



[https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(3\)-2](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(3)-2)

EDN LFCYLK

УДК 551.468

© А. В. Крек*, А. А. Кондрашов, В. А. Кречик, А. О. Корж, М. В. Капустина, М. Н. Голенко,
В. М. Журбас, В. Т. Пака, 2025

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36

*av_krek_ne@mail.ru

Вертикальные колебания перманентного галоклина на восточном склоне Гданьской впадины по результатам автономных измерений

Статья поступила в редакцию 26.03.2025, после доработки 23.07.2025, принята в печать 07.08.2025

Аннотация

В Атлантическом отделении Института океанологии РАН разработана и изготовлена по модульному принципу автономная гирлянда термодатчиков. По результатам измерений на восточном склоне Гданьской впадины Балтийского моря отмечены колебания изотерм. Интерпретация колебаний перманентного галоклина показала, что основной причиной их подъема являются события, при которых при антициклонической циркуляции в водной толще возникает компенсационное течение в придонном слое. Такое компенсационное течение, направленное на восток вдоль южного склона Гданьской впадины, приподнимает изотермы вблизи восточного склона. Максимальная корреляция между глубиной залегания изотермы 5,5 °С и проекцией вектора напряжения трения ветра наблюдалась при западном ветре с небольшой долей северного и с задержкой по времени 38–48 часов. Такая временная задержка обеспечивается инерцией системы. Также по результатам натурных измерений проведена верификация данных модели NEMO, которая показала неточности модели: запаздывание и сглаживание колебаний. Особенно сильные различия отмечаются для верхней части гирлянды термодатчиков, где по модельным данным отсутствуют высокочастотные колебания. У дна высокочастотных колебаний становится значительно меньше и модель достаточно точно, хоть и с запозданием, воспроизводит вертикальные движения выбранной изотермы.

Ключевые слова: Гданьская впадина, Балтийское море, гирлянда термодатчиков, температура воды, перманентный галоклин, колебания изотерм

© А. В. Крек*, А. А. Kondrashov, V. A. Krechik, A. O. Korzh, M. V. Kapustina, M. N. Golenko, V. M. Zhurbas,
V. T. Paka, 2025

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow 117997, Russia

*av_krek_ne@mail.ru

Vertical Variations of the Permanent Halocline on the Eastern Slope of the Gdansk Basin Based on the Results of Autonomous Measurements

Received 26.03.2025, Revised 23.07.2025, Accepted 07.08.2025

Abstract

At the Atlantic Branch of P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, an autonomous thermistor chain was developed and manufactured using a modular design. Measurements conducted on the eastern slope of the Gdańsk Basin (Baltic Sea) revealed fluctuations in isotherms. Interpretation of the permanent halocline oscillations

Ссылка для цитирования: Крек А.В., Кондрашов А.А., Кречик В.А., Корж А.О., Капустина М.В., Голенко М.Н., Журбас В.М., Пака В.Т. Вертикальные колебания перманентного галоклина на восточном склоне Гданьской впадины по результатам автономных измерений // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18, № 3. С. 19–36. EDN LFCYLK. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(3\)-2](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(3)-2)

For citation: Krek A.V., Kondrashov A.A., Krechik V.A., Korzh A.O., Kapustina M.V., Golenko M.N., Zhurbas V.M., Paka V.T. Vertical Variations of the Permanent Halocline on the Eastern Slope of the Gdansk Basin Based on the Results of Autonomous Measurements. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(3):19–36. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(3\)-2](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(3)-2)

showed that their upward shift is primarily caused by events in which anticyclonic circulation in the water column generates a compensatory current in the bottom layer. This compensatory current, flowing eastward along the southern slope of the Gdańsk Basin, lifts the isotherms near the eastern slope. The highest correlation between the depth of the 5.5 °C isotherm and the projection of the wind stress vector was observed under westerly winds with a slight northerly component, with a time lag of 38–48 hours. This delay is attributed to the system's inertia. Field measurements were also used to validate the NEMO model data, revealing model inaccuracies: a time lag and smoothing of fluctuations. The most significant discrepancies were observed in the upper part of the temperature sensor string, where the model failed to reproduce high-frequency oscillations. Near the bottom, high-frequency fluctuations diminish, and the model reproduces the vertical movements of the selected isotherm with reasonable accuracy, though still with a delay.

Keywords: Gdansk Basin, Baltic Sea, thermistor chain, water temperature, permanent halocline, isotherm variations

1. Введение

Балтийское море представляет собой мелководный внутриматериковый бассейн Атлантического океана, сообщающийся с Северным морем системой узких мелководных проливов, затрудняющих водообмен. Водная толща Балтийского моря имеет выраженную стратификацию, где перманентный пикнолин/галоклин (совпадающий с оксиклином и характеризующийся инверсией температуры, вносящей незначительный вклад в ослабление гидростатической устойчивости) затрудняет вертикальное перемешивание глубинных и поверхностных вод [1–5]. Численные модели показывают общую циклоническую циркуляцию, охватывающую всю толщу воды в Центральной Балтике [6–8].

В условиях Балтийского моря как колебания уровня свободной поверхности, так и вертикальные колебания внутренних слоев в первую очередь подвержены влиянию атмосферных процессов [9–16].

Положение перманентного галоклина на склоне Гданьской впадины определяет зону смены окислительно-восстановительных условий, ограничивая распространение сложных форм жизни вниз по склону. Любые колебания этой зоны находят отражение в развитии донных сообществ, которые вынуждены приспособляться к чередованию кислородных и бескислородных условий [17].

Цель работы — изучение вертикальных колебаний слоев воды в перманентном галоклине на восточном склоне Гданьской впадины по данным натурных измерений и верификация этими наблюдениями данных модели NEMO.

2. Материалы и методы

Для изучения колебаний слоя скачка плотности были выбраны термодатчики как наиболее надежные и простые измерительные приборы. Хотя пикноклин в Балтийском море формируется за счет градиента солености [18], сопутствующая инверсия температуры очень хорошо маркирует слой перманентного галоклина/пикноклина. Таким образом, с колебаниями изогалин и изопикн совпадают колебания изотерм, что дает возможность изучать структуру водной толщи и ее колебания по измерениям температуры.

2.1. Конструктивные особенности гирлянды термодатчиков

Для решения задачи получения данных вертикального распределения температуры воды в АО ИО РАН была изготовлена гирлянда термодатчиков. Конструкция представляет собой несколько модулей измерения температуры, размещенных на кабеле. Модуль представляет собой корпус в виде короткой пластиковой трубки, закрываемый с двух сторон пробками с поршневыми резиновыми уплотнениями. Печатная плата с измерительной электроникой помещается внутрь корпуса и закрепляется на одной из крышек. Измерение внешней температуры производится через U-образную медную трубку, выведенную за пределы одной из пробок. Такая конструкция обеспечивает выравнивание внешнего и внутреннего давления измерительных модулей за счет подвижности пробок, что препятствует проникновению внутрь воды под давлением. Внутренний объем модулей заполняется диэлектрической жидкостью.

В качестве измерительного элемента в каждом из модулей применен платиновый тонкопленочный термометр сопротивления мод. 700-102BAA-B00 производства фирмы Honeywell, включенный в измерительный мост Уитстона. Усиление и оцифровка осуществляется микросхемой ADUC848 производства Analog Devices, со встроенным 16-разрядным аналого-цифровым преобразователем, что обеспечивает точность измерения температуры $\pm 0,01$ °C при разрешении $\pm 0,001$ °C в диапазоне от -5 до $+35$ °C.

Связь между модулями и основным блоком управления и сохранения данных осуществляется посредством интерфейса RS-485. Измерение давления осуществляется за счет встроенного в основной модуль датчика избыточного давления Д-0.25 производства фирмы Микротензор и обеспечивающего погрешность $\pm 0,5\%$ от диапазона 25 Бар.

Градуировка термокос производилась в метрологической лаборатории АО ИО РАН непосредственно перед установкой и после поднятия донной станции. Термостатирование среды при градуировке осуществлялось в термостате ТВП-6, обеспечивающем среднеквадратичное отклонение случайной составляющей погрешности температуры в рабочей камере не более $\pm 0,003^\circ\text{C}$. В качестве образцового средства использовалась комбинация стандартного платинового термометра сопротивления Rosemount 162CE и автоматического измерительного моста АТВ-1250 производства Neil Brown Instrument Systems, обеспечивающие погрешность измерения $\pm 0,001^\circ\text{C}$. Для воспроизведения реперной точки МПТШ-90 ($29,7646^\circ\text{C}$) перед началом градуировки производилось контрольное измерение в галлиевом температурном эталоне мод. 17402 производства Yellow Springs Instruments Co. Термокоса вместе с платиновым термометром помещались в рабочий бак термостата, и после стабилизации температуры в объеме производилось считывание параметров.

2.2. Район исследований и схема постановки гирлянды термодатчиков

Донная станция с гирляндой термодатчиков была установлена на восточном склоне Гданьской впадины на глубине 85 м (рис. 1) и охватывала слой 50–82 м. Здесь расположена граница смены окислительно-восстановительных условий, изменение положения которой критически важно для развития донных сообществ и экосистемы в целом.

