

Гидрометеорология и экология. 2026. № 82. С. 120—143.
Hydrometeorology and Ecology. 2026;(82):120—143.

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья
УДК [551.462:551.35](261.243)
doi: 10.33933/2713-3001-2026-82-120-143

Современные седиментационные процессы в восточной части Финского залива

*Дарья Владимировна Рябчук¹, Татьяна Рэмовна Еремина¹,
Александр Юрьевич Сергеев¹, Александр Евменьевич Рыбалко²,
Владимир Александрович Жамойда³, Андрей Глебович Григорьев³,
Екатерина Васильевна Волощук¹, Роман Андреевич Дьячковский⁴,
Антон Владимирович Евдокименко³*

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, С.-Петербург, Россия, tanya.er@gmail.com

² ВНИИОкеангеология, С.-Петербург, Россия

³ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского, С.-Петербург, Россия

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет, С.-Петербург, Россия

Аннотация. В статье выполнено обобщение многолетних наблюдений (1999—2025 гг.) за состоянием донных отложений и межгодовой изменчивостью аноксийно-гипоксийных явлений в придонных водах восточной части Финского залива. На основе собранного материала было выполнено совмещение карт развития гипоксии в придонных водах с данными о площадях алевропелитовой аккумуляции, проанализировано развитие окисленного слоя в донных отложениях в различных седиментационных бассейнах. Показано, что исчезновение окисленного слоя в донных отложениях сохранялось на следующий 2004 г. после ухудшения кислородных условий в 2003 г., в то время как после обширной гипоксии в 2010 г., окисленный слой донных осадков восстановился в большинстве седиментационных бассейнов, что было обусловлено воздействием биологических факторов.

Ключевые слова: Финский залив, донные отложения, придонные воды, гипоксия, седиментационные процессы.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-27-00408).

Для цитирования: Рябчук Д. В., Еремина Т. Р., Сергеев А. Ю. и др. Современные седиментационные процессы Восточной части Финского залива // Гидрометеорология и экология. 2026. № 82. С. 120—143. doi: 10.33933/2713-3001-2026-82-120-143.

© Рябчук Д. В., Еремина Т. Р., Сергеев А. Ю., Рыбалко А. Е., Жамойда В. А., Григорьев А. Г., Волощук Е. В., Дьячковский Р. А., Евдокименко А. В., 2026

Original article

Modern sedimentation processes in the eastern part of the Gulf of Finland

***Daria V. Ryabchuk¹, Tatiana R. Eremina², Alexander Yu. Sergeev¹,
Alexander E. Rybalko², Vladimir A. Zhamoida¹, Andrey G. Grigoriev²,
Ekaterina V. Voloshchuk¹, Roman A. Diachkovsky⁴, Anton V. Evdokimenko³***

¹ Russian State Hydrometeorological University

² VNIIOkeangeologia

³ A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI)

⁴ St. Petersburg State University

Summary. The article summarizes long-term observations (1999–2025) of the state of bottom sediments and the interannual variability of anoxic-hypoxic phenomena in the near-bottom waters of the eastern Gulf of Finland. Based on the collected material, maps of hypoxia development in near-bottom waters were superimposed with data on areas of aleuropelitic accumulation; additionally, the development of the oxidized layer in bottom sediments across various sedimentation basins was analyzed. It is shown that the disappearance of the oxidized layer in bottom sediments in both the deep-water and shallow-water parts of the eastern Gulf of Finland was caused by the emergence of extensive anoxic-hypoxic conditions, which occurred in 2003 as a result of an inflow from the Central Baltic and in 2010 under the influence of hydro-meteorological conditions. At the same time, it was established that the disappearance of the oxidized layer in bottom sediments persisted into the following year, 2004, after the deterioration of oxygen conditions in 2003, whereas after the widespread hypoxia in 2010, the oxidized layer of bottom sediments recovered in most sedimentation basins due to the influence of biological factors. Analysis of long-term variability in near-bottom oxygen conditions confirmed that the main features of hypoxia development remain consistent: hypoxia arises and persists in deep-water areas where stable water stratification forms during the summer period, while it is not observed in shallow-water areas due to good ventilation of near-bottom waters. These characteristics of spatial hypoxia distribution determine the course of sedimentation processes in bottom sediments.

Keywords: Gulf of Finland, bottom sediments, near-bottom waters, hypoxia, sedimentation processes.

Acknowledgments: The study was supported by the Russian Science Foundation (grant № 25-27-00408).

For citation: Ryabchuk D. V., Eremina T. R., Sergeev A. Y., et al. Modern sedimentation processes in the Eastern part of the Gulf of Finland *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(82):(120—143). doi: 10.33933/2713-3001-2026-82-120-143. (In Russ.).

Введение

Одной из характерных черт гидрохимического режима придонных вод Балтики является периодическая смена окислительно-восстановительных условий, следствием которой является периодическое развитие гипоксии на границе дно-вода. В настоящее время этот процесс, оказывающий существенное влияние на биогеохимические процессы, происходящие в бентосном слое и обуславливающие изменение запасов биогенных веществ, прежде всего азота и фосфора, рассматривается как одна из критически важных проблем с точки зрения устойчивости экосистемы Финского залива [1—3].

Алевропелитовые отложения впадин Балтийского моря в целом, и Финского залива в частности, представляют собой седиментационные архивы, детальное изучение которых позволяет проследить как природные изменения среды осадконакопления (в том числе, связанные с климатическими изменениями) [4, 5], так и воздействие на нее техногенных процессов [6—9]. Установлено, что периоды гипоксии в недавнем геологическом прошлом совпадали с периодами потепления климата [10]. Результаты седиментологических и геохимических исследований донных отложений восточной части Финского залива также позволили выявить периоды гипоксии в недавнем геологическом прошлом (на протяжении последних 8 тыс. лет) и проследить их связь с климатическими изменениями [11].

Целью настоящей работы является характеристика современных седиментационных процессов и оценка изменения площадей развития постоянной и сезонной гипоксии в восточной части Финского залива на протяжении последних десятилетий на основе анализа архивных материалов поверхностного пробоотбора, выполненного специалистами ВСЕГЕИ при геологической съемке шельфа в период с 1984 г. по 2000 г. [12] и в ходе экспедиционных и аналитических исследований в период с 2006 г. по 2024 г. [13—15], результатов гидрохимических исследований и мониторинга РГГМУ [1, 3, 16].

Материалы и методы исследования

В период с 1984 г. по 2000 г. Всероссийским геологическим институтом им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ) в пределах российской части Финского залива было проведено государственное морское геологическое картирование (масштаб 1:200 000) [12—14, 17, 18]. В период с 1993 г. по 1995 г. в рамках международной программы МЕР «Marine Ecological Patrol» на НИС «Аранда», «Муйку», «Профессор Логачев», «Академик Шулейкин», «Профессор Мультиановский» при участии авторов данной статьи было отобрано большое количество колонок донных отложений, для которых специалистами Геологической службы Финляндии (ГТК) выполнены детальные геохимические исследования и определение скорости осадконакопления [19].

В последующие годы изучение донных отложений Финского залива выполнялось в рамках целого ряда международных проектов, а также проектных и грантовых исследований ВСЕГЕИ [15, 20].

Многолетние исследования, проводимые в ходе экспедиций РГГМУ в Финском заливе в период с 1998 г. по 2016 г., продолжены совместно с институтом океанологии им. П. П. Ширшова РАН в 2021 г., 2022 г. [16, 21] и 2025 г., были направлены на комплексное изучение состояния экосистемы залива, изменения которой обусловлены влиянием изменения климата и антропогенным воздействием.

В результате был накоплен огромный фактический материал о четвертичных отложениях, рельефе дна, распределении поверхностных донных осадков, изменчивости гидрофизических, гидрохимических и биологических показателей состояния морской среды Финского залива.

Результаты и их обсуждение

Источники осадочного материала

Основным источником осадочного материала является речной сток. Наиболее крупные реки, впадающие в Финский залив и оказывающие влияние на седиментационные процессы в его восточной части, — Нева и Луга. Масса влекомых наносов р. Невы составляет 65 тыс. тонн в год, а взвешенных — достигает 510 тыс. тонн в год [22]. Объем твердого стока р. Луги составляет 0,41 т/км³ год [23]. Реки, впадающие в Финский залив с севера, оказывают ограниченное влияние на седиментационные процессы. Важными источниками осадочного материала в восточной части Финского залива являются абразия берегов и размыв дна. С середины 2000 гг. возросла техногенная составляющая в седиментационных процессах, связанная с реализацией крупных проектов, включающих в себя процессы гидронамыва искусственных территорий, дреджинга и дампинга [24].

Характеристика поверхностных отложений и скоростей седиментации

Поверхностный осадочный покров дна восточной части Финского залива, в составе которого преобладают кластические осадки, характеризуется мозаичностью. Валунно-галечные отложения приурочены к подводным выходам морены, испытавшим процессы интенсивного размыва, и развиты на подводных склонах островов и побережий, а также в вершинах подводных поднятий на глубинах менее 10—15 м. Пески с галькой и гравием образуют многочисленные поля, расположенные на поднятых участках дна, батиметрически ниже грубообломочных отложений. Широкое распространение в пределах дна залива получили пески различного гранулометрического состава. Генетически основная часть песчаных отложений связана с процессами подводного размыва. Они образуют покровные тела небольшой мощности, залегающие, как правило, на поверхности верхнеплейстоценовых отложений. В прибрежной зоне выделяются пески волнового генезиса. Глинистые пески и песчаные глины приурочены к подводным выходам ледниково-озерных глин и отложений анцилового возраста в зонах замедленного осадконакопления или транзита [12].

Специфическими особенностями осадконакопления Восточной части Финского залива является батиметрический контроль процессов алевропелитового осадконакопления, которые происходят в пределах относительно пониженных участков дна залива, т. е. в локальных седиментационных бассейнах. Глубина накопления илов в них закономерно увеличивается от 5 м в Невской губе до 12—30 м в районе Зеленогорского плеса, 30—35 м к югу от Березовых островов, 40—50 м к северу от о-вов Сескар и Мощный, 60—65 м в районе о-ва Гогланд.

