

Ж. И. Стонт, Т. В. Буканова, Е. В. Крек

## ИЗМЕНЧИВОСТЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИБРЕЖНОЙ ЧАСТИ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКИ В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА

Исследование посвящено особенностям гидрометеорологических условий в юго-восточной части Балтийского моря и оценке тенденций их изменения за 2005 – 2019 гг. (климатический полупериод). Использовались данные натурных наблюдений атмосферного давления, направления и скорости ветра, температуры воздуха с автоматической гидрометеорологической станции, расположенной в открытом море, а также спутниковые данные инфракрасного и микроволнового (радиолокационные изображения) диапазонов для определения площади морского льда и температуры поверхности моря соответственно. Выявлены характерные особенности многолетней динамики гидрологических характеристик юго-восточной части Балтийского моря за 2005 – 2019 гг. Среднегодовое атмосферное давление близко к нормальному и составляет  $1014,6 \pm 1,7$  гПа, установлен его рост со скоростью  $0,10$  гПа/год. Преобладают ветра от юго-запада и запада с возрастанием скорости в холодный период года. Отмечен рост количества штормов (+2 шторма/15 лет), однако снижается их продолжительность и уменьшается максимально регистрируемая скорость ветра. Среднегодовая температура воздуха над юго-восточной частью Балтийского моря повысилась на  $1,6^\circ\text{C}$  по сравнению с серединой XX в. и ежегодно увеличивается со скоростью  $0,04^\circ\text{C}/\text{год}$ . Одновременно с меньшим темпом растет температура поверхности моря ( $0,02^\circ\text{C}/\text{год}$ ) и сокращается максимальная наблюдаемая площадь ледового поля в море ( $-112,5$  км<sup>2</sup>/год).

The study is focused on features of hydrometeorological conditions in the southeastern Baltic Sea and their trends assessment for 2005 – 2019 (climatic half period). The authors used the data from field observations of atmospheric pressure, wind direction and speed, and air temperature from the automatic hydrometeorological station located offshore, as well as the satellite data from the infrared and microwave (radar images) ranges to determine sea ice and sea surface temperature, respectively. The research also reveals characteristic features of long-term dynamics of hydrological conditions in the south-eastern part of the Baltic Sea for 2005 – 2019. The average annual atmospheric pressure is close to regular and equals to  $1014.6 \pm 1.7$  hPa; its growth is estimated at a rate of  $0.10$  hPa/year. South-west and west winds prevail and they increase their speed during cold season. Increase in the number of storms is shown (+2 storms/15 years), however, the duration of storms has decreased and the maximum recorded wind speed has declined. The average annual air temperature over the south-eastern part of the Baltic Sea has increased by  $1.6^\circ\text{C}$  compared to the middle of the XX century and it rises annually at a rate of  $0.04^\circ\text{C}/\text{year}$ . The sea surface temperature simultaneously is rising with a slower rate ( $0.02^\circ\text{C}/\text{year}$ ) and the maximum area of the ice field observed in the sea is decreasing ( $-112,5$  km<sup>2</sup>/year).

**Ключевые слова:** атмосферное давление, ветер, шторм, температура воздуха, температура поверхности моря, морской лед, Балтийское море.

**Keywords:** atmospheric pressure, wind, storm, air temperature, sea surface temperature, sea ice, the Baltic Sea.



## Введение

Балтийское море представляет собой одну из акваторий Мирового океана, наиболее чувствительных в отношении изменения климата и чрезвычайно интенсивно используемых в хозяйственной деятельности человека. Многие экологические проблемы стоят здесь весьма остро в силу специфических особенностей Балтийского моря: относительно малых размера и глубины, большой площади водосбора по сравнению с размером бассейна, ограниченного водообмена через узкие проливы, которые связывают его с Северным морем [1–3]. Из-за небольшого размера в сочетании с уязвимостью экосистемы Балтийское море чутко реагирует на изменения климата. Для поддержки необходимых мер по смягчению последствий климатических колебаний все девять государств Балтийского моря ведут интенсивный морской мониторинг, который подтверждает значимые изменения гидрометеорологических условий в регионе [4; 5]. В Балтийском море зарегистрировано одно из самых стремительных повышений приземной температуры воздуха в XX в., и этот рост почти наверняка продолжится [6]. Как во многих областях земного шара, специфическое потепление региона началось в 60–70-е гг. XX в., который, в свою очередь, оказался наиболее теплым за последние 500 лет [2; 7; 8]. Результатом усиления западного переноса над юго-восточной частью Балтики стали повышение температуры воздуха и воды, увеличение количества осадков [1]. Рост температуры воздуха над поверхностью Балтийского моря происходит со скоростью  $0,3–0,7^{\circ}\text{C}/10$  лет [1; 9–11]. Такое потепление обусловило увеличение числа мягких зим и сокращение ледового сезона [12].

