

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ И ВОДООБМЕН БУХТЫ БЛАГОПОЛУЧИЯ (СОЛОВЕЦКИЕ ОСТРОВА, БЕЛОЕ МОРЕ)

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

Институт водных проблем Севера — обособленное подразделение Карельского
научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 20 января 2026 г.

Для цитирования

Лукина Ю. Н., Богданов С. Р., Здорovenнов Р. Э. и др. Особенности гидродинамики и водообмен бухты Благополучия (Соловецкие острова, Белое море) // Арктика: экология и экономика. — 2026. — Т. 16, № 3. — С. 439—451. — DOI: 10.25283/2223-4594-2026-16-3-439-451.

На основании анализа данных натурных измерений температуры, солёности, мутности воды, потоков солнечной радиации в толще воды, течений выявлены особенности распределения сточных и морских вод в бухте Благополучия (Соловецкие острова, Белое море). Оценен период водообмена бухты, составивший 14 сут для периода открытой воды и более 30 сут для периода ледостава. Для условий закрытой бухты получена оценка эффективного коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии $K_x \sim 0,02 \text{ м}^2/\text{с}$, существенно меньшая типичных для шельфовых морей значений. Рассмотрены возможные механизмы переноса вод по акватории бухты.

Ключевые слова: Белое море, Соловецкие острова, природная среда Арктики, антропогенное воздействие, период водообмена, приливные явления, солёность воды, температура воды, солнечная радиация, течения.

Введение

Хрупкие морские экосистемы Арктики подвергаются растущему прессингу в условиях меняющегося климата [1—3] и нарастающего антропогенного воздействия [4; 5]. Прибрежная зона Арктики играет важную роль в биогеохимическом цикле, являясь основным получателем растущих потоков углерода при таянии вечной мерзлоты, эрозии берегов [6; 7]. Изменения экосистем прибрежной зоны Арктики остаются крайне слабо изученными в связи с отсутствием регулярных наблюдений с судов и небольшим количеством наземных исследовательских станций. Оценка современного состояния экосистем прибрежной зоны северных морей становится ак-

туальной задачей для обеспечения экологической безопасности в Мировом океане [8].

Малоизучены и прибрежные островные экосистемы Белого моря, расположенного вблизи очага наибольшего потепления в Арктике [9—11]. Соловецкие острова — крупнейший архипелаг Белого моря, расположенный в Онежском заливе. На берегах бухты Благополучия острова Большой Соловецкий находится Соловецкий монастырь — место паломничества и популярный объект туристической отрасли. Многофакторное антропогенное воздействие на экосистему бухты складывается в результате рекреационной нагрузки от паломническо-туристического потока, судоходства, деятельности аэропорта, хозяйственной деятельности поселка Соловецкий (сброс неочищенных сточных вод). Стабильно высокий уровень посещения острова туристами, строи-

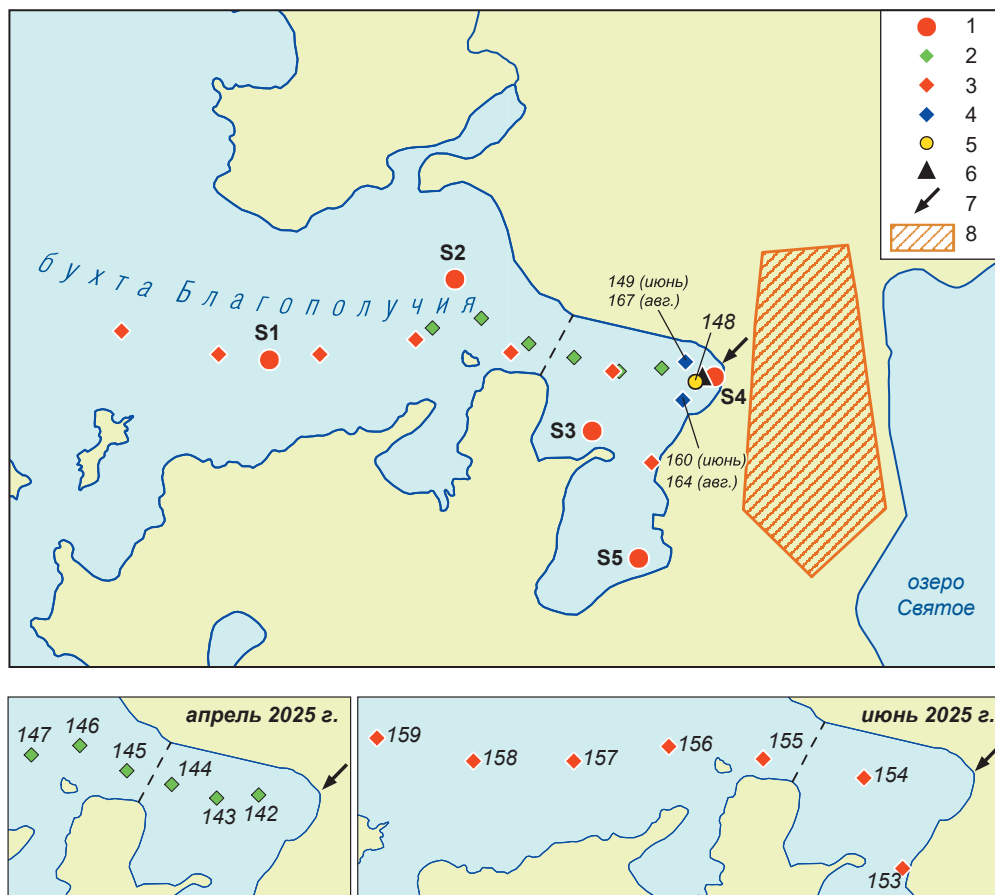


Рис. 1. Станции гидрофизических измерений в бухте Благополучия: 1 – базовые станции зондирования S1–S5 в августе 2024 г., апреле, июне и августе 2025 г., 2 и 3 – дополнительные станции в апреле и июне 2025 г. соответственно, 4 и 5 – ADCP в режиме HR и NM соответственно, 6 – термокоса в июне 2025 г., 7 – сброс сточных вод, 8 – Соловецкий монастырь. Черная пунктирная линия – граница между внутренней и внешней частями бухты. На врезках приведены станции зондирования в апреле и июне 2025 г.

Fig. 1. Hydrophysical measurement stations in Blagopoluchiya Bay: 1 – base sounding stations S1–S5 in August 2024, April, June, and August 2025, 2 and 3 – additional stations in April and June 2025, respectively, 4 and 5 – ADCP in HR and NM, respectively, 6 – TR-chain in June 2025, 7 – wastewater discharge, 8 – Solovetsky Monastery. The black dotted line is the boundary between the inner and outer parts of the bay. The insets show the sounding stations in April and June 2025

тельство новых гостиных, заведений общепита [12] способствуют возрастанию антропогенного воздействия на акваторию бухты Благополучия. Анализ условий функционирования экосистемы бухты необходим для оценки предельно допустимой антропогенной нагрузки на природный комплекс Соловецкого архипелага и обоснования охранного статуса территории.

Комплексные исследования прибрежных вод Соловецкого архипелага Белого моря начаты в августе 2024 г. и продолжены в 2025 г. сотрудниками Карельского научного центра РАН [10; 13–17]. Установлено, что наибольшее антропогенное воздействие испытывает внутренняя часть бухты, куда поступают неочищенные сточные воды поселка Соловецкий и где располагается стоянка маломерного флота [13; 16]. В связи с этим важной задачей становится выявление особенностей распространения сточных и морских вод по акватории бухты.