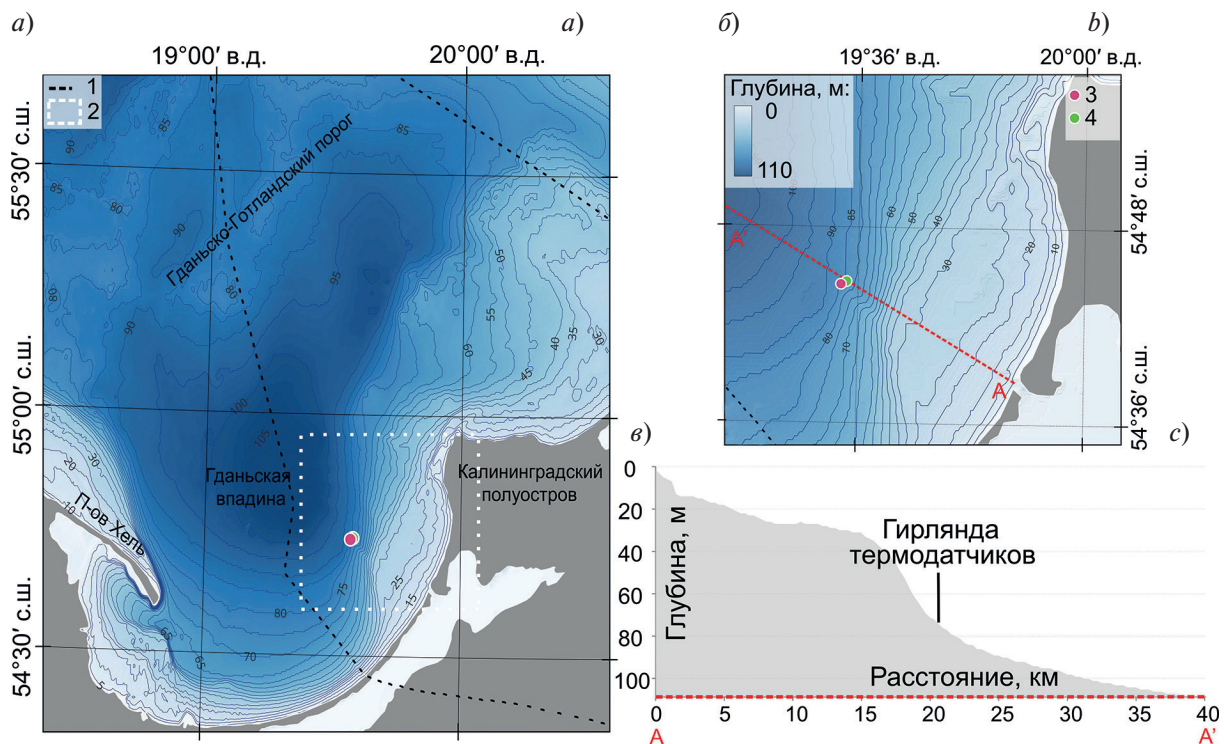


Рис. 1. Схема положения гирлянды термодатчиков в Гданьском бассейне (а); на врезке (б) и схеме (в) показано положение гирлянды термодатчиков на склоне Гданьской впадины, красным пунктиром показан профиль рельефа дна по линии А-А'. Условные обозначения на легендах: 1 — граница РФ; 2 — границы врезки б; 3 — узел реанализа СМЕМС; 4 — точка постановки гирлянды термодатчиков

Fig. 1. Position of the thermistor chain in the Gdansk Basin (a); inset (b) and scheme (c) show the position of the thermistor chain on the slope of the Gdansk Deep, the red dotted line shows the profile of the bottom relief along the line A-A'. Legend: 1 — the boundary of the Russian Federation; 2 — inset b borderline; 3 — CMEMS reanalysis data station; 4 — thermistor chain position

В эксперименте использовались две однотипные гирлянды термодатчиков, каждая из которых была укомплектована, помимо основного блока, восемью термомодулями. Перед постановкой донной станции гирлянда термодатчиков была закреплена на буйрепе с шагом 2 м. Расстояние между якорями составляло 150 м. Расстояние между якорем и первым термодатчиком — 1 м (рис. 2, табл. 1).

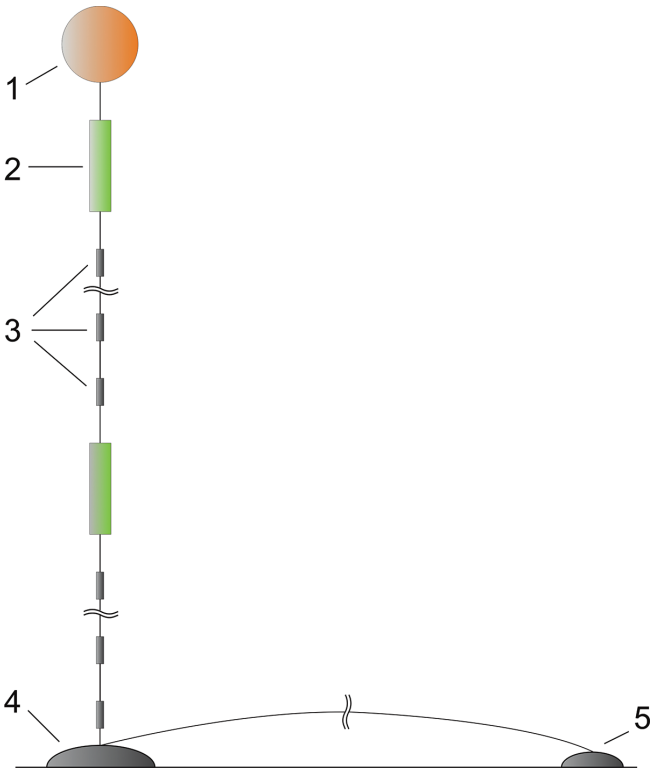


Рис. 2. Схема донной станции с двумя гирляндами термодатчиков (масштаб не соблюден). Условные обозначения: 1 — плавучесть, 2 — основной блок с датчиком давления, 3 — термодатчики, 4 — основной якорь, 5 — отводной якорь. Последовательность термодатчиков начиная от якоря: T09-T08-T07-T06-T05-T04-T03-T02 (основной блок T00-09); T19-T17-T16-T15-T14-T13-T12-T11 (основной блок T10-19)

Fig. 2. Mooring station scheme with two thermistor chains (not to scale). Legend: 1 — buoyancy, 2 — main module with pressure sensor, 3 — temperature sensor, 4 — main anchor, 5 — additional anchor. Sequence of temperature sensors starting from the anchor: T09-T08-T07-T06-T05-T04-T03-T02 (main module T00-09); T19-T17-T16-T15-T14-T13-T12-T11 (main module T10-19)

Таблица 1
Table 1

Сводная характеристика постановки
Summary of deployment

Дата постановки	Время постановки	Дата отключения	Время отключения	Глубина, м	Номер прибора	Координаты	
						с.ш.	в.д.
25.06.2024	19:20:25	T00-09 (04.09.2024)	T00-09 (20:27:02)	84,8	T00-09	054° 44,66′	019° 34,76′
		T10-19 (17.08.2024)	T10-19 (09:29:02)		T10-19		

Примечание: Постановка термокосы была выполнена в 56-м рейсе НИС «Академик Борис Петров», снятие — с МИС «Норд-3».
Note: The thermistor chain was deployed during the 56th cruise of the R/V "Akademik Boris Petrov" and recovered from the small research vessel "Nord-3".

3. Работа с моделью NEMO

3.1. Оценка достоверности модельных данных (NEMO)

Исследование структуры течений и температуры воды в период постановки гирлянды термодатчиков производилось по данным реанализа CMEMS Baltic Sea Physics Analysis and Forecast (реанализ для Балтийского моря) [19] на двух горизонтах (28,1 и 80,1 м). Это массив ежечасных и среднесуточных данных на регулярной сетке с размером ячейки 2×2 км.

По данным [20] среднее систематическое отклонение по температуре составляет $0,2^\circ\text{C}$. Среднеквадратичное отклонение, скорректированное на смещение (cRMSD), демонстрирует самые высокие значения вдоль береговой линии, превышая $+1,5^\circ\text{C}$. Самые низкие значения cRMSD ($<0,5^\circ\text{C}$) наблюдаются в южной части Балтийского моря. Систематическое отклонение колеблется от $-0,3$ до $1,0^\circ\text{C}$ на поверхности моря и от $1,7^\circ\text{C}$ до $0,8^\circ\text{C}$ на самой большой глубине в каждой точке, что зависит от наличия данных. cRMSD варьируется от $0,1$ до $2,25^\circ\text{C}$ на поверхности и от $0,3^\circ\text{C}$ до $2,3^\circ\text{C}$ на дне.

В поверхностном слое смещение скорости течения составляет от $-0,08$ до $0,23$ м/с, направления — от 28° до 35° , cRMSD — $0,08$ – $0,23$ м/с и 68° – 99° . В придонном слое смещение скорости — от $-0,05$ до $0,03$ м/с, направления — от -48° до 6° , cRMSD — $0,04$ – $0,10$ м/с и 73° – 93° .

3.2. Интеркалибрация NEMO

Интеркалибрация модельных данных с измерениями гирлянды термодатчиков была выполнена на четырех горизонтах (табл. 2). Для сравнения были выбраны датчики косы, расположенные наиболее близко к глубинам расчета в ближайшем модельном узле сетки (табл. 2), расположенном на расстоянии 700 м от точки установки косы. Первый датчик (T13) располагался вблизи ядра холодного промежуточного слоя (ХПС), средняя глубина которого в Гданьском бассейне составляет около 50 м [21]. Глубина датчика T17 соответствовала глубине верхней границы галоклина в районе исследования (60–65 м) по данным работы [22]. Датчики T2 и T7 занимали толщу воды в перманентном галоклине, который находился в придонном слое (около 3 м над дном).

Таблица 2

Table 2

Соотношение горизонтов установки гирлянды термодатчиков и модельных уровней

The relationship between temperature sensors installation depths and model levels

Датчик	Средняя глубина датчика, м	Модельная глубина, м	Разница глубин, м
T13	53,93	53,59	0,34
T17	61,89	61,28	0,61
T2	69,96	70,08	0,12
T7	79,85	80,07	0,22

3.3. Спектральный анализ

Для оценки периодов вертикальных смещения изолиний температуры был выполнен спектральный анализ результатов измерений на различных горизонтах. Оценка значимости различных частотных составляющих в сигнале проводилась сравнением мощности спектра вертикальных колебаний, который вычислялся методом мультисаггитации (multitaper). Метод широко используется для анализа временных рядов и позволяет получить более точную и устойчивую оценку спектра по сравнению с традиционными методами, такими как быстрое преобразование Фурье или метод Уэлча.

3.4. Данные о ветре

Данные направления и скорости ветра были в ближайшем узле модельной сетки реанализа ERA-5, созданного Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) [23]. Реанализ представляет собой комбинацию моделирования атмосферы и наблюдений за погодой, что позволяет получить согласованные и надежные данные о метеорологических процессах и параметрах. Данные были загружены с сайта Службы мониторинга морской среды Copernicus.

3.5. Зависимость колебаний галоклина от направления ветра

Следуя методу, изложенному в [24], была построена зависимость коэффициента корреляции между глубиной залегания z характерной для галоклина изотермы $5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и проекцией вектора напряжении трения ветра $\tau(\varphi) = \tau_x \cos(\varphi) + \tau_y \sin(\varphi)$ от угла φ и сдвига по времени lag . Угол φ отсчитывался от направления на восток (x) против часовой стрелки, а сдвиг по времени lag определялся как разность времени между фиксациями z и τ (т. е. бралась корреляция между рядами $\tau(t)$ и $z(t + lag)$).