Аналогичная тенденция потепления наблюдается в годовых вариациях температуры поверхности Балтийского моря [1; 13]. Несмотря на некоторые региональные различия, отмечается положительная тенденция со средним увеличением температуры поверхности моря на  $0,8^{\circ}\text{C}/15$  лет с самого начала XX в. [1; 13–16]. Как глобальные, так и региональные климатические модели прогнозируют прогрев Балтийского моря примерно на  $2–4^{\circ}\text{C}$  к концу XXI в. [5; 17; 18].

Повышение температуры воды во всех регионах Балтийского моря является естественным следствием изменения температуры воздуха и атмосферной циркуляции над северо-востоком Европы. Сильные колебания температуры воды и воздуха в регионе с конца XX в. связаны с интенсивностью Североатлантического колебания (САК), особенно зимой и весной, когда индекс САК находится в основном в положительной фазе [19; 20]. Цель исследования — выяснить особенности гидрометеорологических условий в юго-восточной части Балтийского моря и оценить тенденции их изменения за последние 15 лет (2005–2019 гг.).

Выявление тенденций изменения важнейших гидрометеорологических характеристик необходимо для выработки дальнейших мер адаптации региона к последствиям изменения климата, направленных на смягчение или предотвращение этих последствий либо использование благоприятных возможностей, связанных с изменением климата. Стратегия социального, хозяйственного, берегоохранного рекреационного



и экологобезопасного развития Калининградской области, и особенно ее прибрежной зоны, должна быть сформулирована с учетом прогнозируемого состояния климата.

### Данные и методика

Работа выполнена на основе изучения 15-летних рядов (2005–2019 гг.) наблюдений следующих гидрометеорологических характеристик в юго-восточной части Балтийского моря: атмосферного давления, направления и скорости ветра, температуры воздуха ( $T_a$ ) и поверхности моря (ТПМ), площади морского льда у побережья. Для анализа изменчивости атмосферного давления, ветра и  $T_a$  использованы ежечасные данные автоматической гидрометеорологической станции (АГМС), расположенной на морской ледостойкой стационарной платформе МЛСП Д6 в 20 км от берега, что исключает влияние суши.

Анализировались среднемесячные показатели температуры на поверхности Балтийского моря по данным спутниковых изображений радиометров MODIS (на спутниках Terra и Aqua) и VIIRS (на спутнике Suomi-NPP) на сетке  $3 \times 3$  км в программе SeaDAS (версия 7.4).

Ледовитость акватории юго-востока Балтийского моря определялась путем обнаружения льда на поверхности моря на радиолокационных изображениях спутников Envisat, RADARSAT-1/2, TerraSAR-X, Cosmo-SkyMED-1/2/3/4 и Sentinel-1A/B. В программном пакете ArcGIS 10.0 на РЛИ оконтурены ледовые поля и вычислена их площадь ( $S$ , км<sup>2</sup>). ТПМ и ледовитость оценивались для юго-востока Балтийского моря по следующим границам: с севера –  $56^\circ$  с.ш., с запада –  $18^\circ$  в.д., с юга и востока – береговая линия (рис. 1). Долговременные тренды рассчитаны с помощью линейной аппроксимации временных рядов методом наименьших квадратов. Достоверность полученных результатов оценивалась с помощью  $t$ -критерия Стьюдента.

