголовка. — 1985. — Т. 1. — С. 25—34.
Alekin O. A., Drabkova V. G., Koplan-Dix I. S. The problem of eutrophication of continental waters. Anthropogenic eutrophication of natural waters Chernogolovka, 1985, vol. 1, pp. 25—34. (In Russian).
13. Smith V. H. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems a global problem. Environ. Sci. & Pollut. Res., 2003, vol. 10, pp. 126—139.
14. Håkanson L., Bryhn A. C., Hytteborn J. K. On the issue of limiting nutrient and predictions of cyanobacteria in aquatic systems. Sci. of the Total Environ, 2007, vol. 379, pp. 89—108.
15. Бруевич С. В. Гидрохимические исследования Белого моря // Тр. Ин-та океанологии АН СССР. — 1960. — Т. 42. — С. 194—254.
Bruevich S. V. Hydrochemical studies of the White Sea. Trudy Instituta Okeanologii AN SSSR [Proc. of the Institute of Oceanology of the USSR AS], 1960, vol. 42, pp. 194—254. (In Russian).
16. Максимова М. П. Содержание биогенных элементов и баланс азота, фосфора и кремния в Белом море // Океанология. — 1978. — Т. 18. — С. 58—63.
Maksimova M. P. Content of biogenic elements and balance of nitrogen, phosphorus and silicon in the White Sea. Okeanologiya [Oceanology], 1978, vol. 18, pp. 58—63. (In Russian).
17. Комплексные исследования экосистемы Белого моря: Сборник научных трудов. — М.: ВНИРО, 1994. — 123 с.
Comprehensive studies of the White Sea ecosystem: Collection of scientific papers. Moscow, VNIRO, 1994, 123 p. (In Russian).
18. 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.
Mokhova O. N., Makedonskaya I. Yu., Novikova Yu. V., Melnik R. A. Assessment of the ecological state of the waters of Blagopoluchiya Bay, Solovetsky Island based on hydrochemical and hydrobiological indicators. Ekologicheskaya himiya [Environmental Chemistry], 2018, iss. 27, no. 5, pp. 270—279. (In Russian).
19. Мохова О. Н., Мельник Р. А. Биогенные вещества в оценке качества поверхностных вод бухты Благополучия о. Соловецкий // Биологическое разнообразие: изучение, сохранение, восстановление, рациональное использование: Материалы II Международной научно-практической конференции

(Керчь, 27—30 мая 2020 г.). — Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2020. — С. 373—378.

Mokhova O. N., Melnik R. A. Biogenic substances in assessing the quality of surface waters of Blagopoluchiya Bay, Solovetsky Island. Biological diversity: study, conservation, restoration, rational use: materials of the II Intern. Sci. and Pract. Conf. (Kerch, May 27—30, 2020). Simferopol, IT "ARIAL", 2020, pp. 373—378. (In Russian).

20. 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 Oneghskiy Bay in the White Sea in September, 2019. Morskoi gidrofizicheskii zhurnal [Physical Oceanology], 2023, vol. 39, no. 4, pp. 468—483.

21. Вялышев А. И., Добров В. М., Стоянов В. В. и др. Автономная донная станция оперативного контроля как элемент комплексной системы мониторинга и контроля радиационного и химического загрязнения арктических морей // Арктика: экология и экономика. — 2016. — № 2 (22). — С. 64—71.

Vyalyshev A. I., Dobrov V. M., Stoyanov V. V., Panteleev V. A., Segal M. D. Autonomous bottom station for operational control as an element of an integrated system for monitoring and controlling radiation and chemical pollution of the Arctic seas. Arctic: Ecology and Economy, 2016, no. 2 (22), pp. 64—71. (In Russian).

Информация об авторах

Лукина Юлия Николаевна, доктор биологических наук, директор Института водных проблем Севера КарНЦ РАН (185030, Россия, Петрозаводск, просп. Александра Невского, д. 50), jlukina@list.ru.

Здоровеннов Роман Эдуардович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт водных проблем Севера ИВПС КарНЦ РАН (185030, Россия, Петрозаводск, просп. Александра Невского, д. 50), romga74@gmail.com.

Толстиков Алексей Владимирович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, руководитель лаборатории, Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН (185030, Россия, Петрозаводск, просп. Александра Невского, д. 50), alexeytolstikov@mail.ru

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

Богданов Сергей Рэмович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН (185030, Россия, Петрозаводск, просп. Александра Невского, д. 50), Sergey.R.Bogdanov@mail.ru.