В данной статье проанализированы особенности распространения сточных и морских вод по акватории бухты, оценен период водообмена внутренней части бухты, рассмотрены возможные механизмы переноса вод. Анализ базируется на данных гидрофизических измерений, проведенных в бухте Благополучия в июне и августе 2025 г., а также полученных ранее в августе 2024 г. [17] и апреле 2025 г. [14].

Методы исследований

Гидрофизические измерения в бухте включали зондирования водной толщи мультипараметрическими зондами CTD-90m и RBR-Concerto, а также установку автономных станций для измерений температуры воды, давления, характеристик течений (рис. 1, табл. 1).

Автономная станция измерений температуры воды и давления (термокоса) устанавливалась вблизи сброса сточных вод 16–18 июня 2025 г.

Таблица 1. Гидрофизические измерения в бухте Благополучия в июне и августе 2025 г.
Table 1. Hydrophysical measurements in Blagopoluchiya Bay in June and August 2025

Дата и время измерений	Количество станций, номер станции	Вид измерений, описание измерений
16.06.2025 01:00 — 18.06.2025 17:40	1	Термокоса (датчик давления в придонном слое), расстояние датчиков ото дна 0,0—2,7 м через 0,3 м, интервал измерений — 1 мин
16.06.2025 01:00 — 17.06.2025 21:00	1, ст. 149	ADCP HR, размер ячейки 25 мм, количество ячеек 115
17.06.2025 21:00 — 18.06.2025 17:40	1, ст. 160	ADCP HR, размер ячейки 25 мм, количество ячеек 115
16.06.2025 01:00 — 18.06.2025 17:40	1, ст. 148	ADCP NM, размер ячейки 25 см, количество ячеек 20
16.06.2025 9:59—16:29 (отлив), 16:29—22:16 (прилив)	12	Зондирование CTD-90m и RBR-Concerto
13.08.2025 10:34 — 15.08.2025 17:00	1, ст. S4	ADCP NM, размер ячейки 25 см, количество ячеек 20
13.08.2025 10:42 — 14.08.2025 12:12	1, ст. 164	ADCP HR, размер ячейки 50 мм, количество ячеек 56
14.08.2025 12:12 — 15.08.2025 17:00	1, ст. 167	ADCP HR, размер ячейки 50 мм, количество ячеек 56
13.08.2025 12:40—14:18 (отлив), 18:30—19:55 (прилив)	5	Зондирование CTD-90m и RBR-Concerto

Трос с датчиками был заякорен и вертикально растянут за счет плава, погруженного на глубину 0,5 м. Датчик давления (TDR RBR) был установлен на дно и использовался для расчета изменений уровня воды. Датчики температуры и давления TR и TDR имеют диапазон по температуре $-5...+35^{\circ}\text{C}$, точность $\pm 0,002^{\circ}\text{C}$; диапазон по давлению 500 дБ, точность $\pm 0,01\%$. Для исключения влияния атмосферного давления была внесена поправка по данным метеостанции «Соловки» [18]. Также расчет уровня выполнен с помощью программы WXTide32 (v. 4.7).

Автономные станции измерений течений — два акустических доплеровских профилографа Aquadopp Nortek Profiler HR (ADCP) — устанавливались на дно на глубину порядка 4,5 м на расстоянии 20—40 м от сброса сточных вод в июне и августе 2025 г. (см. рис. 1). Излучатель приборов ориентировали вверх, расстояние ото дна до излучателя составляло 90 см. Один из приборов проводил измерения в режиме high resolution (HR), второй — normal mode (NM), интервал измерений 10 с. Точность измерения скорости течения прибором ADCP $\pm 0,5$ см/с, точность определения направления 2° при угле наклона корпуса прибора менее 20° . По данным ADCP оценены средние скорости течений и возможный перенос частиц жидкости.

Зондирования на станциях в июне и августе 2025 г. проведены на растущей и спадающей воде. Плотность воды рассчитана по уравнению состояния морской воды TEOS-10 [19] с учетом солёности, температуры и давления. Коэффициент ослабления фотосинтетической активной солнечной радиации (ФАР) в воде k_d оценен в предположении экспо-

нентального затухания потока. Мультипараметрические зонды имеют диапазон по температуре $-2...+35^{\circ}\text{C}$, точность по температуре $\pm 0,002^{\circ}\text{C}$, диапазон по потоку ФАР 400—700 нм, точность $\pm 2\%$.

Для оценки интегральных параметров, характеризующих перенос сточных вод в бухте, проведен сравнительный анализ средней по глубине солёности S на разных станциях. Для предварительных количественных оценок использовались значения S , усредненные по внутренней (см. условную границу на рис. 1) и внешней частям бухты. Количественно такой водообмен обычно характеризуется периодом водообмена (flushing time) F [20]. При этом простейшая оценка величины F для бухты объемом V может быть осуществлена по формуле [21]

$$C = \frac{FQ}{M}, \quad (1)$$

где M — масса воды в бухте; C — массовая концентрация трассера в бухте; Q — его расход, кг/с.

Роль трассера в данном случае играют сточные пресные воды; их концентрацию можно рассчитать по измеренной солёности во внутренней S и внешней S_0 частях бухты:

$$C = \frac{(S_0 - S)}{S_0}. \quad (2)$$

При средней глубине 4 м и горизонтальном размере $L \sim 150$ м объем V и массу воды M внутренней части бухты можно оценить как $\sim 10^5$ м³ и $\sim 10^8$ кг соответственно. Оценка средней солёности S была проведена по результатам вертикального зондиро-

