

УДК 551.465.5.551.466

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОРСКОЙ СРЕДЫ В БУХТЕ БЛАГОПОЛУЧИЯ (СОЛОВЕЦКИЕ ОСТРОВА, БЕЛОЕ МОРЕ): ОЦЕНКА НА ОСНОВЕ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В АПРЕЛЕ 2025 ГОДА

Р. Э. Здорovenнов, Г. Э. Здорovenнова*, А. В. Толстиков,
Ю. С. Новикова, С. Р. Богданов, Ю. Н. Лукина

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),

* zdorovennova@gmail.com

В бухте Благополучия (Соловецкие острова, Белое море) в рамках темы НИР «Состояние прибрежной экосистемы Белого моря в пределах Соловецкого архипелага» (FMEN 2024-0016) 5–7 апреля 2025 г. проведены гидрофизические измерения, направленные на выявление особенностей снежно-ледяного покрова, изменений температуры и солёности, кислородных условий, оптических свойств воды в приливном цикле в период ледостава. Измерения включали: 1) ледовую пространственную съёмку; 2) установку вблизи места сброса сточных вод автономной станции для измерения температуры воды, давления и растворённого кислорода в приливном цикле; 3) пространственную съёмку температуры, солёности, растворённого кислорода, потоков фотосинтетической активной солнечной радиации на сетке станций на полной и малой воде. Установлено, что сточные воды с температурой $+0,3...+0,4$ °C и солёностью 0,3–0,5 ‰ распространяются по акватории бухты Благополучия подо льдом на расстояние более 300 м от точки сброса. Толщина слоя сточных вод на всех станциях на полной воде уменьшается на 0,10–0,15 м по сравнению с малой водой. Ниже слоя сточных вод на всех станциях определен слой смешения толщиной несколько десятков см, в котором происходит понижение температуры воды до отрицательных значений и повышение солёности до 23 ‰. Ниже слоя смешения на всех станциях залегает слой морских вод с температурой $-1,1...-1,2$ °C и солёностью 27,4 ‰. Установлено, что содержание кислорода в слое сточных вод (60–70 %) заметно ниже, чем вне этого слоя (90–130 %). Резкое уменьшение потока солнечной радиации в слое сточных вод и слое смешения определяет низкую освещённость водного столба с близкими к нулю значениями потока солнечной радиации глубже 2–3 м. Практически на всех станциях обнаружено существенное (в среднем около 30 %) уменьшение коэффициента экстинкции на полной воде по сравнению с малой водой, что указывает на частичный вынос сточных вод морским приливом.

Ключевые слова: Белое море; Соловецкие острова; сточные воды; гидрофизические характеристики; температура воды; лед; потоки солнечной радиации; растворённый кислород; приливной цикл

Для цитирования: Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э., Толstиков А. В., Новикова Ю. С., Богданов 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. С. 39–56. doi: 10.17076/lim2118

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН).

R. E. Zdorovennov, G. E. Zdorovennova*, A. V. Tolstikov, I. S. Novikova, S. R. Bogdanov, Yu. N. Lukina. HYDROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE MARINE ENVIRONMENT IN BLAGOPOLUCHIYA BAY (SOLOVETSKY ISLANDS, WHITE SEA): AN ASSESSMENT BASED ON FIELDWORK IN APRIL 2025

*Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *zdorovennova@gmail.com*

As part of the research theme “State of the White Sea Coastal Ecosystem within the Solovetsky Archipelago” (FMEN 2024-0016), measurements were carried out in Blagopoluchiya Bay (Solovetsky Islands, White Sea) on April 5-7, 2025 to identify the characteristics of the snow-ice cover, changes in temperature and salinity, oxygen conditions, and optical properties of water through the tidal cycle during the ice-covered period. The measurements included: (1) ice spatial survey; (2) installation of stand-alone stations for measuring water temperature, pressure and dissolved oxygen at the wastewater discharge site through the tidal cycle; (3) spatial survey of temperature, salinity, dissolved oxygen, and fluxes of photosynthetic active solar radiation over a grid of stations at high and low water. It was found that wastewater with a temperature of $+0.3...+0.4$ °C and a salinity of 0.3–0.5 ‰ spreads across Blagopoluchiya Bay under ice over a distance of more than 300 m from the discharge point. The wastewater layer at all stations was 0.10–0.15 m thinner at high tide compared with low tide. Below the wastewater layer, there was a mixing layer several tens of cm thick at all stations, in which the water temperature fell to negative values and the salinity rose to 23 ‰. The mixing layer was underlain by a layer of seawater with a temperature of $-1.1...-1.2$ °C and a salinity of 27.4‰. It was found that the oxygen content in the wastewater (60–70 %) was noticeably lower than outside this layer (90–130 %). A sharp decrease in the solar radiation flux in the wastewater layer and the mixing layer is responsible for the poor illumination of the water column, with solar radiation fluxes close to zero at depths below 2–3 m. At almost all stations, there occurred a significant (approx. 30 % on average) decrease in the extinction coefficient at high tide versus low tide, indicating partial removal of wastewater by the sea tide.

Keywords: White Sea; Solovetsky Islands; wastewater; hydrophysical characteristics; water temperature; ice; solar radiation fluxes; dissolved oxygen; tidal cycle

For citation: 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. No. 6. P. 39–56. doi: 10.17076/lim2118

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to KarRC RAS (Northern Water Problems Institute KarRC RAS).

Введение

В 2024 г. сотрудники нескольких институтов Карельского научного центра РАН в рамках темы НИР «Состояние прибрежной экосистемы Белого моря в пределах Соловецкого архипелага» (FMEN 2024-0016) начали комплексные

междисциплинарные исследования прибрежной акватории бухты Благополучия Соловецкого архипелага Белого моря (рис. 1), экосистема которой испытывает выраженное антропогенное воздействие как в результате возрастающего потока туристов и паломников, так и вследствие хозяйственной деятельности МО

«Сельское поселение Соловецкое». Основные источники загрязнения бухты – практически неочищенные сточные воды поселка, рыболовство, водорослеводство, судоходство, маломерные суда. Все эти и другие факторы (шумовое загрязнение, накопление частиц микропластика и др.) могут привести к заметному ухудшению среды обитания уникальных видов морских животных. Уязвимость северных морских экосистем обосновывает актуальность исследований и необходимость организации мониторинга прибрежной зоны Соловецких островов для своевременного выявления критических изменений водных экосистем.

Экспедиционные исследования, проведенные в августе 2024 г. сотрудниками Института водных проблем Севера КарНЦ РАН, включали батиметрическую съемку акватории,

отбор проб воды на ключевых станциях, гидрофизические измерения в течение нескольких дней на автономных станциях, зондирования на станциях продольного разреза на разных фазах приливного цикла. На ключевых станциях (в кутовой и мористой частях акватории, вблизи точки сброса сточных вод и в 250–1000 м от нее [Лукина и др., 2025, рис. 1]) выполняли зондирования показателей по вертикали (температура, электропроводность, мутность воды, хлорофилл *a*, потоки солнечной радиации) и осуществляли отбор проб воды для химических и биологических анализов. Анализ полученных данных позволил выявить особенности термогидродинамических и химико-биологических процессов в бухте в период открытой воды [Лукина и др., 2025; Калинкина и др., в печати].



Рис. 1. Положение бухты Благополучия на о. Большой Соловецкий. Врезка: схема расположения станций измерений (AC – автономная станция) 5–7 апреля 2025 г. Стрелкой обозначено место сброса сточных вод в бухту

Fig. 1. The position of Blagopoluchiya Bay on Bolshoy Solovetsky Island. Inset: scheme of the measurement stations (AC – autonomous station) on April 5–7, 2025. The arrow indicates the location of the wastewater discharge into the bay

В частности, установлено, что наличие островов, особенности береговой линии и батиметрии сглаживают влияние приливной волны, за счет чего скорости течений на акватории бухты невелики и не превышают 10–15 см/с [Лукина и др., 2025]. Показано, что потенциально возможный перенос примеси по акватории бухты может достигать сотен метров, однако направления этого переноса периодически меняются. Обнаружены повышенные значения мутности в придонных слоях локальных углублений дна, что свидетельствует о возможном накоплении загрязняющих веществ, поступающих в бухту. Установлено, что в настоящее время по содержанию общего фосфора воды бухты можно отнести к высокоэвтрофным (вблизи точки поступления сточных вод концентрация общего фосфора превышала 200–600 мкг/л на разных фазах приливного цикла, в других районах бухты достигала 22–85 мкг/л). Ретроспективный анализ показал, что за 30 лет произошло 4-кратное увеличение концентрации общего фосфора в открытой части бухты [Калинкина и др., в печати].

Условия среды обитания бухты формируются под влиянием приливной циркуляции и смешения морских и пресных неочищенных сточных вод МО «Сельское поселение Соловецкое», поступающих в куттовую часть бухты непрерывно в течение года (52 тыс. м³ в год) [Стратегия..., 2013].

Ранее оценка гидрофизических параметров среды обитания бухты Благополучия в период ледостава не проводилась. Зимой вдоль береговой полосы Соловецких островов образуется припайный лед шириной несколько километров, но в проливах Западная и Восточная Соловецкая Салма сплошного ледяного покрова нет в силу мощной динамики течений. Ледяной покров в акватории бухты Благополучия обычно формируется в ноябре, разрушается в мае. В период ледостава судоходство на акватории бухты не осуществляется.

Сплошной снежно-ледяной покров может существенно менять характер распространения сточных вод по акватории бухты, ограничивая ветровое воздействие, оказывает влияние на температурные и кислородные условия водной среды, существенно ограничивает поступление солнечной радиации в водную толщу. Весной, по мере таяния снега и роста потока солнечной радиации, проходящего сквозь лед, увеличивается подледная освещенность, при этом может происходить активизация планктонного сообщества. Получение новых сведений об условиях среды обитания гидробионтов в этот период становится важной задачей для понимания годового цикла функционирования

водной экосистемы бухты и обоснования ограничений хозяйственной деятельности.

Для экспедиционных исследований был выбран апрель, когда ощутимо увеличивается продолжительность светового дня (более 14 ч начиная с 4–5 апреля) по сравнению с зимними месяцами (3,5–6 ч в декабре–январе, 7–10 ч в феврале). Учитывая сроки ледовых явлений в прибрежной зоне Соловецких островов, в начале апреля лед в бухте все еще достаточно крепкий для обеспечения безопасности работ.