4. Результаты

4.1. Изменение температуры воды по данным гирлянды термодатчиков

Структура водной толщи в диапазоне глубин 65–80 м значительно изменялась во времени. Были отмечены некоторые периоды (эпизоды) повышения температуры придонного слоя до значений более $6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$: 26 июня — 1 июля, 6–14 июля, 22–25 июля, 28–29 июля, 31 июля — 6 августа, 8–12 августа, 14 августа — 4 сентября, которые чередовались с периодами понижения температуры (рис. 3).

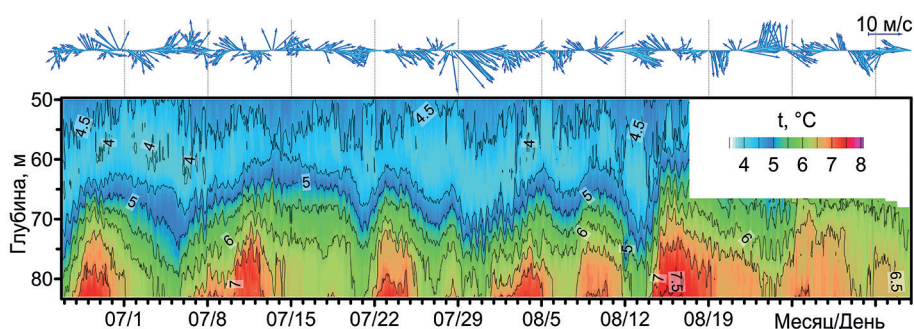


Рис. 3. Результаты записи данных гирлянды термодатчиков. Вверху синими стрелками показан ветер

Fig. 3. Results of recording data from a thermistor chain. The wind is shown by blue arrows

Спектральный анализ показал отчетливый пик с периодом около 14,7 часов, что в точности соответствует периоду инерционных колебаний $T_i = 0,5 \cdot T_{day} / \sin(\varphi) = 12\text{ ч} / \sin(54,744^{\circ}) = 14,70\text{ ч}$. Колебания более длительного периода, 50–56 ч. и 140–142 ч., выявленные спектральным анализом, сопоставимы с результатами исследования спектра колебаний уровня моря в Балтике [25], где было показано, что доминирующий пик энергии существует на периоде 120 ч, и непосредственно создается периодическим ветром и преобладает в течение нескольких дней; вторичный пик возникает примерно в диапазоне 55–60 ч. (рис. 4). Именно инерционные колебания и синоптическая изменчивость поля ветра объясняют вертикальные смещения изотерм на рис. 3 и роль последней, по-видимому, преобладает.

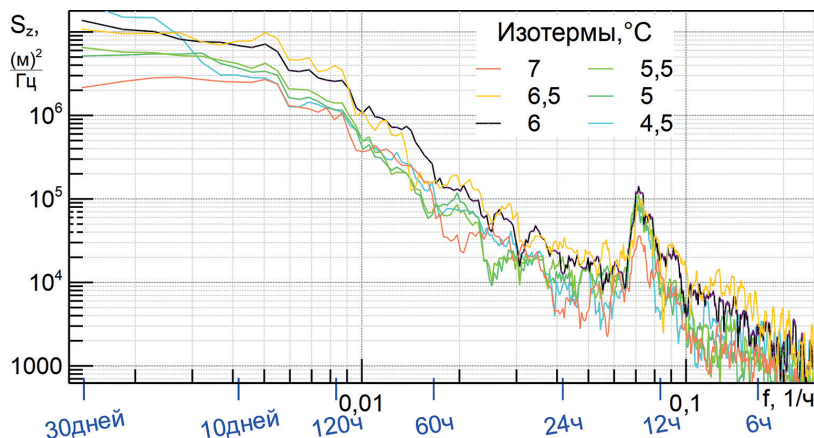


Рис. 4. Спектральный анализ данных гирлянды термодатчиков

Fig. 4. Spectral analysis of data from a thermistor chain

Стоит отметить, что в периоды поднятия галоклина (инверсионного термоклина), которым соответствует положительная флуктуация температуры по данным термодатчиков, по данным моделирования преобладала южная компонента течения, а в периоды заглубления — северная (рис. 5). Более детальное рассмотрение рис. 5 позволяет обнаружить, что периоды поднятия и заглубления запаздывают относительно соответствующих периодов южной и северной компонент течения на 1–3 сут.

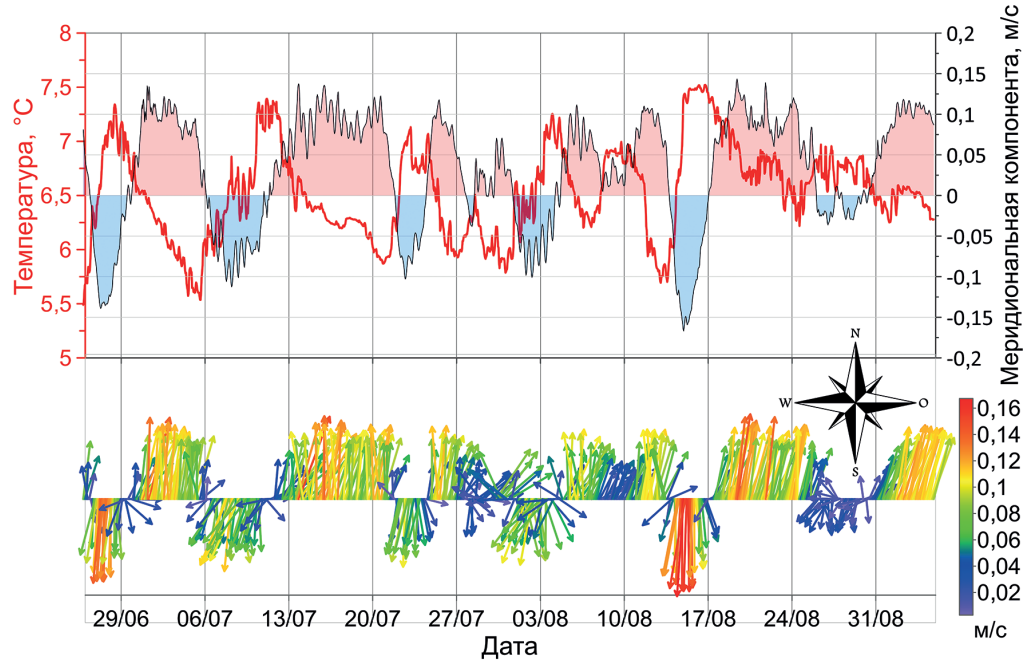


Рис. 5. Сопоставление изменения температуры по данным гирлянды термодатчиков и течений по данным модели NEMO

Fig. 5. Comparison of temperature changes according to the data of the thermistor chain and currents according to the NEMO model data

4.2. Сравнение данных гирлянды термодатчиков с NEMO

Результаты измерений датчика T13, расположенного в ХПС, показали минимальное значение температуры, а также сравнительно небольшие амплитуды ее изменчивости (рис. 6а). Стандартное отклонение составляло 0,172 °C, размах — 0,868 °C, а межквартильный размах — 0,232 °C (табл. 3). Временной ход температуры в ХПС характеризовался в основном короткопериодной изменчивостью с небольшими амплитудами. Данные моделирования показали более сглаженный временной ряд. Модель значительно снизила амплитуду изменчивости температуры. Среднее квадратичное отклонение (СКО) у данных модели составило 0,061 °C, размах — 0,316 °C, а межквартильный размах (МР) — 0,084 °C, что почти в 3 раза меньше соответствующих характеристик массива натуральных данных. При этом наблюдается совпадение средних значений (табл. 3). На графике модели не проявляется долгопериодная изменчивость и не выражены высокочастотные колебания (см. рис. 6, а).

Вблизи верхней границы перманентного галоклина (датчик T17) во временном ходе заметно снижалась доля короткопериодных колебаний небольшой амплитуды и возрастала долгопериодная изменчивость (рис. 6, б). На данных описательной статистики измерений это проявляется в значениях СКО (0,273 °C), размаха (1,529 °C) и МР (0,382 °C). Долгопериодные и короткопериодные колебания хорошо воспроизводились моделью (рис. 6, б). Однако модельные данные отличаются систематическим завышением значений. Модельное среднее составляет 4,663 °C, среднее значение контактных измерений — 4,337 °C (табл. 3). Также снова имеет место занижение амплитуды температурной изменчивости. СКО, размах и МР модельных данных составляют 0,183; 0,942 и 0,209 °C, что примерно в 1,5 раза ниже, чем у выборки данных измерений (табл. 3).

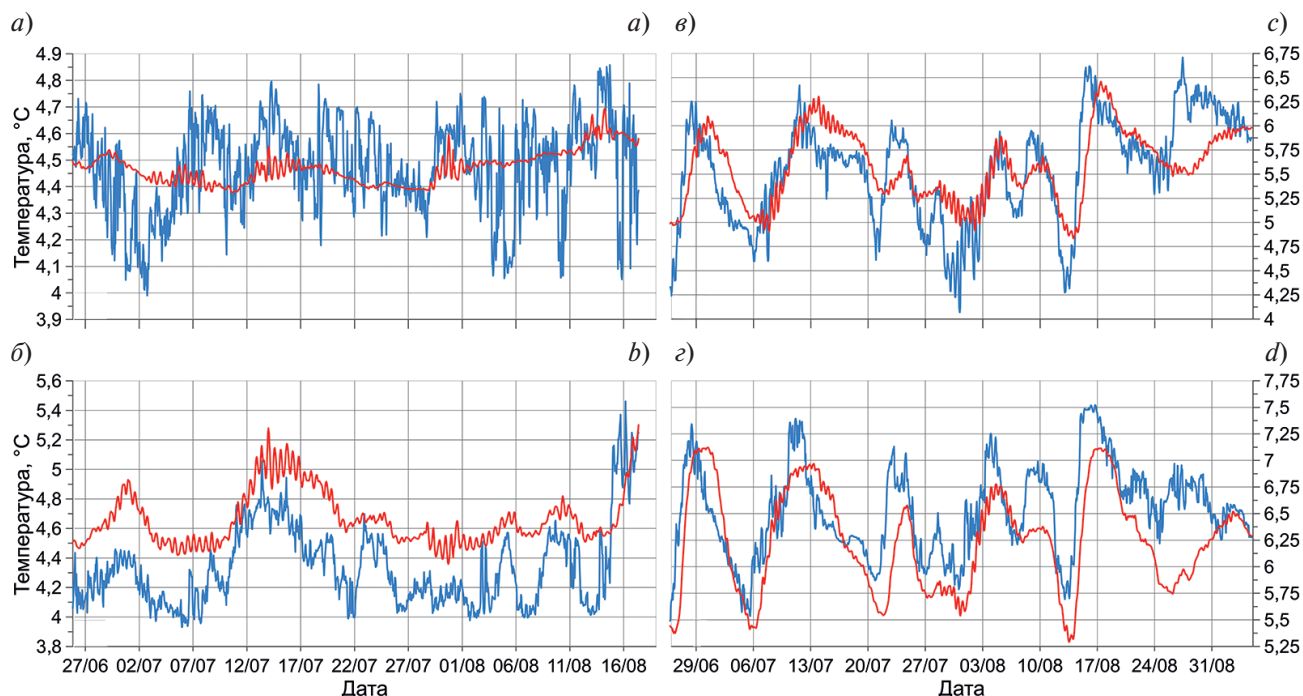


Рис. 6. Сравнение временного хода температуры по измеренным (синяя линия) и модельным (красная линия) данным на горизонтах 53 м (а), 62 м (б), 70 м (в) и 80 м (г)