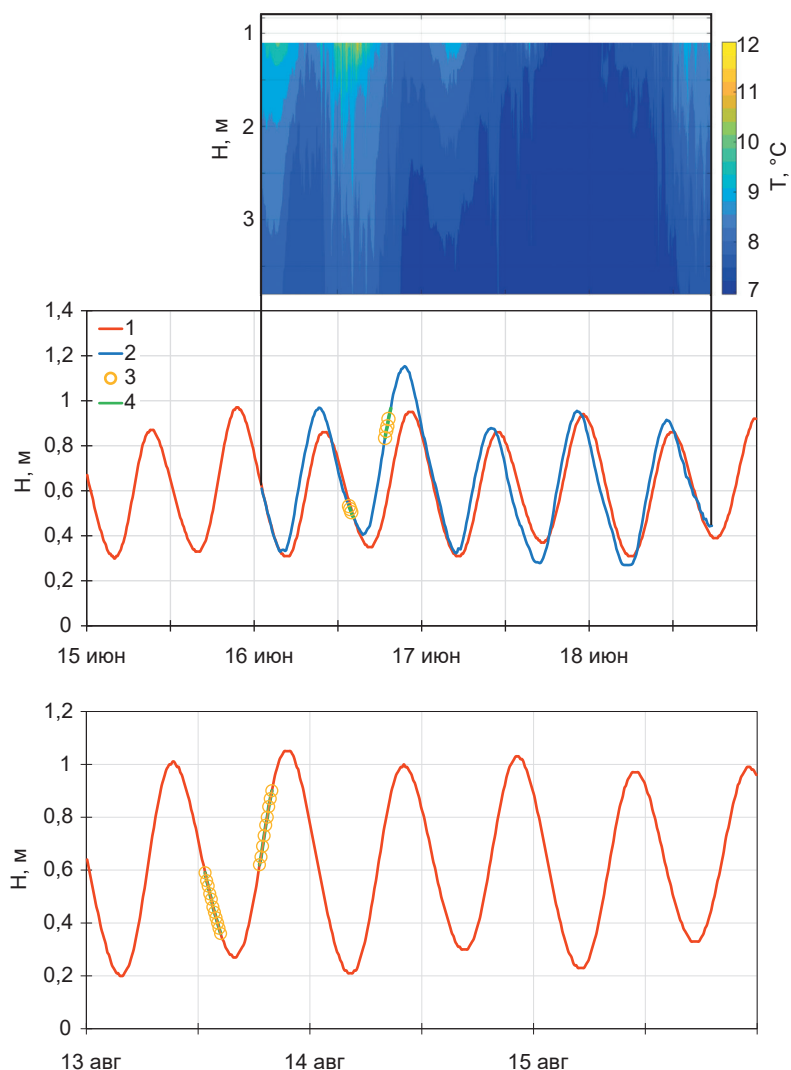


Рис. 2. Уровень моря в бухте Благополучия в июне и августе 2025 г., рассчитанный по программе WXTide32 (v. 4.7) (1) и измеренный автономным датчиком давления TDR RBR (2). Периоды зондирования RBR-Concerto (3) и CTD-90m (4). На врезке приведено изменение температуры воды в вершине бухты 16–18 июня 2025 г. Fig. 2. Sea level in Blagopoluchiya Bay in June and August 2025, calculated using the WXTide32 (v. 4.7) program (1) and measured by the TDR RBR autonomous pressure sensor (2). Sounding periods: RBR-Concerto (3) and CTD-90m (4). The inset shows the change in water temperature at the head of the bay on June 16–18, 2025

вания в моменты прилива и отлива на станциях внутренней и открытой частей бухты. Для приближенной оценки величины F использовано среднегодовое значение стока: $Q \sim 50$ тыс. м³ [22].

Результаты и обсуждение

Изменение уровня, температуры, солёности и мутности воды в приливном цикле

Величина полусуточного прилива в бухте 15–18 июня составляла 0,55–0,75 м, 13–15 августа — 0,7–0,8 м (рис. 2). Реальный ход уровня немного отличался от расчетного (расхождение величины прилива 0,1–0,2 м, время наступления фаз отличалось на 15–40 мин), что отражало влияние погодных условий и особенностей батиметрии бухты.

Измерения на термокесе позволили установить, что изменчивость температуры воды в бухте формируется не только вследствие притока

сточных вод и приливной динамики, но и под влиянием других факторов. В частности, 17–18 июня 2025 г. наблюдался подъем холодных (температура 7,0–7,2°C) глубинных вод к поверхности (апвеллинг), сгладивший полусуточную приливную изменчивость (см. рис. 2).

Зондирования в июне и августе 2025 г. показали, что сточные воды, смешиваясь с морскими, распространялись в верхнем слое водной толщи бухты. На отливе идентифицировался слой смешения сточных и морских вод до глубин 1,5–2,5 м по повышенным значениям температуры и пониженным значениям солёности. На приливе происходило поступление морских вод в бухту, что способствовало перемешиванию сточных и морских вод, и значения температуры в слое смешения понижались, а значения солёности повышались. В частности, в июне на отливе температура воды в слое смешения сточных и морских вод достигала 11–12°C (рис. 3а), солёность составляла 22–24‰ (рис. 3в), увеличиваясь от вершины бухты к выходу в открытое море; температура морской воды (глубже 1,5–2,5 м) была заметно ниже и не превышала 6–8°C, а солёность была существенно выше и достигала 26–27‰. Плотность воды в слое смешения на отливе составляла 1016 кг/м³ в вершине бухты и увеличивалась до 1019 кг/м³ в мористой части акватории (станция 159, рис. 3д). Плотность морской воды глубже слоя смешения достигала 1020–1021 кг/м³. На приливе температура воды верхнего слоя понизилась до 9,0–10,5°C (рис. 3б), а солёность повысилась до 25,5–26,5‰ (рис. 3г) вследствие притока морских вод. На приливе плотность воды в слое смешения увеличилась до 1020 кг/м³ (рис. 3е). Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что пресные сточные воды существенно более легкие, чем морские, и распространяются в верхнем слое бухты. На

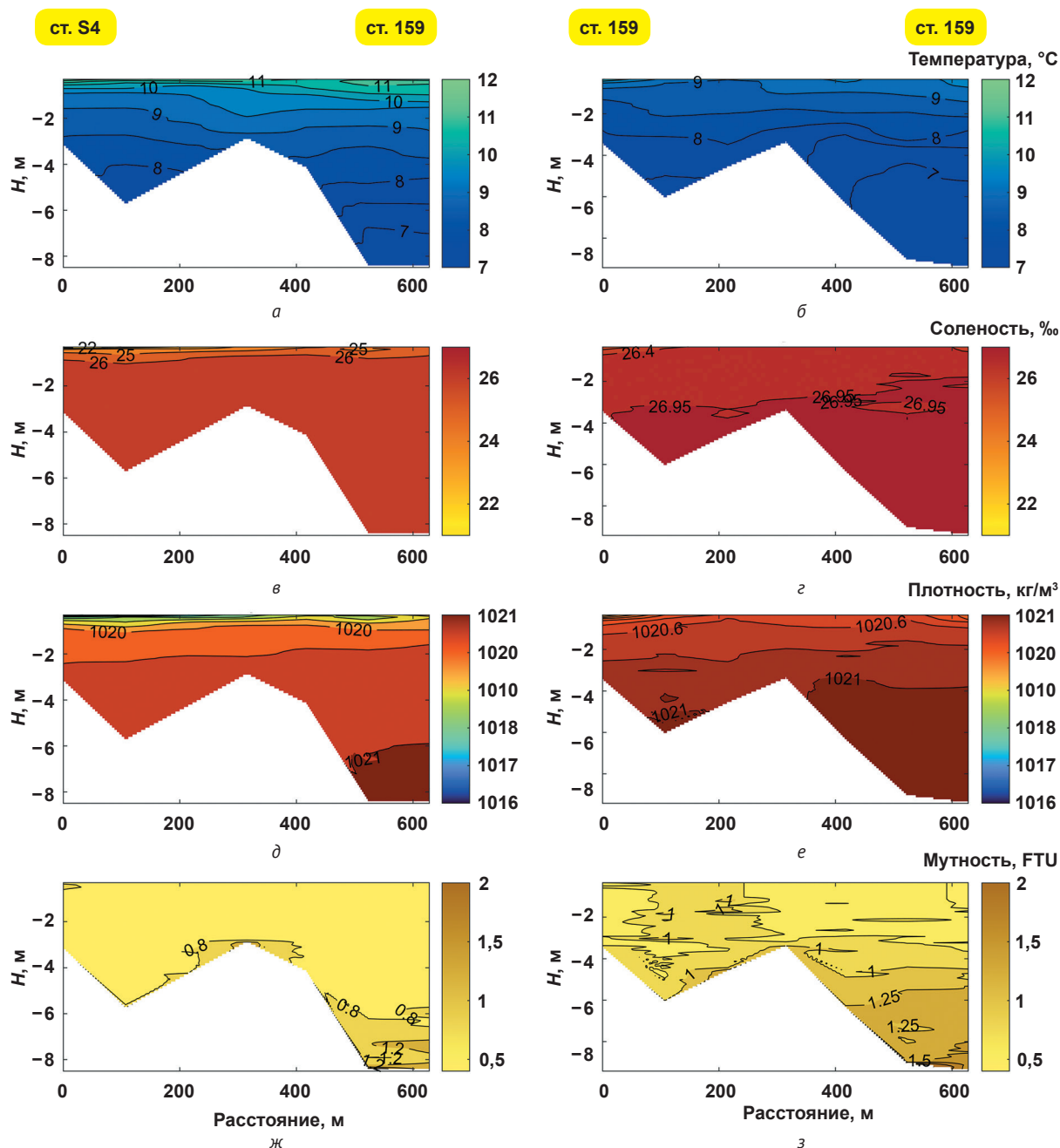


Рис. 3. Распределение температуры (а, б), солёности (в, г), плотности (д, е) и мутности (ж, з) воды на отливе (левые панели) и приливе (правые панели) 16 июня 2025 г.