Для понимания того, как меняются условия среды обитания в приливном цикле в покрытой сплошным льдом бухте, необходимы измерения на автономных станциях в течение нескольких суток и зондирования на сетке станций на разных фазах приливного цикла. Ранее такие измерения в зимний период на акватории бухты не проводились. Для анализа синоптических и сезонных изменений среды обитания необходимы более длительные измерения, которые планируются на период ледостава в 2026 г.

Для уточнения термического, гидродинамического, кислородного и светового режимов бухты в период ледостава проведены исследования в апреле 2025 г., которые включали измерения толщины снежно-ледяного покрова, потоков солнечной радиации в толще воды, течений, температуры и солености воды, содержания растворенного кислорода в воде в приливном цикле. Измерения выполнялись на автономных станциях в течение нескольких суток и путем зондирования водной толщи на сетке станций на разных фазах приливного цикла. В рамках палеографических исследований были отобраны колонки донных отложений и пробы воды для химических анализов.

В данной статье приведены описания методик гидрофизических исследований и предварительные результаты изучения ледового, термического, светового и кислородного режимов бухты в приливном цикле. Особенности течений в бухте Благополучия и результаты анализов проб воды и колонок донных отложений будут обобщены в следующих публикациях.

Цель работы – выявление особенностей термических, кислородных и световых условий в бухте Благополучия Соловецких островов Белого моря в приливном цикле в период ледостава по данным измерений в апреле 2025 г.

Материалы и методы

Бухта Благополучия (гавань Благополучия) расположена на западном берегу о. Большой Соловецкий (рис. 1), непосредственно рядом с Соловецким монастырем. Береговая полоса

бухты сильно изрезана небольшими губами и мысами. Глубины здесь меняются от 1–2 м в вершине бухты (рядом с монастырем) до 10 м на выходе из нее. В центральной части акватории бухты, где находится судовой ход, глубины достигают 5–6 м. Высота прилива меньше 1 м, скорость приливных течений в районе архипелага может достигать 1,8 м/с, однако вне узких проливов не превышает 0,5 м/с [Лоция..., 1983]. В самой бухте Благополучия течения слабые (10–15 см/с) [Лукина и др., 2025].

Белое море играет ключевую роль в формировании климата Соловецкого архипелага. Благодаря смягчающему влиянию моря Соловки находятся в сравнительно благоприятных температурных условиях, здесь мягкая продолжительная зима и короткое прохладное лето. Климат умеренный морской, переходный к континентальному, по среднегодовым характеристикам более теплый, чем на материке [Гидрометеорология..., 1991]. Влияние циклонов ощущается в течение всего года; для лета характерны частые вторжения арктических воздушных масс, несущих солнечную, но холодную погоду. Средняя годовая скорость ветра составляет 6,8 м/с, с марта по август на архипелаге преобладают холодные северо-восточные ветра, с сентября по февраль – юго-западные [Лоция..., 1983; Гидрометеорология..., 1991]. Климат в Беломорском регионе меняется: для ряда метеостанций водосбора Белого моря выявлен рост среднегодовой температуры воздуха на 0,8–1,2 °C в 1991–2020 гг. по сравнению с климатической нормой 1961–1990 гг. с наибольшим изменением в январе (превышение нормы на 1,6–2,9 °C), увеличение сумм осадков, сокращение на два месяца периода выпадения твердых осадков [Филатов и др., 2022].

Методы измерений. В период с 5 по 7 апреля 2025 г. измерения проведены на 9 станциях (рис. 1). В таблице 1 приводятся периоды и виды измерений.

Измерения толщины снега и льда и описание слоев льда выполнены 5 апреля на ст. S-4 и 6 апреля на всех остальных станциях. Для получения керна льда делали 4 лунки ледобуром на расстоянии 30–40 см, затем лед между лунками пропиливали ледовой пилой. КERN льда извлекали из лунки и проводили измерение слоев льда.

Вблизи точки сброса сточных вод (рис. 1) 5–7 апреля проводились измерения давления, температуры воды и содержания растворенного кислорода (РК) на автономной станции (АС). Датчики были закреплены на трос с якорем так, что совмещенный датчик давления и температуры TDR RBR при установке попал в придонный

слой, а совмещенный датчик температуры и растворенного кислорода TDO RBR располагался на расстоянии одного метра над дном. Трос с датчиками был растянут за счет плава, погруженного на глубину около 0,5 м под лед. Верхний свободный конец троса выходил через лунку на поверхность льда, где был закреплен. Общая глубина в месте установки АС на момент ее погружения в воду 5 апреля (полная вода) составила 5,5 м. Дискретность измерений – одна минута. При последующем анализе данных датчика давления TDR RBR были введены поправки на изменение атмосферного давления по данным метеостанции Соловки (WMO 22429) [Расписание..., 2025]. По данным датчика давления TDR RBR получены сведения о ходе уровня в бухте в районе АС в период измерений.

Для получения информации о времени фаз приливного цикла выполнялось предвычисление уровня на 4–8 апреля 2025 г. с помощью программы WXTide32 (v. 4.7).

Зондирования на всех станциях проведены 6 апреля мультипараметрическим зондом RBR-Concerto в заранее подготовленных лунках дважды – на малой и затем на полной воде (табл. 1). Измеряемые параметры зонда RBR-Concerto – температура и соленость воды, поток фотосинтетической активной солнечной радиации (ФАР). Дискретность отсчетов зонда по вертикали 0,04–0,14 м.

Продолжительность измерений 6 апреля на всех станциях на малой воде составила 40 минут, на полной – 37 минут. Согласно результатам расчета уровня с помощью программы WXTide32 (v. 4.7), за время измерений на малой воде уровень увеличился на 2 см, на полной воде уменьшился на 1 см.

Оценка коэффициента ослабления солнечной радиации в воде γ , ассоциируемая с подледным освещенным слоем, выполнена с использованием экспоненциальной аппроксимации зависимости потока ФАР от глубины, в рамках однопараметрического приближения. Вычисления проводились по методу наименьших квадратов. Оценки выполнены для каждой станции для малой и полной воды.

Совмещенный датчик температуры и кислорода TDO RBR использовался для получения вертикального профиля этих параметров на ст. S-4 5 апреля и для измерений в подледном и придонном слоях на всех станциях 7 апреля. Продолжительность измерений на ст. S-4 5 апреля составила 8 минут, на всех станциях 7 апреля – 1 ч 20 мин. Согласно результатам расчета уровня с помощью программы WXTide32 (v. 4.7), за время измерений 5 апреля уровень не изменился, 7 апреля – уменьшился на 9 см.

Таблица 1. Периоды и виды измерений в бухте Благополучия Соловецких островов Белого моря в апреле 2025 г.
Table 1. Periods and types of measurements in Blagopoluchiya Bay of the Solovetsky Islands of the White Sea in April 2025

Период измерений Periods of measurements	Станция Station	Вид измерений, характеристика датчиков Type of measurements, description of sensors
5 и 6 апреля April 5, 6	S-4, S-5, 142–147	Измерение толщины снега и льда и описание слоев ледяного покрова Measurement of snow and ice thickness and description of ice cover layers
5 апреля 11:15 AC установлена (TDO+TDR) – 7 апреля 15:08 снят датчик кислорода (TDO) 7 апреля 17:10 снят датчик давления (TDR) April 5, 11:15 AM, AC installed (TDO + TDR) – April 7, 3:08 PM, oxygen sensor removed (TDO) April 7, 5:10 PM, pressure sensor removed (TDR)	AC	Измерение на автономной станции температуры воды и давления (датчик TDR RBR в придонном слое) и температуры воды и содержания растворенного кислорода (датчик TDO RBR закреплен в 1 м над дном), дискретность измерений – одна минута Диапазон датчика температуры –5...+35 °C, точность ±0,002 °C Диапазон датчика растворенного кислорода 0–150 %, точность 1 % Диапазон датчика давления 500 дБ, точность ±0,001 % Measurements of water temperature and pressure (TDR RBR sensor in the bottom layer) and water temperature and dissolved oxygen content (TDO RBR sensor fixed 1 m above the bottom) at an autonomous station, with a measurement resolution of one minute The temperature sensor range is –5...+35 °C, with an accuracy of ±0.002 °C The dissolved oxygen sensor range is 0–150 %, with an accuracy of 1 % The pressure sensor range is 500 dB, with an accuracy of ±0.001 %
6 апреля малая вода 7:48–8:28 полная вода 13:11–13:48 April 6: Low tide 7:48–8:28 AM High tide 1:11–1:48 PM	S-4, S-5, 142–147	Зондирование RBR-Concerto (температура воды, соленость, поток ФАР) Диапазон датчика температуры –5...+35 °C, точность ±0,002 °C RBR-Concerto profiling (water temperature, salinity, PAR flux) The temperature sensor range is –5...+35 °C, with an accuracy of ±0.002 °C
5 апреля 10:30–10:38 (прилив) April 5, 10:30–10:38 AM (high tide)	AC	Зондирование датчиком TDO RBR, датчик выдерживали примерно одну минуту на глубинах 0,9, 2, 3, 4, 5, 6 м Диапазон датчика растворенного кислорода 0–150 %, точность 1 % Probing with a TDO RBR sensor was performed for approximately one minute at depths of 0.9, 2, 3, 4, 5, and 6 m The dissolved oxygen sensor range is 0–150 %, with an accuracy of 1 %
7 апреля 15:38–16:56 (отлив) April 7, 3:38–4:56 PM (low tide)	S-5, S-4, 142–147	Зондирование датчиком TDO RBR, на каждой станции датчик выдерживали у нижней границы льда и вблизи дна в течение одной минуты Диапазон датчика растворенного кислорода 0–150 %, точность 1 % Probing with a TDO RBR sensor, at each station the sensor was kept at the lower edge of the ice and near the bottom for one minute The dissolved oxygen sensor range is 0–150 %, with an accuracy of 1 %

Особенности региональной климатической изменчивости Соловецких островов и погодные условия зимы 2024/25 гг. проанализированы по данным метеостанции Соловки (WMO 22429) [Расписание..., 2025; Погода..., 2025]. Для понимания динамики температуры за последние десятилетия тренды температуры воздуха (среднегодовое и среднемесячные значения) рассмотрены за три периода: 1960–2024 гг. (максимальная длина доступных для анализа однородных рядов), 1976–2024 гг. (период ускоренного роста температуры приземного воздуха для Европейской территории России выделен начиная с 1976 г. [Второй..., 2014]) и 2005–2024 гг. (современный этап). Анализ трендов выполнен в программе Excel. Уровень значимости трендов принимался при значении $p < 0,01$. В качестве климатической нормы использовались значения температуры воздуха, осредненные за 1961–1990 гг. по данным сайта [Погода..., 2025]. Тренды сумм осадков за год и за отдельные месяцы проанализированы за период 2008–2024 гг. Проанализировать изменение осадков за более

длительный период не представляется возможным в связи с неоднородностью рядов как годовых значений сумм осадков, так и помесечных до 2008 г. (большие пропуски в данных). Для характеристики погодных условий зимы 2024/25 гг. рассмотрены такие параметры, как температура воздуха, скорость ветра, атмосферное давление, осадки в период с 1 октября 2024 г. по 30 апреля 2025 г. по данным сайта [Расписание..., 2025].