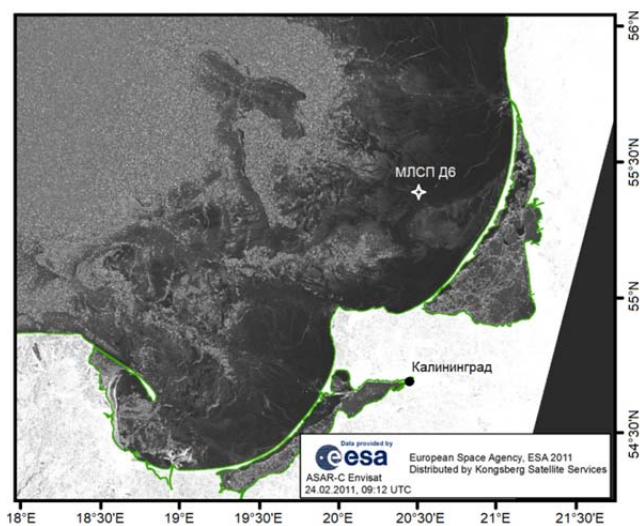


Рис. 1. Район исследования. Показано максимальное распространение морского льда на радиолокационном изображении поверхности Балтийского моря 24 февраля 2011 г. со спутника Envisat. Белой звездочкой отмечено положение автоматической гидрометеорологической станции на МЛСП Д6



## Результаты и обсуждение

### Атмосферное давление

Среднегодовое атмосферное давление над юго-восточной частью Балтийского моря за 2005–2019 гг. составило  $1014,6 \pm 1,7$  гПа, что близко к нормальному ( $760$  мм рт. ст. =  $1013,3$  мб =  $1013,3$  гПа) (табл. 1). Максимальное среднегодовое давление отмечено в 2011 г. ( $1016,9 \pm 4,1$  гПа), минимальное – в 2007 г. ( $1012,3 \pm 5,08$  гПа).

Таблица 1

Среднемесячные величины атмосферного давления в юго-восточной части Балтийского моря по измерениям АГМС в 2005–2019 гг., гПа, +1000

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Среднее	$\pm \sigma$
2005	6,8	15,0	11,1	13,9	12,3	11,8	10,0	12,8	18,6	22,1	14,4	10,7	13,3	4,03
2006	28,8	13,7	11,1	12,9	14,3	19,5	19,8	7,3	16,8	12,9	10,7	17,4	15,4	5,60
2007	3,4	13,6	14,7	17,8	10,6	11,7	7,6	13,5	13,6	22,8	8,9	16,9	12,3	5,08
2008	14,7	17,8	0,5	12,8	18,2	14,4	14,0	9,9	18,7	12,3	9,5	18,6	13,4	5,19
2009	14,3	11,4	10,8	19,2	18,1	13,3	11,6	17,2	18,0	13,9	10,0	10,5	14,0	3,33
2010	20,3	8,8	12,0	18,0	11,2	13,9	15,7	11,3	15,5	18,1	4,6	9,8	13,3	4,51
2011	14,4	19,7	21,5	17,3	18,8	14,4	9,3	13,2	14,4	18,3	24,2	3,9	15,8	5,50
2012	18,7	27,0	19,7	7,0	16,8	11,9	13,4	15,6	13,0	11,2	12,7	12,5	15,0	5,13
2013	13,7	15,9	16,0	16,4	12,1	15,3	16,5	17,7	13,1	17,3	11,4	14,0	14,9	2,05
2014	16,0	11,6	16,2	15,8	15,3	14,3	15,3	11,2	19,1	18,9	20,5	12,7	15,6	2,91
2015	8,7	15,3	19,1	14,3	14,1	17,4	12,3	19,7	17,6	23,0	10,8	20,4	16,1	4,23
2016	12,9	7,5	14,7	12,4	15,7	14,3	13,6	16,4	19,2	23,2	12,8	20,8	15,3	4,21
2017	18,9	18,3	13,8	13,2	14,6	10,4	11,8	16,1	14,8	10,1	10,6	6,9	13,3	3,54
2018	13,8	20,9	10,4	14,4	20,5	15,0	13,3	20,6	17,5	16,0	24,9	15,5	16,9	4,10
2019	7,9	17,7	9,6	21,6	12,9	17,9	11,6	16,7	14,5	12,6	9,7	9,3	13,5	4,23
Среднее	14,2	15,6	13,4	15,1	15,0	14,4	13,1	14,6	16,3	16,8	13,0	13,3	14,6	1,26
$\pm \sigma$	6,2	5,0	5,1	3,5	3,0	2,5	3,1	3,7	2,3	4,6	5,8	4,9	4,1	1,31