Fig. 3. Distribution of temperature (a, б), salinity (в, г), density (д, е) and turbidity (ж, з) of water at low tide (left panels) and high tide (right panels) on June 16, 2025

приливе происходит интенсивное смешивание сточных и морских вод в верхней части водного столба, а на отливе — вынос смешанных вод за пределы бухты. Небольшие скорости течений не препятствуют оседанию частиц взвеси из сточных вод и ее аккумуляции в акватории, о чем свидетельствуют повышенные значения мутности воды придонных слоев (рис. 3ж и 3з). Измерения в июне 2025 г. показали, что на приливе концентрация взвешенного вещества увеличивалась по всему водному столбу

(рис. 3з), что можно считать косвенным свидетельством поступления загрязняющих веществ из прилегающей морской акватории. Также увеличение мутности придонного слоя бухты может происходить вследствие взмучивания донных отложений в области реверсивных течений [23].

Оптические свойства воды в бухте

Значения коэффициента ослабления ФАР в воде в июне и августе 2025 г. приведены в табл. 2. В июне

Таблица 2. Значения коэффициента ослабления солнечной радиации (м^{-1}) в слоях воды в бухте Благополучия на станциях S1—S5 на приливе (П) и отливе (О)

Table 2. Values of the solar radiation attenuation coefficient (м^{-1}) in water layers in Blagopoluchiya Bay at stations S1—S5 at high tide (П) and low tide (О)

Станция	Фаза прилива	Глубины слоя, м							
		0—1	1—2	2—3	3—4	4—5	5—6	6—7	7—8
Июнь									
S1	П	1,05	0,87	0,47	0,45	0,47	0,47	1,08	2,81
	О	0,60	0,58	0,47	0,41	0,49	0,31	0,53	0,52
S2	П	1,33	0,30	0,40	0,38	0,78			
	О	0,76	2,00						
S3	П	2,04	0,78	0,30					
	О	1,37	1,32	0,17					
S4	П	2,16	0,37	0,74	0,42				
	О	1,76	0,85	0,42	1,78				
S5	П	0,65							
	О	1,83							
Август									
S1	П	1,64	0,97	0,34	0,64	0,79	1,20	0,76	0,53
	О	2,74			0,27	0,52	0,41	0,61	
S2	П	1,13	0,60						
	О	1,09	0,86						
S3	П	1,95	0,94	1,65					
	О	1,90	0,42						
S4	П	0,60	0,86	1,16	3,75				
	О	2,12	0,58	0,47	0,51				
S5	П	0,94	1,13						
	О	0,17	0,80						

на отливе на станциях во внутренней части бухты (станции S3—S5) значения коэффициента экстинкции (1,37—1,83 м^{-1}) были больше, чем на станциях S1 и S2 (0,59—0,76 м^{-1}), удаленных в сторону моря на 300—500 м от сброса сточных вод. На приливе на всех станциях за исключением станции S5 коэффициент экстинкции был больше, чем на отливе, его максимальные значения достигали 2,04—2,16 м^{-1} вблизи сброса сточных вод. В придонных слоях некоторых станций на приливе значения коэффициента экстинкции увеличивались, например, на станции S5 на приливе значения коэффициента были почти в 2,5 раза выше, чем на отливе.

В летний период коэффициент экстинкции верхнего слоя воды был существенно ниже (до 3,7 м^{-1}), чем в апреле в условиях ледостава (до 6,5 м^{-1}) [14], что является показателем более эффективного разбав-

ления сточных вод и их выноса за пределы бухты в условиях открытой воды. В период ледостава судоходство в прилегающей к бухте морской акватории не осуществляется, и единственным источником загрязнения вод бухты можно считать сброс сточных вод. В период открытой воды, напротив, большие значения коэффициента экстинкции зачастую наблюдались именно на приливе, возможно, вследствие поступления в бухту загрязненных вод из прилегающей морской акватории, также испытывающей выраженное антропогенное воздействие (судоходство).

Период водообмена бухты, оценка коэффициента горизонтальной диффузии

Для оценки интегральных параметров, характеризующих перенос сточных вод в бухте, был проведен сравнительный анализ средней по глубине солёности S на разных станциях внутренней и внешней частей бухты по всему доступному массиву данных (август 2024 г., апрель, июнь и август 2025 г.). Во всех четырех сериях измерений отмечено увеличение усредненного по двум фазам приливного цикла значения S от внутренней части бухты в сторону открытого моря (табл. 3).

Величина C в период полной воды ожидаемо принимает меньшие значения, чем на малой воде. Значения C оказались весьма вариативны и чувствительны к выбору станций, по которым проводилось усреднение (например, при исключении из расчета по июню 2025 г. станции S5 значение C на малой воде уменьшается в два раза, с 0,027 до 0,014). Этот факт может свидетельствовать о неравномерности распределения сточных вод и загрязнений в акватории бухты. Нельзя также исключать влияние переменности стока Q на существенные вариации средних концентраций солёности и соответственно величины C .

Обращают на себя внимание и значительные вариации количественной разницы ΔC в перио-

Таблица 3. Средняя по глубине солёность (‰), осредненная по станциям измерений во внутренней и внешней частях бухты на приливе и отливе, по результатам 4 серий измерений, и оценки C **Table 3. Average salinity by depth (ppm), averaged over measurement stations in the inner and outer parts of the bay at high tide and low tide, based on the results of four (4) series of measurements and the C estimation**

Период	Внутренняя часть бухты			Внешняя часть бухты			C		
	Прилив	Отлив	Среднее	Прилив	Отлив	Среднее	Прилив	Отлив	Среднее
Август 2024 г.	24,70	25,11	24,90	24,63	25,81	25,22	−0,003	0,027	0,013
Апрель 2025 г.	19,41	18,55	18,98	21,40	18,81	20,10	0,093	0,014	0,056
Июнь 2025 г.	26,62	25,86	26,24	26,90	26,57	26,73	0,010	0,027	0,018
Август 2025 г.	26,38	23,61	24,99	26,37	25,92	26,15	0,000	0,090	0,040

ды приливов и отливов в сезон открытой воды. Так, если в июне 2025 г. величина $\Delta C / \bar{C}$ составляла примерно 0,9 (что соответствует более чем двукратному снижению на приливе), то в августе 2024 и 2025 гг. этот параметр был близок к 0,5, поскольку солёность в обеих частях бухты была практически одинакова. Такая августовская аномалия может быть следствием загрязнения внешней части бухты. Но в качестве альтернативной причины нельзя исключать и вариации асимметрии прилива [24]. Для разрешения дилеммы необходимо сравнительное исследование семейства вертикальных профилей, точно привязанных к фазам цикла, что будет учтено при планировании следующей экспедиции.

При использовании для C характерного для лета значения 0,02 в период водообмена внутренней части бухты получена оценка 14 сут. В случае наличия льда значение величины C существенно — в 2,5 раза — увеличивается. Соответственно период водообмена внутренней части бухты может составлять более месяца, что может способствовать накоплению сточных вод во внутренней части бухты.