Fig. 6. Comparison of the time course of temperature according to measured (blue line) and model (red line) data at layers of 53 m (a), 62 m (b), 70 m (c) and 80 m (d)

Таблица 3

Table 3

Описательная статистика рядов измерений датчиков термокосы и модельных данных на соответствующих горизонтах

Descriptive statistics of the thermistor chain's sensors measurements series and model data at the respective levels

	T13 (53,93 м)	Модель (53,59 м)	T17 (61,89 м)	Модель (61,28 м)	T2 (69,96 м)	Модель (70,08 м)	T7 (79,85 м)	Модель (80,07 м)
Кол-во измерений	1262	1262	1262	1262	1705	1705	1705	1705
Среднее	4,472	4,472	4,337	4,663	5,542	5,589	6,529	6,253
СКО	0,172	0,061	0,273	0,183	0,533	0,367	0,424	0,472
Минимум	3,990	4,377	3,932	4,359	4,07	4,835	5,49	5,292
1-й квартиль	4,365	4,418	4,120	4,531	5,166	5,304	6,242	5,840
Медиана	4,491	4,471	4,272	4,614	5,645	5,585	6,529	6,281
3-й квартиль	4,597	4,502	4,502	4,740	5,925	5,899	6,814	6,594
Максимум	4,858	4,693	5,461	5,301	6,708	6,458	7,521	7,123
Размах	0,868	0,316	1,529	0,942	2,638	1,623	2,031	1,831
MP	0,232	0,084	0,382	0,209	0,759	0,595	0,572	0,754

Временной ход вблизи ядра перманентного галоклина (датчик T2) также характеризуется преобладанием долгопериодной изменчивости с большими амплитудами (рис. 6, в). Характеристики вариативности измеренных данных на этом горизонте значительно возрастают. СКО, размах и МР составляют 0,533; 2,638 и 0,759 °С, соответственно (табл. 3). Короткопериодная изменчивость также присутствует на данных контактных измерений, но представляет собой дополнительный сигнал временного хода. Модельные данные хорошо воспроизводят ряд на качественном и количественном уровне (рис. 6, в). Разница в части центральной тенденции рядов заметно снижается. Среднее значение для ряда измерений составляет 5,542 °С, а для данных моделирования равно 5,589 °С. Однако тенденция занижения амплитуды изменений температуры также присутствует. Показатели вариативности модельных данных: 0,367; 1,623 и 0,595 °С для СКО, размаха и МР соответственно (табл. 3).

Похожая картина по данным измерений наблюдается в придонном слое. Здесь временной ход температуры на датчике Т7 показывает превалирующую роль долгопериодных колебаний большой амплитуды в изменчивости значений температуры. При этом высокочастотная изменчивость носит второстепенный характер (рис. 6, з). Модель, как и в случае с прошлым горизонтом, неплохо воспроизводит ряд натурных измерений. Однако, несмотря на относительно хорошую сходимость вариативных показателей измеренного и модельного рядов (табл. 3), предсказанные значения являются более сглаженными и в недостаточной степени воспроизводят амплитуды короткопериодных и долгопериодных колебаний (рис. 6, з). Кроме того, при сопоставлении двух рядов хорошо заметно систематическое занижение моделью значений измеренной температуры, что также хорошо проявляется в разнице средних значений рядов (табл. 3).

На горизонтах вблизи ядра перманентного галоклина и в придонном слое (датчики Т2 и Т7, соответственно) также отмечается отставание модельного хода температуры относительно натурных измерений. Результаты кросскорреляционного анализа показали, что запаздывание модели составляет 17 ч для глубины 70,08 м и 16 ч для придонного слоя (80,07 м). При смещении рядов на указанные значения лагов коэффициент корреляции Пирсона увеличивается с 0,70 до 0,79 для горизонта 70 м и с 0,69 до 0,78 для придонного горизонта 80 м.

5. Обсуждение

Структура течений на глубине 28–30 и 80 м в зависимости от подъема или опускания перманентного галоклина на восточном склоне Гданьской впадины была различна, но при этом имела общие особенности. Так, при поднятии перманентного галоклина (рис. 3) в слое 28–30 м был отмечен антициклонический вихрь, приводящий к западному направлению течений вдоль южного склона Гданьской впадины. В перманентном галоклине возникала обратная циклоническая циркуляция, с направлением вдольсклонового противотечения в восточном направлении (рис. 7). Такой механизм, по-видимому, приводил к подъему перманентного галоклина у восточного склона Гданьской впадины. Как правило, в точке постановки гирлянды термодатчиков возле склона развивается неустойчивое южное течение.

Эпизоды понижения перманентного галоклина соответствуют отсутствию антициклонической циркуляции в толще (рис. 8). Зачастую перманентный галоклин был также приподнят вблизи восточного склона Гданьской впадины, но на расстоянии от места постановки гирлянды термодатчиков.

Течение на горизонте 80 м, как правило, направлено на север и тоже может быть частью компенсации, либо более сложных мезомасштабных и присклоновых процессов. Исключением из общего правила было понижение температуры 16 июля, при циклонической циркуляции на горизонтах 28–30 м и типичному для такой циркуляции направлению течения на восток в придонном слое. Здесь, очевидно, сыграли роль присклоновые процессы, отжавшие поднятый перманентный галоклин от склона.

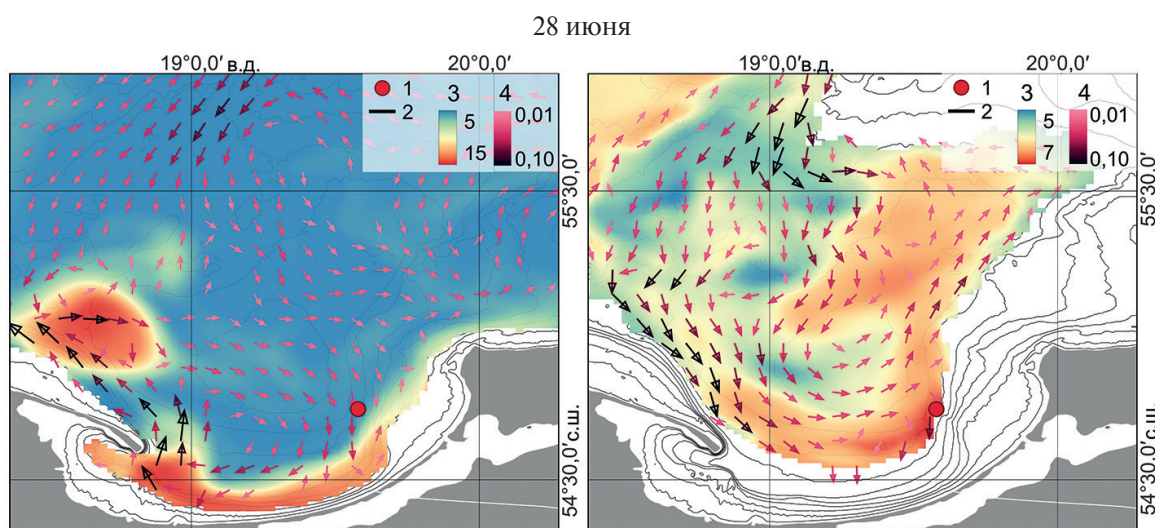
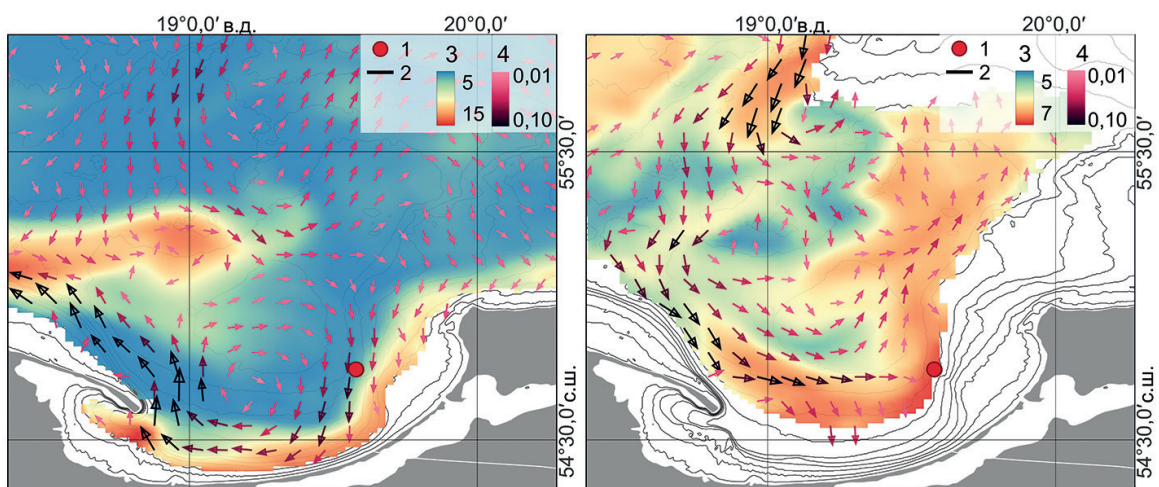


