

Гидрометеорология и экология. 2023. №73. С. 666—683.  
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(73):666—683.

## ***ОКЕАНОЛОГИЯ***

---

Научная статья  
УДК [551.463.6:551.466.3](261.246)  
doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-666-683

### **О типичном и аномальном режимах выхолаживания морских вод в прибрежной зоне Куршской косы**

*Анастасия Евгеньевна Куприянова<sup>1,2</sup>,  
Владимир Алексеевич Гриценко<sup>1</sup>, Александр Владимирович Килесо<sup>1</sup>,  
Ксения Дмитриевна Коробченкова<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва

<sup>2</sup> Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград,  
kupriyanova\_ae@mail.ru

*Аннотация.* Исследование изменчивости температуры для морских прибрежных вод у Куршской косы выполнено на основе данных инструментальных измерений термокосы, метеонаблюдений 2016 г.—2020 г., спутниковых данных и массива реанализа. Для осенне-зимнего периода наблюдений выделены типичный и аномальный режимы выхолаживания воды с поверхности. При типичном режиме выхолаживание до позднесенних температур протекает за 1,5—2 месяца (2017 г.—2020 г.), а при аномальном (2016 г.) — за 7—8 дней. Тренды скорости охлаждения воды при типичном режиме составили  $-0,11$  °C/сутки и  $-0,22$  °C/сутки — при аномальном. Оценка температурных градиентов на границе вода–воздух показала, что октябрь наиболее благоприятен для развития конвекции ( $\Delta\rho_{\max} = 0,035$  кг/м<sup>3</sup> в 2016 году). Полуэмпирические оценки числа Релея в октябре 2016 года подтвердили возможность превышения критического значения и возникновения условий для развития конвекции.

*Ключевые слова:* конвекция, ветро-волновое перемешивание, гидростатическая неустойчивость, юго-восточная Балтика, Куршская коса.

*Благодарности:* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23–27–00150, <https://rscf.ru/project/23-27-00150/>. Авторы выражают благодарность ООО «Лукойл–КМН» (г. Калининград) за организацию процессов наблюдения и получения данных (в 2015—2020 гг.), а также АО ИО РАН за возможность работы с данными измерений термокосы.

*Для цитирования:* Куприянова А. Е., Гриценко В. А., Килесо А. В., Коробченкова К. Д. О типичном и аномальном режимах выхолаживания морских вод в прибрежной зоне Куршской косы // Гидрометеорология и экология. 2023. № 73. С. 666—683. doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-666-683.

Original article

## About typical and anomalous modes of sea water cooling in a coastal zone of the Curonian spit

*Anastasia E. Kupriyanova*<sup>1, 2</sup>, *Vladimir A. Gritsenko*<sup>2</sup>,  
*Alexander V. Kileso*<sup>2</sup>, *Ksenia D. Korobchenkova*<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow

<sup>2</sup> Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia, Kaliningrad,

\*kupriyanova\_ae@mail.ru

*Summary.* An investigation of the temperature variability of coastal waters in the southeastern part of the Baltic Sea was carried out. Experimental data were collected from measurements of the thermo sensors on the platform D-6 and related meteorological observations for 2016–2020. For the autumn–winter period of observations, typical and anomalous modes of water cooling from the surface were identified. A typical cooling of water was considered to be cooling of water to late autumn temperatures (~5 °C), which lasted for seven to eight weeks. Cooling of the water, which lasted 7–8 days, was considered abnormal. An assessment of temperature gradients in the water–air contact zone showed that October is the most favorable month for the beginning of thermogravitational convection. The maximum density difference (0,035 kg/m<sup>3</sup>) was observed during the period of anomalous mode of water cooling in mid-October 2016. An analysis of the experimental data showed that the dynamics of water during wind-wave mixing and drift currents did not allow to distinguish the presence of convection. The intensification of thermogravitational convection was manifested in experimental data during storm winds from the coast (the eastern direction, in October 2016). It was noted that the presence of a temperature gradient between the water sensors at 1 and 3 meters is only a necessary condition for the beginning of thermogravitational convection. In particular, in January 2016, the value of the temperature gradient between the horizons reached –0,57 °C/m, while the air temperature at the time of measurements was 1,76 °C, and the water temperature was 2,07 °C and 2,64 °C at 1 and 3 meters, respectively. Thus, the water at the 1-meter horizon turned out to be colder, but had a lower density than the underlying layer at the 3-meter horizon, and there were no conditions for the appearance of convection in the 1–3 meter layer. Semi-empirical estimates of the Rayleigh number during anomalous cooling of water in 2016 (with water–air temperature difference from 2 °C to 10 °C and the thickness of the boundary thermal layer about 0,5 cm) confirmed the possibility of exceeding the critical value and the occurrence of conditions for the beginning of thermogravitational convection.

*Keywords:* convection, wind–wave mixing, hydrostatic instability, southeastern Baltic Sea, Curonian Spit.

*Acknowledgments:* The investigations are supported by Russian Science Foundation via grant number 23–27–00150, <https://rscf.ru/en/project/23–27–00150/>. The authors are grateful to LLC «Lukoil–KMN» (Kaliningrad) for organization of data acquisition process (2015–2020), as well as to AB IO RAS for the opportunity to work with the measurement data of the thermocouple.

*For citation:* Kupriyanova A. E., Gritsenko V. A., Kileso A. V., Korobchenkova K. D. About typical and anomalous modes of sea water cooling in a coastal zone of the Curonian spit. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(73):666–683. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-666-683.

### Введение

Общий характер изменчивости термической структуры вод Балтийского моря известен по результатам многих работ [1–6]. Верхний 50–60 м слой моря

формируется под воздействием речного стока и осадков, что определяет его низкую соленость (6—8 psu). Ветро-волновое перемешивание и конвективные процессы в период осенне-зимнего выхолаживания обеспечивают квазиоднородность верхнего слоя вплоть до галоклина. Свойства нижнего слоя вод моря (соленость, температура, содержание кислорода) определяются, в основном, затоками вод Северного моря [7]. Между ними определенное положение занимает холодный промежуточный слой, природа которого, предположительно, определяется термогравитационной конвекцией [8].

Оперативные STD-измерения в прибрежной зоне Балтийского моря [3], по данным судовых разрезов 2004 г.—2006 г., показали существенную пространственно-временную изменчивость температуры воды. В частности, в марте 2006 года наблюдалась очень холодная вода, вызванная воздействием сильных штормов и конвекции. В марте всех годов была отмечена значительная горизонтальная стратификация вод: вблизи берега вода была холоднее на 0,5 градуса, чем в 15—20 км от берега. Этот же факт отмечался и в других работах [1, 8]. Зимой за счет совместного действия ветрового перемешивания и конвекции глубина перемешанного слоя по данным измерений достигала 50 м. К сожалению, разделить степень влияния ветро-волнового воздействия и конвекции на базе имеющихся измерений не представилось возможным.

Изменчивость вертикального распределения температуры воды на балтийском мелководье с 2015 года подробно по времени (дискретность — 1 минута) фиксируется датчиками термоксы в районе нефтедобывающей платформы Д-6. Анализ полученных данных за 2015 год [9] позволил обнаружить несколько событий апвеллинга и периодов конвективного перемешивания. В отдельные периоды осени и весны был зафиксирован суточный ход температуры на глубине в 1 метр с амплитудой в 1 °С.

Таким образом, длительные по времени инструментальные измерения на платформе Д-6 говорят о наличии различных по своей природе особенностей изменчивости температуры морских вод. Анализ накопленного массива данных может помочь выделить промежуточные фазы и обуславливающие их факторы для известного в целом процесса осенне-зимнего выхолаживания вод юго-восточной Балтики [1—4].