Измерение вертикального изменения активности ¹³⁷Cs позволяет выделить в кернах донных отложений седиментационных бассейнов слой осадка, характеризующийся резким пиком и отвечающий в Финском заливе 1987 г. максимальному загрязнению донных отложений радиоцезием в результате аварии на Чернобыльской АЭС [25]. Это позволяет рассчитать скорость осадконакопления

за период с 1987 г. Проведенные исследования показывают, что скорости осадконакопления в пределах седиментационных бассейнов варьируют от 1—2 мм/год до 1—3 см/год. Распределение скоростей осадконакопления алевропелитовых отложений восточной части Финского залива по опубликованным данным [15, 19] и результатам исследований 2025 г. представлено на рис. 1.

Имеющиеся данные для более западных районов Финского залива [26] позволяют предположить, что донные отложения локальных седиментационных бассейнов содержат значительные запасы биогенных веществ.

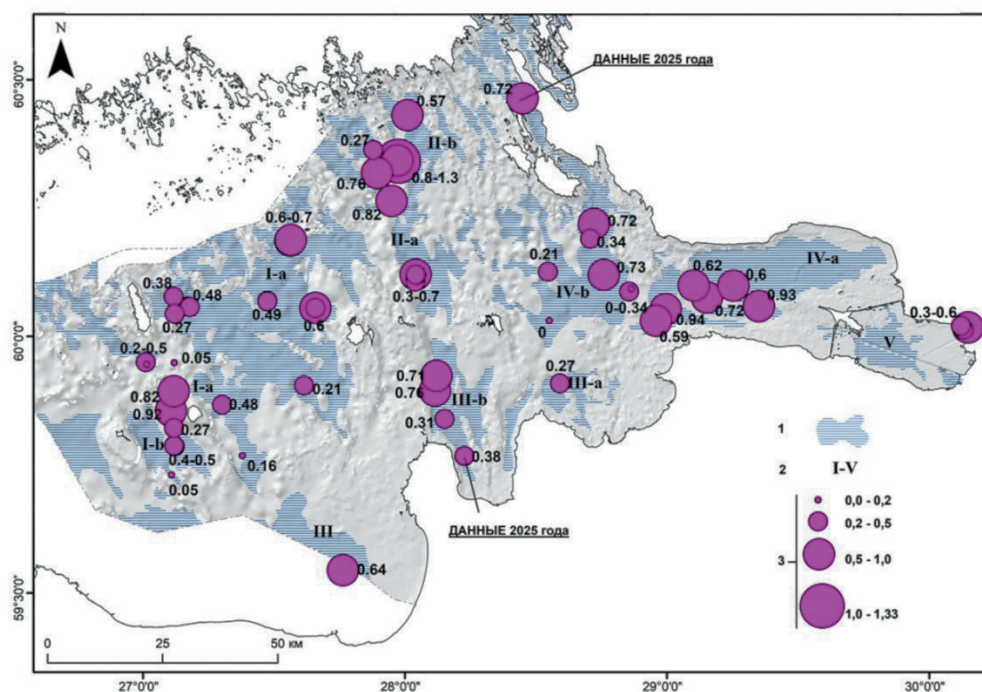


Рис. 1. Схема распределение скоростей осадконакопления алевропелитовых отложений Восточной части Финского залива:

I — зоны алевропелитовой аккумуляции, *2* — номера локальных седиментационных бассейнов, *3* — скорости седиментации (см/год). *I* — глубоководная впадина вблизи о-ва Гогланд, *II* — Выборгский залив, *III* — южный седиментационный бассейн (Копорская (*a*) и Лужская (*b*) губы, Нарвский залив (*c*)), *IV* — остров Котлин — Зеленогорский плес (*a*) и Березовые о-ва (*b*), *V* — Невская губа.

Fig. 1. Scheme of sedimentation rates of aleuropelite deposits in the Eastern part of the Gulf of Finland:

1 — zones of aleuropelite accumulation, *2* — numbers of local sedimentation basins, *3* — sedimentation rates (cm/year). *I* — deep-sea depression near Gogland Island, *II* — Vyborg Bay, *III* — southern sedimentation basin (Koporskaya (*a*) and Lugsкая (*b*) bays, Narva Bay (*c*)), *IV* — Kotlin Island — Zelenogorsky Ples (*a*) and Berezovy Islands (*b*), *V* — Nevsky Bay.

Физико-химические условия на границе «дно-вода». Гипоксия

Одной из важнейших характеристик геоэкологического состояния акваторий является окислительно-восстановительный режим в придонном слое воды и в поверхностных слоях донных отложений. Задачей настоящего раздела является сбор и анализ как прямых (результаты измерений содержания кислорода в придонной воде, в донных отложениях и придонной воде), так и косвенных (описания ненарушенных образцов донных отложений) данных об окислительно-восстановительных условиях на границе дно-вода в восточной части Финского залива за последнюю четверть века.

Анализ описаний более 6000 станций донного пробоотбора, выполненных в период с 1986 г. по 2000 г. в ходе геологической съемки шельфа, позволил выделить в пределах седиментационных бассейнов зоны долговременного преобладания гипоксии (поверхностные отложения представлены черными пелитовыми алевритами и алевритовыми пелитами с запахом сероводорода, как правило, пористыми, газонасыщенными; на поверхности дна развиты белые бактериальные маты) и зоны, характеризующиеся наличием мощной (более 2 см) зоны окисления, представленной бурыми алевропелитовыми осадками. Эти осадки переходят вниз по разрезу в биотурбированные зеленовато-серые отложения, что является индикатором существования устойчивой окислительной обстановки на границе дно-вода. Указанные зоны занимают ограниченные площади дна в пределах седиментационных бассейнов, на большей площади которых анализ данных поверхностного пробоотбора позволяет предположить периодическое (сезонное) и достаточно кратковременное возникновение бескислородных условий.

Верхний слой алевропелитовых отложений характеризуется здесь наличием тонкой слойчатости — чередовании слоев бурых, светло-серых и черных цветов мощность около 1 мм. Для зон подводного размыва и ненакопления (транзита) осадочного материала, приуроченных к относительно более мелководным участкам дна, где развиты грубообломочные и песчаные отложения, формирование бескислородных условий нехарактерно (рис. 2).

Описанные выше фоновые характеристики поверхностного слоя донных отложений объясняются общими закономерностями гидрохимического режима. В отличие от более западной части Финского залива в его восточных районах отсутствует постоянная стратификация водной толщи. В пределах района исследований ежегодное ветровое и конвективное перемешивание в осенне-зимний период обеспечивает аэрацию всей водной толщи воды до глубин 40 м, в то время как летом при формировании стратификации (возникновение термоклина и галоклина) в придонных слоях возникает дефицит кислорода [17].

Выполняющийся с 1999 г. гидрохимический мониторинг позволил проследить развитие процессов гипоксии во времени и их воздействие на седиментационные процессы. Среднегодовое распределение содержания кислорода в придонном слое в Финском заливе позволяет выделить седиментационные бассейны, в которых наиболее ярко выражено возникновение аноксийно-гипоксийных явлений в летний период. Анализ данных многолетних наблюдений показал, что площадь

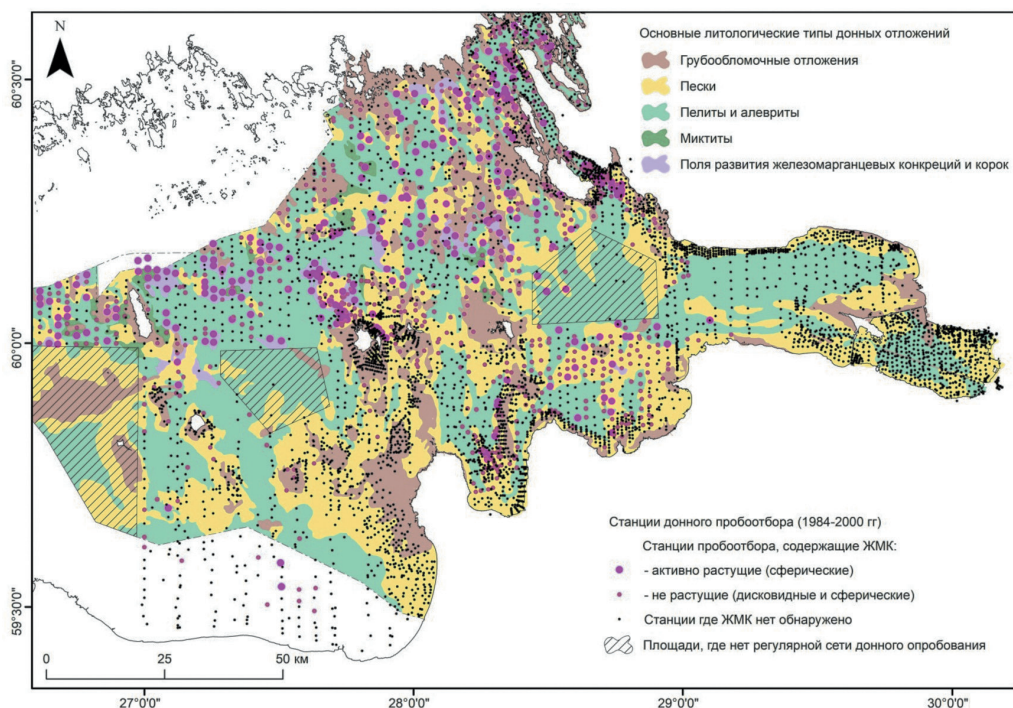


Рис. 2. Литологическая схема Восточной части Финского залива с расположением станций гидрохимического мониторинга РГГМУ.

Fig. 2. Lithological diagram of the Eastern part of the Gulf of Finland with the location of hydrochemical monitoring stations of RSHU.

развития сезонной гипоксии в восточной части Финского залива изменялась в пределах от 302—398 км² до 906—1760 км² за период с 2001 г. по 2010 г. [27]. Средняя площадь дна с дефицитом кислорода составляла порядка 950 км² в период с 2005 г. по 2015 г. В период с 1999 г. по 2002 г. на всей площади восточной части Финского залива существовали благоприятные кислородные условия [28].