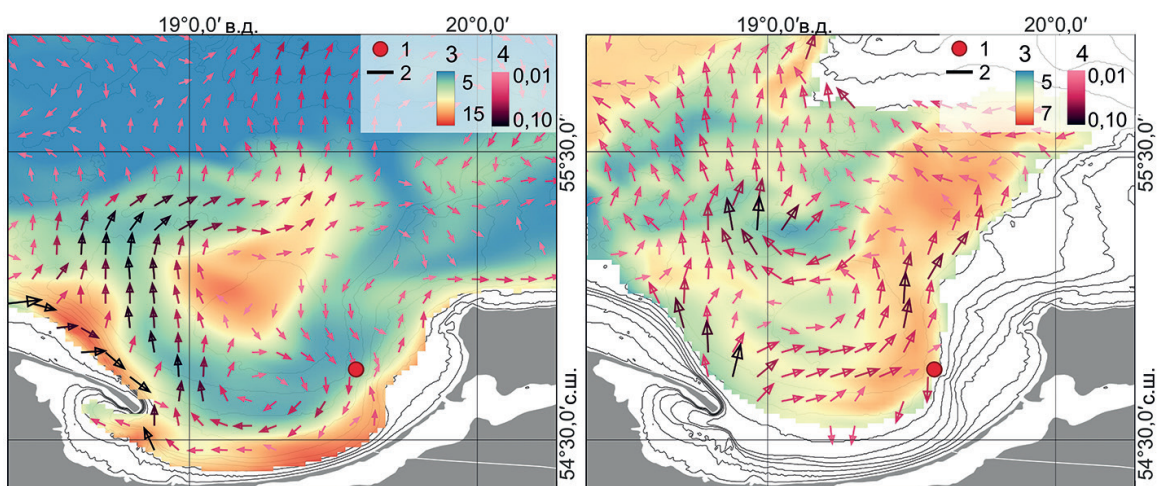
Рис. 7. Окончание на с. 28–29

Fig. 7. Fin p. 28–29

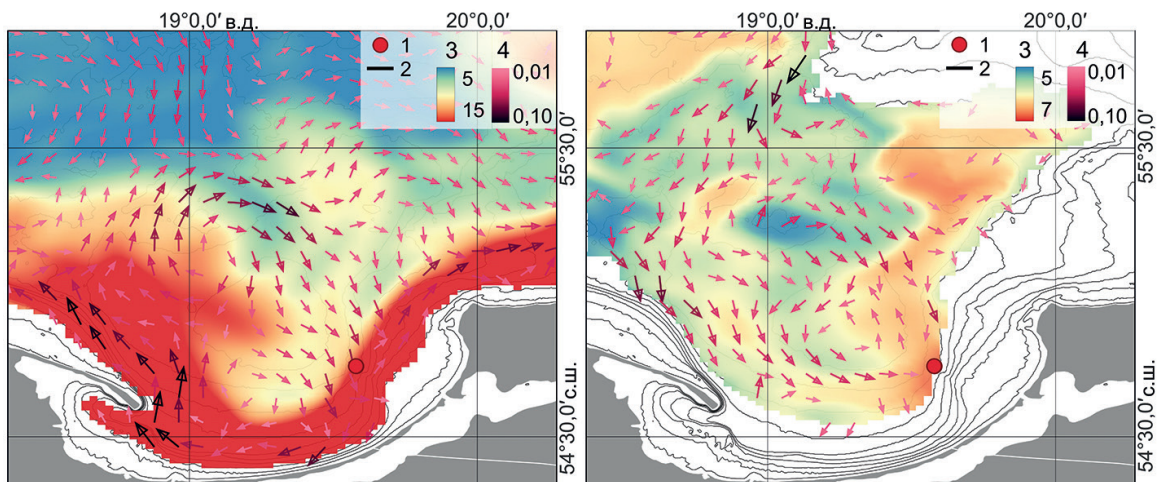
11 июля



23 июля



4 августа



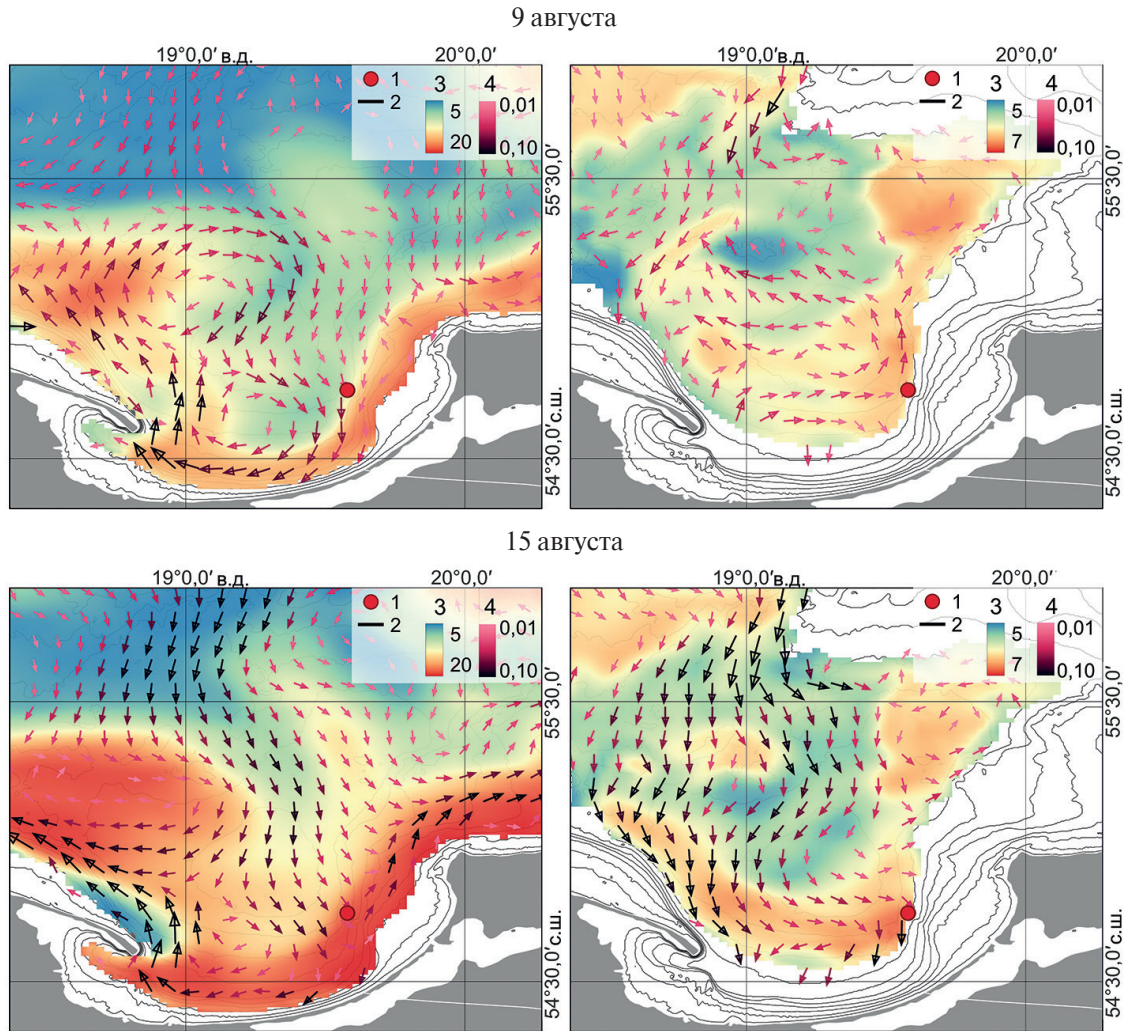


Рис. 7. Температура (цветом) и скорость течения (векторы) на горизонте 28 м (слева) и 80 м (справа) по модели NEMO в периоды поднятия перманентного галоклина по данным гирлянды термодатчиков. Условные обозначения: 1 — точка постановки гирлянды термодатчиков; 2 — изобаты, м; 3 — шкала температуры, °C; 4 — шкала скорости течений, м/с

Fig. 7. Temperature (in color) and current velocity (vectors) at the 28 m (left) and 80 m (right) layers according to the NEMO model during periods of permanent halocline rise, based on data from the thermistor chain. Legend: 1 — point of installation of the thermistor chain; 2 — isobaths, m; 3 — temperature scale, °C; 4 — current velocity scale, m/s

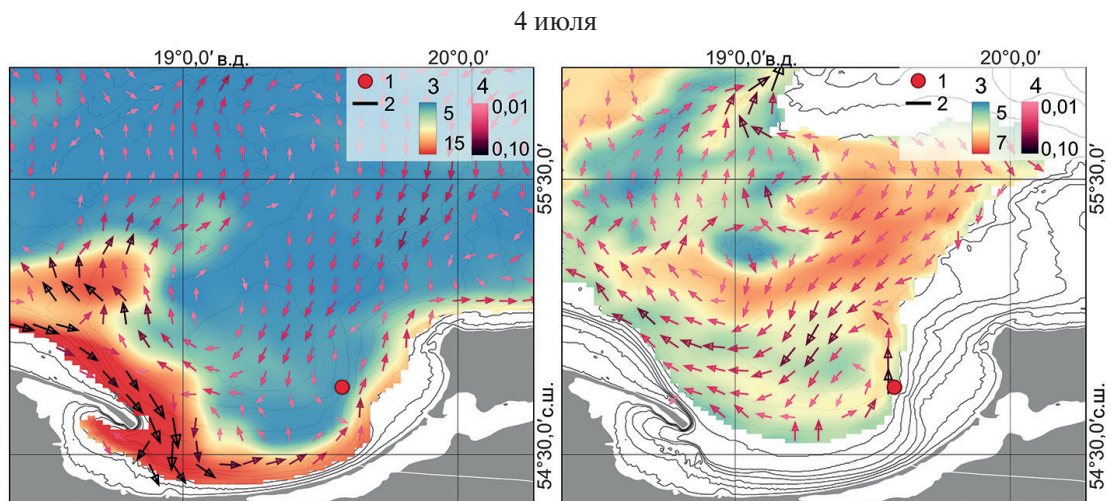
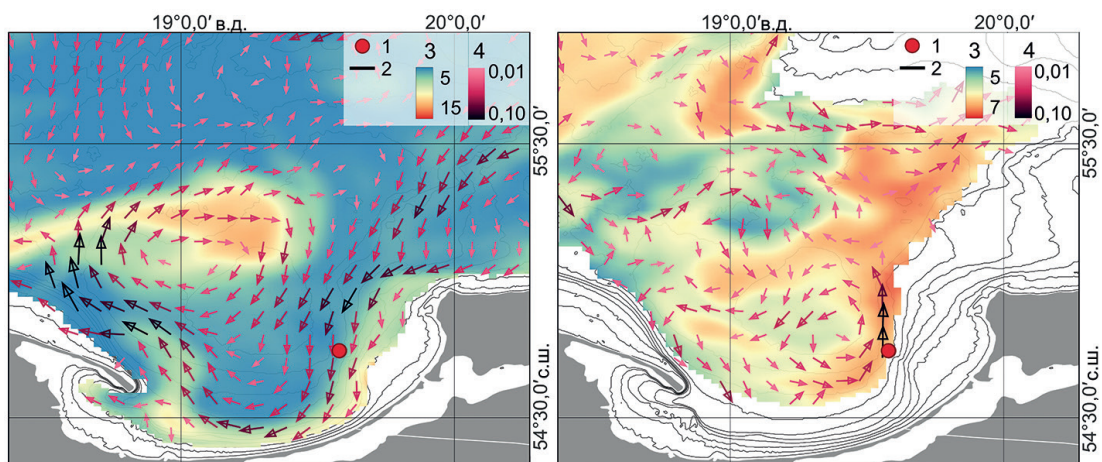