Кроме того, интенсивное выхолаживание приурезовых вод может порождать импульсные вдольсклоновые потоки холодной воды [8, 10], способные подпитывать холодный промежуточный слой Балтийского моря. Оценки возможности возникновения такого рода ситуаций помогут дополнить понимание природы квазистационарного существования этого слоя.

Целью данной работы является исследование деталей процесса выхолаживания прибрежных вод у Куршской косы по данным измерений датчиков термоксы, спутниковым данным, данным реанализа и сопутствующих метеонаблюдений в осенний период.

### Материалы и методы

В качестве основного массива экспериментальных данных были использованы результаты измерений температуры воздуха на высоте 1 метр от поверхности

моря [11] и температуры воды (с погрешностью  $\pm 0,025$  °С) на глубинах от поверхности до дна за период с 2015 г. по 2020 г. с дискретностью измерений в 1 минуту. Источником данных послужили датчики температуры термокосы с неравномерным шагом на глубинах 1—28 метров (общее количество горизонтов — 15), установленной на переходном мостике между двумя модулями нефтяной платформы Д-6 (юго-восточная часть Балтийского моря, 22,5 км от берега) в тридцати метрах от опор каждой из них [9].

Расчет значений плотности воды проводился с использованием международного термодинамического уравнения состояния морской воды (TEOS-10). Количественные показатели были получены при помощи модуля GSW для языка программирования Python, функция “`gsw.density.rho_t_exact(SA, t, p)`”, где SA — абсолютная соленость (г/кг), t — температура воды in-situ (°С), p — давление (дбар) [12]. Поскольку в составе термокосы отсутствовали датчики электропроводности, то при расчете плотности использовалось характерное для данного района значение солености равное 7,4 psu [13]. Давление для измерений на горизонтах 1 и 3 метра задавалось равным 1 и 3 дбар соответственно. При возникновении сильного волнения ближайšie к поверхности датчики периодически находились на воздухе, соответствующие этим периодам показания были отфильтрованы по резкому увеличению дисперсии значений температуры.

Кроме того, в работе были использованы ежесуточные спутниковые данные измерений температуры поверхности моря уровня L3 программы Metop-A [14] за осенний период 2016 года. Пространственное разрешение данных по широте и долготе составляет 0,02 градуса. Рассматривались только данные высокого качества (QL = 5). Так как исследуемый район характеризуется большим количеством облачных дней в осенне-зимний период, для дополнения отсутствующих из-за облачности спутниковых данных использованы данные реанализа NOAA OI SST V2 [15]. Это позволило восстановить непрерывность в представлении о фоновых значениях температуры для прибрежной зоны моря. Пространственное разрешение данных по широте и долготе составляет 0,25 градусов.

Все описываемые в работе результаты были получены путем сравнительного анализа данных прямых инструментальных измерений температуры воды и воздуха в окрестности платформы Д-6, метеостанции в городе Пионерский (Калининградская область), спутниковых данных и массивов реанализа.

## Результаты

### *1. Анализ натурных данных.*

Измерения температуры морской воды в 2016 г.—2020 г. показали, что постепенное выхолаживание всего столба воды в окрестности термокосы начинается со второй половины сентября, когда дневные температуры воздуха в большинстве случаев не превышают значений температуры воды. Анализ помесечно сгруппированных измеренных показателей температуры с 2016 г. по 2020 г. позволил выделить типичный (2017 г.—2020 г.) и аномальный (2016 г.) режимы процесса выхолаживания.

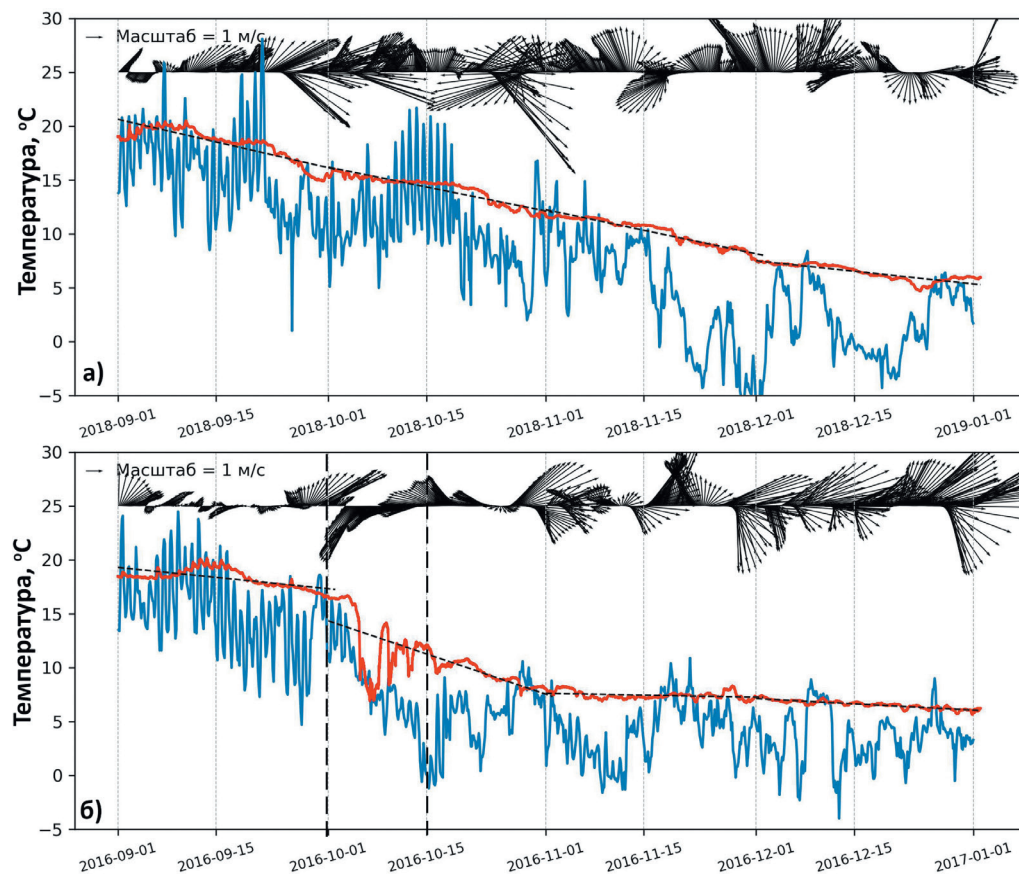


Рис. 1. Изменчивость температуры воздуха (синий цвет), воды (красный цвет), силы и направления ветра для типичного (2018, *a*) и аномального (2016, *b*) режимов выхолаживания приповерхностного слоя прибрежных вод юго-восточной Балтики. Приведены линии месячных трендов (пунктирные линии) в изменчивости температуры воды для периодов с сентября по январь. Период аномального выхолаживания для октября 2016 года (*b*) выделен пунктирными вертикальными линиями.

Fig. 1. Variability of air temperature (blue), water temperature (red), wind strength and direction for typical (2018, *a*) and anomalous (2016, *b*) regimes of the process of cooling the near-surface layer of coastal waters of the SE Baltic. The dotted line indicates trends in water temperature. Also, monthly trends for water temperature variability are plotted on top: for October, a period of intense cooling is highlighted (dotted vertical lines).

На рис. 1 приведены примеры изменчивости температуры воды на глубине 1 м для типичного (на примере 2018 г.) и аномального (2016 г.) процессов осеннего выхолаживания.

Отметим, что для всех лет наблюдений, кроме 2016 г., процесс выхолаживания прибрежных вод происходил примерно с одинаковой скоростью, без резких

скачков, что объясняется совместным действием медленно меняющихся параметров охлаждения поверхностного слоя воды: температуры воздуха, ветрового перемешивания и дрейфовых течений. В частности, в октябре 2018 г. (рис. 1, *а*) было зафиксировано постепенное падение температуры воздуха с 16 °С в начале месяца до 5 °С к его концу, что привело к уменьшению температуры воды с 16,5 °С до 8 °С. Возникшие в октябре 2018 года метеоусловия способствовали охлаждению всей толщи воды с квазипостоянной скоростью по времени, что и наблюдалось по данным измерений термоксы. В ноябре процесс выхолаживания стабилизируется, достигая температуры воды примерно 5 °С. Во все годы наблюдений (2017 г.—2020 г.) типичный режим перехода к этой температуре занимал 7—8 недель.