Результаты и обсуждение

Особенности региональной климатической изменчивости Соловецких островов в 1960–2024 гг.

Анализ данных по метеостанции Соловки за 1960–2024 гг. показал статистически значимый рост температуры воздуха в среднем за год (+0,4 °C/10 лет) и в отдельные месяцы с января по май, в августе и сентябре (+0,3...+0,6 °C/10 лет) (табл. 2). В остальные месяцы года температура также увеличивалась

со скоростью +0,2...+0,4 °C/10 лет, но статистически незначимо. В период 1976–2024 гг. сохранялась тенденция роста температуры воздуха во все месяцы года, при этом увеличилась скорость роста в январе и декабре (+0,9 °C/10 лет) и с июля по октябрь (+0,5...+0,6 °C/10 лет). В последние два десятилетия (2005–2024 гг.) изменения температуры воздуха как в среднем за год, так и за каждый месяц года были статистически незначимы. Наибольший рост температуры воздуха в этот период происходил в феврале и марте (+1,5...+2,1 °C/10 лет), а также в июне, августе и сентябре (+0,7...+0,9 °C/10 лет), при этом температура воздуха в апреле и октябре–декабре слабо уменьшалась.

Изменение годовых и месячных сумм осадков в 2008–2024 гг. было статистически незначимо (табл. 2). За этот период годовая сумма осадков увеличивалась в среднем на 3 мм/год. Наибольшее увеличение осадков происходило

в январе и апреле (+1,4...+1,5 мм/год). В марте, сентябре, октябре и декабре сумма осадков увеличивалась на 0,4–0,5 мм/год. В мае–августе и ноябре сумма осадков уменьшалась на 0,2–1,1 мм/год.

Погодные условия зимы 2024/25 гг.

Согласно данным метеостанции Соловки, среднемесячная температура приземного слоя воздуха во все месяцы с октября 2024 г. по апрель 2025 г. была выше климатической нормы 1961–1990 гг. на 1,3–4,7 °C с наибольшим превышением в январе и феврале (рис. 2, а).

Атмосферное давление в рассматриваемый период менялось в пределах от 727 до 784 мм рт. ст. (рис. 2, б). Периоды роста и падения давления продолжались по несколько суток, максимальная величина барической тенденции достигала 7–8 мм рт. ст./3 ч. Менее флуктуирующим атмосферное давление было с середины

Таблица 2. Тренды температуры воздуха за год и месяцы года в 1960–2024, 1976–2024 и 2005–2024 гг. и сумм осадков в 2008–2024 гг.

Table 2. Trends in air temperature for the year and months of the year in 1960–2024, 1976–2024 and 2005–2024 and precipitation in 2008–2024

	Температура воздуха Air temperature			Осадки Precipitation
	1960–2024	1976–2024	2005–2024	2008–2024
Январь January	$y = 0,06x - 11,10$ $R^2 = 0,11$ $p < 0,01$	$y = 0,09x - 11,00$ $R^2 = 0,15$ $p < 0,01$	$y = 0,02x - 7,43$ $R^2 = 0,0018$ $p = 0,80$	$y = 1,47x + 34,27$ $R^2 = 0,22$ $p = 0,05$
Февраль February	$y = 0,06x - 11,19$ $R^2 = 0,09$ $p < 0,01$	$y = 0,07x - 10,47$ $R^2 = 0,06$ $p = 0,07$	$y = 0,21x - 10,39$ $R^2 = 0,11$ $p = 0,15$	$y = 0,14x + 31,11$ $R^2 = 0,002$ $p = 0,85$
Март March	$y = 0,05x - 7,49$ $R^2 = 0,12$ $p < 0,01$	$y = 0,04x - 6,05$ $R^2 = 0,04$ $p = 0,15$	$y = 0,15x - 6,41$ $R^2 = 0,10$ $p = 0,15$	$y = 0,54x + 22,18$ $R^2 = 0,08$ $p = 0,27$
Апрель April	$y = 0,03x - 1,77$ $R^2 = 0,12$ $p < 0,01$	$y = 0,04x - 1,45$ $R^2 = 0,11$ $p = 0,01$	$y = -0,004x + 0,17$ $R^2 = 0,0005$ $p = 0,90$	$y = 1,55x + 23,14$ $R^2 = 0,13$ $p = 0,16$
Май May	$y = 0,04x + 3,22$ $R^2 = 0,16$ $p < 0,01$	$y = 0,04x + 3,83$ $R^2 = 0,12$ $p = 0,01$	$y = 0,04x + 5,33$ $R^2 = 0,02$ $p = 0,53$	$y = -0,23x + 36,33$ $R^2 = 0,003$ $p = 0,82$
Июнь June	$y = 0,03x + 9,35$ $R^2 = 0,09$ $p = 0,01$	$y = 0,04x + 9,37$ $R^2 = 0,12$ $p = 0,01$	$y = 0,08x + 10,29$ $R^2 = 0,09$ $p = 0,19$	$y = -0,10x + 50,19$ $R^2 = 0,001$ $p = 0,93$
Июль July	$y = 0,02x + 13,30$ $R^2 = 0,05$ $p = 0,08$	$y = 0,05x + 12,66$ $R^2 = 0,19$ $p < 0,01$	$y = 0,05x + 13,98$ $R^2 = 0,02$ $p = 0,51$	$y = -0,40x + 69,07$ $R^2 = 0,004$ $p = 0,93$
Август August	$y = 0,03x + 11,76$ $R^2 = 0,14$ $p < 0,01$	$y = 0,06x + 11,04$ $R^2 = 0,42$ $p < 0,01$	$y = 0,07x + 12,82$ $R^2 = 0,09$ $p = 0,17$	$y = -1,16x + 71,28$ $R^2 = 0,02$ $p = 0,50$
Сентябрь September	$y = 0,03x + 7,60$ $R^2 = 0,20$ $p < 0,01$	$y = 0,06x + 7,32$ $R^2 = 0,35$ $p < 0,01$	$y = 0,09x + 8,88$ $R^2 = 0,14$ $p = 0,1$	$y = 0,49x + 50,52$ $R^2 = 0,01$ $p = 0,68$
Октябрь October	$y = 0,03x + 2,55$ $R^2 = 0,10$ $p = 0,01$	$y = 0,05x + 2,51$ $R^2 = 0,15$ $p < 0,01$	$y = -0,005x + 4,41$ $R^2 = 0,001$ $p = 0,90$	$y = 0,42x + 72,20$ $R^2 = 0,003$ $p = 0,82$
Ноябрь November	$y = 0,03x - 2,31$ $R^2 = 0,06$ $p = 0,04$	$y = 0,04x - 2,42$ $R^2 = 0,10$ $p = 0,02$	$y = -0,04x + 0,24$ $R^2 = 0,03$ $p = 0,49$	$y = -0,09x + 55,34$ $R^2 = 0,001$ $p = 0,92$
Декабрь December	$y = 0,04x - 6,85$ $R^2 = 0,08$ $p = 0,01$	$y = 0,09x - 7,46$ $R^2 = 0,17$ $p < 0,01$	$y = -0,06x - 3,19$ $R^2 = 0,02$ $p = 0,61$	$y = 0,43x + 47,27$ $R^2 = 0,02$ $p = 0,51$
Год Year	$y = 0,04x + 0,59$ $R^2 = 0,35$ $p < 0,01$	$y = 0,06x + 0,65$ $R^2 = 0,48$ $p < 0,01$	$y = 0,05x + 2,38$ $R^2 = 0,21$ $p = 0,04$	$y = 3x + 562,88$ $R^2 = 0,02$ $p = 0,58$

Примечание. Жирным выделены p -значения статистически значимых трендов.

Note. Statistically significant trends are given in bold with p -values.