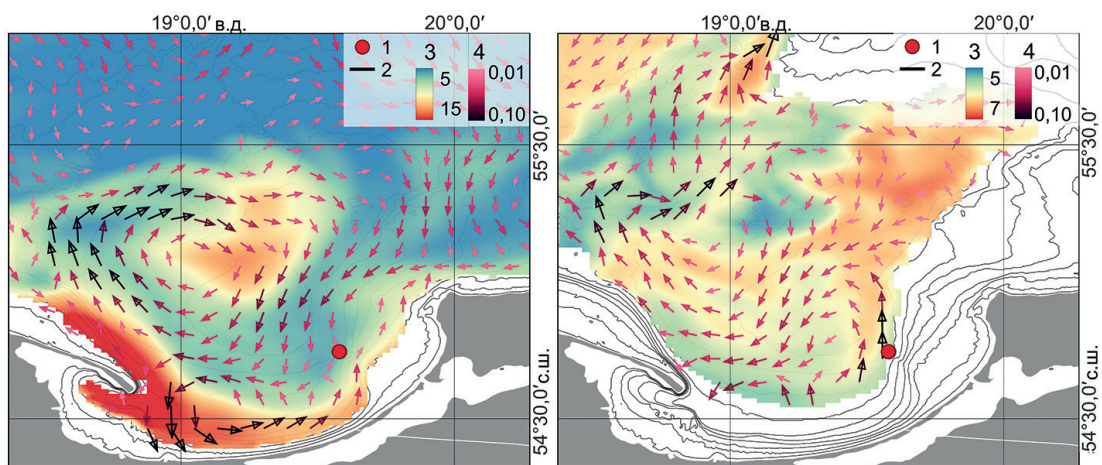
Рис. 8. Окончание на с. 30–31

Fig. 8. Fin p. 30–31

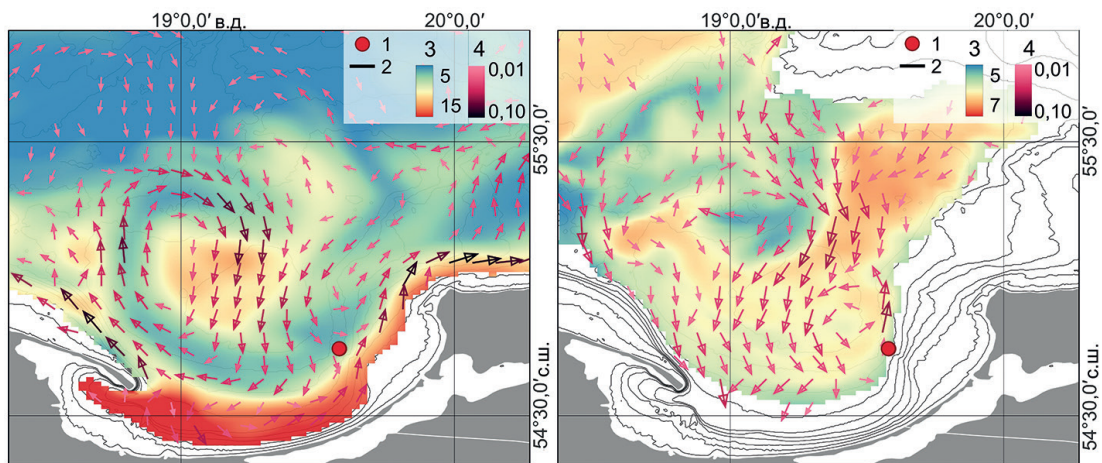
16 июля



20 июля



27 июля



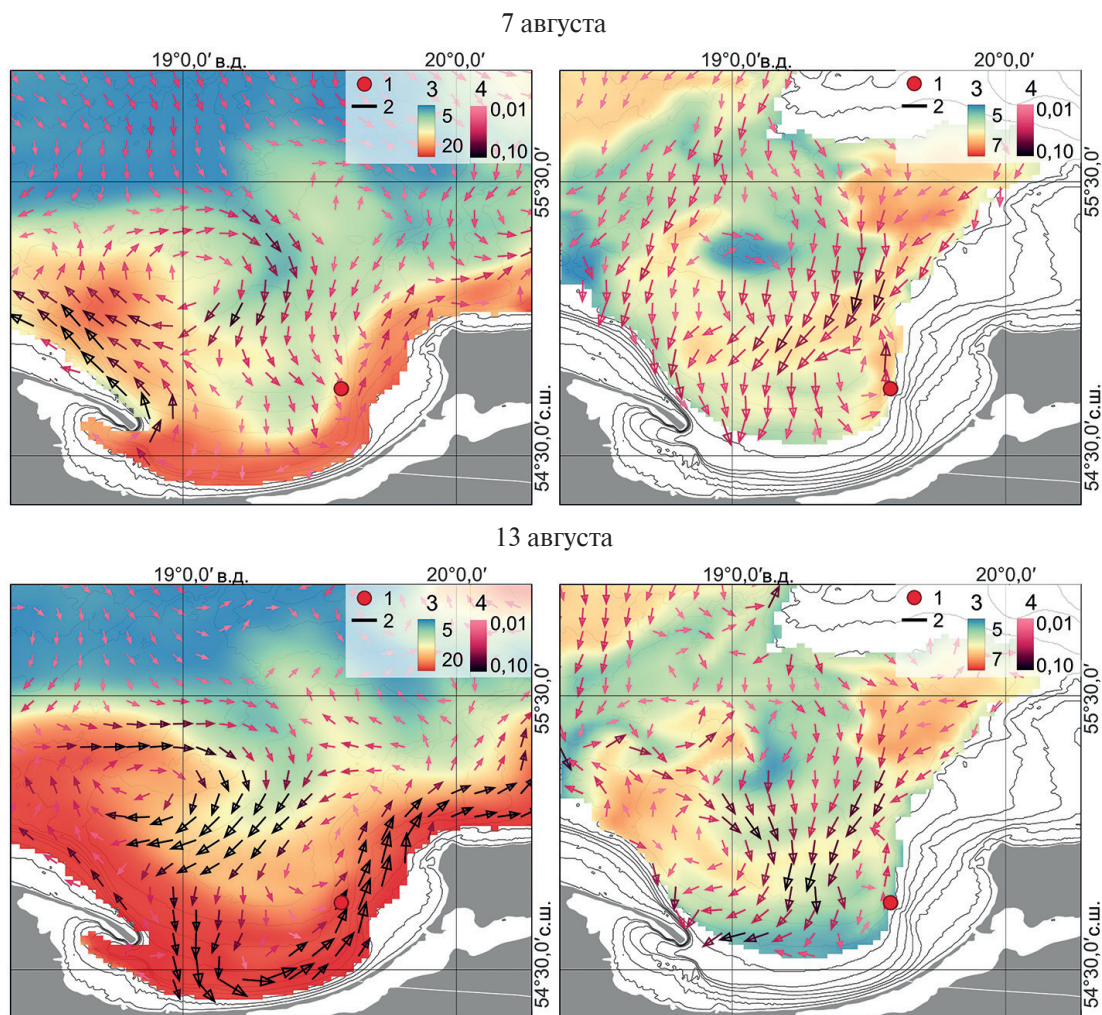


Рис. 8. Температура (цветом) и скорость течения (векторы) на горизонте 28 м (слева) и 80 м (справа) по модели NEMO в периоды опускания перманентного галоклина по данным гирлянды термодатчиков. Условные обозначения: 1 — точка постановки гирлянды термодатчиков; 2 — изобаты, м; 3 — шкала температуры, °C; 4 — шкала скорости течений, м/с

Fig. 8. Temperature (in color) and current velocity (vectors) at the 28 m (left) and 80 m (right) layers according to the NEMO model during periods of permanent halocline rise, based on data from the thermistor chain. Legend: 1 — point of installation of the thermistor chain; 2 — isobaths, m; 3 — temperature scale, °C; 4 — current velocity scale, m/s

Максимальная корреляция между глубиной залегания z характерной для галоклина изотермы 5,5 °C и проекцией вектора напряжения трения ветра составила 0,68 и 0,59, и была достигнута при $\varphi = 355^\circ$ и 340° , что соответствует западному ветру с небольшой долей северного, и $lag = 38$ и 48 ч (рис. 9–10) в случаях измерений гирляндой термодатчиков и моделирования NEMO соответственно. В результате, реакция глубины залегания изотермы запаздывает на 1,5–2,0 суток относительно действия ветра. В общем, схема процесса описывается так: западный ветер производит экмановский перенос на юг, нагоняя воду в Гданьский залив. Как следствие, в глубинном слое (в перманентном галоклине) происходит компенсационный отток воды из залива на север и, следовательно, глубина залегания изопикн/изохалин/изотерм возрастает. Такой компенсационный отток вдоль склона на север подтверждается моделью NEMO (рис. 8). Запаздывание заглубления изотерм z относительно τ на 1,5–2 суток является следствием того, что требуется некоторое время, чтобы нагнать воду в Гданьский залив.

Точка постановки гирлянды термодатчиков находится у восточного-юго-восточного побережья залива, где локальный даунвеллинг развивается при южном-юго-западном ветре, а апвеллинг — при северном-северо-восточном. Поэтому если бы миграции z были связаны с локальным прибрежным апвеллингом/даунвеллингом, то максимальная корреляция между z и τ была бы при южном-юго-западном ветре

($\varphi = 45\text{--}90^\circ$). Следовательно, колебания перманентного галоклина определялись не локальными процессами прибрежного апвеллинга/даунвеллинга, а экмановским стоном/нагоном воды на масштабах всего Гданьского залива. Масштаб этого процесса подтверждает восстановление структуры течений при помощи NEMO (рис. 7–8), где температура глубинного слоя на восточном склоне Гданьской впадины определяется циркуляцией во всем бассейне.