В начале октября 2016 г. процесс выхолаживания прибрежных вод произошел скачкообразно. На протяжении всего 1 недели (см. рис. 1 *б*, 2 *б*) на фоне максимальных изменений температуры воздуха с 20 °С до –2 °С и воды с 17 °С до 6 °С (рис. 3) произошел быстрый переход от ранне-осеннего (16 °С—17 °С) к поздне-осеннему показателю температуры (5 °С). Зафиксированный в измерениях быстрый переход (рис. 2, *б*) произошел в условиях воздействия штормового ветра (до 15 м/с) восточного направления с температурой воздуха до –2 °С. За данный период времени весь столб воды охладился до типичного для поздней осени значения 5 °С. В дальнейшем температура прибрежных вод в 2016 г. начала меняться уже только в январе при наступлении зимнего периода с отрицательными температурами воздуха.

Детальный анализ значений температуры для горизонтов 1 и 3 м показал, что на фоне значительного перепада температуры в 11 °С между воздухом и поверхностным слоем воды максимальный перепад температуры между горизонтами воды составил 0,37 °С. Температура воздуха на данный момент времени (15.10.2016 20:03) составила 4,24 °С, а температура воды на горизонте 1 м составляла 10,78 °С, на 3 м — 11,15 °С. Разница плотности между горизонтами равна 0,035 кг/м<sup>3</sup>.

Отметим, что близкое по смыслу штормовое воздействие на прибрежные воды произошло в 2018 г. Однако оно не привело к аналогичному, как в 2016 г., скачкообразному изменению температуры прибрежных вод. Анализ произошедшей ситуации показал, что решающую роль сыграло направление ветра. При примерно одинаковых значениях скорости ветра и продолжительности штормового воздействия интенсивное выхолаживание в 2016 г. произошло при ветрах восточных румбов с ориентацией от берега (рис. 1, *б*), а в 2018 г. направление ветра (рис. 1, *а*) было преимущественно с моря (северо-западных румбов). Оказалось, что интенсификация выхолаживания воды при ветре с открытого моря не отмечалась и в другие годы наблюдений. Таким образом, можно предположить, что ветер восточных румбов и адвективный характер движения воды от берега, которая всегда более холодная в осенне-зимний период [16—18], способствуют скачкообразному выхолаживанию всего столба воды в окрестности точки наблюдения.

Отметим, что наличие градиента температуры между слоями в 1 и 3 м является только необходимым условием для возможности развития термогравитационной



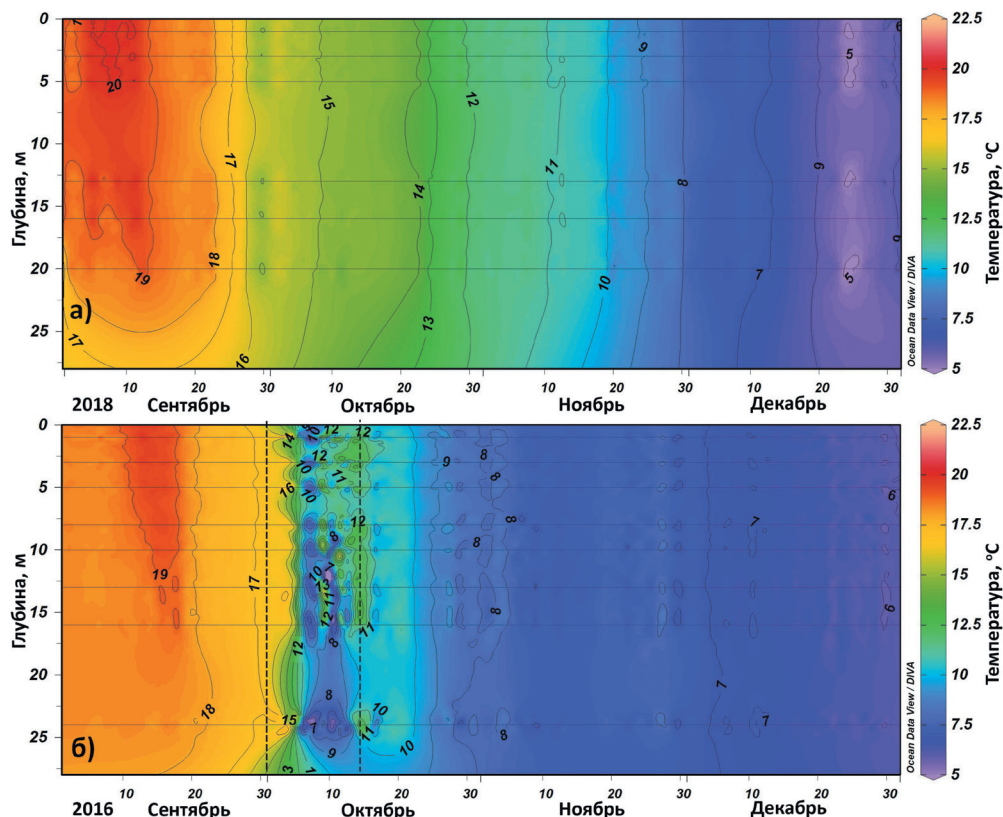


Рис. 2. Общий вид процесса выхолаживания воды от поверхности до дна в сентябре–декабре для типичного (2018 г., даты октября) и аномального (2016 г.): вертикальная ось — глубина, горизонтальная ось — дни (время), горизонтальные черные линии — горизонты с датчиками (1, 3, 5, 8, ..., 28), цветовая шкала — температура (5 °С, ..., 22,5 °С). Период аномального выхолаживания для октября 2016 г. (б) выделен пунктирными вертикальными линиями.

Fig. 2. General view of the water-cooling process from the surface to the bottom in September–December for typical (2018, October dates) and anomalous (2016) conditions. Characteristics: vertical axis — depth, horizontal axis — days (time), horizontal black lines — horizons with sensors (1, 3, 5, 8, ..., 28), color scale — temperature (5 °С, ..., 22,5 °С). For October, a period of intense cooling is highlighted (dotted vertical lines).

конвекции [10, 19–22]. В частности, в январе 2016 г. значение градиента температуры между горизонтами достигало значения  $-0,57$  °С/м, при этом температура воздуха на момент измерений (20.01.2016 6:48) составила  $-1,76$  °С, температура воды —  $2,07$  °С и  $2,64$  °С на горизонтах 1 и 3 м соответственно. При этом среднее значение перепада температур в период с 19 по 20 января составило  $-0,15$  °С/м. Перепад значений между температурой воздуха и воды на горизонте 1 м равнялся  $-4,1$  °С, при максимуме  $-5,35$  °С.

Данный период характеризовался изменчивостью температуры воды для горизонта 1 м в диапазоне от 2,04 °С до 2,73 °С (рис. 2). Расчет плотности воды (TEOS–10, 7,4 psu) показал, что в январе максимальный перепад плотности составил –0,001 кг/м<sup>3</sup>. Таким образом, вода на горизонте 1 м хоть и оказалась холоднее, но имела меньшую плотность, чем у подстилающего слоя на горизонте 3 м, и условий для возникновения конвекции в слое 1–3 м не возникало.