Согласно таблице 1, наибольшие величины среднемесячного давления отмечены в сентябре ( $1016,3 \pm 2,3$  гПа) и октябре ( $1016,8 \pm 4,6$  гПа), наименьшие – в ноябре ( $1013,0 \pm 5,8$  гПа). Сентябрь характеризуется минимальной изменчивостью атмосферного давления ( $\pm \sigma = 2,34$  гПа). Наиболее изменчиво давление в январе ( $\pm \sigma = 6,2$  гПа). Сохраняется закономерность колебания амплитуд среднемесячного атмосферного давления, отмеченная в [21]: разности между наибольшими и наименьшими значениями зимой в 3–4 раз выше, чем в летние месяцы. В январе отмечены экстремумы атмосферного давления: максимум  $1049,8$  гПа и минимум  $964,8$  гПа, так как самые мощные антициклоны и самые глубокие циклоны определяли погоду в этот месяц.

Многолетний ход атмосферного давления, приведенного к уровню моря за период 2005–2019 гг., характеризуется наличием статистически значимого положительного тренда  $+0,10$  гПа/год (уровень значимости  $p=0,95$ ). Соответствующее приращение по тренду равно  $1,5$  гПа за период.



Отмечены незначительные внутригодовые колебания атмосферного давления: рассчитанная скорость роста атмосферного давления близка зимой и весной<sup>1</sup> ( $\sim 0,10$  гПа/год), приращение по тренду 1,5 гПа/период. Летом процесс заметно ускорился — 0,17 гПа/год, приращение 5,5 гПа/период. Осенью процесс замедляется: приращение составило 0,3 гПа/период.

Причиной роста атмосферного давления, очевидно, является наблюдающийся сдвиг траекторий движения центров атлантических циклонов, смещающихся над Балтийским морем с запада на восток [22–24].

### Ветровые условия

Для поля ветра над юго-восточной частью Балтики характерно преобладание ветров от юго-запада и запада, при этом увеличение скорости наблюдается в холодный период года (рис. 2). Такую специфику обуславливают географические особенности региона. Большая часть побережья Балтийского моря простирается от Датских проливов на восток, имея зональное направление. У окончания Куршской косы береговая линия меняет направление на меридиональное. Отсутствие орографических препятствий способствует транзиту атлантических циклонов, что определяет режим ветра [25] и ведет к возникновению критических ситуаций на калининградском побережье Юго-Восточной Балтики.

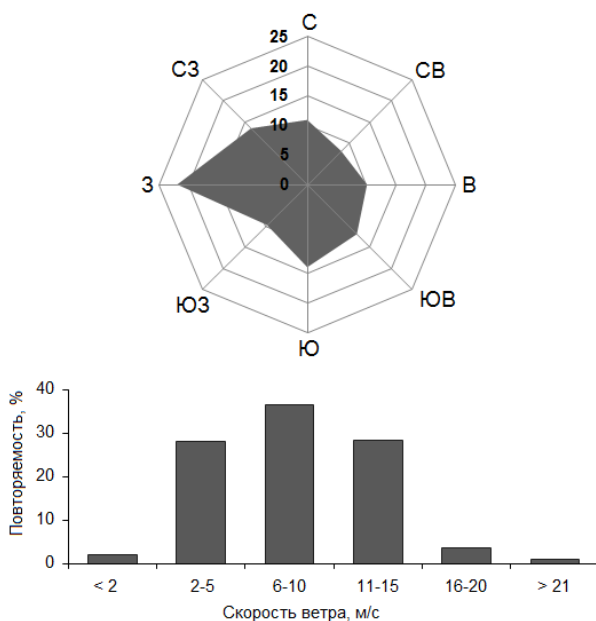


Рис. 2. Роза ветров и повторяемость скоростей ветра по данным МЛСП Д6 в 2005–2019 гг., %

<sup>1</sup> Выделенные сезоны не совпадают с календарными. По мнению В. Ф. Дубравина, климатические сезоны в Юго-Восточной Балтике смещены относительно календарных на один месяц: так, зима длится с января по март [26].