Наиболее значительные площади, охваченные аноксийно-гипоксийными условиями, отмечались в 2003 г. и 2010 г. [3, 29]. В 2003 г. на десяти станциях из двадцати пяти была зафиксирована гипоксия (содержание кислорода от 0 до 1,9 мг/л), еще на двух станциях отмечалось низкое содержание кислорода (2,1 и 2,5 мг/л, соответственно) было установлено также на станциях в глубоководной части залива. Низкое содержание кислорода (2,1 и 2,5 мг/л, соответственно) было установлено также на станциях 18F и 17F. На остальных станциях концентрация кислорода в придонной воде находилась в диапазоне от 2,9 мг/л (3F) до 6,9 мг/л (28F) (рис. 3 а).

Таким образом, по результатам гидрохимического мониторинга гипоксия была зафиксирована во всех седиментационных бассейнах за исключением двух

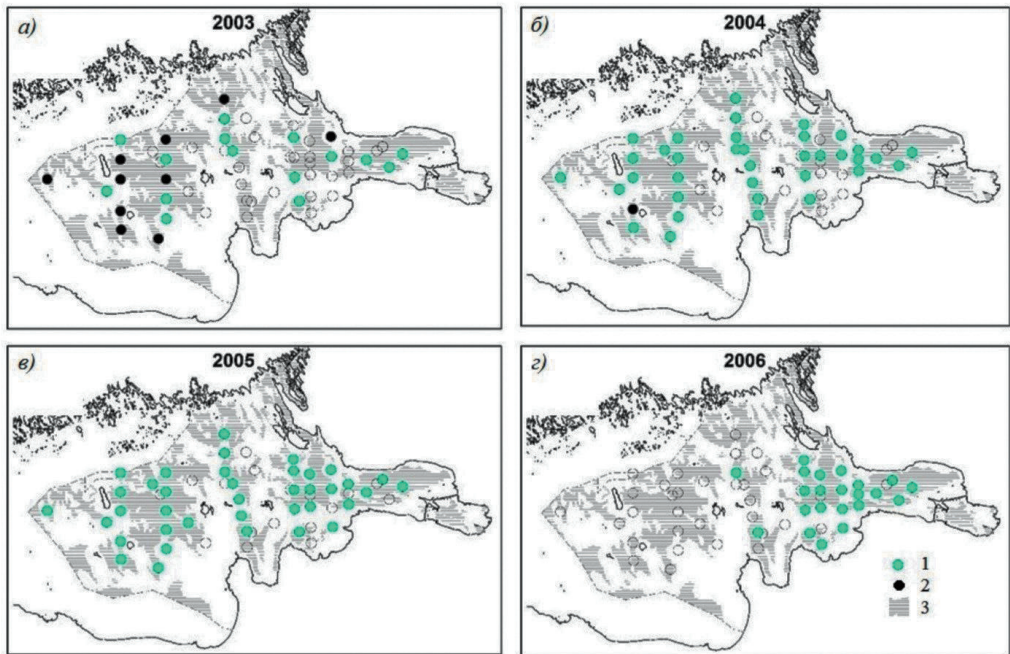


Рис. 3. Карты пространственной изменчивости содержания растворенного кислорода в придонных водах по данным мониторинговых наблюдений РГГМУ

а) 2003 г., б) 2004 г., в) 2005 г., г) 2006 г. 1 — станции с наличием кислорода, 2 — станции с гипоксией, 3 — площади алевропелитовой аккумуляции.

Fig. 3. Maps of spatial variability of dissolved oxygen content in the bottom waters according to monitoring observations of RSHU

а) 2003, б) 2004, в) 2005, г) 2006. 1 — stations with oxygen, 2 — stations with hypoxia, 3 — areas of aleuropelite accumulation.

наиболее восточных (Зеленогорский плес и Невская губа). В седиментационных бассейнах южной части залива (Копорская и Лужская губы, Нарвский залив) измерения были выполнены только на одной станции (8F, Копорский залив) и зафиксировано содержание кислорода 5,7 мг/л, однако, по данным исследований донных отложений, выполнявшихся «Севморгео» (рис. 4), на поверхности донных осадков в этих районах отсутствовала зона окисления. Наличие зоны окисления было установлено на большинстве станций в мелководной части Финского залива, в том числе на восьми станциях мощность окисленного слоя донных отложений превышала 1 см.

Важно отметить, что наряду с участками дна глубоководных седиментационных бассейнов, где бескислородные условия периодически наблюдались и ранее, зоны гипоксии в 2003 г. были отмечены в районах долговременного развития окислительной среды седиментации. Так, станция 27F (содержание кислорода 0 мг/л) пространственно совпадает с точкой пробоотбора ВСЕГЕИ 99-213

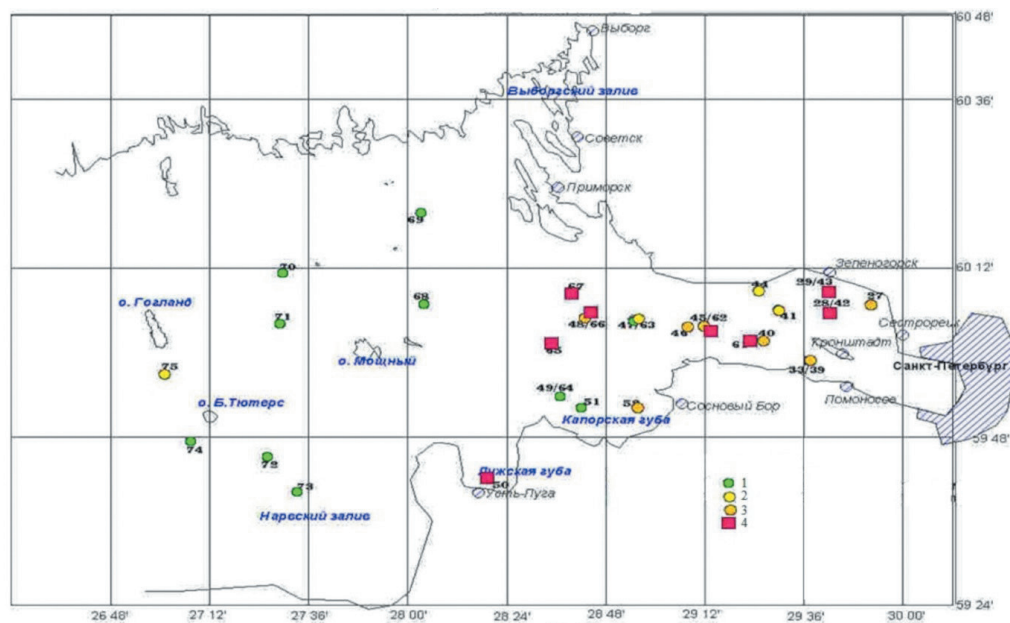


Рис. 4. Распределение зоны окисления в 2003 г.
в восточной части Финского залива по данным «Севморгео».

1 — зона окисления отсутствует, 2 — зона окисления в виде пленки, 3 — зона окисления хорошо выражена (мощность до 1 см), 4 — зона окисления прекрасно выражена (мощность более 1 см).

Fig. 4. Distribution of the oxidation zone in 2003
in the eastern part of the Gulf of Finland according to data of Sevmorgeo.

1 — there is no oxidation zone, 2 — the oxidation zone in the form of a film,
3 — the oxidation zone is well expressed (thickness up to 1 cm),
4 — the oxidation zone is well expressed (thickness more than 1 cm).

за 1999 г. Поверхностные отложения здесь были представлены буровато-коричневым алевропелитовым наилком зоны окисления (мощностью 2 см), содержащим значительное количество мелких дробовидных ЖМК. В непосредственной близости от зон развития ЖМК расположены также станции наблюдения 29F (содержание кислорода 1,9 мг/л) и 20F (содержание кислорода 0,15 мг/л).

Смена окислительно-восстановительных условий в восточной части Финского залива в 2003 г. была связана с затокном североморских вод в Центральную Балтику, когда значительная часть зараженных сероводородом водных масс была вытеснена из этого района в Финский залив [1, 28]. В 2004 г. по данным гидрохимического мониторинга (37 станций наблюдения) содержание кислорода в придонной воде менее 2,0 мг/л было отмечено только на станции 32F (рис. 3 б). На остальных станциях концентрация кислорода находилась в пределах от 3,7 до 7,9 мг/л, то есть по сравнению с 2003 г. произошло обогащение придонных вод кислородом. В то же время в донных отложениях, как более инерционной среде,

эффект воздействия гипоксии был проявлен в полной мере, продолжилась деградация окисленного слоя осадков. В первую очередь, это сказалось на мощности зоны окисления в мелководном районе. В седиментационном бассейне, расположенном к югу от Березовых островов (IVb, станции 11F, 10F, 6F) на поверхности алевропелитовых осадков были установлены только тонкие пленки зоны окисления, в седиментационном бассейне IVa к северу от м. Шепелевский практически исчезли мощные, хорошо выраженные зоны окисления мощностью более 1 см. В глубоководной части залива, к западу от острова Мощный, по данным колонкового пробоотбора на поверхности осадков сформировался интенсивно флокулированный наилкок черного цвета, а из самого осадка происходило интенсивное выделение сероводорода.

Воздействие гипоксии на биоту имело еще более отложенный эффект. В 2003 г. в бентосе восточной части Финского залива начались катастрофические изменения, выразившиеся в массовой гибели донных животных, к 2004 г. «большая часть дна акватории залива превратилась в безжизненную пустыню» [30]. В глубоководных седиментационных бассейнах макрозообентос отсутствовал или был представлен единичными экземплярами олигохет и молодью полихет *Marenzelleria neglecta*, биомасса которых не превышала 0,1 г/м². К 2005 г. произошло частичное восстановление донных сообществ, однако биомасса бентоса на значительной части акватории не превышала 0,1 г/м² [30].

Наиболее масштабные процессы развития гипоксии за весь период наблюдений были зафиксированы в 2010 г. (рис. 5). Из сорока станций наблюдений на двадцати шести содержание кислорода было ниже 2,0 мг/л (на 18 станциях впервые за период наблюдений с 1999 г.).

Еще на четырех станциях содержание кислорода в придонной воде колебалось от 2,0 до 2,6 мг/л. Гипоксией были охвачены все седиментационные бассейны восточной части Финского залива (за исключением Невской губы). Гипоксические явления 2010 г. оценивались исследователями как рекордные по своим масштабам и интенсивности [1]. Гипоксия была зафиксирована на участках дна, где по данным пробоотбора существовала устойчивая кислородная обстановка.