Использование измеренных значений температуры воды на всех горизонтах наблюдений от поверхности до дна (1–28 м) позволило представить развертку во времени процесса охлаждения всего слоя воды в окрестностях точки наблюдения. Как и для описанного выше процесса выхолаживания приповерхностного слоя, типичным для района измерений в 2017 г.—2020 г. оказалось равномерное, квазилинейное по времени понижение температуры от близких к летним значениям в середине сентября (16 °С—18 °С) до характерных для позднесеннего периода (5 °С) (см. рис. 2 б).

Расчет трендов изменчивости температуры прибрежных вод показал (табл. 1), что скорость выхолаживания для типичных годов составляет примерно –0,11 °С/сутки, а максимальная скорость наблюдалась в октябре 2016 г. и составила –0,22 °С/сутки. Близкая к ноябрю 2016 г. скорость выхолаживания (–0,2 °С/сутки) была зафиксирована и в сентябре 2019 г.

Таблица 1

Скорости выхолаживания (°С/сутки) поверхностного слоя воды в осенне-зимний период наблюдений с 2016 г. по 2020 г. в окрестности платформы Д–6

Cooling rates of the surface water layer (°C / day) for the autumn-winter period of observation from 2016 to 2020 in the proximity of the D–6 platform

	Скорость выхолаживания (°С/сутки)				
	2016	2017	2018	2019	2020
Сентябрь	–0,07	–0,10	–0,15	–0,20	–0,06
Октябрь	<b>–0,22</b>	–0,13	–0,13	–0,06	–0,14
Ноябрь	–0,01	–0,09	–0,14	–0,14	–0,09
Декабрь	–0,03	–0,08	–0,07	–0,07	—

В данном случае к быстрому падению температуры поверхностных вод привело совместное влияние сильных ветров западных румбов и низких ночных температур воздуха (до 4 °С) на фоне позднелетних температур воды (более 20 °С). В свою очередь, небольшие скорости выхолаживания в октябре 2019 г. определяются отсутствием сильных ветров во второй половине месяца и температурой воздуха (до 20 °С), превышающей температуру воды (среднее значение составило 15 °С) примерно на 5 °С.

Выполненная оценка перепадов температуры между приповерхностным слоем воздуха и слоем воды на горизонте 1 м в точке наблюдения показала (рис. 3), что максимальные перепады температуры наблюдаются в октябре (~10 °С) и ноябре (~11 °С), однако четкой зависимости между скоростью выхолаживания воды и рассчитанными перепадами температуры выявить не удалось.



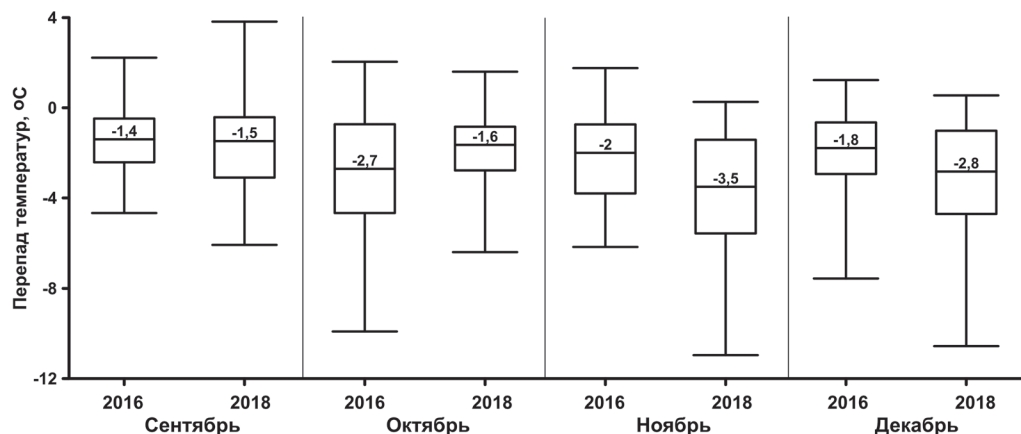


Рис. 3. Квантильный анализ перепада температуры в контактной зоне воздух–вода в 2016 г. и 2018 г. (отдельно по месяцам). Разница между приповерхностным слоем воздуха в точке размещения термокосы и слоем воды на горизонте 1 м. Верхние и нижние концы усов соответствуют максимальным и минимальным значениям, а значения медианы приведены внутри ящика.

Fig. 3. Calculations of temperature differences in the air–water contact zone for 2016 and 2018 (separately by months). The difference between the near–surface layer of air installed at the point of placement of the thermocouple and the layer of water on the horizon is 1 meter. The upper and lower limits correspond to the maximum and minimum values, respectively.

Отсутствие зависимости между скоростью выхолаживания и разницей температуры воздух–вода также не удалось зарегистрировать в сентябре и ноябре 2018 г. Максимальные перепады температуры в ноябре составили примерно 11 °С, что значительно превысило перепады в сентябре, составляющие примерно 6 °С. Однако скорости выхолаживания в обозначенные периоды наблюдений практически одинаковые:  $-0,15$  °С/сутки и  $-0,14$  °С/сутки для сентября и ноября 2018 г. соответственно.

Анализ рассчитанных значений плотности воды на горизонтах 1 и 3 м, ежемесячно сгруппированных для всего периода наблюдений (2016 г.—2020 г.), показал (рис. 4), что наибольшее число ситуаций с гидростатически неустойчивым распределением плотности в слое воды между этими горизонтами приходилось на конец сентября и октябрь и, в основном, приурочено к условиям сильных ветров. Максимальные значения перепада плотности (до  $0,035$  кг/м<sup>3</sup>) были зафиксированы в октябре всего периода наблюдений, что позволяет предполагать, что именно в этот период будут возникать благоприятные условия для развития термогравитационной конвекции. В декабре такого рода ситуации наблюдаются значительно реже, так как к этому моменту времени вода уже успевает охладиться до температур ниже 7—8 °С. Дальнейшее уменьшение температуры воды происходит не так интенсивно, о чем свидетельствуют рассчитанные скорости выхолаживания, которые для декабря составляют в среднем  $-0,07$  °С/сутки.

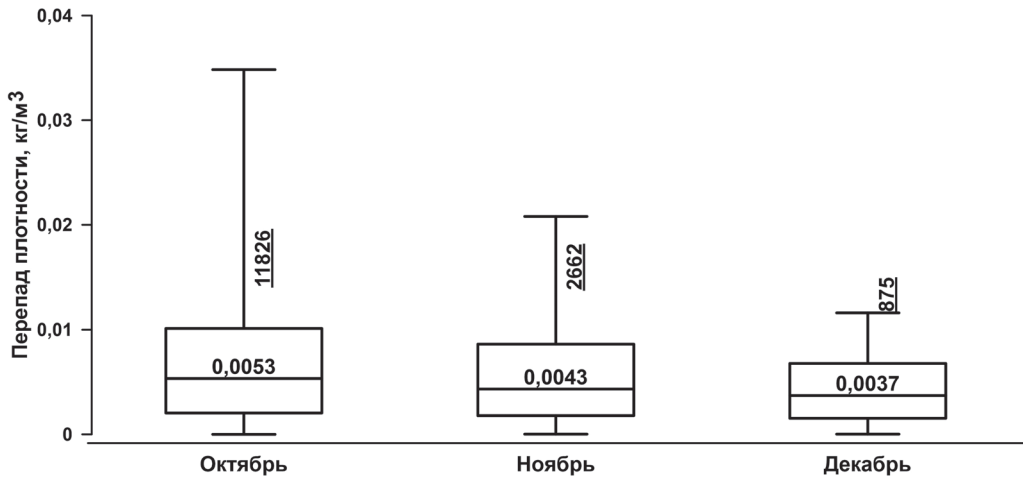


Рис. 4. Квантильный анализ сгруппированных по месяцам положительных перепадов плотности между горизонтами 1 и 3 м для периода с 2016 г. по 2020 г. Над ящиками приведены количество значений соответствующей выборки. Верхние и нижние концы усов соответствуют максимальным и минимальным значениям, а значения медианы приведены внутри ящика.