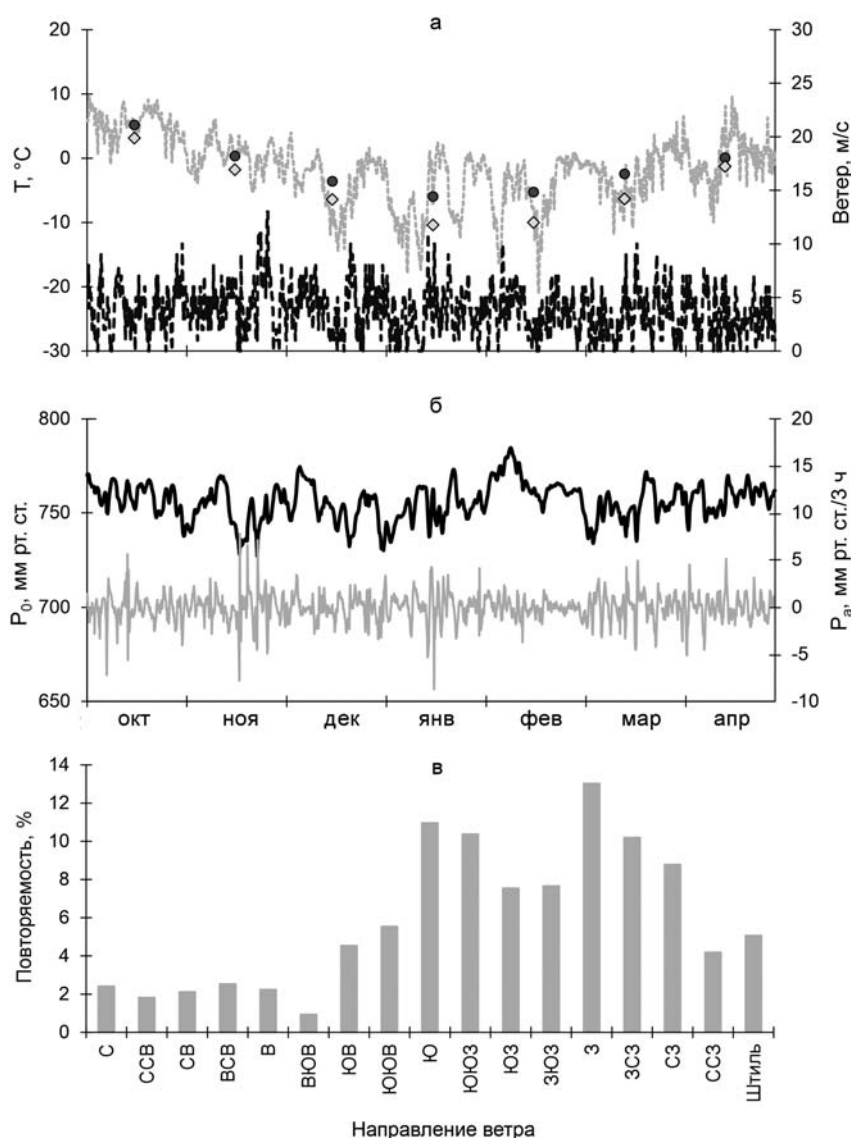


Рис. 2. а, б – погодные условия в период с 1 октября 2024 г. по 30 апреля 2025 г. по данным метеостанции Соловки:

1 – температура воздуха, 2 – скорость ветра, 3 – атмосферное давление на уровне станции P_0 , 4 – барическая тенденция P_a , 5 – среднемесячные значения температуры воздуха в зимний сезон 2024/25 гг., 6 – среднемесячные значения температуры воздуха в 1961–1990 гг.;

в – повторяемость направлений ветра в период с 1 октября 2024 г. по 30 апреля 2025 г.

Fig. 2. а, б – weather from October 1, 2024 to April 30, 2025 according to the Solovki weather station:

1 – air temperature, 2 – wind speed, 3 – atmospheric pressure at station level P_0 , 4 – baric tendency P_a , 5 – average monthly air temperature in the winter season 2024/25, 6 – average monthly air temperature in 1961–1990;

в – frequency of wind directions from October 1, 2024 to April 30, 2025

октября до середины ноября, в декабре 2024 г. и в феврале 2025 г. Наиболее резкие скачки атмосферного давления наблюдались в первую половину октября, вторую половину ноября 2024 г. и в середине января 2025 г. В марте и начале апреля 2025 г. атмосферное давление также резко менялось, барическая тенденция достигала 5 мм рт. ст./3 ч.

Средняя скорость ветра в период с октября 2024 г. по апрель 2025 г. составляла 3,8 м/с: в октябре–декабре – 4,0–4,5 м/с (с максимальным значением в ноябре), в январе–апреле – 3,2–3,7 м/с (с наименьшим значением в апреле). Повторяемость направлений ветра северных и восточных румбов с октября 2024 г. по апрель 2025 г. составляла 0,9–2,5 %, преобладали ветры западных и южных румбов (5–13 %); повторяемость штилей – 5,1 % (рис. 2, в). Наиболее часто

штили повторялись в марте (27 %), январе (24 %) и апреле (17 %), заметно реже – в декабре (6 %), ноябре (7 %), феврале (8 %) и октябре (10 %).

За неделю перед началом измерений стояла теплая ветреная погода, температура воздуха в дневные часы повышалась до 2–6 °C, в ночные опускалась до –0,3...–1,7 °C (рис. 3). Скорость ветра достигала 4–8 м/с, однако 31 марта – 2 апреля снизилась до 2–3 м/с. Начиная с 4 апреля наступило похолодание, и в период измерений в бухте температура воздуха в дневные часы не превышала –0,4 °C, в ночные – опускалась до –5,9 °C. Скорость ветра северных румбов 4–6 апреля достигала 4–7 м/с, с порывами до 10–20 м/с, 7 апреля – не превышала 3 м/с. Атмосферное давление росло 4–6 апреля от 741 до 767 мм рт. ст. Осадки в виде снега выпали 28 марта, 1 и 4 апреля.

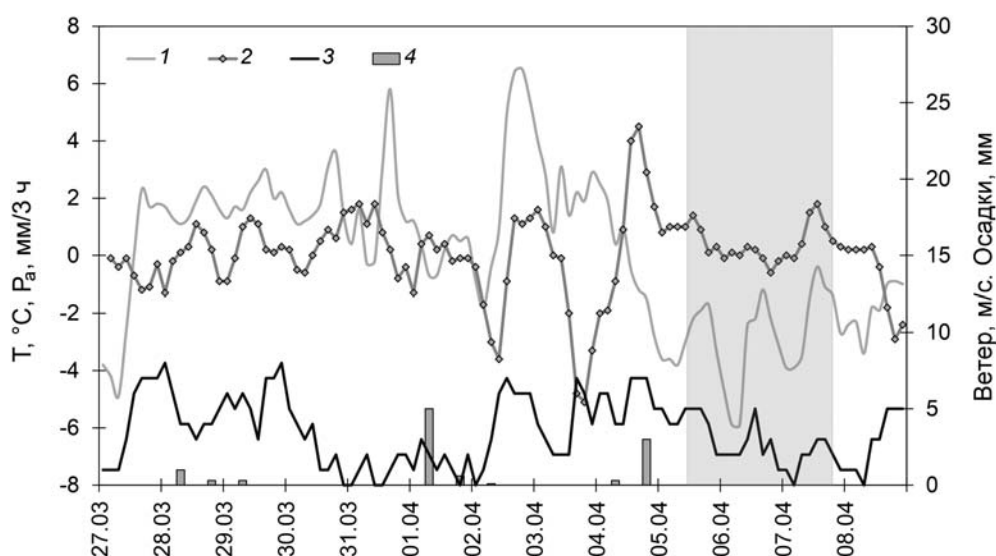


Рис. 3. Погодные условия в период с 27 марта по 8 апреля 2025 г. по данным метеостанции Соловки:

1 – температура воздуха, 2 – барическая тенденция P_a , 3 – скорость ветра, 4 – осадки. Затененная область – период измерений на автономной станции

Fig. 3. Weather from March 27 to April 8, 2025, according to the Solovki weather station:

1 – air temperature, 2 – baric tendency P_a , 3 – wind speed, 4 – precipitation. The shaded area – period of measurements at the autonomous station

Толщина и структура снежно-ледяного покрова

Согласно данным сайта Multimaps [2025], в начале апреля 2025 г. акватория Белого моря была свободна ото льда, но вдоль береговой линии заливов и островов существовал припай. Вокруг острова Б. Соловецкий наблюдался припайный лед, акватория бухты Благополучия была покрыта сплошным льдом.

Измерение толщины льда проведено 5 апреля 2025 г. на ст. S-4, 6 апреля – на ст. S-5 и всех станциях разреза (ст. 142–147) (табл. 3).

По всей акватории бухты поверхность льда была покрыта тонким слоем снега (0,5–1,0 см). Общая толщина льда изменялась от 57 (ст. S-5) до 72 см (ст. 147). На всех станциях выделялись слои нижнего конжеляционного (кристаллического) и верхнего белого (снежного) льда. На прибрежных станциях между слоями верхнего и нижнего льда и в верхнем слое льда выделялись две прослойки влажного снега и воды, на станциях 144 и 147 прослоек воды не было, на ст. 145 и 146 была только одна прослойка воды между верхним и нижним льдом. При удалении в сторону моря от ст. 147 подо льдом и метровой прослойкой воды обнаруживался второй слой льда, толщину которого установить не удалось, так как не хватило длины бура.

Ход уровня воды по данным автоматического датчика TDR и программы WXTide32 (v. 4.7)

Согласно результатам расчета приливов в программе WXTide32 (v. 4.7) и по показаниям датчика TDR RBR величина полусуточного прилива в бухте Благополучия 5–7 апреля 2025 г. составляла 0,5–0,7 м (рис. 4).

Сравнение величины прилива по данным датчика TDR RBR и программы WXTide32 (v. 4.7) показало хорошую сходимость: максимальная величина прилива по данным измерений составляла 0,65–0,66 м, по результатам вычислений с помощью программы 0,55 м время наступления фаз прилива отличалось на 15–40 минут.

Анализ данных датчика TDR RBR показал, что на приливе в показаниях с некоторого момента уровень переставал расти, несмотря на то, что прилив продолжался (затененные области на рис. 4, б). По всей видимости, это происходило из-за недостаточности свободной длины троса, к которому крепился плав. В результате в периоды полной воды происходило натягивание троса, к которому крепились датчики TDR RBR и TDO RBR, что приводило к всплытию всей станции. На рис. 5 приведена схема возможного положения станции на малой и полной воде. При всплытии станции датчики меняли свое начальное положение относительно дна, установить точно их положение затруднительно,

Таблица 3. Толщина слоев снега и льда в бухте Благополучия 5 и 6 апреля 2025 г.