Согласно рисунку 2, основные характеристики ветрового режима над юго-восточной частью Балтийского моря заключаются в следующем:

- роза ветров симметрична вдоль оси «запад (W) – восток (E)»;
- повторяемость всех направлений, кроме преобладающего западного, равновероятна;
  - на западные румбы приходится 45 % всех ветров, из них 23 % – западные (W) ветры, 14 % – северо-западные (NW);
  - повторяемость южных (S) ветров – 13 %;
  - на остальные направления приходится по  $10 \pm 1$  % случаев;
  - гистограмма повторяемости скорости бимодальная: основная мода приходится на скорость 6–10 м/с. Повторяемость убывает в обоих направлениях от максимальной моды.

86

Вектор результирующего переноса направлен с юго-запада на северо-восток ( $230^\circ$ ), что является характерным для этой части Балтики. Несмотря на существующие общие закономерности (преобладание ветров западных румбов и симметричность относительно зональной оси), характеристики поля ветра зависят от циркуляционных условий каждого года.

### *Шторма по данным измерений в открытом море (МЛСП Д6)*

В соответствии со шкалой силы ветра Бофорта [25] штормовым называется ветер силой 8 баллов и более (скорость ветра  $\geq 15$  м/с). Ветер со скоростью  $\geq 15$  м/с и продолжительностью не менее 6 часов учитывался нами как штормовой.

По данным наблюдений середины XX в. [27], повторяемость числа дней с сильным ветром ( $\geq 15$  м/с) в прибрежной зоне составляла 28–38 дней в течение года, редко до 60 дней. При этом на зиму приходится половина всех наблюдаемых штормов с максимумом в январе, а весной самый штормовой месяц март. Летом штормовые процессы развиваются гораздо реже, чем в остальные сезоны, осенью активность штормов снова высокая. Скорость ветра во время шторма в среднем составляет 12–18 м/с, иногда достигает 19–25 м/с.

Во второй половине XX в. (за период 1966–1985 гг.) отмечалось в среднем 26 случаев штормов в год [28]. Самым штормовым был 1984 г. (66 штормов), самыми спокойными – 1979 и 1982 гг. (8–10 штормов). При анализе термобарических условий возникновения штормовых ветров в регионе было выделено 8 типов траекторий барических образований и охарактеризованы шторма в зависимости от направления ветра [28–30].

По данным АГМС, в 2005–2019 гг. отмечено 404 шторма, в среднем  $27 \pm 5,4$  штормов в год (рис. 3). За этот период самым штормовым был 2007 г. (35 штормов). Более 30 штормов за год зафиксировано в 2008, 2010, 2011, 2015 и 2016 гг., до 20 штормов за год наблюдалось в 2006, 2009 и 2013 гг. За последние 15 лет количество штормов медленно увеличивается: линейное приращение по тренду +2 шторма за период. Средняя продолжительность штормового воздействия также увеличилась на 18 часов за счет возросшей повторяемости (172 ч) ветров восточных румбов, которые связаны с господством антициклональных условий в зимний период 2014 г. Максимальная скорость ветра за рассматриваемый период уменьшилась. Но говорить о достоверности тренда за короткий период (15 лет) некорректно.