Fig. 4. Quartile analysis of month-grouped positive density changes between 1 and 3 meter horizons for the period from 2016—2020. Above the boxes are the number of values of the corresponding sample. The top and bottom ends of the whiskers correspond to the maximum and minimum values, and the median values are given inside the box.

## 2. Полуэмпирическая оценка гидростатической неустойчивости поверхностного слоя.

Рассмотрим возможность возникновения и развития термогравитационной конвекции, отталкиваясь от количественных оценок значений числа Релея ( $Ra$ ). Как известно [20, 22—25], необходимым условием возникновения термогравитационной конвекции является наличие отрицательного градиента плотности между поверхностным и подповерхностным слоями воды, создающего условия для образования гидростатической неустойчивости в этом слое. Критерием возникновения приповерхностной конвекции принято считать превышение величины числа Рэлея его критического значения [26]:

$$Ra_{кр} = \frac{g\alpha\Delta T\delta^3}{\nu k_T},$$

где  $g$  — ускорение свободного падения,  $\alpha$  — коэффициент температурного расширения жидкости,  $\Delta T$  — перепад температуры между воздухом и водой,  $\delta$  — расстояние между границами слоя,  $\nu$  — кинематическая вязкость жидкости,  $k_T$  — коэффициент температуропроводности жидкости [27]. К сожалению, прямое вычисление значений  $Ra$  затруднительно, так как толщина термического пограничного слоя  $\delta$  плохо поддается определению. Данные с платформы Д-6 имеют недостаточное

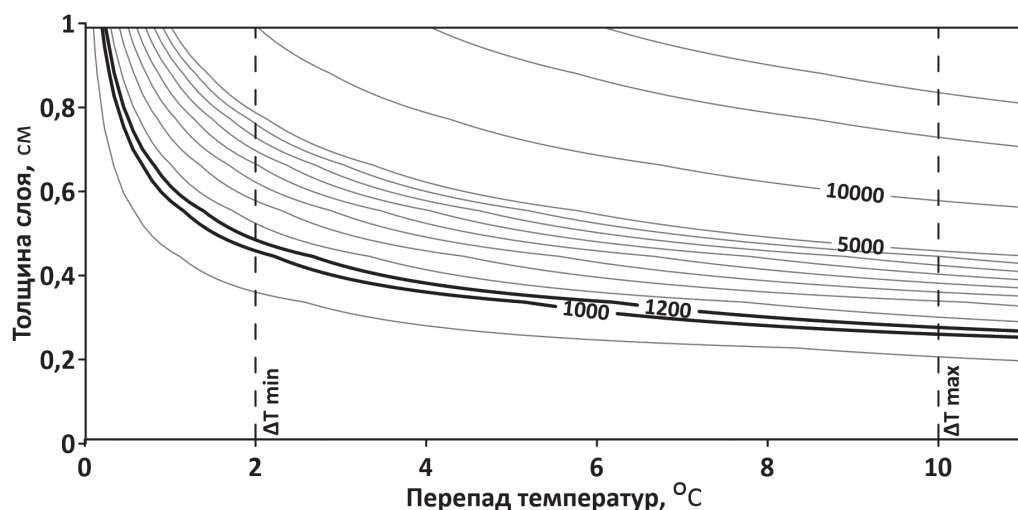


Рис. 5.  $\Delta T$ - $\delta$ -диаграмма зависимости значений числа Релея ( $Ra$ ) от величины перепада температуры воздух–вода  $\Delta T$  и толщины термического пограничного слоя  $\delta$ , диапазоны изменчивости которых взяты из экспериментальных наблюдений различных авторов.

Изолинии от 500 до 5000 с шагом 500, а затем с шагом 10000. Жирными линиями выделена граница критических значений.

Fig. 5. Diagram of the dependence of the values of the Rayleigh number ( $Ra$ ) on the values of the temperature difference  $\Delta T$  and the thickness of the thermal boundary layer  $\delta$ , the variability ranges of which are taken from the experimental observations of various authors. Isolines from 500 to 5000 in increments of 500, then in increments of 10000. Bold lines mark the boundary of critical values.

вертикальное разрешение, поэтому не позволили выполнить оценку толщины слоя. Однако из ранее выполненных инструментальных измерений известно [20, 22—24, 26, 28—32], что оценки толщины слоя  $\delta$  и градиента температуры  $\Delta T$  противоречивы и находятся в диапазоне от первых миллиметров до первых сантиметров. Исходя из зависимости числа Рэлея от конкретных значений перепада температуры  $\Delta T$  и толщины термического пограничного слоя  $\delta$  и принимая во внимание эмпирически определенные диапазоны изменчивости этих параметров, была построена  $\Delta T$ - $\delta$ -диаграмма зависимости значений числа  $Ra = Ra(\Delta T, \delta)$  (рис. 5).

Критическое число Рэлея зависит от типа решаемой задачи и может изменяться от  $Ra_{кр}^* = 1024$  в поверхностном слое воды [26] до  $Ra_{кр}^* = 1190$  при развитой конвекции для двух пограничных слоев, и  $Ra_{кр}^* = 1108$  для жидкости между твердой и жидкой границами [33]. Построенное распределение изолиний  $Ra$  показывает, что при реально зафиксированных перепадах температуры ( $\min = 2$  °C,  $\max = 10$  °C) в октябре 2016 г. и толщине  $\delta$  пограничного термического слоя больше, чем 0,3 см, величина числа  $Ra$  превышает критическое (см. рис. 5). Таким образом, выполненный анализ значений критического числа Рэлея подтвердил возможность развития конвективных движений в приповерхностном слое моря.

## Дискуссия

Вышеприведенные оценки и заключения могут быть отнесены лишь к некоторой окрестности морских вод в точке наблюдений (Д–6) за температурой воды. Однако оценки авторов за период с 05.08.2015 г. по 25.05.2016 г. показали [34], что степень корреляции спутниковых данных и измерений термокосы для поверхностного слоя достигала 0,95. Сравнение было выполнено для спутниковых данных [14] программы Metop–А и температуры воды на горизонте измерений термокосы в 1 метр в диапазоне температур от  $-1,5$  до  $2,7$  °С. При этом систематическая ошибка показаний данных составила  $0,25$  °С для летнего периода и менее  $0,1$  °С для осенне-зимнего (спутниковые данные завышали значения температуры поверхности моря).

Для осени 2016 г. спутниковые данные показали (рис. 6) высокую степень горизонтальной однородности температуры приповерхностного слоя прибрежных

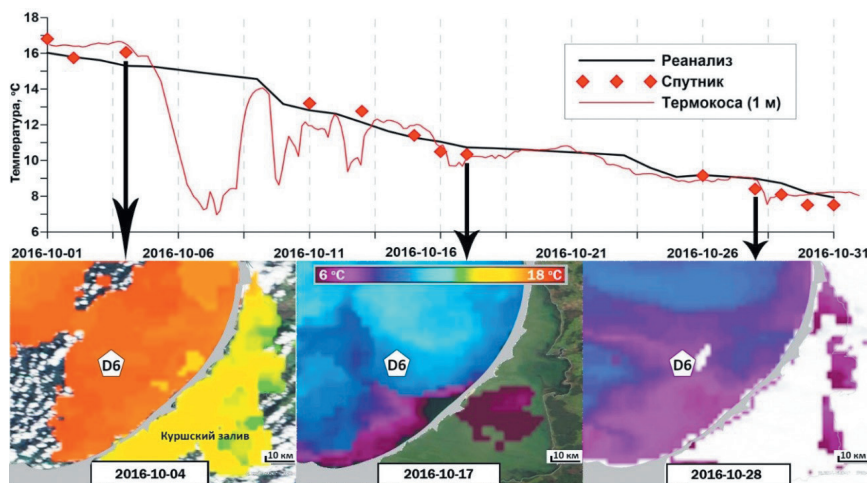


Рис. 6. График изменчивости температуры воды для района Балтийского моря вблизи Куршской косы (верхняя часть рисунка): черная толстая линия — данные реанализа, красные ромбы — спутниковые данные, тонкая красная линия — измерения термокосы на горизонте 1 м. Ниже расположены спутниковые снимки для наблюдаемой части Балтийского моря: слева — начало штормовой ситуации (04.10.2016 г.), по центру — снимок сразу после шторма (17.10.2016 г.), справа — снимок через несколько дней после шторма (28.10.2016 г.). В правом нижнем углу спутниковых снимков расположен Куршский залив (линейный масштаб 10 км).