Table 3. Thickness of snow and ice in Blagopoluchiya Bay on April 5 and 6, 2025

Станция Station	Дата, время Date, time	Толщина, см Thickness, cm		Примечание Note
S-4	5 апреля 9:50 April 5 9:50 AM	Лед / Ice	67	с двумя прослойками влажного снега и воды with two layers of wet snow and water
		Снег / Snow	0,5	
S-5	6 апреля 16:23 April 6 4:23 PM	Лед / Ice	57	«
		Снег / Snow	0,5	
142	6 апреля 16:49 April 6 4:49 PM	Лед / Ice	60	«
		Снег / Snow	0,5–1,0	
143	6 апреля 16:59 April 6 4:59 PM	Лед / Ice	57	«
		Снег / Snow	0,5	
144	6 апреля 17:16 April 6 5:16 PM	Лед / Ice	65	без прослоек влажного снега и воды without layers of wet snow and water
		Снег / Snow	0,5	
145	6 апреля 17:35 April 6 5:35 PM	Лед / Ice	65	одна прослойка влажного снега и воды one layer of wet snow and water
		Снег / Snow	0,5	
146	6 апреля 17:50 April 6 5:50 PM	Лед / Ice	58	«
		Снег / Snow	0,5	
147	6 апреля 18:13 April 6 6:13 PM	Лед / Ice	72	без прослоек влажного снега и воды without layers of wet snow and water
		Снег / Snow	0,5	

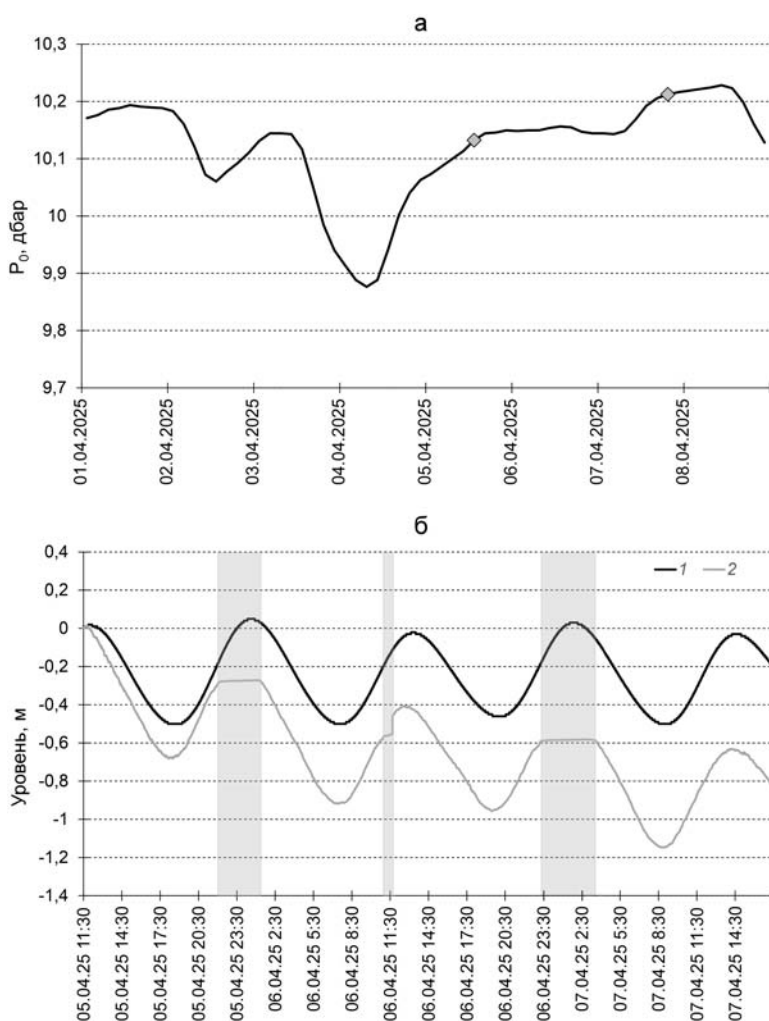


Рис. 4. а – изменение атмосферного давления на уровне метеостанции Соловки с 1 по 8 апреля 2025 г. Символами обозначен период начала и окончания измерений давления на автономной станции датчиком TDR RBR; б – ход уровня моря по результатам вычислений с помощью программы WXTide32 (v. 4.7) (1) и измеренный автономным датчиком TDR RBR в бухте Благополучия на ст. AC (2) 5–7 апреля 2025 г. Затененные области – начало и окончание периодов некорректных измерений. Вертикальные оси приведены к единому нулю

Fig. 4. а – change in atmospheric pressure at the Solovki weather station from April 1 to 8, 2025. The symbols indicate the start and end periods of pressure measurements at the autonomous station by a TDR RBR sensor; б – sea level variation based on calculations using the WXTide32 (v. 4.7) software (1) and measured by an autonomous TDR RBR sensor in Blagopoluchiya Bay at the AC station (2) on April 5–7, 2025. The shaded areas are the beginning and end of the periods of incorrect measurements. The vertical axes are reduced to a common zero

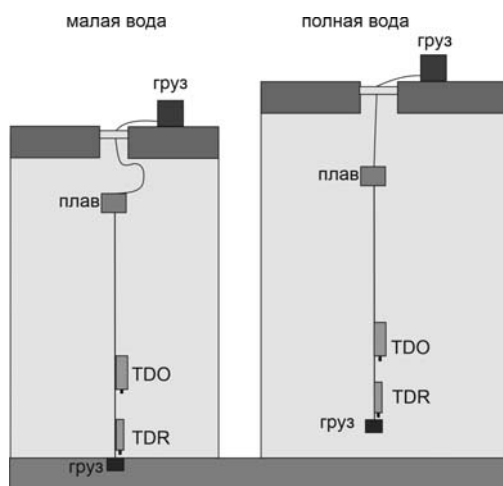


Рис. 5. Схема положения плавка, троса с датчиками и груза на малой и полной воде

Fig. 5. Scheme of the position of the float, cable with sensors and weight at low and high water

поэтому такие периоды в анализе не использовались (см. затененные области на рис. 4, б и 6).

Стоит отметить, что согласно данным датчика давления TDR RBR в период измерений 5–7 апреля 2025 г. в бухте произошло понижение уровня примерно на 0,5 м (рис. 4, б), в то время как по результатам вычислений с помощью

программы WXTide32 (v. 4.7) эта особенность не проявилась. Предположительно, снижение уровня воды в бухте могло быть спровоцировано сгоном воды на фоне сильных ветров северных румбов 4–6 апреля. Возможно также, падение уровня связано с особенностями остаточной приливной циркуляции в бухте в присутствии льда, так как при измерениях в период открытой воды в августе 2024 г. заметных расхождений между показаниями датчика давления и результатами расчета с помощью программы WXTide32 (v. 4.7) не выявлено [Лукина и др., 2025].

Изменение температуры воды и содержания растворенного кислорода по данным автономной станции

Согласно данным автоматических датчиков TDR RBR и TDO RBR, в период измерений 5–7 апреля 2025 г. в районе АС в придонном слое и на расстоянии одного метра над дном не наблюдалось полусуточной периодичности температуры и содержания растворенного в воде кислорода (рис. 6).

В показаниях температурных и кислородного датчиков АС присутствовали колебания с периодами от минут до часов, кроме того, была выявлена изменчивость с большим периодом

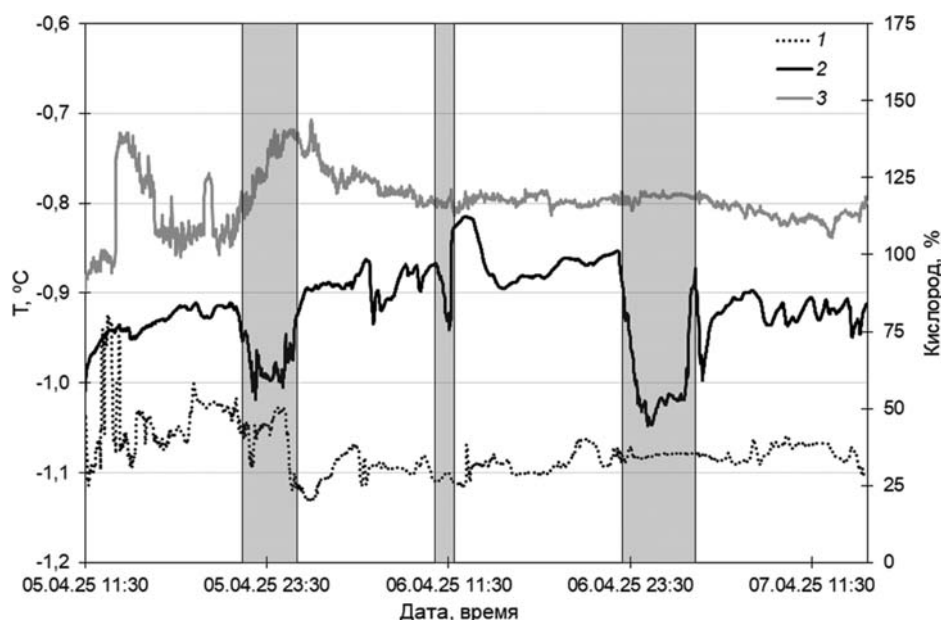


Рис. 6. Температура воды на расстоянии 1 м над дном (1, датчик TDO) и в придонном слое (2, датчик TDR) и содержание растворенного кислорода на расстоянии 1 м от дна (3, датчик TDO) 5–7 апреля 2025 г. Затененные области показывают периоды некорректных измерений

Fig. 6. Water temperature at a distance of 1 m above the bottom (1, TDO sensor) and in the bottom layer (2, TDR sensor) and dissolved oxygen at a distance of 1 m above the bottom (3, TDO sensor) on April 5–7, 2025. The shaded areas indicate periods of incorrect measurements

(десятки часов). В первые сутки измерений на АС в придонном слое (датчик TDR) происходило повышение температуры воды на 0,2 °C (от –1,0 до –0,8 °C), во вторые сутки – снижение на 0,1 °C (до –0,9 °C). На расстоянии 1 м над дном (датчик TDO) в первые 12 ч измерений наблюдалось повышение температуры на 0,1 °C, затем температура вернулась к начальному уровню (–1,1 °C) и колебалась в пределах 0,01–0,04 °C. Содержание растворенного кислорода в первые 12 ч измерений изменялось в пределах 90–130 %, затем сохранялось в пределах 105–125 %, наблюдались колебания с периодами от минут до часов.