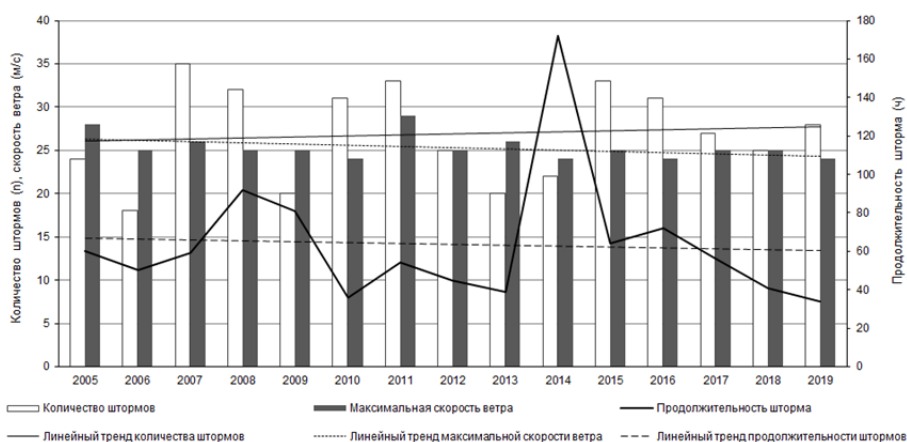


Рис. 3. Межгодовая изменчивость количества и продолжительности штормов, максимальной измеренной скорости ветра (МЛСП Д6).

Таблица 2

**Внутригодовая изменчивость основных характеристик штормов в юго-восточной части Балтийского моря в 2005 – 2019 гг. (скорость ветра  $\geq 15$  м/с; продолжительность шторма  $\geq 6$  ч)**

Месяц	Среднее количество штормов $\pm \sigma$	Средняя продолжительность, ч	Максимальная продолжительность, ч	Средняя максимальная скорость ветра, м/с	Максимальная скорость ветра, м/с
I	5,7 $\pm$ 2,5	60,2	172	22,7	28
II	3,3 $\pm$ 1,9	24,5	59	19,5	27
III	2,3 $\pm$ 0,8	15	27	22,3	27
IV	2,3 $\pm$ 1,2	11	13	18,3	19
V	1,0 $\pm$ 0,0	13,5	17	18	18
VI	1,0 $\pm$ 0,0	13	27	19,5	22
VII	1,0 $\pm$ 0,0	6	28	18	18
VIII	2,5 $\pm$ 0,9	10,5	26	20	24
IX	2,8 $\pm$ 1,4	21	39	21	24
X	4,2 $\pm$ 1,6	41,2	72	21,3	25
XI	3,7 $\pm$ 2,4	26,7	81	21,7	29
XII	4,8 $\pm$ 2,4	35,5	64	22	26
Среднее $\pm \sigma$	2,9 1,5	13,2 5,5	52,1 44,0	19,8 1,8	23,9 3,9

В юго-восточной части Балтийского моря четко выражен внутригодовой ход штормовой активности. Максимальная повторяемость штормов (как по климатическим данным [27; 28], так и по данным АГМС на МЛСП Д6) наблюдается в осенне-зимний период (табл. 2). Максимальное среднеемесячное количество штормов отмечено в январе (5–6 штормов). В летние месяцы (май – август) наблюдаются обычно 1–2 шторма, в ноябре – декабре штормовая активность вновь растет.

В теплый период года (апрель – октябрь) в середине и конце XX в. штормов было больше, чем в настоящее время [31], в связи с наибольшей активностью атмосферы в Юго-Восточной Балтике в этот период [27; 32].



В середине и последней четверти прошлого века, когда активность штормовых процессов усилилась [32], измерены максимальные скорости ветра в Клайпеде, достигавшие 34 м/с. В открытом море (одноградусный квадрат с центром 55° N 20° E) наибольшие скорости ветра приурочены именно к этим периодам: 32 м/с в 1983 г. и 30 м/с в 1985 г. [33]. За период с 1881 по 1998 г. в изменчивости штормистости не было долгопериодного тренда, ряды отражали в основном междекадную изменчивость [34; 35]. В начале XXI в. вновь происходит активизация штормовых процессов: летом наблюдаются шквалы (32 м/с в августе 2012 г.), в ноябре измерены порывы ветра до 31 м/с в Клайпеде и до 37 м/с на МЛСП Д6 (2011 г.).

Больше всего штормов наблюдалось в январе 2007 г. и декабре 2011 г. (11 и 10 соответственно), что связано с активными атлантическими циклонами, приходящими из западного квадранта (SW, W, NW). В ноябре 2008 г. отмечено 9 штормов, в октябре 2017 г. – 8.

Шторма от восточных румбов по силе уступают западным. В октябре 2009 г. зарегистрирован шторм от северо-востока силой 9–10 баллов, с порывами ветра до 32 м/с (12 баллов) и продолжительностью 72 часа (табл. 2). Но особенно опасными для северного побережья Юго-Восточной Балтики считаются шторма от северных румбов, обладающие разрушительной силой, что продемонстрировали январские шторма 2012 и 2019 гг. [36; 37].