В седиментационном бассейне, расположенном между о-вом Котлин и линией м. Шепелевский — м. Флотский (IVa), низкое содержание кислорода в 2010 г. было зафиксировано на трех станциях. Станция 3F (O₂ — 2,04 мг/л) расположена в районе точки пробоотбора ВСЕГЕИ 90—233, где в 1990 г. фиксировался бурый наилкок мощностью 2—3 мм. В 2003 г. и 2004 г., по данным «Севморгео», мощность окисленного слоя донных отложений здесь превышала 1 см. Станция 1F5 (O₂ — 1,77 мг/л) находится вблизи точки пробоотбора 90—177, где в 1990 г. поверхность дна была покрыта алевропелитовыми осадками с бурой пленкой зоны окисления, аналогичные описания были даны при работах «Севморгео» в 2004 г. Станция 4F (O₂ — 1,64 мг/л) совпадает с точкой пробоотбора 90—177, где была зафиксирована зона окисления мощностью 1 см, представленная желтовато-бурый алевропелитом. В 2003 г. описана зона окисления мощностью более 1 см, в 2004 г. — менее 1 см.

Станции 1FG, 2FG и 3FG расположены в периферийной части седиментационного бассейна IVa. Пробоотбор ВСЕГЕИ 1990 г. (станции 294, 196 и 160)

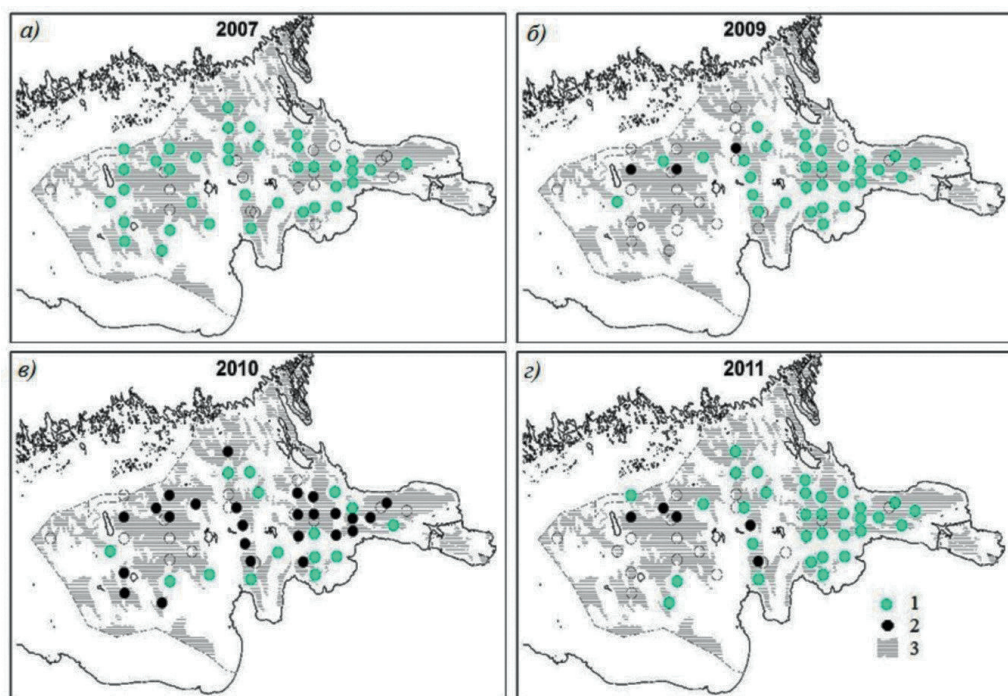


Рис. 5. Карты пространственной изменчивости содержания растворенного кислорода в придонных водах по данным мониторинговых наблюдений РГГМУ

а) 2007 г., б) 2009 г., в) 2010 г., г) 2011 г. 1 — станции с наличием кислорода, 2 — станции с гипоксией, 3 — площади алевропелитовой аккумуляции.

Fig. 5. Maps of spatial variability of dissolved oxygen content in the bottom waters according to monitoring observations of RSHU

а) 2007, б) 2009, в) 2010, г) 2011. 1 — stations with oxygen, 2 — stations with hypoxia, 3 — areas of aleuropelite accumulation.

показал на всех трех станциях наличие бурого наилка зоны окисления. В 2010 г. содержание кислорода в придонной воде здесь составило 2,20 мг/л, 1,47 мг/л и 0,83 мг/л, соответственно (рис. 5 в).

Станция 5F (O_2 — 1,70 мг/л) находится в юго-западной части седиментационного бассейна IVa (рис. 5 в) и совпадает с точкой пробоотбора 99—333, где в 1999 г. на поверхности пелитовых алевритов был зафиксирован бурый наилк зоны окисления мощностью 3—5 мм. Несколько южнее расположена точка пробоотбора 89—310, где поверхностные отложения представлены песчаными алевритами со значительной примесью грубообломочного материала с железомарганцевыми оторочками и дисковидными ЖМК, что соответствует окислительным условиям осадконакопления. При описании станции геологического пробоотбора в 1990 г. было отмечено наличие нескольких экземпляров живых моллюсков *Macoma Baltica*.

Станция 2F5 (O_2 — 1,78 мг/л) расположена в северной части седиментационного бассейна IVb (рис. 5 в), к югу от о-ва Большой Березовый, и совпадает с точкой пробоотбора ВСЕГЕИ 99-384, где в 1999 г. наблюдалась зона окисления мощностью 2 см. Аналогичные результаты были получены при опробовании в точке 99—341, располагающейся в районе станции 2UGMS (O_2 — 1,59 мг/л). В непосредственной близости от станции 6F (O_2 — 1,24 мг/л), находящейся на восточной периферии того же седиментационного бассейна на глубине 35 м, точки пробоотбора ВСЕГЕИ отсутствуют, однако между станциями 6F и 2UGMS расположены точка 99—333 (глубина 38 м), где в 1999 г. мощность зоны окисления была более 2 см и станция пробоотбора F40, исследованная в ходе совместного рейса ВСЕГЕИ и Геологической службы Финляндии в 2009 г. на НИС «Аранда», где, согласно описанию осадка, отобранного с помощью герметичной грунтовой трубки, мощность зоны окисления, представленной флокулированным светло-бурым алевропелитовым наилком, достигала 4 см. Осадок был интенсивно биотурбирован. Работами «Севморгео» в 2004 г. непосредственно на станции 6F была зафиксирована тонкая пленка наилка зоны окисления (рис. 6).

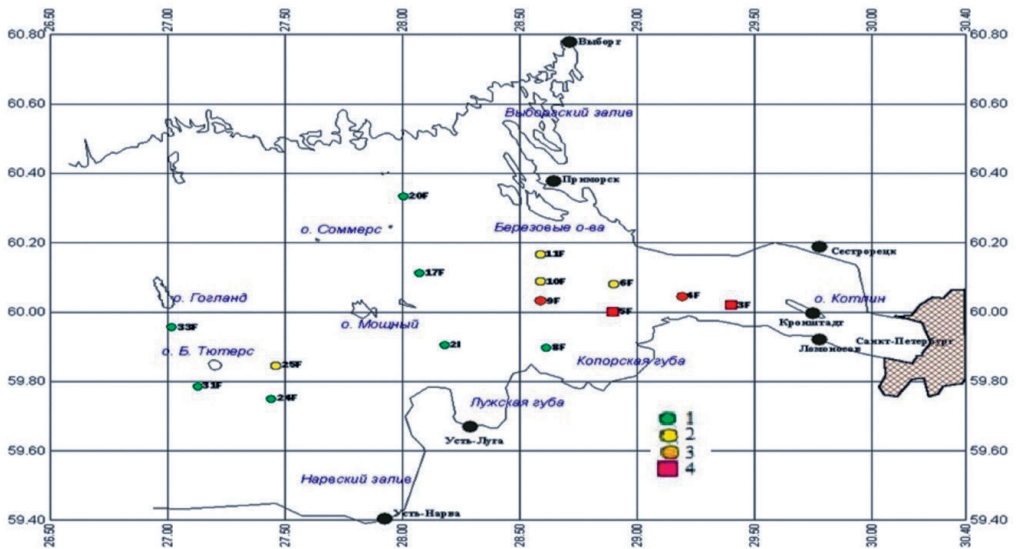


Рис. 6. Распределение зоны окисления в 2004 г. в восточной части Финского залива по данным «Севморгео».

1 — зона окисления отсутствует, 2 — зона окисления в виде пленки, 3 — зона окисления хорошо выражена (мощность до 1 см), 4 — зона окисления прекрасно выражена (мощность более 1 см).

Fig. 6. Distribution of the oxidation zone in 2004 in the eastern part of the Gulf of Finland according to data of Sevmorgeo.

1 — there is no oxidation zone, 2 — the oxidation zone in the form of a film, 3 — the oxidation zone is well expressed (thickness up to 1 cm), 4 — the oxidation zone is well expressed (thickness more than 1 cm).

В западной части седиментационного бассейна IVb гипоксия была установлена на станциях 9F (O_2 — 0,93 мг/л), 10F (O_2 — 1,10 мг/л) и 11F (O_2 — 1,86 мг/л) (рис. 5). На этих участках дна при работах 1989—1992 гг. наблюдалась пленка окисленного наилка мощностью от первых мм до 1 см (точки пробоотбора ВСЕГЕИ 89-175, 91-627 и 92-843 соответственно). При работах «Севморгео» в 2003 г. на этих станциях была описана зона окисления мощностью более 1 см, в 2004 г. — тонкая пленка окисленного наилка на станциях 10F и 11F и окисленные алевропелитовые осадки мощностью до 1 см на станции 9F.

Станция 8F (O_2 — 1,10 мг/л) расположена в седиментационном бассейне Копорского залива (IIIa). По данным пробоотбора ВСЕГЕИ (точка 89—183), в 1989 г. на поверхности дна здесь наблюдались желтовато-бурые алевропелиты мощностью около 1 см.

Станции 2L (O_2 — 0,58 мг/л) и 3L (O_2 — 1,17 мг/л) характеризуют седиментационный бассейн Лужской губы. В районе станции 2L находятся точки пробоотбора ВСЕГЕИ 91—388 и 91—640, на которых в 1991 г. описаны окисленные поверхностные осадки мощностью в мм.