Если предположить, что перенос чвстиц имеет диффузионный характер, с использованием представления периода водообмена как $F \sim L^2 / K_x$, для эффективного коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии получаем оценку $K_x \sim 0,02$ м²/с, весьма скромную по сравнению, например, со значением $K_x \sim 10^2$ м²/с для европейских шельфовых морей [21]. При этом, однако, следует иметь в виду, что приведенная оценка величины K_x несколько искусственна: как отмечается в [24], «диффузионная» составляющая переноса в большей степени обусловлена корреляцией горизонтальная скорость — солёность в приливном цикле, чем турбулентным горизонтальным переносом как таковым, и обычно ассоциируется с приливной накачкой (tidal pumping).

О механизмах переноса вод по акватории бухты

Для получения более точных оценок величины F и других параметров, связанных с переносом приливов, необходимо детально рассмотреть основ-

ные механизмы этого переноса. В настоящее время считается, что таких механизмов два. Первый из них, уже упомянутый механизм приливной накачки (tidal pumping), является собственно приливым и связан с периодическими изменениями интенсивности перемешивания (периоды максимальных прилива/отлива vs периоды малой и полной воды). Сам перенос при этом связан с повышенной/пониженной солёностью на приливе/отливе [25; 26]. Второй механизм обусловлен возникновением остаточных циркуляций [24; 25; 27]. Как отмечается в [26], циркуляционный механизм обычно доминирует в глубоких эстуариях со слабыми приливами, а механизм tidal pumping доминирует на мелководьях с сильным приливом.

Следует отметить, что относительные вклады двух указанных механизмов в процесс переноса определяют особенности стратификации водной массы. Так, в рамках простейшего приближения прилив как таковой учитывается лишь как источник вертикального и горизонтального турбулентного переноса в уравнении для усредненного по приливному циклу импульса [28; 29]. При этом наличие или отсутствие стратификации определяется балансом между стабилизирующим действием циркуляции (связанной с продольным градиентом давления) и приливым перемешиванием. Для случая простейшей геометрии при рассмотрении этого баланса выведены безразмерные критерии, определяющие характер стратификации. Один из них — горизонтальное число Ричардсона Ri_x [24], или параметр Симпсона [29]:

$$Ri_x = \frac{\beta g \frac{d\bar{S}}{dx} h^2}{C_D u_t^2}. \quad (3)$$

Здесь $\beta \approx 7,710^{-4}$ psu^{−1} — параметр, характеризующий зависимость плотности от солёности в упрощённом уравнении состояния $\rho = \rho_0(1 + \beta S)$; C_D — коэффициент придонного трения (bottom drag coefficient); u_t — характерная скорость прилива. При малых значениях этого параметра ($Ri_x < 0,1$) водная

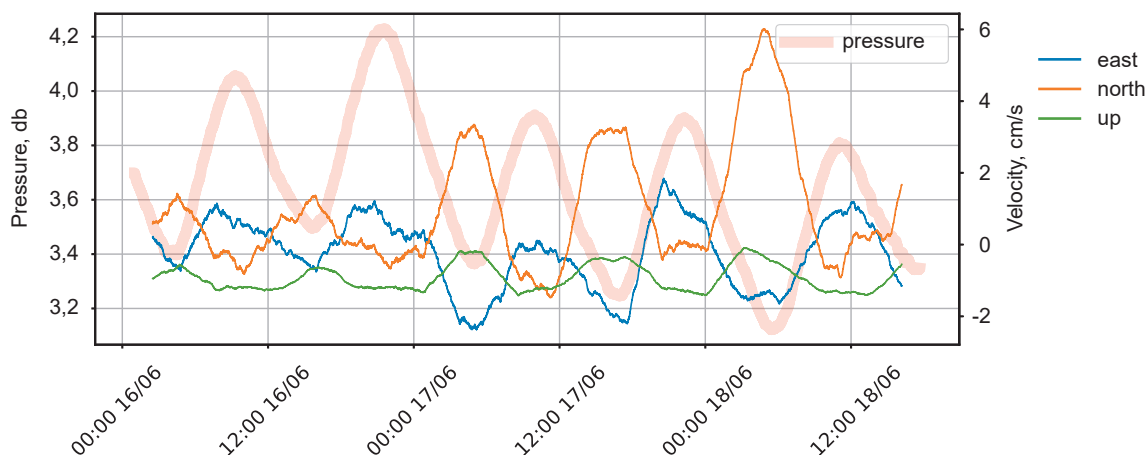


Рис. 4. Динамика усредненных (по 3 ч) компонент скорости на расстоянии 2,75 м от излучателя (глубина примерно 1 м), станция 148. Для сопоставления приведена также динамика уровня (полупрозрачная кривая, условные координаты)
Fig. 4. Variation of averaged (over 3-hour) velocity components at a distance of 2,75 m from the transducer (approx. 1-m depth), station 148. For a comparison, the level fluctuation (semitransparent curve, conventional coordinates) is added

масса остается перемешанной, стратификация не наблюдается.

Бухта Благополучия характеризуется сложными береговой линией и батиметрией, поэтому предсказательные возможности приведенной формулы весьма ограничены. Соответствующие количественные оценки затруднены также сложностью строгого количественного расчета продольного градиента солёности. Тем не менее для величины dS/dx могут быть получены приближенные оценки на основе проведенных измерений на разрезах (см. табл. 3). Например, по июньским данным 2025 г. при длине разреза порядка 300 м обнаружено изменение солёности на $\sim 0,3\text{‰}$, так что для dS/dx получаем оценку $\sim 10^{-3} \text{‰/м}$.

Оценка второго параметра в формуле (3) — приливной скорости u_t — достаточно проблематична в связи с нерегулярным характером поля скорости; для иллюстрации на рис. 4 приведены данные по горизонтальным компонентам скорости, полученные с помощью ADCP для всего периода наблюдений в июне 2025 г. и дополненные дисперсионными эллипсами (velocity variance ellipses, рис. 5). Тем не менее при использовании трехчасового усреднения для величины u_t получаются достаточно воспроизводимые в разных экспериментальных сериях значения $\sim (2\text{—}5) \text{ см/с}$.

С использованием приведенных выше оценок для критерия Симпсона из формулы (3) получаем $Ri_x \sim 100$, что с большой вероятностью указывает на стратификацию водной массы в бухте Благополучия, а также, косвенно, на циркуляционный характер процесса переноса примеси. Этот вывод подтверждается прогрессивно-векторными диаграммами (ПВД) в горизонтальной плоскости. Для примера на рис. 6 приведена ПВД по июньским данным 2025 г. При этом