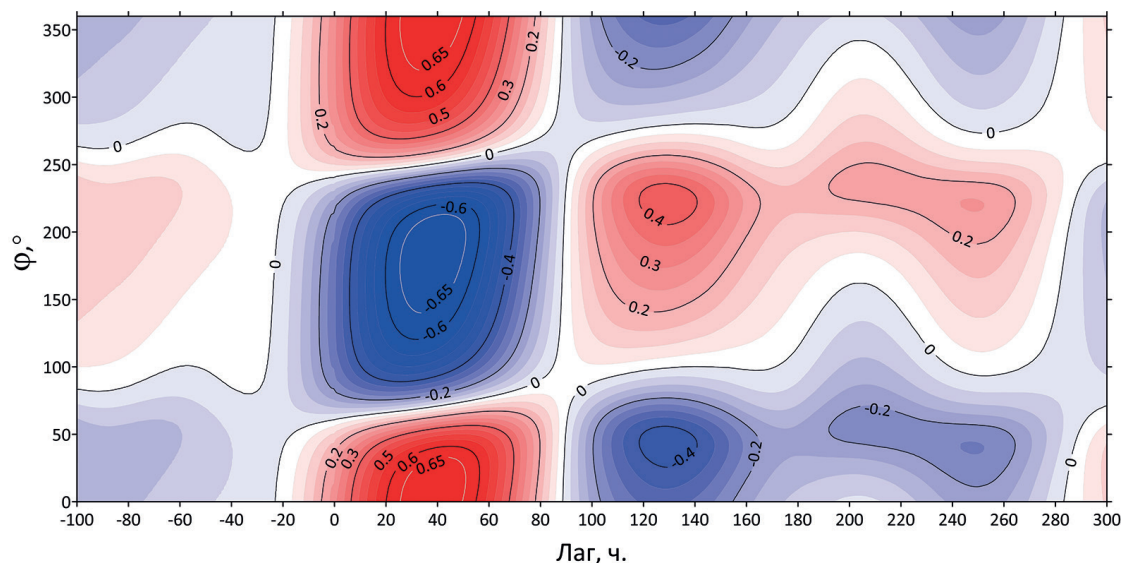


Рис. 9. Зависимость коэффициента корреляции между глубиной z залегания изотермы $5.5\text{ }^\circ\text{C}$ по измерениям гирляндой термисторов и проекцией напряжении трения ветра $\tau(\varphi)$ от угла φ и сдвига по времени lag

Fig. 9. Dependence of the correlation coefficient between the depth z of the $5.5\text{ }^\circ\text{C}$ isotherm as measured by a thermistor chain and the projection of wind stress $\tau(\varphi)$ as a function of the angle φ and the time shift lag

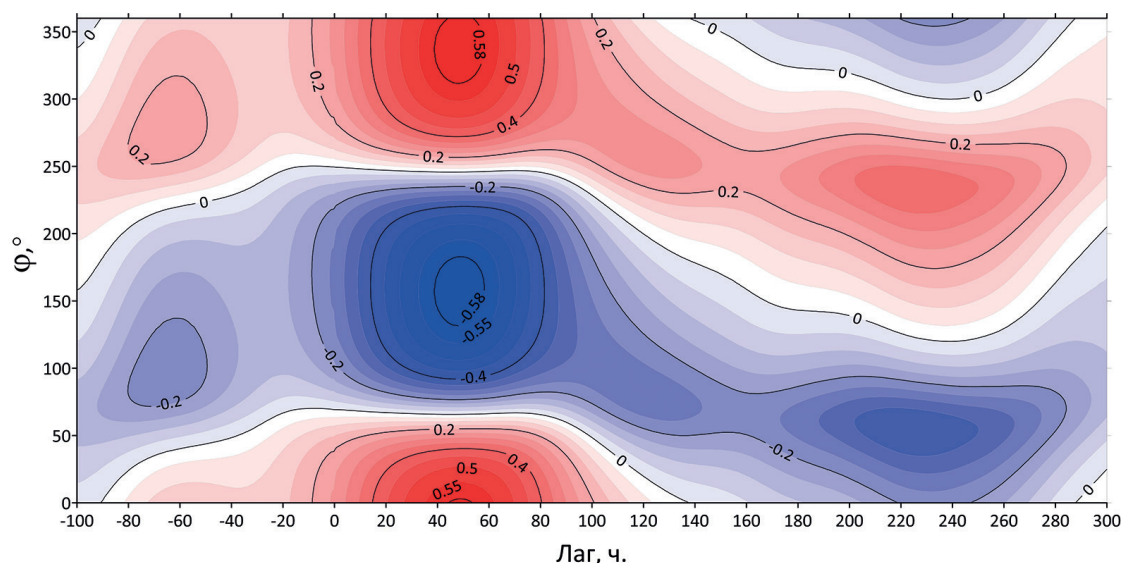


Рис. 10. То же, что на рис. 9, но по данным модели NEMO

Fig. 10. The same as in Fig. 9, but based on NEMO model data

6. Заключение

Таким образом, анализ данных гирлянды термодатчиков и моделирования показал, что основная доля ошибок модели на всех исследуемых горизонтах связана с недооценкой амплитуды температурной изменчивости. Второй по значимости причиной количественных расхождений между измеренными и модель-

ными данными является систематическая переоценка или недооценка значений модельной температуры. Однако это ярко выражено не на всех горизонтах. В частности, в ХПС модель довольно точно воспроизводит данные на уровне среднего значения. Также незначительное расхождение между средними значениями зафиксировано в перманентном галоклине на горизонте 70 м. На придонном горизонте (80 м) разница в средних значениях становится более значительной по причине более низких значений расчётной температуры. Вблизи верхней границы перманентного галоклина происходит наиболее выраженная переоценка значений температуры, продолжавшаяся в течение всего периода измерений. Кроме того, в глубинном и придонном горизонтах (70 и 80 м) ощутимую погрешность в количественную оценку вносит запаздывание модельных временных рядов на 17 и 16 ч соответственно.

Основной причиной колебаний перманентного галоклина, вероятно, является смена направлений компенсационных течений, продиктованная, в первую очередь, атмосферной циркуляцией. Ветры западного и северо-западного направлений вызывают нагон воды и повышение уровня моря у южного побережья Гданьского залива. Повышение уровня, в свою очередь, приводит к компенсационному оттоку воды из залива в глубинном слое и, как следствие, заглублению галоклина. И наоборот, при воздействии сгонных ветров восточного и юго-восточного направлений происходит компенсационный нагон воды в глубинном слое залива — галоклин поднимается. Однако, наряду с основной ролью атмосферной циркуляции в вертикальных колебаниях галоклина, в конкретной точке наблюдения некоторое влияние могут также оказывать локальные топографические особенности склона Гданьской впадины и присклоновые процессы.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0025). Экспедиционные работы выполнены с использованием оборудования НИС «Академик Борис Петров» в составе ЦКП «Научный флот ИО РАН», <https://rv.ocean.ru/flot/abf/nis-akademik-boris-petrov>.

Funding

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for IO RAS (theme No. FMWE-2024-0025). Field studies were carried out using the equipment of the RV Akademik Boris Petrov as part of the Center for the collective use of scientific equipment "Scientific fleet of IO RAS".

Литература

1. Антонов А.Е. Крупномасштабная изменчивость гидрометеорологического режима Балтийского моря и ее влияние на промысел. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 248 с.
2. Соскин И.М. Многолетние изменения гидрологических характеристик Балтийского моря. Л.: Гидрометеиздат, 1963. 163 с.
3. Fischer H., Matthäus W. The importance of the Drogden Sill in the Sound for major Baltic inflows // Journal of Marine Systems. 1996. Vol. 9, N 3–4. P. 137–157. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(96\)00046-2](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(96)00046-2)
4. Matthäus W., Franck H. Characteristics of major Baltic inflows — a statistical analysis // Continental Shelf Research. 1992. Vol. 12, N 12. P. 1375–1400. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(92\)90060-W](https://doi.org/10.1016/0278-4343(92)90060-W)
5. Nehring D., Matthäus W., Lass H.U., Nausch G., Nagel K. The Baltic Sea 1994 — consequences of the hot summer and inflow events // Deutsche Hydrographische Zeitschrift. 1995. Vol. 47, N 2. P. 131–144. <https://doi.org/10.1007/BF02732015>
6. Jędrasik J., Kowalewski M. Mean annual and seasonal circulation patterns and long-term variability of currents in the Baltic Sea // Journal of Marine Systems. 2019. Vol. 193. P. 1–26. EDN ZBDYPD. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2018.12.011>
7. Meier H.E.M. Modeling the pathways and ages of inflowing salt-and freshwater in the Baltic Sea // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2007. Vol. 74, № 4. P. 610–627. EDN MLLKUZ. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.05.019>
8. Placke M., Meier H.M., Gräwe U. et al. Long-term mean circulation of the Baltic Sea as represented by various ocean circulation models // Frontiers in Marine Science. 2018. Vol. 5. N 287. EDN YIUKNV. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00287>
9. Голенко М.Н., Краюшкин Е.В., Лаврова О.Ю. Исследование особенностей прибрежных поверхностных течений в Юго-Восточной Балтике по результатам подспутниковых дрейфтерных экспериментов и численного моделирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 7. С. 280–296. EDN YNJOQM. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-7-280-296>