Станции 4L (O_2 — 1,42 мг/л) и 17F (O_2 — 1,54 мг/л) находятся в части седиментационного бассейна Выборгского залива, расположенной между островами Сескар и Мощный. По данным пробоотбора ВСЕГЕИ (точка 90—86), поверхностные осадки в районе станции 4L в 1990 г. были представлены серо-желтым разжиженным алевропелитовым наилком, содержащим до 20 % песчаных частиц. Такой тип отложений является типичным для устойчивой окислительной обстановки. Станция 17F совпадает по расположению с точками пробоотбора 99—319, где поверхностные осадки в 1999 г. были представлены зоной окисления мощностью до 1 см и F41b, опробованной в ходе рейса на НИС «Аранда» в 2009 г. Мощность светло-коричневого разжиженного флокулированного наилка зоны окисления составляла 2 см. В осадке отмечались многочисленные ходы бентосных животных и живые экземпляры полихет *Marenzelleria*.

Таким образом, в 2010 г. окислительно-восстановительные условия в наиболее восточных седиментационных бассейнах Финского залива принципиально изменились. На станциях западной части залива (20F, 9F5, 24F, 28F, 29F, 31F, 32F и 35F) гипоксия, как уже упоминалось, фиксировалась ранее. На станции 2UGMS гипоксия (O_2 — 1,22 мг/л) в 2010 г. была зафиксирована впервые с начала наблюдений в 1999 г. По данным пробоотбора ВСЕГЕИ в 2000 г. (точка 00—35), поверхностный слой донных отложений был представлен бурыми разжиженными алевропелитами с примесью зерен тонкозернистого песка и мелких дробовидных ЖМК, что также является индикатором устойчивой кислородной обстановки.

Несмотря на резкое ухудшение условий, биомасса бентоса в 2010 г. не только не снизилась, как это происходило в прошлом при аналогичных ситуациях, в связи с тем, что газовый режим придонных вод был основным фактором, контролирующим развитие макрозообентоса в открытых районах залива, но даже увеличилась [30]. Это было связано с эффектом бурного развития толерантных к гипоксии полихет *Marenzelleria arctica*, активная инвазия которых в российские воды

Финского залива началась, вероятно, в 2008 г., а в 2008—2009 гг. биомасса зообентоса на илистых грунтах в глубоководных районах залива выросла в 45 раз [31]. Последствия инвазии и ее влияние на кислородный режим придонной среды подробно описаны в публикациях [31—33].

В 2011 г. по данным гидрохимического мониторинга (37 станций наблюдения) гипоксия наблюдалась лишь на одной станции 4I (1,6 мг/л) (рис. 5 з). Низкое содержание кислорода в придонной воде зафиксировано на трех станциях в западной части исследуемой площади (35F — 2,7 мг/л; 4UGSM — 2,6 мг/л и 28F — 2,1 мг/л) и в седиментационном бассейне между островами Сескар и Малый (2I — 2,2 мг/л). Содержание кислорода, в целом, оставалось достаточно низким, на четырех станциях оно было ниже 3 мг/л, еще на восьми — ниже 4 мг/л. Максимальная концентрация кислорода составила 9,1 мг/л (станция 19F). К 2012 г. ситуация нормализовалась: гипоксии не было зафиксировано ни на одной из 41 станций гидрохимического мониторинга, хотя уровень насыщения придонных вод кислородом оставался относительно низким (среднее 6,7 мг/л, максимальное — 8,9 мг/л (станция 11F5), минимальное — 3,4 мг/л (36F)).

В последующие годы (рис. 7) до завершения в 2016 г. мониторинговых работ по расширенной сетке станций обширных аноксийно-гипоксийных условий в восточной части Финского залива не отмечалось [34]. Исключением является 2014 г., когда аноксийно-гипоксийные условия отмечались на станциях, расположенных в глубоководной части залива (9F5, 35F, 36F, 33F, 4UGMS), что связано с затоком вод повышенной солености из западной части залива: значения солености на указанных станциях превышали 8 промилле при обычных 5 промилле.

Институтом Карпинского в рамках проекта «Государственный мониторинг состояния недр прибрежно-шельфовой зоны Балтийского, Белого и Баренцева морей» выполнялся пробоотбор на нескольких участках дна Финского залива. Ежегодные работы проводились с 2011 г. в восточной части Копорского залива (в районе станции 5F), а с 2016 г. — в седиментационном бассейне в районе о-ва Гогланд (полигон включает станции 35F и 4UGMS), (табл. 1). Данные о наличии/отсутствии зоны окисления на поверхности донных отложений и Eh придонной воды являются дополнительным источником информации о кислородном режиме восточной части Финского залива, особенно для промежутков времени, когда гидрохимический мониторинг не выполнялся. Согласно полученным данным, неблагоприятные кислородные условия в районе исследований в 2017 г.: к югу от станции 35F был выполнен пробоотбор на 34 станциях. Бурый наилкок зоны окисления наблюдался на 14 станциях, на остальных станциях осадки были представлены черными газонасыщенными пелитовыми алевритами, характерными для условий недостатка кислорода. Измеренные показатели Eh придонной воды над восстановленными осадками находились в диапазоне от –76 мВ до 210 мВ. В 2018 г. и 2019 г. в районе о-ва Гогланда донные отложения характеризовались развитой зоной окисления, что свидетельствует об отсутствии ярко выраженных гипоксийных явлений.

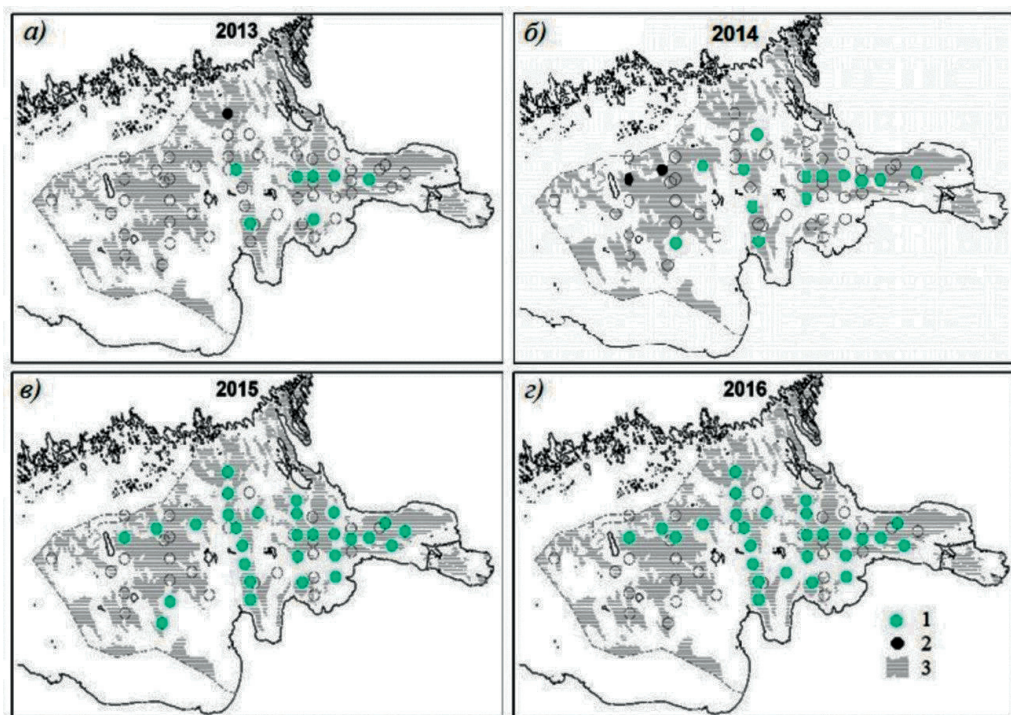


Рис. 7. Карты пространственной изменчивости содержания растворенного кислорода в придонных водах по данным мониторинговых наблюдений РГГМУ.

a) 2013 г., б) 2014 г., в) 2015 г., г) 2016 г. 1 — станции с наличием кислорода, 2 — станции с гипоксией, 3 — площади алевропелитовой аккумуляции.

Fig. 7. Maps of spatial variability of dissolved oxygen content in the bottom waters according to monitoring observations of RSHU.

a) 2013, б) 2014, в) 2015, г) 2016. 1 — stations with oxygen, 2 — stations with hypoxia, 3 — areas of aleuropelite accumulation.

Таблица 1

Межгодовая изменчивость количества станций с зоной окисления и без в седиментационном бассейне в районе о-ва Гогланд

Interannual variability of the number of stations with and without an oxidation zone in the sedimentation basin near Gogland Island

Год опробования	Количество станций	Осадки с зоной окисления	Станции, на которых зона окисления отсутствует
2016	13	9	4
2017	34	14	17
2018	26	18	8
2019	27	17	10
2020	21	16	5

Окончание табл. 1

Год опробования	Количество станций	Осадки с зоной окисления	Станции, на которых зона окисления отсутствует
2021	9	7	2
2022	12	4	8
2023	11	10	1
2024	15	11	4
2025	13	6	7

С 2020 г. в выполнялся пробоотбор в Лужской губе и прилегающей к ней части акватории Финского залива (до о-ва Сескар). В 2020 г. точки пробоотбора располагались в седиментационном бассейне IIIb между станциями мониторинга 1L и 2L. Поверхность дна была покрыта темно-зеленовато-серыми пелитовыми алевролитами, на поверхности которых наблюдалась мощная зона окисления (до 2 см). Eh придонной воды составил от 240 до 270 мВ. Аналогичные результаты (Eh 230) были получены для точки, расположенной между станцией 6F5 и о-ва Сескар.

В 2021 г., 2022 г. и 2025 г. гидрохимические исследования были выполнены на станциях по трансекте с запада на восток в центральной части залива (рис. 8). В 2021 г. гидрохимические исследования выполнялись на семи станциях по трансекте с запада на восток в центральной части залива (35F, 4UGSM, 10F, 3F5, 5F, 6F, 4F). На всех станциях содержание кислорода в придонной воде превышало 2,0 мг/л (от 2,9 мг/л на станции 35F до 7,7 мг/л на станции 10F) (рис. 8 а). Мониторинг, выполненный в 2022 г. на десяти станциях, также не выявил гипоксии (рис. 8 б), хотя на станции 35F содержание кислорода снизилось до 2,46 мг/л. Однако ухудшение окислительно-восстановительных условий зафиксированы пробоотбором в 2022 г. На восьми из обследованных 12 геологических станций зона окисления отсутствовала, поверхностные осадки были представлены черными газонасыщенными илами; на четырех станциях визуально наблюдалось выделение газа и отмечался резкий запах H₂S. Eh придонной воды на станциях, где на поверхности дна фиксировался бурый наиллок зоны окисления находился в пределах от 94 до 123 мВ, на всех станциях, где наиллок отсутствовал, этот показатель имел отрицательные значения (от –90 до –54 мВ).