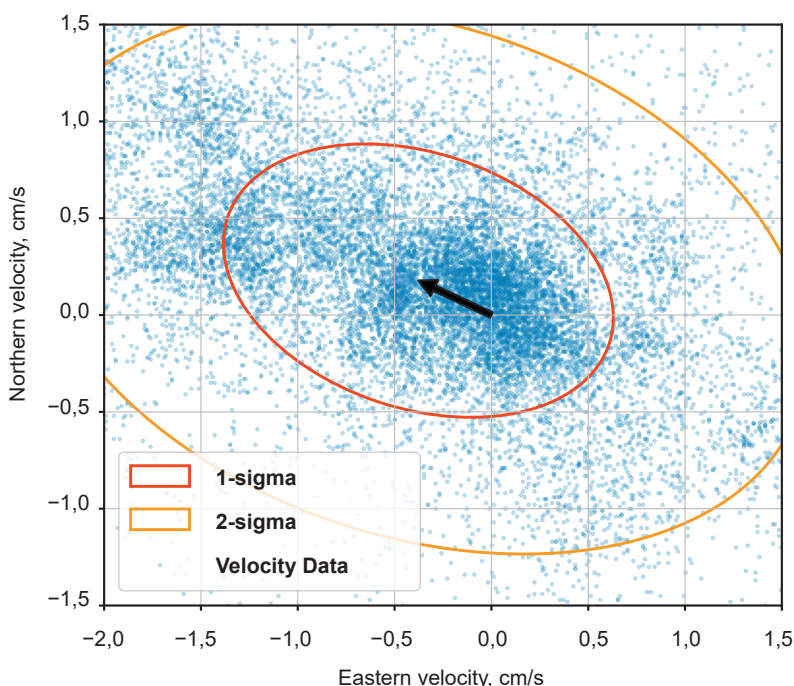


Рис. 5. Массив измеренных значений горизонтальных компонент скорости и соответствующие дисперсионные эллипсы. По данным 16–17 июня 2025 г., расстояние до дна 2,15 м, станция 149. Стрелкой обозначена средняя по всему промежутку измерений скорость
Fig. 5. An array of measured horizontal velocity components and the corresponding dispersion ellipses. According to data from June 16–17, 2025, the distance to the bottom is 2,15 m, station 149. The arrow indicates the average velocity over the entire measurement interval

характерные скорости квазиупорядоченного переноса, обусловленного остаточной циркуляцией, варьируются в пределах нескольких мм/с (см. также рис. 4).

Во многих случаях остаточные течения, обнаруживаемые при анализе ПВД, имеют классический характер: циркуляция представлена двумя слоями, при этом течение направлено к берегу в придонной области и в сторону открытого моря у поверхности. При этом оценить толщину поверхностного слоя не удается, поскольку последние ячейки зоны сканирования располагаются близко к поверхности воды. В подобных условиях показания искажаются за счет лепестковых отражений (sidelobe reflection) и должны быть исключены. Доля таких ячеек для трехлучевого профилографа с лучевым углом 25° составляет не менее 10% [30].

Несмотря на убедительные свидетельства присутствия остаточных течений, остаются открытыми вопросы об их интенсивности и пространственной конфигурации. В частности, если для скорости циркуляции U использовать значения порядка нескольких мм/с, то для периода водообмена L/U в малой бухте получаем оценку порядка одного дня, что на порядок меньше того значения, которое было получено на основе анализа продольных изменений солёности. Кроме того, следует отметить значительную вариативность циркуляционных течений как по величине, так и по направлению. Так, ПВД в августе 2025 г. также указывает на присутствие упорядоченного дрейфа, однако направление этого дрейфа, которое в июне в придонных слоях было юго-восточным, сменилось на юго-западное. При этом в отличие от июньских данных не было обнаружено слоев с противоположным направлением движения.

Отличие ПВД для разных серий измерений может быть обусловлено как изменчивостью циркуляционных течений во времени, так и их существенной пространственной неоднородностью. Для изучения второго из этих факторов и — косвенно — для оценки горизонтальной протяженности циркуляционных структур в июне и августе 2025 г. было осуществлено сканирование двумя разнесенными по горизонтали ADCP. При этом обнаружено, что характер ПВД существенно изменяется даже при относительно небольшом (на несколько десятков метров) горизонтальном перемещении приборов. В целом эти данные могут свидетельствовать о том, что обнаруженный дрейф является результатом существования квазиупорядоченных вихрей с относительно

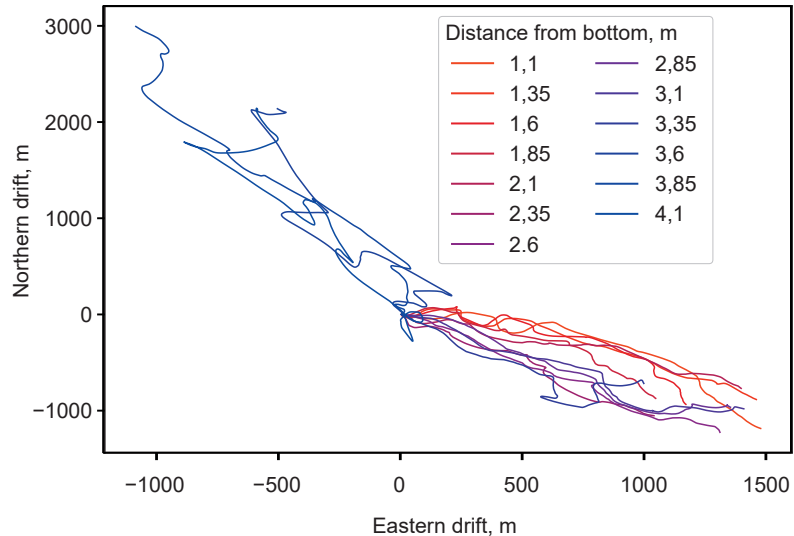


Рис. 6. Прогрессивно-векторная диаграмма на горизонтальной плоскости, построенная по измерениям компонент скорости 16–18 июня 2025 г. на станции 148

Fig. 6. Progressive vector diagram on the horizontal plane constructed from velocity components measured in the June 16–18, 2025 at station 148

небольшими горизонтальными размерами. Подобные вихри могут способствовать образованию застойных зон и уменьшению выноса загрязняющих веществ из бухты.

В [24; 25] показано, что характер циркуляции зависит не только от средней интенсивности перемешивания, индуцированного приливом, но определяется и нелинейными эффектами, обусловленными асимметрией приливов, корреляцией турбулентная вязкость — осциллирующий сдвиг скорости (ESCO, Eddy viscosity-Shear Covariance). Такие эффекты приводят, в частности, к осцилляциям стратификации в рамках приливного цикла. Поскольку бухта Благополучия относительно мелководна ($\sim 4\text{--}6$ м), можно ожидать существенного влияния придонного пограничного слоя на турбулентный перенос и соответственно существования эффекта ESCO. Вариации стратификации, как отмечено выше, уже были выявлены для периода открытой воды. Однако для более полного изучения асимметрии прилива и осцилляций стратификации необходимо сравнительное исследование семейства, включающего как минимум 4–6 вертикальных профилей, точно привязанных к фазам цикла.

Зимой лед ингибирует асимметрию прилива и ESCO, что существенно ослабляет перемешивание. Для подтверждения этого вывода планируются дополнительные серии измерений с установкой ADCP на льду за пределами внутренней бухты.

Весьма актуальной остается задача изучения горизонтальной структуры остаточных течений. В этой связи предполагается продолжить серию экспериментов с использованием двух разнесенных по горизонтали ADCP.

Заключение

Гидрофизические измерения, проведенные в бухте Благополучия в 2024 и 2025 гг., позволили выявить особенности распространения сточных и морских вод по акватории бухты.

Характер распространения сточных вод анализировался по данным измерений температуры, солености, мутности воды, потоков солнечной радиации в толще воды, скоростей течений. Установлено, что в условиях открытой воды сточные воды распространяются в верхнем слое, смешиваются с морскими и образуют слой смешения, идентифицируемый до глубин 1,5—2,5 м по пониженным значениям солености и повышенным значениям температуры. На приливе соленость увеличивается по всей водной толще вследствие притока морских вод в бухту. Обнаруженные повышенные значения мутности воды в придонных слоях бухты в июне и августе 2025 г. свидетельствуют о том, что взвешенное вещество оседает и накапливается в локальных углублениях дна как внутренней, так и внешней акватории бухты. Измерения в июне 2025 г. показали, что на приливе концентрация взвешенного вещества увеличивалась не только в придонном слое, но по всей водной толще, что косвенно свидетельствует о том, что в бухту могут поступать загрязненные воды из прилегающей морской акватории.