10. Krayushkin E., Lavrova O., Storchkov A. Application of GPS/GSM Lagrangian mini-drifters for coastal ocean dynamics analysis // Russian Journal of Earth Science. 2019. Vol. 19. ES1001. EDN ZCXYGL. <https://doi.org/10.2205/2018ES000642>
11. Sokolov A., Chubarenko B. Wind influence on the nearshore currents formation in the South Baltic: numerical modeling results // Archives of HydroEngineering and Environmental Mechanics. 2012. Vol. 59, N 1. P. 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2018.12.011>
12. Jönsson B., Döös K., Nycander J., Lundberg P. Standing waves in the Gulf of Finland and their relationship to the basin-wide Baltic seiches // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2008. Vol. 113, N C3. EDN UVOWLU. <https://doi.org/10.1029/2006JC003862>
13. Lilover M.J., Pavelson J., Kouts T. Wind forced currents over the shallow Naissaar Bank in the Gulf of Finland // Boreal environment research. 2011. Vol. 16. P. 164.
14. Samuelsson M., Stigebrandt A. Main characteristics of the long-term sea level variability in the Baltic Sea // Tellus a. 1996. Vol. 48, N 5. P. 672–683. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v48i5.12165>
15. Suhhova I., Pavelson J., Lagemaa P. Variability of currents over the southern slope of the Gulf of Finland // Oceanologia. 2015. Vol. 57, N 2. P. 132–143. EDN URHLPJ. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2015.01.001>
16. Väli G., Meier H.E.M., Elken J. Simulated halocline variability in the Baltic Sea and its impact on hypoxia during 1961–2007 // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2013. Vol. 118, N 12. P. 6982–7000. EDN NEQXEV. <https://doi.org/10.1002/2013JC009192>
17. Krek A., Gusev A., Krek E. et al. The pathway of the water exchange over the Gdańsk–Gotland Sill of the Baltic Sea and its impact on habitat formation during the stagnation period // Oceanologia. 2021. Vol. 63, N2. P. 163–178. EDN CJMDGD. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2020.11.003>
18. Reissmann J., Burchard H., Feistel R. et al. Vertical mixing in the Baltic Sea and consequences for eutrophication — A review // Progress in Oceanography. 2009. Vol. 82. P. 47–80. EDN MMFLSB. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2007.10.004>
19. Baltic Sea Physics Analysis and Forecast. 2025. E.U. Copernicus Marine Service. <https://doi.org/10.48670/moi-00010>
20. Quality Information Document. 2024. Baltic Sea Production Centre Baltic Sea Physical Analysis and Forecasting Product BALTICSEA_ANALYSISFORECAST_PHY_003_006. URL: <https://documentation.marine.copernicus.eu/QUID/CMEMS-BAL-QUID-003-006.pdf> (дата обращения: 18.02.2025)
21. Степанова Н.Б. Свойства холодного промежуточного слоя в Юго-Восточной Балтике по экспедиционным данным 2004–2008 гг. и возможность его вентиляции водами шельфа в весенний период // Труды Московского физико-технического института. 2013. Т. 5, № 3 (19). С. 187–195.
22. Janecki M., Dybowski D., Rak D., Dzierzbicka-Glowacka L. A new method for thermocline and halocline depth determination at shallow seas // Journal of Physical Oceanography. 2022. Vol. 52, N 9. P. 2205–2218. EDN KRBIQL. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-22-0008.1>
23. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present // Copernicus climate change service (C3S) climate data store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>
24. Zhurbas V., Väli G. Wind-controlled transport of saltwater in the southeastern Baltic Sea: A model study // Frontiers in Marine Science. 2022. Vol. 9, N 835656. EDN: PAPUPD. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.835656>
25. Maagard L., Krauß W. Spektren der wasserstandsschwankungen der Ostsee im jahre 1958 // Kieler Meeresforschungen. 1966. Vol. 22, N 2. P. 155–162.

References

1. Antonov A.E. A Large-scale Variability of Hydrometeorological Regime of the Baltic Sea and Its Impact on the Fishery. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1987. 248 p. (in Russian).
2. Soskin I.M. Long-term changes in the hydrological characteristics of the Baltic Sea. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1963. 163 p. (in Russian).
3. Fischer H., Matthäus W. The importance of the Drogden Sill in the Sound for major Baltic inflows. *Journal of Marine Systems*. 1996;9(3–4):137–157. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(96\)00046-2](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(96)00046-2)
4. Matthäus W., Franck H. Characteristics of major Baltic inflows — a statistical analysis. *Continental Shelf Research*. 1992;12(12):1375–1400. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(92\)90060-W](https://doi.org/10.1016/0278-4343(92)90060-W)
5. Nehring D., Matthäus W., Lass H.U., Nausch G., Nagel K. The Baltic Sea 1994 — consequences of the hot summer and inflow events. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*. 1995;47(2):131–144. <https://doi.org/10.1007/BF02732015>
6. Jędrasik J., Kowalewski M. Mean annual and seasonal circulation patterns and long-term variability of currents in the Baltic Sea. *Journal of Marine Systems*. 2019;193:1–26. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2018.12.011>
7. Meier H.E.M. Modeling the pathways and ages of inflowing salt- and freshwater in the Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2007;74(4):610–627. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.05.019>
8. Placke M., Meier H.M., Gräwe U., et al. Long-term mean circulation of the Baltic Sea as represented by various ocean circulation models. *Frontiers in Marine Science*. 2018;5:287. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00287>

9. Golenko MN, Krayushkin EV, Lavrova OY. Investigation of coastal surface currents in the South-East Baltic based on concurrent drifter and satellite observations and numerical modeling. *Sovremennye problemy distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2017;14(7):280–296. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-7-280-296>
10. Krayushkin E, Lavrova O, Storchkov A. Application of GPS/GSM Lagrangian mini-drifters for coastal ocean dynamics analysis. *Russian Journal of Earth Science*. 2019;19: ES1001. <https://doi.org/10.2205/2018ES000642>
11. Sokolov A, Chubarenko B. Wind influence on the nearshore currents formation in the South Baltic: numerical modeling results. *Archives of HydroEngineering and Environmental Mechanics*. 2012;59(1):3–14. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2018.12.011>
12. Jönsson B, Döös K, Nycander J, Lundberg P. Standing waves in the Gulf of Finland and their relationship to the basin-wide Baltic seiches. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2008;113(C3). <https://doi.org/10.1029/2006JC003862>
13. Lilover MJ, Pavelson J, Kõuts T. Wind forced currents over the shallow Naissaar Bank in the Gulf of Finland. *Boreal Environment Research*. 2011;16:164.
14. Samuelsson M, Stigebrandt A. Main characteristics of the long-term sea level variability in the Baltic Sea. *Tellus A*. 1996;48(5):672–683. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v48i5.12165>
15. Suhhova I, Pavelson J, Lagemaa P. Variability of currents over the southern slope of the Gulf of Finland. *Oceanologia*. 2015;57(2):132–143. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2015.01.001>
16. Väli G, Meier HEM, Elken J. Simulated halocline variability in the Baltic Sea and its impact on hypoxia during 1961–2007. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2013;118(12):6982–7000. <https://doi.org/10.1002/2013JC009192>
17. Krek A, Gusev A, Krek E, et al. The pathway of the water exchange over the Gdańsk-Gotland Sill of the Baltic Sea and its impact on habitat formation during the stagnation period. *Oceanologia*. 2021;63(2):163–178. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2020.11.003>
18. Reissmann J, Burchard H, Feistel R, et al. Vertical mixing in the Baltic Sea and consequences for eutrophication — A review. *Progress in Oceanography*. 2009;52:47–80. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2007.10.004>
19. Baltic Sea Physics Analysis and Forecast. 2025. E.U. Copernicus Marine Service. <https://doi.org/10.48670/moi-00010>
20. Quality Information Document. 2024. Baltic Sea Production Centre Baltic Sea Physical Analysis and Forecasting Product BALTICSEA_ANALYSISFORECAST_PHY_003_006. URL (Accessed: 18.02.2025).
21. Stepanova N.B. Properties of the cold intermediate layer in the south-eastern Baltic according to expeditionary data of 2004–2008 and the possibility of its ventilation by shelf waters in the spring. *Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta*. 2013;5(3):187–195 (in Russian).
22. Janecki M, Dybowski D, Rak D, Dzierzbicka-Glowacka L. A new method for thermocline and halocline depth determination at shallow seas. *Journal of Physical Oceanography*. 2022;52(9):2205–2218. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-22-0008.1>
23. Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store*. <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>
24. Zhurbas V, Väli G. Wind-controlled transport of saltwater in the southeastern Baltic Sea: A model study. *Frontiers in Marine Science*. 2022;9:835656. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.835656>
25. Maagard L, Krauß W. Spektren der wasserstandsschwankungen der Ostsee im Jahre 1958. *Kieler Meeresforschungen*. 1966;22(2):155–162.

Об авторах

КРЕК Александр Владимирович, старший научный сотрудник, кандидат географических наук, Атлантическое отделение ИО РАН, ORCID: 0000-0003-4572-0493, Scopus AuthorID: 56602707900, WoS ResearcherID: J-9948-2016, SPIN-код (РИНЦ): 2603-5120, e-mail: av_krek_ne@mail.ru

КОНДРАШОВ Алексей Александрович, младший научный сотрудник, Атлантическое отделение ИО РАН, ORCID: 0000-0002-3684-2184, Scopus AuthorID: 36657225800, WoS ResearcherID: S-2848-2016, SPIN-код (РИНЦ): 8568-9638, e-mail: kondrashoff1984@yandex.ru

КРЕЧИК Виктор Антонович, научный сотрудник, кандидат географических наук, Атлантическое отделение ИО РАН, ORCID: 0000-0001-6440-060X, Scopus AuthorID: 55613421400, WoS ResearcherID: 9941-2016, SPIN-код (РИНЦ): 2168-1850, e-mail: myemail.gav@gmail.com

КОРЖ Андрей Олегович, ведущий инженер, Атлантическое отделение ИО РАН, ORCID: 0000-0001-6409-8228, Scopus AuthorID: 15080985900, WoS ResearcherID: L-3192-2016, SPIN-код (РИНЦ): 4252-1955, e-mail: andrey.korzh@atlantic.ocean.ru

КАПУСТИНА Мария Владимировна, научный сотрудник, кандидат географических наук, Атлантическое отделение ИО РАН, ORCID: 0000-0002-7507-3170, Scopus AuthorID: 57201388973, WoS ResearcherID: L-2625-2016, SPIN-код (РИНЦ): 5287-1100, e-mail: kapustina.mariya@yandex.ru

Крек А.В., Кондрашов А.А., Кречик В.А., Корж А.О., Капустина М.В., Голенко М.Н., Журбас В.М., Пака В.Т.
Krek A.V., Kondrashov A.A., Krechik V.A., Korzh A.O., Kapustina M.V., Golenko M.N., Zhurbas V.M., Paka V.T.

ГОЛЕНКО Мария Николаевна, старший научный сотрудник, ИО РАН, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0001-5979-1415, Scopus AuthorID: 24080316600, WoS ResearcherID: K-1544–2016, e-mail: m.golenko@yahoo.com

ЖУРБАС Виктор Михайлович, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией морской турбулентности ИО РАН, доктор физико-математических наук, ORCID: 0000-0001-9013-3234, Scopus AuthorID: 6603968937, WoS ResearcherID: A-7341–2009, SPIN-код (РИНЦ): 8646-7272, e-mail: victor.zhurbas@mail.ru

ПАКА Вадим Тимофеевич, главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук, Атлантическое отделение ИО РАН, ORCID: 0000-0003-0316-1961.