Изменения как температуры воды, так и содержания растворенного кислорода с периодом в десятки часов в придонном слое бухты Благополучия, обнаруженные в апреле 2025 г. (рис. 6), могут быть связаны с формированием остаточной приливной циркуляции в акватории бухты. Известно, что периодическое действие прилива на зону смешения и трансформации морских и речных вод в эстуарных зонах способствует интенсификации турбулентного перемешивания, формированию возвратных течений, сложных схем остаточной циркуляции

[Лупачев, 1984; Лапина, 2001; Май, Фукс, 2005; Зырянов, Чебанова, 2016]. В эстуариях приливных рек отмечается периодическое увеличение мутности, обусловленное взмучиванием донных отложений приливыми и отливными течениями, а также при торошении льда и его трении о донные отложения, образование мутьевой пробки в пределах области реверсивных течений [Мискевич и др., 2022].

Измерение содержания растворенного кислорода совмещенным датчиком температуры и кислорода TDO RBR на ст. S-4 5 апреля показало, что на глубине 0,9 м содержание кислорода было наименьшим по толще воды, а температура наибольшей. Судя по всему, датчик при измерениях в подледном слое попал в слой смешения сточных и морских вод. В нижележащих слоях насыщение воды кислородом было существенно выше и достигало 89 % в придонном слое, а температура воды – существенно ниже (–1,29...–1,01 °C) (табл. 4).

Измерения датчиком TDO RBR в подледном и придонном слоях на всех станциях 7 апреля показали минимальное содержание кислорода в подледном слое ст. S-4 вблизи сброса сточных вод (табл. 5). На всех станциях температура

Таблица 4. Температура воды и содержание растворенного кислорода (ПК) на разных глубинах на ст. S-4 на приливе 5 апреля 2025 г.

Table 4. Water temperature and dissolved oxygen (DO) content at different depths at station S-4 at high tide on April 5, 2025

Время Time	Глубина, м Depth, m	T, °C	ПК, % DO, %
10:30	0,9	–0,02	69
10:34	2,0	–1,29	81
10:37	3,0	–1,01	81
10:41	4,0	–1,06	79
10:44	5,0	–1,01	78
10:48	6,0	–1,05	89

Таблица 5. Температура воды и содержание растворенного кислорода (ПК) в подледном и придонном слоях станций в бухте Благополучия 7 апреля 2025 г. на отливе

Table 5. Water temperature and dissolved oxygen (DO) content in the sub-ice and bottom layers of stations in Blagopoluchiya Bay on April 7, 2025 at low tide

Станция Station	Время Time	Подледный слой Sub-ice layer		Придонный слой Bottom layer	
		T, °C	ПК, % DO, %	T, °C	ПК, % DO, %
S-5	15:38–15:42	0,35	87	–1,01	89
S-4	15:52–15:55	–0,02	58	–1,01	102
142	16:02–16:05	–0,01	95	–1,01	107
143	16:12–16:15	0,13	106	–0,88	100
144	16:22–16:26	–0,02	103	–0,94	105
145	16:33–16:37	–0,03	89	–1,00	102
146	16:44–16:48	–0,01	92	–0,97	98
147	16:56–16:59	0,01	98	–1,11	110

воды была заметно выше, а содержание кислорода ниже в подледном слое, чем в придонном, что свидетельствует о распространении сточных вод в подледном слое по акватории бухты.

Высокий процент насыщения воды кислородом в бухте Благополучия ниже слоя сточных вод может быть связан с развитием фитопланктона. Для эстуарных зон рек Белого моря в конце зимнего периода характерно высокое содержание кислорода в воде как на приливе, так и на отливе, что связывают с развитием фитопланктона [Мискевич, 2019, 2024]. В бухте Благополучия высокая обеспеченность питательными веществами [Калинкина и др., в печати] может способствовать активному фотосинтезу с выделением кислорода.

Изменение температуры и солёности в приливном цикле по результатам зондирования

Анализ вертикальных профилей температуры и солёности воды позволил установить, что сточные воды поселка Соловецкий распространяются по акватории бухты в подледном слое, нижняя граница которого идентифицируется по

уменьшению температуры и росту солёности на глубинах 1,2–1,3 м (рис. 7–9). Слой смешения сточных и морских вод с резким уменьшением температуры и увеличением солёности занимает глубины 1,3–2,3 м. На верхней границе этого слоя (глубины 1,3–1,4 м) температура воды достигает $+0,3...+0,4$ °C, а солёность не превышает 0,3–0,5 ‰. На нижней границе слоя смешения (глубины 1,7–2,3 м) значения температуры воды отрицательные и не превышают $-0,9$ °C, а значения солёности более 26 ‰. На полной воде в слое смешения отмечено понижение температуры воды до отрицательных значений и повышение солёности до 8–23 ‰.

Наиболее существенное уменьшение температуры воды (на $0,5–0,6$ °C) и увеличение солёности (на 20–23 ‰) в слое смешения между малой и полной водой обнаружено на прибрежных мелководных станциях и в центральной части бухты (рис. 8, 9). По мере удаления в сторону открытого моря изменения температуры и солёности в слое смешения в приливном цикле уменьшаются: на расстоянии 300 м от выпуска сточных вод температура в слое смешения между малой и полной водой меняется всего на $0,01–0,02$ °C, а солёность – на 5–8 ‰.

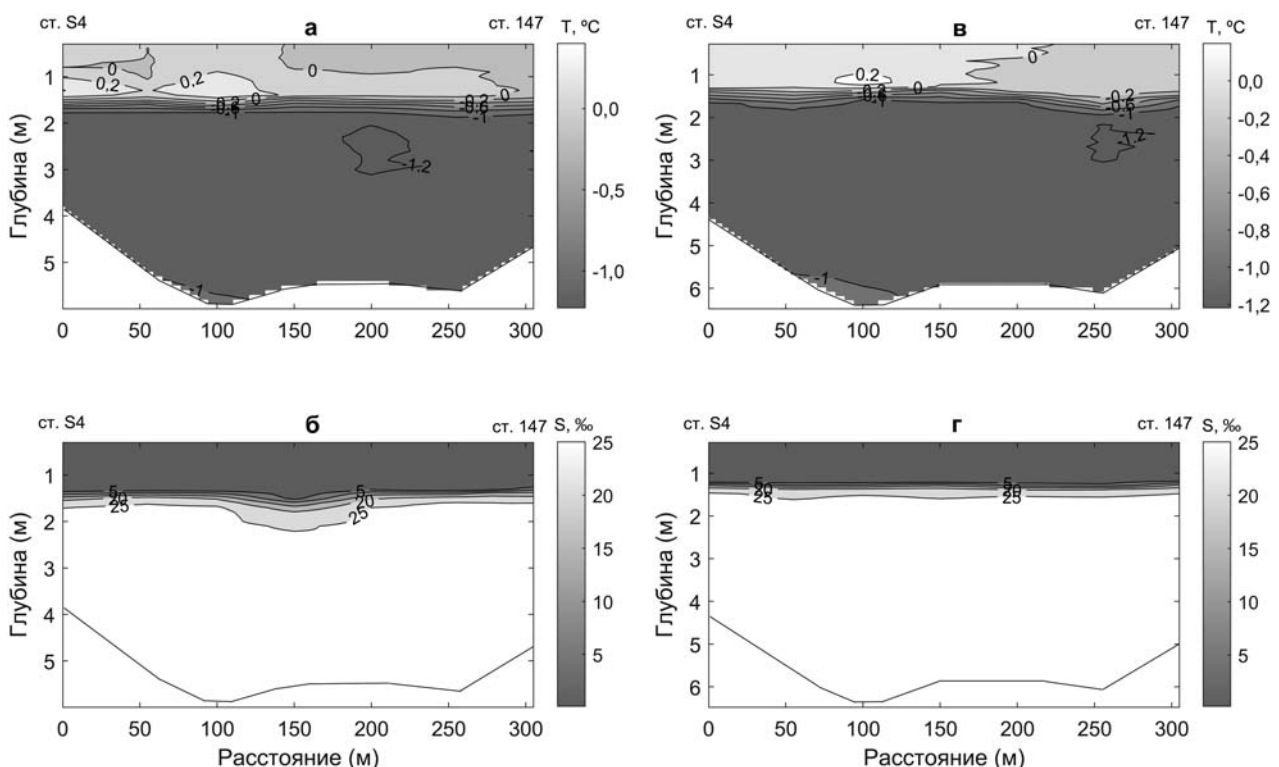


Рис. 7. Распределение температуры (а, в) и солёности (б, г) воды на станциях разреза от ст. S-4 до ст. 147 6 апреля 2025 г. на малой воде (07:54–08:30) (а, б) и полной воде (13:18–13:50) (в, г)

Fig. 7. Distribution of water temperature (а, в) and salinity (б, г) at stations along the section from station S-4 to station 147 on April 6, 2025 at low tide (07:54–08:30 AM) (а, б) and high tide (13:18–13:50 PM) (в, г)

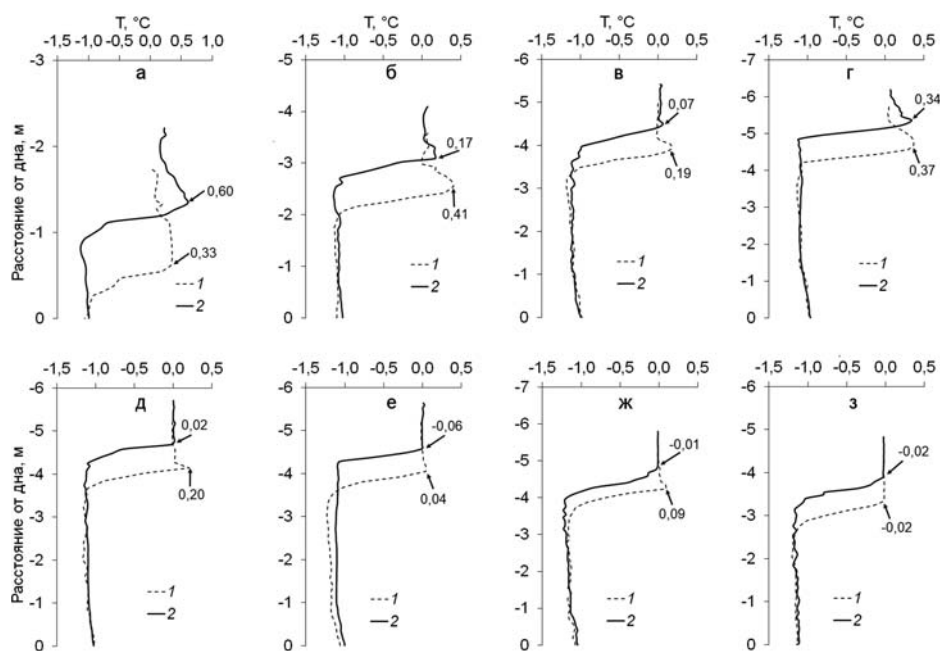


Рис. 8. Вертикальные профили температуры на станциях S-5 (а), S-4 (б), 142 (в), 143 (г), 144 (д), 145 (е), 146 (ж), 147 (з) 6 апреля 2025 г.:
1 – малая вода (07:54–08:30), 2 – полная вода (13:18–13:50). Цифры на рисунках – максимальные значения температуры на малой и полной воде