Fig. 6. Graph of water temperature variability for the part of the Baltic Sea near the Curonian Spit is placed in the upper part of the figure: thick black line — reanalysis data, red diamonds — satellite data, thin red line — thermocouple measurements (1 meter). Below are satellite images for the observed part of the Baltic Sea: on the left — the beginning of the storm situation (10/04/2016), in the center — a picture immediately after the storm (10/17/2016), on the right — a picture a few days after the storm (10/28/2016). In the lower right corner of satellite images is the Curonian Lagoon and linear scale (10 km).

вод Балтики вдоль Куршской косы на начало и после окончания сильного шторма в октябре. Сильная облачность не позволила получить спутниковые данные о промежуточных стадиях аномального выхолаживания вод в октябре 2016 г. Для уточнения ситуации были использованы данные реанализа NOAA OI SST V2 [15], которые также показали высокую горизонтальную однородность температуры приповерхностных вод для всех акваторий, прилегающих к Куршской косе.

График изменчивости температуры для прибрежных вод у Куршской косы на период штормовых событий приведен на рис. 6. Показания термокосы (на горизонте 1 м) хорошо коррелируют с имеющейся изменчивостью температуры поверхности воды по показаниям спутниковых данных. Значения поверхностной температуры реанализа демонстрируют большую инерционность расчетных полей на текущие события из-за больших размеров ячейки ( $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ ) расчетной сетки: отклик на аномальное выхолаживание запаздывает на несколько дней (изменения отчетливо видны на графике). Данные реанализа показывают сглаженную картину изменчивости поверхностной температуры морских вод. Через неделю после окончания штормовых событий (28.10.2016 г.) спутник фиксирует позднеосенние показатели ( $\sim 5^\circ\text{C}$ ) температуры морских вод на протяжении всей Куршской косы. Заметим [35—36], что рельеф подводного берегового склона горизонтально однороден почти вдоль всей Куршской косы за исключением небольшого участка у пос. Рыбачий.

Таким образом, приведенные соображения позволяют предполагать, что полученные нами результаты и оценки на основе анализа показаний датчиков термокосы за продолжительный период времени вполне могут быть применимы для морских акваторий, прилегающих к Куршской косе.

Выполненное исследование изменчивости поля температуры прибрежных вод также показало, что для лучшего понимания взаимоотношений основных факторов процесса выхолаживания (ветро-волнового волнения, дрейфовых течений и приповерхностной конвекции) необходимо более детальное измерение всех термодинамических параметров морских вод.

### Выводы

Анализ временных рядов датчиков термокосы на горизонтах 1 и 3 м и температуры воздуха на горизонте 1 м над водой показал, что максимальное значение перепада температуры на границе раздела вода–воздух может достигать  $11^\circ\text{C}$ . При этом перепад температуры между горизонтами 1—3 м воды составлял  $-0,37^\circ\text{C}$ . При температуре воздуха  $4,24^\circ\text{C}$  температуры воды на горизонтах 1 и 3 метра составляли соответственно  $10,75$  и  $11,15^\circ\text{C}$ , что порождало отрицательный перепад плотности  $0,035\text{ кг/м}^3$ . Максимальные отрицательные градиенты в контактной зоне вода–воздух зафиксированы в конце сентября–октябре и приурочены к сочетанию холодного воздуха и сильного ветра.

Анализ измеренных значений температуры воды и воздуха за 2016 г.—2020 г. показал, что характер изменчивости во времени процесса выхолаживания прибрежных вод может быть подразделен на типичный и аномальный.



При типичном режиме выхолаживания до позднесенних температур протекает за период в 1,5—2 месяца (в 2018 г. за 7 недель), а при аномальном (в 2016 г.) выхолаживание произошло всего за 7—8 дней. Тренды скорости охлаждения воды с поверхности при типичном режиме составили  $-0,11$  °C/сутки и  $-0,22$  °C/сутки — при аномальном. Зависимость скорости выхолаживания приповерхностных вод от величины перепада температуры на границе раздела воздух–вода не выявлена.

В аномальном случае холодный и сильный ветер с берега создал условия для интенсивного развития конвекции, что привело к формированию гидростатически неустойчивого распределения плотности в окрестностях точки наблюдения, зафиксированного в измерениях термокосы. Анализ значений чисел Рэлея для 2016 г. подтвердил превышение критического значения и возникновение условий для развития термогравитационной конвекции. Экспериментально зафиксирована зависимость возникновения аномального режима выхолаживания от направления ветра: в штормовых событиях 2016 года ветер дул с берега, а в 2018 году (при близких параметрах шторма) при направлении ветра с моря интенсивное выхолаживание не возникло. Одним из результатов работы стало описание региональных особенностей сезонного выхолаживания морских вод у берегов Куршской косы.

### Список литературы

1. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том III Балтийское море. Вып. I. Гидрометеорологические условия / Под ред. Терзиева Ф. С. и др. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 449 с.
3. Морозов Е. Г., Шука С. А., Голенко Н. Н. и др. Структура температуры в прибрежной зоне Балтийского моря // Доклады Академии наук. 2007. Т. 416. № 1. С. 115—118.
4. Динамика вод Балтийского моря в синоптическом диапазоне пространственно–временных масштабов / Под ред. Е. А. Захарчука / СПб: Гидрометеоиздат, 2007. 354 с.
5. Двоеглазова Н. В., Чубаренко Б. В. О способах репрезентативного описания характеристик ветра (на примере данных для Калининградской области) // Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 407—421. doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-407-421.
6. Гмыря Е. И., Чубаренко Б. В. Количественная оценка величины расходов в реках Нижняя Преголя и Дейма (юго-восточная Балтика) по данным измерения придонных течений // Гидрометеорология и экология. 2023. № 70. С. 38—53. doi: 10.33933/2713-3001-2023-70-38-53.
7. Matthaeus W., Frank H. Characteristics of major Baltic inflows — a statistical analysis // Cont. Shelf Res. 1992. Vol. 12. P. 1375—1400.
8. Степанова Н. Б., Чубаренко И. П., Шука С. А. Структура и эволюция холодного промежуточного слоя в юго–восточной части Балтийского моря по данным натурных измерений в 2004—2008 гг. // Океанология. 2015. Т. 55. № 1. С. 32—43. doi: 10.7868/S0030157415010153
9. Мысленков С. А., Кречик В. А., Бондарь А. В. Суточная и сезонная изменчивость температуры воды в прибрежной зоне Балтийского моря по данным термокосы на платформе Д–6 // Экологические системы и приборы. 2017. № 5. С. 25—33.
10. Чубаренко И. П. Горизонтальный конвективный водообмен над подводным склоном: механизм формирования и анализ развития // Океанология. 2010. Т. 50. № 2. С. 184—193. doi: 10.7868/S0030157417050045.
11. Архив погоды на метеостанции: [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://rp5.ru/Архив\\_погоды\\_в\\_Пионерском](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Пионерском) (дата обращения: 13.03.2023).
12. IOC, SCOR and IAPSO, 2010: The international thermodynamic equation of seawater — 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides. // UNESCO (English). No. 56. 196 p.