В 2023 г. и 2024 г. гидрохимический мониторинг не выполнялся.

При работах, выполненных в ходе рейса НИС «Академик Борис Петров» в июне 2025 г., гипоксия была зафиксирована на станции 4UGMS, где содержание кислорода в придонной воде составило 0,25 мг/л (рис. 8 в). Поверхностные осадки (0—12 см) здесь представлены разжиженными черными алевропелитами, с резким запахом сероводорода. На глубине керна 12 см они постепенно переходят в черный алевропелит с мелкими зеленовато-серыми вкраплениями и линзочками мощностью около 1 мм (текстура осадка слабо крапчатая). Ниже на всю отобранную длину керна осадок имеет темно-зеленовато-серый цвет, местами — до черного, слабо проявленная слоистость отмечается на интервалах 30—33 см и 40—46 см.

Расширение зоны недостатка кислорода было отмечено также в ходе геологического мониторинга. На семи станциях из тринадцати зона окисления

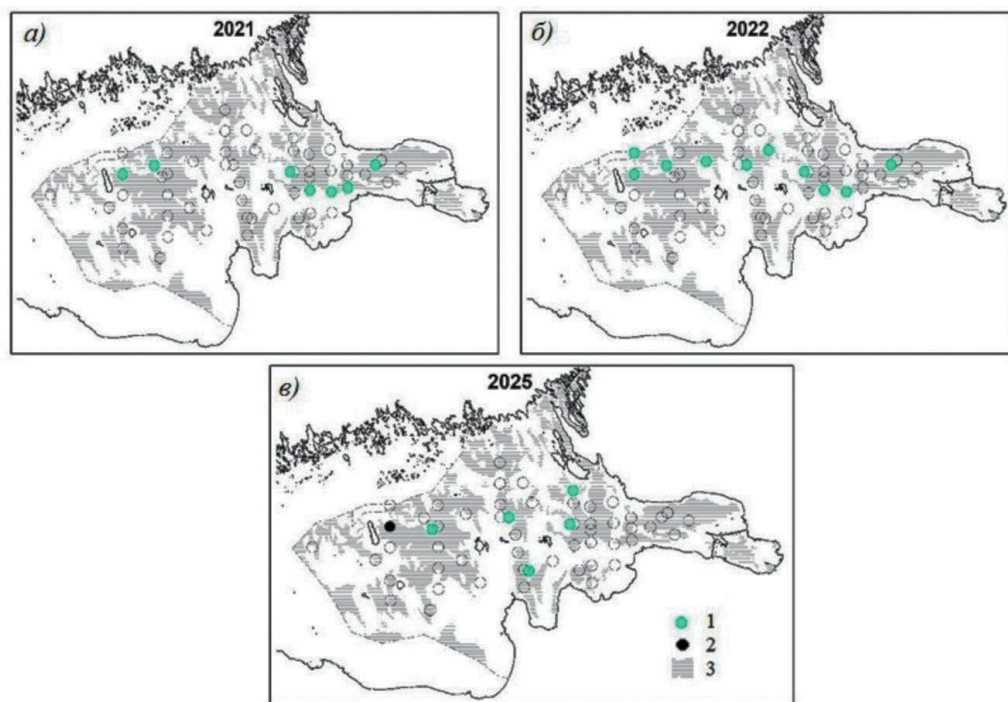


Рис. 8. Карты пространственной изменчивости содержания растворенного кислорода в придонных водах по данным мониторинговых станций наблюдений РГГМУ.

а) 2021 г., б) 2022 г., в) 2025 г. 1 — станции с наличием кислорода, 2 — станции с гипоксией, 3 — площади алевропелитовой аккумуляции.

Fig. 8. Maps of spatial variability of dissolved oxygen content in the bottom waters according to monitoring observations of RSHU.

а) 2021, б) 2022, в) 2025. 1 — stations with oxygen, 2 — stations with hypoxia, 3 — areas of aleuropelite accumulation.

отсутствовала. Близкие к критическим значениям (O_2 — 2,1 мг/л) установлены в 2025 г. также на станции 9F5. С поверхности осадка здесь наблюдался бурый алевропелитовый наилот мощностью менее 1 см, переходящий вниз по разрезу в черный разжиженный алевропелит. На станции 17F мощность окисленного слоя пелитовых алевролитов составляет около 1 см. На станции 12F отобраны светло-бурые алевропелиты. Поверхностные отложения станции 10F представлены бурыми микритами (сильно заиленные разномерные пески с гравием, единичной галькой и железо-марганцевыми корками) мощностью до 2 см. Таким образом, описание донных отложений в 2025 г. полностью соответствует результатам измерений содержания кислорода в придонной воде.

Анализ изменения содержания кислорода в придонной воде по всем станциям и по отдельным седиментационным бассейнам (рис. 9) показал, что за исследованный период в 2010 г. аноксигно-гипоксигным условиям были подвержены

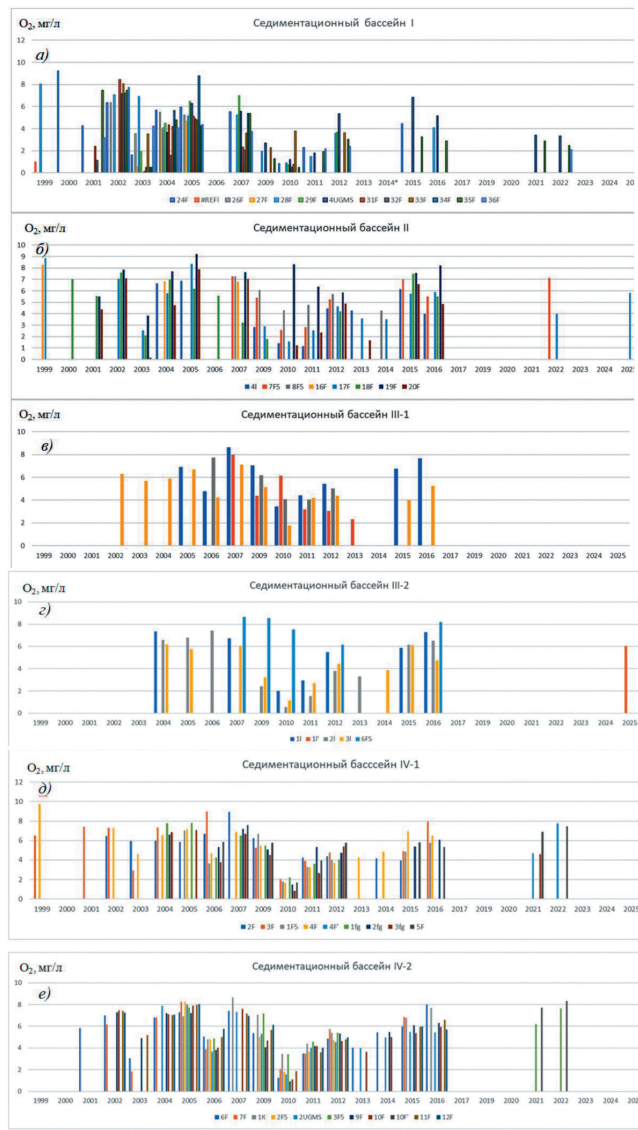


Рис. 9. Содержание растворенного кислорода (мг/л) в придонной воды на станциях мониторинга РГГМУ в седиментационных бассейнах восточной части Финского залива.

а) седиментационный бассейн I, б) седиментационный бассейн II,
 в) седиментационный бассейн III-1, г) седиментационный бассейн III-2,
 д) седиментационный бассейн IV-1, е) седиментационный бассейн IV-2.

Fig. 9. Dissolved oxygen content (mg/l) in bottom water at the RSHU monitoring stations in the sedimentation basins of the eastern part of the Gulf of Finland.

а) sedimentation basin I, б) sedimentation basin II,
 в) sedimentation basin III-1, г) sedimentation basin III-2,
 д) sedimentation basin IV-1, е) sedimentation basin IV-2.

все седиментационные бассейны (номера бассейнов указаны на рис. 1), в то время как в 2003 г. гипоксией явлениями не были охвачены самый восточный, III и IV бассейны (Лужская и Копорская губа).

Заключение

Специфическими особенностями осадконакопления восточной части Финского залива является батиметрический контроль процессов алевропелитового осадконакопления, которые происходят в пределах относительно пониженных участков дна залива, т. е. в локальных седиментационных бассейнах. При этом глубина накопления илов закономерно увеличивается от 5 м в Невской губе до 60—65 м в районе о-ва Гогланд. Скорость осадконакопления в пределах седиментационных бассейнов варьируется от 1—2 мм/год до 1,3 см/год.

Явление гипоксии, наблюдаемое в восточной части Финского залива, отличается существенной временной изменчивостью и обусловлено, главным образом, интенсивностью затоков придонных вод из открытой Балтики. Однако гидрометеорологические факторы (жаркое лето и суровая зима), как в случае 2010 г., создали условия для формирования сильной стратификации вод, что обусловило возникновение наиболее обширной по площади гипоксии, под воздействием которой оказались все седиментационные бассейны. В глубоководных районах гипоксия отмечается в течение всего года. В восточной, мелководной части залива, придонные слои обеднены кислородом только в летний период, а затем под действием ветро-волнового перемешивания в осенний период происходит их обогащение кислородом.