Fig. 8. Vertical temperature profiles at stations S-5 (a), S-4 (б), 142 (в), 143 (г), 144 (д), 145 (е), 146 (ж), 147 (з) on April 6, 2025:

1 – low tide (07:54–08:30 AM), 2 – high tide (1:18–1:50 PM). The numbers in the figures are the maximum temperature values at low and high tide

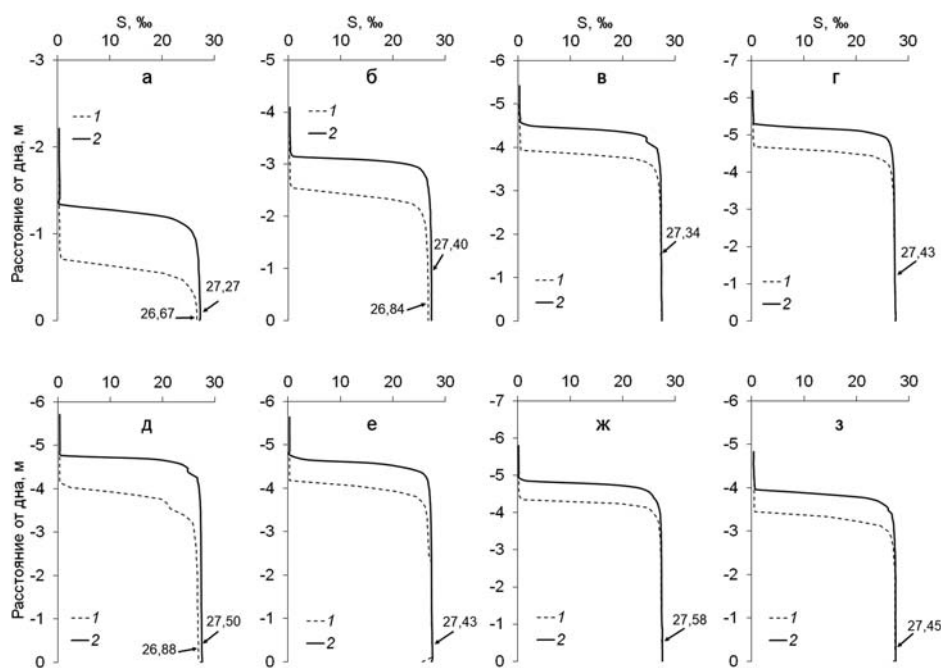


Рис. 9. Вертикальные профили солёности на станциях S-5 (а), S-4 (б), 142 (в), 143 (г), 144 (д), 145 (е), 146 (ж), 147 (з) 6 апреля 2025 г.:

1 – малая вода (07:54–08:30), 2 – полная вода (13:18–13:50). Цифры на рисунках – максимальные значения солёности на малой и полной воде

Fig. 9. Vertical salinity profiles at stations S-5 (a), S-4 (б), 142 (в), 143 (г), 144 (д), 145 (е), 146 (ж), 147 (з) on April 6, 2025:

1 – low tide (07:54–08:30), 2 – high tide (1:18–1:50 PM). The numbers in the figures are the maximum salinity at low and high tide

Выявленные особенности распределения сточных вод по акватории бухты (глубины слоев сточных вод, слоя смешения, сохранение стратификации водной толщи на всех фазах приливного цикла) следует учитывать при выборе глубин отбора проб и глубин установки датчиков автономных станций. Если требуется отбор проб и измерение температуры и содержания растворенного кислорода именно из слоя сточных вод, слоя смешения или вне этих слоев, предварительно рекомендуется провести профилирование водной толщи на станции на фазах полной и малой воды для выявления глубин слоев по показаниям температуры и солености. При измерениях в период открытой воды [Лукина и др., 2025] слой сточных вод по показаниям температуры и солености не идентифицировался, так как водная толща бухты хорошо перемешивалась под действием ветра. Роль льда, изолирующего водную толщу от ветрового перемешивания, в сохранении стратификации в устьевых областях рек, впадающих в заливы Белого моря, обсуждается также в работах [Терский и др., 2021, 2024]. Сохранение устойчивой вертикальной стратификации вод зимой при наличии ледяного покрова обнаружено и в дельтовых протоках р. Северной Двины в Белом море в зоне смешения речных и морских вод [Мискевич и др., 2022]. Оценка динамики зоны смешения морских и речных вод в устьевой области р. Онега приведена в [Справочно-аналитический..., 2023].

Потоки фотосинтетической солнечной радиации и коэффициент экстинкции

По показаниям мультипараметрического зонда RBR-Concerto установлено, что потоки солнечной радиации вблизи поверхности воды в полуденные часы 5 апреля 2025 г. достигали 100–1600 мкмоль/(м²·с), резко уменьшаясь до 35–45 мкмоль/(м²·с) на глубине 1 м и до близких к нулю значений на глубинах 2,5–3,0 м на всех станциях. Поскольку слой сточных вод присутствовал на всех станциях измерений

ФАР и не было проведено измерений потоков ФАР в водной толще вне зоны влияния сточных вод, пока не представляется возможным сопоставить ослабление ФАР именно за счет влияния сточных вод с фоновыми значениями.

Практически на всех станциях обнаружена существенная разница между значениями γ для малой и полной воды (табл. 6). Такая разница (как и отмеченные выше приливные вариации значений температуры и солености) косвенно свидетельствует о разбавлении сточных вод на приливе и частичном их выносе из бухты на отливе.

Максимальные значения γ как на малой, так и на полной воде получены для ст. S-4 и 142, расположенных наиболее близко к точке сброса сточных вод. Выявлено уменьшение величины γ по направлению к выходу из бухты и на малой, и на полной воде, что свидетельствует о наибольшем влиянии сточных вод на освещенность водной толщи в вершине бухты.

Заключение

Проведенные в бухте Благополучия (Соловецкие острова Белого моря) в начале апреля 2025 г. экспедиционные исследования позволили установить характер изменения температуры и солености воды, содержания растворенного кислорода, потоков солнечной радиации в толще воды в приливном цикле при наличии ледяного покрова. Установлено, что поток сточных вод (температура +0,3...+0,4 °С, соленость 0,3–0,5 ‰) распространяется в подледном слое по акватории бухты на расстояние более 300 м от места сброса. Ниже слоя сточных вод на глубинах 1,3–2,3 м идентифицируется слой смешения сточных и морских вод с резкими градиентами температуры и солености; температура и соленость морских вод ниже слоя смешения меняются слабо в приливном цикле (температура –1,1 °С, соленость 27,5 ‰). Выявлены существенные изменения температуры (уменьшение до отрицательных значений) и солености (увеличение до 8–23 ‰) воды в слое смешения на полной воде.

Таблица 6. Результаты расчета коэффициента экстинкции (м⁻¹) для периодов малой (МВ) и полной (ПВ) воды
Table 6. Results of calculating the extinction coefficient (m⁻¹) for periods of low tide (MB) and high tide (PB)

Станция / γ (м ⁻¹) Station / γ (м ⁻¹)	S5	S4	142	143	144	145	146	147
МВ	4,0	6,5	5,5	3,3	4,15	3,9	3,1	3,4
ПВ	3,1	5,1	3,7	3,3	2,5	2,7	2,86	2,7

Установлено, что в слое сточных вод содержание растворенного кислорода (60–70 %) заметно ниже, чем в придонном слое вне зоны влияния сточных вод (насыщение 90–130 %) на всех фазах прилива.

Выявленные особенности вертикальной структуры водной толщи в бухте (глубины слоя сточных вод, слоя смешения сточных и морских вод, сохранение стратификации на всех фазах прилива) следует учитывать при выборе глубин отбора проб и глубин установки автономных датчиков в период ледостава. Если требуется отбор проб и измерение температуры и содержания растворенного кислорода именно из слоя сточных вод, слоя смешения или вне этих слоев, предварительно рекомендуется провести профилирование водной толщи на станции на фазах полной и малой воды для выявления глубин слоев по показателям температуры и солености.

Резкое уменьшение потока солнечной радиации в слое сточных вод и слое смешения определяет низкую освещенность водной толщи, с близкими к нулю значениями солнечной радиации глубже 2–3 м. Аномально высокие значения коэффициента экстинкции в кутовой части бухты (5,5 и 6,5 м⁻¹ на станциях 142 и S4 соответственно) свидетельствуют о высокой мутности сточных вод. При этом как на полной, так и на малой воде зафиксировано почти двукратное уменьшение этого коэффициента по направлению от вершины бухты к выходу в море (от станции 143 к станции 147), что свидетельствует о хорошо выраженном максимуме концентрации сточных вод в вершине бухты. На всех станциях обнаружено существенное (в среднем около 30 %) уменьшение коэффициента экстинкции на полной воде по сравнению с малой водой, что указывает на частичный вынос сточных вод морским приливом.

Установленные особенности распределения сточных вод по акватории бухты в период ледостава в апреле 2025 г. позволили выявить зону наибольшего антропогенного влияния на экосистему бухты в зимний период (подледный слой) и спланировать полевые эксперименты на следующий зимний сезон 2026 г. Задачи на следующий полевой сезон включают установление границ зоны распространения сточных вод в сторону открытого моря, измерения потоков ФАР в водной толще вне зоны влияния сточных вод, длительные измерения автономными датчиками температуры и содержания растворенного кислорода в слое сточных вод и слое смешения в кутовой и мористой частях бухты.