13. Myslenkov S., Silvestrova K., Krechik V., Kapustina M. Verification of the Ekman Upwelling Criterion with In Situ Temperature Measurements in the Southeastern Baltic Sea // *J. Mar. Sci. Eng.* 2023. Vol. 11. No. 1. 179 p. doi: 10.3390/jmse11010179.
14. Huang B., Liu C., Banzon V. et al. Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) Version 2.1 // *Journal of Climate*. 2021. Vol. 34. P. 2923—2939. doi: 10.1175/JCLI-D-20-0166.1.
15. NOAA/STAR. 2021. GHRSSST L3U Metop-C AVHRR FRAC ACSPO v2.80 0.02-deg Dataset. Ver. 2.80. PO.DAAC, CA, USA. Dataset accessed [2023-09-20] at <https://doi.org/10.5067/GHMTA-3US28>.
16. Панин Г. Н., Шульман Е. Н. О влиянии скорости ветра на толщину приповерхностного ламинарного слоя // *Известия Академии наук СССР. Сер. Физика атмосферы и океана*. 1984. Т. 20. № 12. С. 1218—121.
17. Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А. и др. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 480 с.
18. Fer I., Lemmin U., Thorpe S. A. Observations of mixing near the sides of a deep lake in winter // *Limnol. Oceanogr.* 2002. Vol. 47. No. 2. P. 535—544.
19. Куприянова А. Е., Гриценко В. А. Лабораторное и численное исследование особенностей процесса выхолаживания воды с поверхности в прибрежных водах // *Известия РАН. Сер. Физика атмосферы и океана*. 2021. Т. 57. № 4. С. 484—494. doi: 10.31857/S0002351521040076.
20. Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкости. М.: МИР, 1977. 431 с.
21. Джалурия Й. Естественная конвекция. М.: МИР, 1983. 399 с.
22. Bouffard D., Wüest A. Convection in Lakes // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2019, Vol 51. P. 189—215 doi: 10.1146/annurev-fluid-010518-040506.
23. Гинзбург А. И., Федоров К. Н. Охлаждение воды с поверхности при свободной и вынужденной конвекции // *Известия Академии наук СССР. Сер. Физика атмосферы и океана*. 1978. Т. 14. № 1. С. 79—87.
24. Скорер Р. Аэрогидродинамика окружающей среды. М.: МИР, 1980. 549 с.
25. Панин Г. Н. Тепло- и массообмен между водоемом и атмосферой в естественных условиях. М.: Наука, 1985. 208 с.
26. Гинзбург А. И., Федоров К. Н. О критическом пограничном числе Рэлея при охлаждении воды через свободную поверхность // *Известия Академии наук СССР. Сер. Физика атмосферы и океана*. 1978. Т. 14. № 4. С. 433—436.
27. Попов Н. И., Федоров К. Н., Орлов В. М. Морская вода. Справочное руководство. М.: Наука, 1979. 327 с.
28. Хунджуа Г. Г., Андреев Е. Г. Экспериментальное исследование теплообмена между морем и атмосферой при мелкомасштабном взаимодействии // *Известия Академии наук СССР. Сер. Физика атмосферы и океана*. 1974. Т. 10. № 10. С. 1110—1113.
29. Хунджуа Г. Г., Гусев А. М., Андреев Е. Г. и др. О структуре поверхностной холодной пленки океана и о теплообмене океана с атмосферой // *Известия Академии наук СССР. Сер. Физика атмосферы и океана*. 1977. Т. 13. № 7. С. 753—758.
30. Черноусько Ю. Л. Экспериментальные исследования микроконвекции в лабораторных условиях // *Известия Академии наук СССР. Сер. Физика атмосферы и океана*. 1971. Т. 7. № 10. С. 1096—1098.
31. Вершинский Н. В., Соловьев А. В., Гуренко В. В. Опыт регистрации вертикальной микроструктуры температуры и электропроводности в поверхностном слое океана с помощью всплывающего зонда // *Океанология*. 1981. Т. 21. № 4. С. 734—738.
32. Федоров К. Н., Гинзбург А. И. Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 303 с.
33. Spangenberg W.G., Rowland W. R. Convective circulation in water induced by evaporative cooling // *Phys. Fluids*. 1961. Vol 4. No. 6. P. 743—750.
34. Мысленков С. А., Кречик В. А., Соловьев Д. М. Анализ температуры воды в прибрежной зоне Балтийского моря по спутниковым данным и измерениям термокосы // *Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 2017. № 364. С. 159—169.
35. Dorokhov D., Dudkov I., Sivkov V. Single beam echo-sounding dataset and digital elevation model of the southeastern part of the Baltic Sea (Russian sector). Data in brief. 2019. Vol. 25, 104123. doi: 10.1016/j.dib.2019.104123.

36. Нефть и окружающая среда Калининградской области. Т. II: Море / под ред. В. В. Сивкова (отв. редактор), Ю. С. Каджояна, О. Е. Пичужкиной, В. Н. Фельдмана. Калининград: Терра Балтика, 2012. 576 с.

### References

1. Dobrovolsky A. D., Zalogin B. S. *Morya SSSR = Seas of the USSR*. Moscow: Izdatel'stvo MGU, 1982: 192 p. (In Russ.).
2. *Hydrometeorologiya i hydrokhimiya morey SSSR, pod redaksiyey Terziyeva, F. S., V. A. Rozhkova and A. I. Smirnovoy = Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR*. Saint Petersburg: Hydrometeoizdat, 1992; 3(1): 450 p. (In Russ.).
3. Morozov E. G., Schuka S. A., Golenko N. N. et al. Temperature structure in the coastal zone of the Baltic Sea. *Doklady Akademii Nauk = Proc. of the Academy of Sciences*. 2007; 416(1): (115—118). (In Russ.).
4. *Dinamika vod Baltiyskogo morya v sinopticheskom diapazone prostranstvenno-vremennykh masshtabov, pod red. Ye.A. Zakharchuka = Dynamics of Baltic Sea waters in the synoptic range of spatiotemporal scales*. Saint Petersburg: Hydrometeoizdat, 2007: 354 p. (In Russ.).
5. Dvoeglazova N. V., Chubarenko B. V. On methods of representative description of wind characteristics (by the example of data for the Kaliningrad oblast). *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022; (68) : (407—421). (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-407-421.
6. Gmyrya E. I., Chubarenko B. V. Quantitative assessment of discharges in the Downstream Pregolya and Deyma rivers (southeast Baltic) according to near-bottom current measurement data. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023; (70) : (38—53) (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-70-38-53.
7. Matthaeus W., Frank H. Characteristics of major Baltic inflows — a statistical analysis. *Cont. Shelf Res.* 1992; (12): 1375—1400.
8. Stepanova N. B., Chubarenko I. P., Schuka S. A. Structure and evolution of the cold intermediate layer in the southeastern part of the Baltic Sea according to field measurements in 2004—2008. *Okeanologiya = Oceanology*. 2015; 57 (1): (32—43). doi: 10.7868/S0030157415010153. (In Russ.).
9. Myslenkov S. A., Krechik V. A., Bondar A. V. Daily and seasonal variability of water temperature in the coastal zone of the Baltic Sea according to the data of the thermal streamer on the D-6 platform. *Ekologicheskiye sistemy i pribory = Ecological systems and devices*. 2017; (5): (25—33). (In Russ.).
10. Chubarenko I. P. Horizontal convective water exchange over the underwater slope: formation mechanism and development analysis. *Okeanologiya = Oceanology*. 2010; 50 (2): (184—193). doi: 10.1134/S0001437010020025 (In Russ.)
11. *Arkhiv pogody na meteostantsii = Weather archive at the weather station*: [Electronic resource]. Access mode: [https://rp5.ru/Weather\\_archive\\_in\\_Pionersky](https://rp5.ru/Weather_archive_in_Pionersky) (date of access: 13.03.2023).
12. IOC, SCOR and IAPSO: The international thermodynamic equation of seawater — 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides. UNESCO (English). 2010; (56): 196 p.
13. Myslenkov S., Silvestrova K., Krechik V., Kapustina M. Verification of the Ekman Upwelling Criterion with In Situ Temperature Measurements in the Southeastern Baltic Sea. *J. Mar. Sci. Eng.* 2023; 11 (1): 179 p. doi: 10.3390/jmse11010179.
14. Huang B., Liu C., Banzon V. et al. Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) Version 2.1. *Journal of Climate*. 2021; (34): 2923—2939. doi: 10.1175/JCLI-D-20-0166.1.
15. NOAA/STAR. 2021. GHRSSST L3U Metop-C AVHRR FRAC ACSPO v2.80 0.02-deg Dataset. Ver. 2.80. PO.DAAC, CA, USA. Dataset accessed [2023-09-20] at <https://doi.org/10.5067/GHMTA-3US28>.
16. Panin G. N., Shulman E. N. On the effect of wind speed on the thickness of the near-surface laminar layer. *Izvestiya AN SSSR. Seriya Fizika atmosfery i okeana = Izvestiya AN SSSR Atmos. Ocean. Phys.* 1984; 20 (12): (1218—1221). (In Russ.).