Сабылина Альбина Васильевна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН (185030, Россия, Петрозаводск, просп. Александра Невского, д. 50), efremova.pwri@mail.ru.

Здоровеннова Галина Эдуардовна, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории, Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН (185030, Россия, Петрозаводск, просп. Александра Невского, д. 50), zdrovennova@gmail.com.

FEATURES OF THE HYDRODYNAMIC AND HYDROCHEMICAL STATES OF BLAGOPOLUCHIYA BAY (SOLOVETSKY ISLANDS OF THE WHITE SEA) IN AUGUST 2024

Lukina, Yu. N., Zdorovenov, R. E., Tolstikov, A. V., Galakhina, N. E., Bogdanov, S. R., Sabylina, A. V., Zdorovenova, G. E.

Northern water problems Institute Karelian Research Center of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

For citing

Lukina Yu. N., Zdorovenov R. E., Tolstikov A. V., Galakhina N. E., Bogdanov S. R., Sabylina A. V., Zdorovenova 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).

The article was received on January 28, 2025

Abstract

Based on the measurement data obtained in August 2024, the researchers have identified the hydrodynamic features and chemical composition of the waters of Blagopoluchiya Bay (Solovetsky Islands of the White Sea), which is experiencing pronounced anthropogenic impact. They have performed a bathymetric survey, and studied the tidal cycle of the water area, which has a semi-diurnal nature. A complete vertical profile of the speeds and directions of currents has been obtained, revealing insignificant current speeds from the surface to the bottom (3–10 cm/s). Based on the results of vertical profiling of temperature, salinity and turbidity, the authors have made a conclusion about weak water exchange in Blagopoluchiya Bay. Water has been analyzed for a set of chemical indicators (nutrients, oil products) in different phases of the tidal cycle. The greatest impact is experienced by the apex part of the bay during the low tide phase, where wastewater from the MO “Solovetsky Settlement” flows. Pollutants are carried across the bay and settle in local deep-water zones. Currently, the waters of the bay are highly eutrophic in terms of total phosphorus content. A fourfold increase in total phosphorus concentrations in the open part of the bay over 30 years has been revealed.

Keywords: *White Sea, Solovetsky Islands, Arctic environment, anthropogenic impact, hydrological state, tidal phenomena, hydrochemistry, environmental problems.*

Funding

The study was carried out within the framework of the state assignment of the Northern water problems Institute of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences “State of the coastal ecosystem of the White Sea within the Solovetsky Archipelago” (FMEN 2024-0016).

Information about the authors

Lukina, Yulia Nikolaevna, Doctor of Biological Sciences, Director of the Northern water problems Institute, KarRC RAS (50, Aleksander Nevsky Ave., Petrozavodsk, Russia, 185030), jlukina@list.ru.

Zdorovenov, Roman Eduardovich, PhD of Geography, Senior Researcher, Northern water problems Institute, KarRC RAS (50, Aleksander Nevsky Ave., Petrozavodsk, Russia, 185030), romga74@gmail.com.

Tolstikov, Aleksey Vladimirovich, PhD of Geography, Senior Researcher, Head of Laboratory, Northern water problems Institute, KarRC RAS (50, Aleksander Nevsky Ave., Petrozavodsk, Russia, 185030), alexeytolstikov@mail.ru.

Galakhina, Natalia Evgenyevna, PhD of Chemistry, Senior Researcher, Northern water problems Institute, KarRC RAS (50, Aleksander Nevsky Ave., Petrozavodsk, Russia, 185030), kulakovanata@mail.ru.

Bogdanov, Sergey Removich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Northern water problems Institute, KarRC RAS (50, Aleksander Nevsky Ave., Petrozavodsk, Russia, 185030), Sergey.R.Bogdanov@mail.ru.

Sabylina, Albina Vasilievna, PhD of Chemistry, Senior Researcher, Northern water problems Institute, KarRC RAS (50, Aleksander Nevsky Ave., Petrozavodsk, Russia, 185030), efremova.nwpi@mail.ru.

Zdorovenova, Galina Eduardovna, PhD of Geography, Leading Researcher, Head of Laboratory, Northern water problems Institute, KarRC RAS (50, Aleksander Nevsky Ave., Petrozavodsk, Russia, 185030), zdorovenova@gmail.com.