В период открытой воды большие значения коэффициента экстинкции зачастую наблюдались на приливе, что также подтверждает предположение о возможном поступлении загрязненных морских вод в бухту. Уменьшение коэффициента экстинкции верхнего слоя воды в июне и августе ($2,7\text{—}3,7\text{ м}^{-1}$) по сравнению с условиями ледостава (до $6,5\text{ м}^{-1}$) является показателем более эффективного разбавления сточных вод морскими и их выноса за пределы бухты в условиях открытой воды.

По измеренной солености во внутренней и внешней частях бухты проведена оценка периода водообмена F внутренней части бухты. Результаты оказались весьма вариативными и чувствительными, например, к выбору станций, по которым проводилось усреднение, что может свидетельствовать о неравномерности распределения загрязнений в акватории внутренней части бухты. В среднем для периода водообмена F получено значение около 14 сут для периода открытой воды. В предположении диффузионного описания переноса это соответствует весьма малым значениям коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии $K_x \sim 0,02\text{ м}^2/\text{с}$, существенно меньшим типичных для шельфовых морей значений ($K_x \sim 10^2\text{ м}^2/\text{с}$). Оценка F для периода ледостава в 2,5 раза больше и может превышать месяц.

Рассмотрены возможные механизмы переноса вод по акватории бухты. Показано существование остаточных течений, однако вопросы об их интенсивности и пространственной конфигурации остаются открытыми. Сформулировано предположение о возможном существовании в бухте системы ква-

зиупорядоченных вихрей с относительно небольшими горизонтальными размерами. Необходимы серии дополнительных измерений гидрофизических параметров для проверки сформулированных предположений.

Финансирование

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

Благодарность

Авторы признательны О. В. Дерусовой за помощь в подготовке рисунков.

Литература/References

1. Lind S., Ingvaldsen R. B., Furevik T. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import. *Nature Climate Change*, 2018, no. 8, pp. 634—639.
2. Falardeau M., Bennett E. M. Towards integrated knowledge of climate change in Arctic marine systems: A systematic literature review of multidisciplinary research. *Arctic Science*, 2020, no. 6 (1), pp. 1—23.
3. Тишков А. А., Тумова С. В. Пожары в Арктической зоне Российской Федерации: новые оценки, роль изменений климата и возможные последствия // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 1. — С. 98—108.
4. Tishkov A. A., Titova S. V. Fires in the Arctic zone of the Russian Federation: new assessments, the role of climate change and possible consequences. *Arctic: Ecology and Economy*, 2025, vol. 15, no. 1, pp. 98—108. (In Russian).
5. Kirdeyanov A. V., Krusic P. J., Piermattei A. et al. Ecological and conceptual consequences of Arctic pollution. *Ecology Letters*, 2020, no. 23 (12), pp. 1827—1837. DOI: 10.1111/ele.13611.
6. Bartsch A., Pointner G., Efimova A. et al. Expanding infrastructure and growing anthropogenic impacts along Arctic coasts. *Environmental Research Letters*, 2021, no. 16 (11), pp. 115013.
7. Fritz M., Vonk J., Lantuit H. Collapsing Arctic coastlines. *Nature Climate Change*, 2017, no. 7, pp. 6—7.
8. Irrgang A. M., Bendixen M., Farquharson L. M. et al. Drivers, dynamics and impacts of changing Arctic coasts. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, vol. 3, no. 1, pp. 39—54.
9. Гурлев И. В., Макошко А. А., Малыгин И. Г. Экологические проблемы Арктической зоны России на примере Ямало-Ненецкого автономного округа // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 3. — С. 370—383.
10. Gurlev I. V., Makosko A. A., Malygin I. G. Ecological problems of the Russian Arctic Zone on the example of the Yamal-Nenets Autonomous Area. *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 3, pp. 370—383. (In Russian).

9. Isaksen K., Nordli Ø., Ivanov B. et al. Exceptional warming over the Barents area. *Scientific Reports*, 2022, 12, p. 9371.
10. Баклагин В. Н., Махальская Н. И., Лукина Ю. Н. Многолетняя изменчивость ледового режима на Белом море в районе Соловецких островов по данным натурных наблюдений // *Успехи соврем. естествознания*. — 2025. — № 8. — С. 13—19.
- Baklagin V. N., Makhalskaya N. I., Lukina Yu. N. Long-term variability of the ice regime in the White Sea near the Solovetsky Islands based on in-situ observations. *Advances in Modern Natural Science*, 2025, no. 8, pp. 13—19. (In Russian).
11. Толстиков А. В., Серых И. В. Климатические изменения количества осадков в регионе Белого моря и их расчет по моделям CMIP6 до 2099 г. // *Арктика: экология и экономика*. — 2025. — Т. 15, № 3. — С. 30—41.
- Tolstikov A. V., Serykh I. V. Climate changes in precipitation in the White Sea area and their calculation using CMIP6 models up to 2099. *Arctic: Ecology and Economy*, 2025, vol. 15, no. 3, pp. 30—41. (In Russian).
12. RTour News: Интернет-журнал о российском туризме. — URL: <https://rtournews.ru/tournews/uchyonye-ustanovili-bezopasnyj-uroven-poseshheniya-solovkov.html>.
- RTour News: Online magazine about Russian tourism. Available at: <https://rtournews.ru/tournews/uchyonye-ustanovili-bezopasnyj-uroven-poseshheniya-solovkov.html>.
13. Белкина Н. А., Пронина А. В., Гатальская Е. В. и др. Оценка биогенного загрязнения донных отложений бухты Благополучия (о. Большой Соловецкий) // *Тр. КарНЦ РАН*. — 2025. — № 8. — С. 113—126.
- Belkina N. A., Pronina A. V., Morozova I. V. et al. Assessment of the nutrient pollution of bottom sediments in Blagopoluchiya Bay (Bolshoy Solovetsky Island). *Transactions of the KarRC RAS*, 2025, no. 8, pp. 113—126. (In Russian).
14. Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э., Толстиков А. В. и др. Гидрофизические характеристики морской среды в бухте Благополучия (Соловецкие острова, Белое море): оценка на основе экспедиционных исследований в апреле 2025 года // *Тр. КарНЦ РАН*. — 2025. — № 6. — С. 39—56.
- Zdorovennov R. E., Zdorovennova G. E., Tolstikov A. V. et al. Hydrophysical characteristics of the marine environment in Blagopoluchiya Bay (Solovetsky Islands, White Sea): an assessment based on fieldwork in April 2025. *Transactions of the KarRC RAS*, 2025, no. 6, pp. 39—56. (In Russian).
15. Казнина Н. М., Таскина К. Б., Игнатенко А. А. Состояние ценопопуляций *Alopecurus arundinaceus* Poir. на территории острова Большой Соловецкий (Архангельская область) при разной степени антропогенной нагрузки // *Тр. КарНЦ РАН*. — 2025. — № 8. — С. 127—136. — DOI: 10.17076/eco2202.
- Kaznina N. M., Taskina K. B., Ignatenko A. A. Vitality of *Alopecurus arundinaceus* Poir. cenopopulations on Bolshoy Solovetsky Island (Arkhangelsk Region) under various levels of anthropogenic pressure. *Transactions of the KarRC RAS*, 2025, no. 8, pp. 127—136. (In Russian).
16. Калинкина Н. М., Галахина Н. Е., Костромин Е. А. и др. Трофический статус бухты Благополучия (Соловецкие острова Белого моря) в летний период 2024 г. // *Арктика: экология и экономика*. — 2025. — Т. 15, № 4. — С. 592—604.
- Kalinkina N. M., Galakhina N. E., Kostromin E. A. et al. Trophic status of Blagopoluchiya Bay (the Solovetsky Archipelago of the White Sea) in the summer of 2024. *Arctic: Ecology and Economy*, 2025, vol. 15, no. 4, pp. 592—604. (In Russian).
17. 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.
- Lukina Yu. N., Zdorovennov R. E., Tolstikov A. V. et al. 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. (In Russian).
18. Расписание погоды. — URL: <https://rp5.ru/>.
- Reliable prognosis. Available at: <https://rp5.ru/>.
19. TEOS-10 Thermodynamic Equation of Seawater – 2010. Available at: <https://www.teos-10.org/>.
20. Prandle D., Jago C. F., Jones S. E. et al. The influence of horizontal circulation on the supply and distribution of tracers. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Physical and Engineering Sciences*, 1993, no. 343, pp. 405—421.
21. Prandle D., Lane A., Souza A. J. Coastal circulation. *Treatise on Estuarine and Coastal Science, Water and Fine Sediment Circulation*. Wolanski E., McLusky D. (eds.). Vol. 2. Oxford, Elsevier, 2011, pp. 237—266.
22. 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-ПП.
- 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).
23. Мискевич И. В., Котова Е. И., Нецветова О. П. Особенности вертикальной структуры маргинального фильтра в устьях рек с устойчивым галоклином в зимний период на приме-