17. Lavrova O. Yu., Kostyanoy A. G., Lebedev S. A. et al. *Kompleksnyy sputnikovyy monitoring morey Rossii = Integrated satellite monitoring of the seas of Russia*. Moscow: IKI RAN, 2011: 480 p. (In Russ.).
18. Fer I., Lemmin U., Thorpe S. A. Observations of mixing near the sides of a deep lake in winter. *Limnol. Oceanogr.* 2002; 47 (2): 535—544.
19. Kupriyanova A. E., Gritsenko V. A. Laboratory and Numerical Study of the Peculiarities of Sea Surface Cooling in Coastal Waters. *Izvestiya RAN. Seriya Fizika atmosfery i okeana = Izvestiya RAN. Atmos. Ocean. Phys.* 2021; (57): (425—434). doi: org/10.1134/S0001433821040186.
20. Turner J. S. *Buoyancy Effects in Fluids*. New York: Cambridge Univ. Press, 1973: 367 p.
21. Jaluria Y. *Natural Convection Heat and Mass Transfer*. Ed. by S. L. Vishnevetsky. Pergamon, 1980: 326 p.
22. Bouffard D., Wüest A. Convection in Lakes. *Annual Review Fluid Mech.* 2019; (51): 189—215. doi: 10.1146/annurev-fluid-010518-040506.
23. Ginzburg A. I., Fedorov K. N. Cooling of water from the surface under free and forced convection. *Izvestiya AN SSSR. Seriya Fizika atmosfery i okeana = Izvestiya AN SSSR Atmos. Ocean. Phys.* 1978; 14 (1): (79—87). (In Russ.).
24. Scorer R. *Environmental Aerodynamics*. Wiley, 1978: 488 p.
25. Panin G. N. *Teplo- i massoobmen mezhdu vodoyemom i atmosferoy v yestestvennykh usloviyakh = Heat and mass transfer between the reservoir and the atmosphere in natural conditions*. Moscow: Nauka, 1985: 208 p. (In Russ.).
26. Ginzburg A. I., Fedorov K. N. On the critical boundary Rayleigh number for water cooling through a free surface. *Izvestiya AN SSSR, Seriya Fizika I Atmosfera okeana = Izvestiya AN SSSR Atmos. Ocean. Phys.* 1978; 14 (4): (433—436). (In Russ.).
27. Popov N. I., Fedorov K. N., Orlov V. M. *Morskaya voda. Spravochnoye rukovodstvo = Sea water. Reference guide*. Moscow: Nauka, 1979: 327 p. (In Russ.).
28. Khundzhua G. G., Andreev E. G. Experimental study of heat transfer between the sea and the atmosphere during small-scale interaction. *Izvestiya AN SSSR, Seriya Fizika I Atmosfera okeana = Izvestiya AN SSSR Atmos. Ocean. Phys.* 1974; 10 (10): (1110—1113). (In Russ.).
29. Khundzhua G. G., Gusev A. M., Andreyev Ye. G. et al. On the structure of the surface cold film of the ocean and on the heat exchange between the ocean and the atmosphere. *Izvestiya AN SSSR, Seriya Fizika I Atmosfera okeana = Izvestiya AN SSSR Atmos. Ocean. Phys.* 1977; 13 (7): (753—758). (In Russ.).
30. Chernousko Yu. L. Experimental studies of microconvection in laboratory conditions. *Izvestiya AN SSSR, Seriya Fizika I Atmosfera okeana = Izvestiya AN SSSR Atmos. Ocean. Phys.* 1971, 7 (10): (1096—1098). (In Russ.).
31. Vershinsky N. V., Solovyov A. V., Gurenko V. V. Experience in registering the vertical microstructure of temperature and electrical conductivity in the surface layer of the ocean using a floating probe. *Okeanology = Oceanology*. 1981; 21 (4): (734—738). (In Russ.).
32. Fedorov K. N., Ginzburg A. I. *Pripoverkhnostnyy sloy okeana = The Near-Surface Layer of the Ocean*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1988: 303 p. (In Russ.).
33. Spangenberg W. G., Rowland W. R. Convective circulation in water induced by evaporative cooling. *Phys. Fluids*. 1961; 4 (6): 743—750.
34. Myslenkov S. A., Krechik V. A., Soloviev D. M. Water temperature analysis in the coastal zone of the baltic sea based on thermistor chain observations and satellite data. *Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*. 2017; (364): (159—169). (In Russ.).
35. Oil and environment of the Kaliningrad Region. Vol. II: The Sea / ed. by V. V. Sivkov (editor-in-chief), Yu. S. Kadzhoyan, O. E. Pichuzhkina, V. N. Feldman. Kaliningrad: Terra Baltica. 2012: 576 p. ISBN 978-5-98777-052-8. (In Russ.).
36. Dorokhov D., Dudkov I., Sivkov V. Single beam echo-sounding dataset and digital elevation model of the southeastern part of the Baltic Sea (Russian sector). Data in brief. 2019; 25: 104123. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104123>

### Информация об авторах

Анастасия Евгеньевна Курьянова, Атлантическое отделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, младший научный сотрудник, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, аспирант, kurriyanova\_ae@mail.ru.

*Владимир Алексеевич Гриценко*, доктор физико-математических наук, профессор, Атлантическое отделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П. П. Шишова РАН, ведущий научный сотрудник, gritsenko-vl-al@mail.ru.

*Александр Владимирович Килесо*, кандидат географических наук, Атлантическое отделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П. П. Шишова РАН, младший научный сотрудник.

*Ксения Дмитриевна Коробченкова*, Атлантическое отделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П. П. Шишова РАН, старший лаборант с ВПО, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, аспирант.

### ***Information about authors***

*Anastasia Kupriyanova*, Atlantic Branch of the Institute of Oceanology. P. P. Shirshov RAS, junior researcher, Immanuel Kant Baltic Federal University, PhD student.

*Vladimir Gritsenko*, Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Atlantic Branch of the Institute of Oceanology. P. P. Shirshov RAS, Leading Researcher.

*Alexander Kilesa*, PhD (Geogr. Sci.), Atlantic Branch of the Institute of Oceanology. P. P. Shirshov RAS, Junior researcher.

*Ksenia Korobchenkova*, Atlantic Branch of the Institute of Oceanology. P. P. Shirshov RAS, senior laboratory assistant with higher professional education, Immanuel Kant Baltic Federal University, PhD student.

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 18.07.2023*

*Принята к печати после доработки 01.11.2023*

*The article was received on 18.07.2023*

*The article was accepted after revision on 01.11.2023*