Список литературы

1. Еремина Т. Р., Максимов А. А., Волощук Е. В. Влияние изменчивости климата на кислородный режим глубинных вод восточной части Финского залива // *Океанология*. 2012. Т. 52, № 6. С. 836—845.
2. Еремина Т. Р., Владимирова О. М., Савчук О. П. Влияние изменения климата и биогенной нагрузки на состояние экосистемы Балтийского моря по результатам моделирования / Тезисы докладов Всерос. науч. конф. Моря России: Вызовы отечественной науки. Севастополь: ФГБУН Федер. Исслед. центр «Морской гидрофизический институт РАН», 2022. С. 303—304.
3. Владимирова О. М., Еремина Т. Р., Исаев А. В. и др. Модельные оценки составляющих баланса азота и фосфора в экосистеме Финского залива // *Ученые Записки РГГМУ*. 2018. Вып. 53, С. 72—82.
4. Kotilainen A. T., Arppe L., Dobosz S. et al. Echoes from the past: a healthy Baltic Sea requires more effort // *AMBIO*. 2014. 43. P. 60—68. doi: 10.1007/s13280-013-0477-4.
5. Warden L., Moros M., Neumann T. et al. Climate induced human demographic and cultural change in northern Europe during the mid Holocene // *Scientific reports*. 2017. 7 (1). P. 1—11. doi: 10.1038/s41598-017-14353-5.
6. Zillén L., Conley D. J., Andrén Th. E. et al. Past occurrences of hypoxia in the Baltic Sea and the role of climate variability, environmental change and human impact // *Earth—Science Reviews*. 2008. 91. P. 77—92. doi: 10.1016/j.earscirev.2008.10.001.
7. Vallius H. Heavy metal concentrations in sediment cores from the northern Baltic Sea: Declines over the last two decades // *Marine Pollution Bulletin*. 2014. 79. P. 359—364. doi: 10.1016/j.marpolbul.2013.11.017.
8. Vallius H. Sediment geochemistry studies in the Gulf of Finland and the Baltic Sea: a retrospective view // *Baltica*. 2016. 29 (1). P. 57—64. doi: 10.5200/baltica.2016.29.06.

9. Ryabchuk D., Vallius H., Zhamoida V. et al. Pollution history of Neva Bay bottom sediments (eastern Gulf of Finland, Baltic Sea) // *Baltica*. 2017. 30 (1). P. 31–46. doi: 10.5200/baltica.2017.30.04.
10. Savchuk O. P., Wulff F. Long-term modeling of large-scale nutrient cycles in the entire Baltic Sea // *Hydrobiologia*. 2009. Vol. 629. No. 1. P. 209–224. doi: 10.1007/s10750-009-9775-z.
11. Ryabchuk D. V., Sergeev A. Yu., Prishchepenko D. V. et al. Impact of climate change on sedimentation processes in the eastern Gulf of Finland during the Middle to Late Holocene // *Boreas*. 2021. Vol. 50. P. 381–403. doi: 10.1111/bor.12500.
12. Атлас геологических и эколого-геологических карт Российского сектора Балтийского моря. СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. 78 с.
13. Zhamoida V., Grigoriev A., Gruzlov K., Ryabchuk D. The influence of ferromanganese concretions-forming processes in the eastern Gulf of Finland on the marine environment // *Geological Survey of Finland, Special Paper*. 2007. 45. P. 21–32.
14. Zhamoida V., Grigoriev A., Ryabchuk D. et al. Ferromanganese concretions of the eastern Gulf of Finland — Environmental role and effects of submarine mining // *Journal of Marine Systems*. 2017. 172. P. 178–187. doi: 10.1016/j.jmarsys.2017.03.009.
15. Prishchepenko D. V., Ryabchuk D. V., Zhamoida V. A. et al. Main trends and results of 300-years anthropogenic impact on the geological environment and ecosystem of the Eastern Gulf of Finland // *Continental Shelf Research*. 2023. Vol. 265. P. 105058. doi: 10.1016/j.csr.2023.105058.
16. Шатрова О. В., Еремина Т. Р., Ланге Е. К. Анализ изменчивости параметров эвтрофирования в Финском заливе по данным натурных наблюдений // *Ученые записки РГГМУ*. 2016. № 44. С. 129–140.
17. Zhamoida V. A., Butylin W. P., Glasby G. P., Popova I. A. The nature of ferromanganese concretions from the eastern gulf of Finland, Baltic Sea // *Marine Georesources & Geotechnology*. 1996. Vol. 14 (2). P. 161–176. doi: 10.1080/10641199609388309.
18. Grigoriev A. G., Zhamoida V. A., Glasby G. P. Distribution of radionuclides in ferromanganese concretions associated sediments from the northern-eastern Gulf of Finland // *Baltica*. 2004. Vol. 17 (2). P. 63–70.
19. Vallius H. Recent sediments of the Gulf of Finland: an environment affected by the accumulation of heavy metals. PhD Thesis, Åbo Academi University. Turku, 1999. 111 p.
20. Vallius H., Ryabchuk D., Kotilainen A. Distribution of heavy metals and arsenic in the soft surface sediments of the coastal area off Kotka, north-eastern Gulf of Finland, Baltic Sea // *Geological Survey of Finland, Special Paper*. 2007. 45. P. 31–46.
21. Ульянова М. О., Сивков В. В., Баширова Л. Д. и др. Океанологические исследования Балтийского моря в 51—м рейсе ПС «Академик Сергей Вавилов» (июнь—июль 2021 г.) // *Океанология*. 2022. Т. 62. № 4. С. 667–669. doi: 10.31857/S003015742204013X.
22. Нежиховский Р. А. Вопросы гидрологии р. Невы и Невской губы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 108 с.
23. Шмакова М. В. Сток рек северо-запада РФ // *Географический вестник*. 2021. №2(57). С. 65–74.
24. Сухачева Л. Л., Орлова М. И. О применении результатов спутниковых наблюдений восточной части Финского залива для оценки воздействия естественных и антропогенных факторов на состояние акватории и биотических компонентов экосистемы // *Региональная экология*. 2014. № 1—2 (35). С. 62–76.
25. Григорьев А. Г. Закономерности распределения и накопления радионуклидов в донных отложениях Балтийского моря. Авт. на соискание ученой степени канд. геол.-мин. наук. 2003, СПб, 25 с.
26. Lukkari K., Leivuori M., Vallius H., Kotilainen A. The chemical character and burial of phosphorus in shallow coastal sediments in the northeastern Baltic Sea // *Biochemistry*. 2009. 94. P. 141–162.
27. Исаев А. В. Количественные оценки пространственно-временной изменчивости абиотических характеристик экосистемы восточной части Финского залива на основе данных наблюдений и математического моделирования: Авт. На соискание ученой степени канд. геогр. наук. 2010, СПб. 21 с.
28. Информационный бюллетень №9: Состояние геологической среды континентального шельфа Балтийского, Белого и Баренцева морей. СПб.: изд-во ФГУНПП «Севморгео», 2007. 55 с.
29. Еремина Т. Р., Карлин Л. Н. Современные черты гидрохимических условий в восточной части Финского залива / Экосистема эстуария реки Невы: биологическое разнообразие и экологические проблемы. М.: ООО Тов-во науч. изд. КМК, 2008. С. 24–38.

30. Максимов А. А. Межгодовая и многолетняя динамика макрозообентоса на примере вершины Финского залива. СПб.: Нестор-История, 2018. 260 с.
31. Волощук Е. В., Еремина Т. Р., Рябченко В. А. Моделирование биогеохимических процессов в донных отложениях в восточной части Финского залива с использованием диагенетической модели // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8. № 4. С. 106—113.
32. Maximov A., Bonsdorff E., Eremina T. et al. Context-dependent consequences of *Marenzelleria spp.* (Spionidae: Polychaeta) invasion for nutrient cycling in the Northern Baltic Sea // *Oceanologia*. 2015. Vol. 57, No. 4. P. 342—348. Doi: 10.1016/j.oceano.2015.06.002.
33. Еремина Т. Р., Волощук Е. В., Максимов А. А. Оценка биогеохимических изменений в донных отложениях восточной части Финского залива вследствие вселения полихет *Marenzelleria spp.* по данным наблюдений и результатам моделирования // Известия Русского географического общества. 2016. Т. 148, № 1. С. 55—71.
34. Волощук Е. В., Еремина Т. Р., Ланге Е. К., Аверкиев А. С. Влияние климатических изменений и антропогенной деятельности на гидрометеорологический режим и состояние экосистемы Финского залива Балтийского моря // Гидрометеорология и экология. 2023. № 72. С. 493—511. doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-493-511.

References

1. Eremina T. R., Maximov A. A., Voloshchuk E. V. Effects of climatic variability on deep-water oxygen conditions in the Eastern Gulf of Finland. *Okeanologia = Oceanology*. 2012; 52(6):(836—845). (In Russ.).
2. Eremina T. R., Vladimirova O. M., Savchuk O. P. The impact of climate change and biogenic load on the state of the Baltic Sea ecosystem based on modeling results. *The seas of Russia: challenges of Russian science: Proceedings of the International Scientific conference*, Sevastopol, September 26-30, 2022. Marine Hydrophysical Institute, 2022. (303—304). (In Russ.).
3. Vladimirova O. M., Eremina T. R., Isaev A. V. et al. Model estimates of nitrogen and phosphorus budget components for the Gulf of Finland ecosystem. *Uchenye zapiski Rossijsko gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta = Proceedings of Russian State Hydrometeorological University*. 2018; (53): (72—82). (In Russ.).
4. Kotilainen A. T., Arppe L., Dobosz S. et al. Echoes from the past: a healthy Baltic Sea requires more effort. *AMBIO*. 2014; (43): 60—68. doi: 10.1007/s13280-013-0477-4.
5. Warden L., Moros M., Neumann T. et al. Climate induced human demographic and cultural change in northern Europe during the mid Holocene. *Scientific reports*. 2017; 7(1): 1—11. doi: 10.1038/s41598-017-14353-5.
6. Zillén L., Conley D. J., Andrén Th. E. et al. Past occurrences of hypoxia in the Baltic Sea and the role of climate variability, environmental change and human impact. *Earth—Science Reviews*. 2008; (91): 77—92. doi: 10.1016/j.earscirev.2008.10.001.
7. Vallius H. Heavy metal concentrations in sediment cores from the northern Baltic Sea: Declines over the last two decades. *Marine Pollution Bulletin*. 2014; (79): 359—364. doi: 10.1016/j.marpolbul.2013.11.017.
8. Vallius H. Sediment geochemistry studies in the Gulf of Finland and the Baltic Sea: a retrospective view. *Baltica*. 2016; 29 (1): 57—64. doi: 10.5200/baltica.2016.29.06.
9. Ryabchuk D., Vallius H., Zhamoida V. et al. Pollution history of Neva Bay bottom sediments (eastern Gulf of Finland, Baltic Sea). *Baltica*. 2017; 30(1): 31—46. doi: 10.5200/baltica.2017.30.04.
10. Savchuk O. P., Wulff F. Long-term modeling of large-scale nutrient cycles in the entire Baltic Sea. *Hydrobiologia*. 2009; 629(1): 209—224. doi: 10.1007/s10750-009-9775-z.
11. Ryabchuk D. V., Sergeev A. Yu., Prishchepenko D. V. et al. Impact of climate change on sedimentation processes in the eastern Gulf of Finland during the Middle to Late Holocene. *Boreas*. 2021; (50): 381—403. doi: 10.1111/bor.12500.
12. *Atlas geologicheskikh i ekologo-geologicheskikh kart Rossijskogo sektora Baltijskogo morya*. Atlas of geological and ecological-geological maps of the Russian sector of the Baltic Sea. SPb: VSEGEI, 2010: 78 p. (In Russ.).