ре дельты Северной Двины // Успехи соврем. естествознания. — 2022. — № 11. — С. 61—65.

Miskevich I. V., Kotova E. I., Netsvetaeva O. P. Features of the vertical structure of the marginal filter in the mouths of rivers with a stable halocline in winter: the example of the Northern Dvina delta. Successes of modern natural science, 2022, no. 11, pp. 61—65. (In Russian).

24. MacCready P., Geyer W. R. Advances in estuarine physics. Ann. Rev. Marine Sci., 2010, no. 2, pp. 35—58.

25. Chen W. Dynamics of currents and sediment in estuaries with different density stratifications. PhD thesis. Institute for Marine and Atmospheric research Utrecht (IMAU) Utrecht University, 2018.

26. Li M., Najjar R. G., Kaushal S. et al. The Emerging Global Threat of Salt Contamination of Water Supplies

in Tidal Rivers. Environ. Science & Technol. Letters, 2025, no. 12 (8), pp. 881—892.

27. Simpson J. H., Brown J., Matthews J. et al. Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification. Estuaries, 1990, no. 13, pp. 125—132.

28. Hansen D. V., Rattray M. Gravitational circulation in straits and estuaries. J. Mar. Res., 1965, no. 23, pp. 104—122.

29. Geyer W. R., Ralston D. K. The Dynamics of Strongly Stratified Estuaries. Treatise on Estuarine and Coastal Science. Wolanski E. and McLusky D. S. (eds.), Waltham, Academic Press, 2011, no. 2, pp. 37—51.

30. Lentz S. J., Kirincich A., Plueddemann A. J. A note on the depth of sidelobe contamination in acoustic doppler current 495 profiles. J. of Atmospheric and Oceanic Technology, 2022, 39, pp. 31—35.

Информация об авторах

Лукина Юлия Николаевна, доктор биологических наук, директор Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (185030, Россия, Петрозаводск, просп. Александра Невского, д. 50), e-mail: jlukina@list.ru.

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

Здоровеннов Роман Эдуардович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (185030, Россия, Петрозаводск, просп. Александра Невского, д. 50), e-mail: romga74@gmail.com.

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

Новикова Юлия Сергеевна, младший научный сотрудник, аспирант, Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (185030, Россия, Петрозаводск, просп. Александра Невского, д. 50), e-mail: povyuliana@gmail.com.

Здоровеннова Галина Эдуардовна, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории, Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (185030, Россия, Петрозаводск, просп. Александра Невского, д. 50), e-mail: zdorovennova@gmail.com.

HYDRODYNAMICS AND WATER EXCHANGE FEATURES OF BLAGOPOLUCHIYA BAY (SOLOVETSKY ISLANDS, WHITE SEA)

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

Northern water problems Institute of Karelian Research Centre of the Russian
Academy of Sciences (Petrozavodsk, Russian Federation)

The article was received on January 20, 2026

For citing

Lukina Yu. N., Bogdanov S. R., Zdorovenov R. E., Tolstikov A. V., Novikova Iu. S., Zdorovenova G. E. Hydrodynamics and water exchange features of Blagopoluchiya Bay (Solovetsky Islands, White Sea). *Arctic: Ecology and Economy*, 2026, vol. 16, no. 3, pp. 439—451. DOI: 10.25283/2223-4594-2026-16-439-451. (In Russian).

Abstract

Based on an analysis of in-situ measurements of water temperature, salinity, turbidity, solar radiation fluxes in the water column, and currents, the distribution patterns of wastewater and seawater in Blagopoluchiya Bay (Solovetsky Islands, White Sea) were identified. The bay's water exchange period was estimated at 14 days during the open-water and over 30 days during the freeze-up period. For the enclosed bay, the effective horizontal turbulent diffusion coefficient, K_x , ~ 0.02 m²/s, was estimated, significantly lower than typical values for shelf seas. Possible mechanisms of water transport within the bay are considered.

Keywords: White Sea, Solovetsky Islands, Arctic environment, anthropogenic impact, water exchange period, tidal phenomena, water salinity, water temperature, solar radiation, currents.

Funding

The study was carried out under 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).

Acknowledgements

The authors are grateful to Olga Derusova (NWPI KarRC RAS) for assistance in preparing the figures.

Information about the authors

Lukina, Yulia Nikolaevna, Doctor of Biological Sciences, Director of the Northern water problems Institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (50, Alexander Nevsky Ave., Petrozavodsk, Russia, 185910), e-mail: jlukina@list.ru.

Bogdanov, Sergey Removich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Northern water problems Institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (50, Alexander Nevsky Ave., Petrozavodsk, Russia, 185910), e-mail: Sergey.R.Bogdanov@mail.ru.

Zdorovenov, Roman Eduardovich, PhD of Geography, Senior Researcher, Northern water problems Institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (50, Alexander Nevsky Ave., Petrozavodsk, Russia, 185910), e-mail: romga74@gmail.com.

Tolstikov, Aleksey Vladimirovich, PhD of Geography, Senior Researcher, Head of Laboratory, Northern water problems Institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (50, Alexander Nevsky Ave., Petrozavodsk, Russia, 185910), e-mail: alexeytolstikov@mail.ru.

Novikova, Iuliia Sergeevna, Junior Researcher, Northern water problems Institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (50, Alexander Nevsky Ave., Petrozavodsk, Russia, 185910), e-mail: novyuli-ana@gmail.com.

Zdorovenova, Galina Eduardovna, PhD of Geography, Leading Researcher, Head of Laboratory, Northern water problems Institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (50, Alexander Nevsky Ave., Petrozavodsk, Russia, 185910), e-mail: zdorovenova@gmail.com.