Литература

Болгов М. В. Справочно-аналитический обзор гидрологического режима устьевой области реки Онега / Под ред. О. В. Горелиц, Г. С. Ермаковой, Г. Ш. Турсуновой. Воронеж: Воронеж. обл. тип., 2023. 334 с.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 58 с.

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 2. Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Б. Х. Глуховской, Ф. С. Терзиева. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 240 с.

Зырянов В. Н., Чебанова М. К. Гидродинамические эффекты при вхождении приливных волн в эстуарии // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 4. С. 379–386. doi: 10.7868/S0321059616040180

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 года // Арктика: экология и экономика. (В печати)

Лапина Л. Э. Динамика течений и особенности переноса консервативной примеси в устьевых областях приливных рек. Сыктывкар, 2001. 140 с.

Лоция Белого моря. Л.: Мин. обороны СССР, ГУНиО, 1983. № 4766. 344 с.

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

Лупачев Ю. В. Динамическое взаимодействие морских и речных вод в приливных устьях рек // Труды ГОИН. 1984. Вып. 172. С. 64–82.

Май Р. И., Фукс В. Р. Остаточные приливные явления в Белом море // Проблемы изучения, рационального использования и охраны ресурсов Белого моря: Мат-лы IX Междунар. конф. (г. Петрозаводск, 11–14 октября 2004 г.). Петрозаводск, 2005. С. 202–207.

Мискевич И. В., Котова Е. И., Нецветаева О. П. Особенности вертикальной структуры маргинального фильтра в устьях рек с устойчивым галоклином в зимний период на примере дельты Северной Двины // Успехи современного естествознания. 2022. № 11. С. 61–65. doi: 10.17513/use.37929

Мискевич И. В., Лещев А. В., Махнович Н. М., Мосеев Д. С., Нецветаева О. П. Короткопериодная изменчивость структуры маргинального фильтра в мезоприливном эстуарии малой реки в Белом море на примере устья р. Тамицы Онежского залива // Тенденции развития науки и образования. 2024. № 109-15. С. 142–145. doi: 10.18411/trnio-05-2024-808

Мискевич И. В., Лещев А. В., Мосеев Д. С., Лохов А. С. Гидролого-гидрохимические исследования устьев малых рек Белого моря в зимнюю межень 2019 года // Океанология. 2019. Т. 59, № 8. С. 1089–1092. doi: 10.31857/S0030-15745961089-1092

Погода и климат [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения: 05.08.2025).

Расписание погоды [Электронный ресурс]. URL: <https://rp5.ru/> (дата обращения: 05.08.2025).

Стратегия развития Соловецкого архипелага – уникального объекта духовного, историко-культурного и природного наследия как самостоятельного компонента Стратегии социально-экономического развития Архангельской области до 2030 года. Распоряжение Правительства Архангельской области от 16.07.2013 г № 310-РП.

Терский П. Н., Горин С. Л., Панченко Е. Д., Алабян А. М., Ахмерова Н. Д., Василенко А. Н., Иванов В. А., Крастынь Е. А., Куликова Ж. М., Мигунов Д. А., Попрядухин А. А., Фатхи М. О., Харламов М. А. Приливное устье реки Варзуги (Российская субарктика): первые сведения о зимнем гидрологическом режиме // Водные ресурсы. 2024. Т. 51, № 2. С. 145–156. doi: 10.31857/S0321059624020019

Терский П. Н., Панченко Е. Д., Горин С. Л., Агафонова С. А., Василенко А. Н., Куликова Ж. М., Попрядухин А. А., Алабян А. М. Исследования зимнего режима устьев рек Белого моря в 2017–2020 гг. // Океанология. 2021. Т. 61, № 6. С. 1006–1008. doi: 10.31857/S0030157421060162

Филатов Н. Н., Бахмет О. Н., Дружинин П. В., Меншуткин В. В., Назарова Л. Е. Оценка состояния и изменения эколого-социоэкономической системы Белого моря и водосбора // Вестник РФФИ. 2022. № 2(114). С. 102–118. doi: 10.22204/2410-4639-2022-114-02-102-118

Multimaps [Электронный ресурс]. URL: <https://multimaps.ru> (дата обращения: 05.08.2025).

References

Bolgov M. V. Reference and analytical review of the hydrological regime of the mouth area of the Onega River. Voronezh: Voronezh. obl. tip.; 2023. 334 p. (In Russ.)

Development strategy for the Solovetsky Archipelago – a unique site of spiritual, historical, cultural, and natural heritage as an independent component of the Strategy for the Socioeconomic Development of the Arkhangelsk Region until 2030. Order of the Government of the Arkhangelsk Region dated July 16, 2013, No. 310-RP. (In Russ.)

Filatov N. N., Bakhmet O. N., Druzhinin P. V., Menshutkin V. V., Nazarova L. E. Assessment of the current state and changes of the ecological and socio-economic system of White Sea and its catchment. *Vestnik RFFI = RFFI Journal*. 2022;2(114):102–118. (In Russ.). doi: 10.22204/2410-4639-2022-114-02-102-118

Glukhovskaya B. Kh., Terziev F. S. (eds.). Hydro-meteorology and hydrochemistry of the seas in the USSR. Vol. 2. White Sea. Iss. 1. Hydrometeorological conditions. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1991. 240 p. (In Russ.)

Kalinkina N. M., Galakhina N. E., Kostromin E. A., Usov N. V., Slastina Yu. L. Trophic status of Blagopoluchiy Bay (Solovetsky Islands of the White Sea)

in the summer of 2024. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy* (in press). (In Russ.)

Lapina L. E. Dynamics of currents and features of conservative components transport in the mouth areas of tidal rivers. Syktyvkar; 2001. 140 p. (In Russ.).

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 Blagopoluchiy 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.). doi: 10.25283/2223-4594-2025-2-287-299

Lupachev Yu. V. Dynamic interaction of sea and river waters in tidal estuaries. *Trudy GOIN = The SOI's Proceedings*. 1984;172:64–82. (In Russ.)

Mai R. I., Fuks V. R. Remaining tides in the White Sea. *Problemy izucheniya, ratsional'nogo ispol'zovaniya i okhrany resursov Belogo morya: Mat-ly IX mezhdunar. konf. (g. Petrozavodsk, 11–14 oktyabrya 2004 g.) = Issues of study, rational use and protection of resources of the White Sea: Proceed. of the IX int. conf. (Petrozavodsk, Oct. 11–14, 2004)*. Petrozavodsk; 2005. P. 202–207. (In Russ.)

Miskevich I. V., Kotova E. I., Netsvetaeva O. P. Peculiarities of the vertical structure of a marginal filter in the mouth of rivers with a stable halocline in winter on the example of the delta of the Northern Dvina. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*. 2022;11:61–65. (In Russ.). doi: 10.17513/use.37929

Miskevich I. V., Leshchev A. V., Makhnovich N. M., Moseev D. S., Netsvetaeva O. P. Short-term variability of the marginal filter structure in a mesotidal estuary of a small river in the White Sea on the example of the mouth of the Tamitsa River in Onega Bay. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya = Trends in the Development of Science and Education*. 2024;109-15:142–145. (In Russ.). doi: 10.18411/trnio-05-2024-808

Miskevich I. V., Leshchev A. V., Moseev D. S., Lokhov A. S. Hydrological and hydrochemical research of the mouths of the small rivers flowing to the White Sea in the winter low-water season of 2019. *Okeanologiya = Oceanology*. 2019;59(8):1089–1092. (In Russ.). doi: 10.31857/S0030-15745961089-1092

Multimaps. URL: <https://multimaps.ru> (accessed: 05.08.2025).

Pilot chart of the White Sea. Leningrad: Min. oborony SSSR, GUNiO, 1983. No. 4766. 344 p. (In Russ.)

Terskii P. N., Gorin S. L., Panchenko E. D., Alabyan A. M., Akhmerova N. D., Vasilenko A. N., Ivanov V. A., Krastyn E. A., Kulikova Zh. M., Migunov D. A., Popryadukhin A. A., Fatkhi M. O., Kharlamov M. A. The tidal estuary of the Varzuga River (Russian subarctic): first information about the winter hydrological regime. *Water Resources*. 2024;51(1):1–11. doi: 10.1134/S0097807823700677

Terskii P. N., Panchenko E. D., Agafonova S. A., Vasilenko A. N., Kulikova Z. M., Popryadukhin A. A., Alabyan A. M., Gorin S. L. Investigation of winter regime of the White Sea estuaries in 2017–2020. *Oceanology*. 2021;61(6):1076–1078. doi: 10.1134/S0001437021060163

The second assessment report of the Roshydromet on climate change and its consequences in the Russian Federation. Moscow: Roshydromet; 2014. 58 p. (In Russ.)

Weather and climate. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (accessed: 05.08.2025).

Weather schedule. URL: <https://rp5.ru/> (accessed: 05.08.2025).

Zyryanov V. N., Chebanova M. K. Hydrodynamic effects at the entry of tidal waves into estuaries. *Water Resources*. 2016;43(4):621–628. doi: 10.1134/S0097807816040187

Поступила в редакцию / received: 09.06.2025; принята к публикации / accepted: 28.08.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Здоровеннов Роман Эдуардович

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: romga74@gmail.com

Здоровеннова Галина Эдуардовна

канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник,
руководитель лаборатории гидрофизики

e-mail: zdorovennova@gmail.com

Толстиков Алексей Владимирович

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник,
руководитель лаборатории географии и гидрологии

e-mail: alexeytolstikov@mail.ru

Новикова Юлия Сергеевна

аспирант, младший научный сотрудник

e-mail: novyuliana@gmail.com

Богданов Сергей Рэмович

д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: Sergey.R.Bogdanov@mail.ru

Лукина Юлия Николаевна

д-р биол. наук, директор

e-mail: jlukina@list.ru

CONTRIBUTORS:

Zdorovennov, Roman

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

Zdorovennova, Galina

Cand. Sci. (Geog.), Leading Researcher,
Head of Hydrophysics Laboratory

Tolstikov, Alexey

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher,
Head of Geography and Hydrology Laboratory

Novikova, Iuliia

Doctoral Student, Junior Researcher

Bogdanov, Sergey

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher

Lukina, Yulia

Dr. Sci. (Biol.), Director