13. Zhamoida V., Grigoriev A., Gruzдов K., Ryabchuk D. The influence of ferromanganese concretions-forming processes in the eastern Gulf of Finland on the marine environment. *Geological Survey of Finland, Special Paper*. 2007; (45): 21—32.
14. Zhamoida V., Grigoriev A., Ryabchuk D. et al. Ferromanganese concretions of the eastern Gulf of Finland — Environmental role and effects of submarine mining. *Journal of Marine Systems*. 2017; (172): 178—187. doi: 10.1016/j.jmarsys.2017.03.009.
15. Prishchepenko D. V., Ryabchuk D. V., Zhamoida V. A. et al. Main trends and results of 300-years anthropogenic impact on the geological environment and ecosystem of the Eastern Gulf of Finland. *Continental Shelf Research*. 2023; (265): 105058. doi: 10.1016/j.csr.2023.105058.
16. Shatrova O. V., Eremina T. R., Lange E. K. Analysis of variability of eutrophication parameters in the Gulf of Finland based on field observations. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of RSHU*. 2016; (44): (129—140). (In Russ.).
17. Zhamoida V. A., Butylin W. P., Glasby G. P., Popova I. A. The nature of ferromanganese concretions from the eastern gulf of Finland, Baltic Sea. *Marine Georesources & Geotechnology*. 1996; 14(2): 161—176. doi: 10.1080/10641199609388309.
18. Grigoriev A. G., Zhamoida V. A., Glasby G. P. Distribution of radionuclides in ferromanganese concretions associated sediments from the northern-eastern Gulf of Finland. *Baltica*. 2004; 17(2): 63—70.
19. Vallius H. Recent sediments of the Gulf of Finland: an environment affected by the accumulation of heavy metals. Turku. 1999: 111 p.
20. Vallius H., Ryabchuk D., Kotilainen A. Distribution of heavy metals and arsenic in the soft surface sediments of the coastal area off Kotka, north-eastern Gulf of Finland, Baltic Sea. *Geological Survey of Finland, Special Paper*. 2007; (45): 31—46.
21. Ulyanova M. O., Sivkov V. V., Bashirova L. D. et al. Oceanological research of the Baltic Sea on the 51st cruise P/V«Akademik Sergey Vavilov» (June—July 2021). *Okeanologiya = Oceanology*. 2022; 62(4): (667—669). doi: 10.31857/S003015742204013X. (In Russ.).
22. Nezhilovsky R. A. *Voprosy gidrologii r. Nevy i Nevskoj guby = Issues of hydrology of the Neva River and the Neva Bay*. Leningrad: Hydrometeoizdat. 1988: 108p. (In Russ.).
23. Shmakova M. V. River flow in the north—west of the Russian Federation. *Geograficheskij vestnik = Geographical Bulletin*. 2021; 2(57): (65—74). (In Russ.).
24. Sukhacheva L. L., Orlova M. I. On the application of the results of satellite observations of the eastern part of the Gulf of Finland to assess the impact of natural and anthropogenic factors on the state of the water area and biotic components of the ecosystem. *Regionalnaya ekologiya = Regional ecology*. 2014; 1—2 (35): (62—76). (In Russ.).
25. Grigoriev A. G. *Zakonornosti raspredeleniya i nakopleniya radionuklidov v donnyh otlozheniyah Baltijskogo moray = Patterns of distribution and accumulation of radionuclides in the bottom sediments of the Baltic Sea*. PhD thesis. SPb. 2003: 25 p. (In Russ.).
26. Lukkari K., Leivuori M., Vallius H., Kotilainen A. The chemical character and burial of phosphorus in shallow coastal sediments in the northeastern Baltic Sea. *Biochemistry*. 2009; (94): 141—162.
27. Isaev A. V. *Kolichestvennye ocenki prostranstvenno-vremennoj izmenchivosti abioticheskikh harakteristik ekosistemy vostochnoj chaste Finskogo zaliva na osnove dannyh nablyudenij i matematicheskogo modelirovaniya = Quantitative estimates of the spatial and temporal variability of the abiotic characteristics of the eastern part of the Gulf of Finland ecosystem based on observational data and mathematical modeling*. PhD thesis. SPb. 2010: 21 p. (In Russ.).
28. *Informacionnyj byulleten' № 9: Sostoyanie geologicheskoy sredy kontinental'nogo shel'fa Baltijskogo, Belogo i Barenceva morej = Newsletter No. 9: The state of the geological environment of the continental shelf of the Baltic, White and Barents Seas*. SPb: «Sevmorgeo». 2007: 55 p. (In Russ.).
29. Eremina T. R., Karlin L. N. *Sovremennye cherty gidrohimiicheskikh uslovij v vostochnoj chaste Finskogo zaliva = Modern features of hydrochemical conditions in the eastern part of the Gulf of Finland*. Ecosystem of the Neva River estuary: biological diversity and environmental problems. M.: OOO Tov—vo nauch. izd. KMK. 2008: 24—38. (In Russ.).
30. Maximov A. A. *Mezhgodovaya i mnogoletnyay dinamika makrozoobentosa na primere vershiny Finskogo zaliva = Interannual and long-term dynamics of macrozoobenthos on the example of the top of the Gulf of Finland*. SPb: Nestor-Istoriya. 2018: 260 p. (In Russ.).

31. Voloshchuk E. V., Eremina T. R., Ryabchenko V. A. Modeling of biogeochemical processes in bottom sediments in the eastern part of the Gulf of Finland by means of diagenetic model. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika = Fundamental and applied hydrophysics*. 2015; 8(4): (106—113). (In Russ.).
32. Maximov A., Bonsdorff E., Eremina T. et al. Context-dependent consequences of *Marenzelleria spp.* (Spionidae: Polychaeta) invasion for nutrient cycling in the Northern Baltic Sea. *Oceanology*. 2015; 57(4): 342—348. doi: 10.1016/j.oceano.2015.06.002.
33. Eremina T. R., Voloshchuk E. V., Maximov A. A. Assessment of biogeochemical changes in the bottom sediments of the eastern part of the Gulf of Finland due to invasion of polychaetes *Marenzelleria spp.* on observational data and modeling results. *Izvestiya RGO = News of RGS*. 2016; 148(1): (55—71). (In Russ.).
34. Voloshchuk E. V., Eremina T. R., Lange E. K., Averkiev A. S. The impact of climate change and anthropogenic activities on the hydrometeorological regime and the state of the ecosystem of the Gulf of Finland of the Baltic Sea. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2023; (72): (493—511). doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-493-511. (In Russ.).

Информация об авторах

Рябчук Дарья Владимировна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории спутниковой океанографии, Российский государственный гидрометеорологический университет, Daria_Ryabchuk@mail.ru.

Ерёмина Татьяна Рэмовна, кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории спутниковой океанографии, Российский государственный гидрометеорологический университет, Tanya.er@gmail.com.

Сергеев Александр Юрьевич, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Арктической лаборатории, Российский государственный гидрометеорологический Университет, Alexander_Sergeev@karpinskyinstitute.ru.

Рыбалко Александр Евменьевич, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории геомониторинга недр, ФГБУ «ВНИИОкеангеология», okeangeo@vniio.ru.

Жамойда Владимир Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Отдела региональной геоэкологии и морской геологии, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского.

Григорьев Андрей Глебович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник отдела региональной геоэкологии и морской геологии, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского.

Волощук Екатерина Васильевна, кандидат географических наук, научный сотрудник Арктической лаборатории, Российский государственный гидрометеорологический университет, Ketrin492006@mail.ru.

Дьячковский Роман Андреевич, инженер-исследователь, Санкт-Петербургский государственный университет.

Евдокименко Антон Владимирович, инженер 1 категории отдела региональной геоэкологии и морской геологии, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского.

Information about authors

Daria V. Ryabchuk, PhD (geological and mineralogical sciences), Senior Researcher at the Laboratory of Satellite Oceanography, Russian State Hydrometeorological University.

Tatiana R. Eremina, (Phys. and Math. Sci.), Associate Professor, Leading Researcher at the Laboratory of Satellite Oceanography, Russian State Hydrometeorological University.

Alexander Yu. Sergeev, PhD (geological and mineralogical sciences), Researcher at the Arctic Laboratory, Russian State Hydrometeorological University.

Alexander E. Rybalko, Doctor (geological and minareological sciences), leading Researcher at the Laboratory of Geomonitoring of the Subsoil, «VNIIOkeangeologiya».

Д. В. РЯБЧУК, Т. Р. ЕРЕМИНА, А. Ю. СЕРГЕЕВ и др.

Vladimir A. Zhamoida, PhD (geological and mineralogical sciences), leading Researcher at the Department of Regional Geoecology and Marine Geology, A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute.

Andrey G. Grigoriev, PhD (geological and mineralogical sciences), Senior Researcher at the Department of Regional Geoecology and Marine Geology, A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute.

Ekaterina V. Voloshchuk, PhD (geogr. sciences), Researcher at the Arctic Laboratory, Russian State Hydrometeorological University.

Roman A. Dyachkovsky, Research Engineer, Saint-Petersburg State University.

Anton V. Evdokimenko, 1st Category Engineer of the Department of Regional Geoecology and Marine Geology, A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 10.12.2025

Принята в печать 16.02.2026

The article was received on 10.12.2025

The article was accepted on 16.02.2026