### Температура воздуха

Средняя годовая  $T_a$  в районе исследования составляет  $8,9 \pm 0,6^\circ\text{C}$ , что превышает среднегодовое значение в середине XX в. на  $1,5^\circ\text{C}$  [38]. Максимум наблюдался в 2019 г., когда среднегодовая  $T_a$  составила  $9,9^\circ\text{C}$ , а среднемесячные значения варьировали в диапазоне от  $0,3^\circ\text{C}$  (в январе) до  $18,9^\circ\text{C}$  (в июне). Минимум среднегодовой  $T_a$  отмечен в 2010 г. –  $7,2^\circ\text{C}$  с вариациями среднемесячных значений от  $-5,4$  до  $20,8^\circ\text{C}$  (табл. 3).

Таблица 3

### Межгодовая изменчивость гидрометеорологических характеристик в юго-восточной части Балтийского моря в 2005–2019 гг.

Год	Среднее, °C		Ледовая обстановка		
	$T_a$	ТПМ	Количество дней со льдом	$S_{\max}$ льда, км <sup>2</sup>	Дата наблюдения
2005	8,9	10,2	29	209	03.03.2005
2006	9,0	10,5	56	2283	10.03.2006
2007	9,3	10,3	9	63	26.02.2007
2008	9,4	10,6	0	0	–
2009	8,7	9,9	0	0	–
2010	7,2	9,9	62	2953	08.02.2010
2011	8,9	9,9	63	15725	24.02.2011
2012	8,2	9,8	19	2254	11.02.2011
2013	8,7	10,1	25	606	23.01.2013
2014	9,2	10,8	16	397	25.01.2014
2015	9,4	10,6	0	0	–





Окончание табл. 3

Год	Среднее, °С		Ледовая обстановка		
	Т <sub>а</sub>	ТПМ	Количество дней со льдом	S <sub>max</sub> льда, км <sup>2</sup>	Дата наблюдения
2016	9,2	10,7	23	109	08.01.2016
2017	8,8	10,0	10	75	12.02.2017
2018	9,4	10,2	19	565	26.02.2018
2019	9,9	10,8	0	0	–

Сезонный ход Т<sub>а</sub> характеризуется максимумом в августе (18,7°С), который превысил максимальную среднемноголетнюю Т<sub>а</sub> августа во второй половине XX в. на 1,8°С (табл. 4). Зимой, в январе и феврале, средняя Т<sub>а</sub> двух месяцев опускается до отрицательных значений (-0,1 и -0,4°С соответственно). Минимум среднегодовой Т<sub>а</sub> приходится на февраль и составляет -0,4°С, в то время как в середине XX в. минимум Т<sub>а</sub> приходился на январь и был на 1,6°С ниже (-2°С). Это связано с тем, что изменились циркуляционные процессы: в феврале усилилась роль восточной составляющей переноса, что привело к увеличению повторяемости восточных ветров, которые вызывают понижение температуры воздуха.

Таблица 4

**Характеристики среднемесячной температуры воздуха и поверхности воды и соответствующие приращения по тренду за 2005–2015 гг.**

Месяц	Средняя Т <sub>а</sub> , °С	Скорость изменения Т <sub>а</sub> , °С/15 лет	Средняя ТПМ, °С	Скорость изменения ТПМ, °С/15 лет
I	-0,1	0	3,4	–
II	-0,4	1,3	2,5	–
III	2	1,0	2,7	1,3
IV	6,1	0,4	4,8	0,8
V	11,1	2,4	9,6	1,5
VI	14,6	0,8	14,8	0,9
VII	18,3	0,1	18,9	0,2
VIII	18,7	0,9	19,3	-1,1
IX	15,7	0,2	16,3	-0,5
X	10,6	-1,4	12,6	-1,5
XI	6,4	0,3	7,6	–
XII	3,4	-0,9	5,8	–

Темпы роста Т<sub>а</sub> варьируют в зависимости от сезона. Как показывают данные таблицы 4, положительное приращение среднегодовой Т<sub>а</sub> наблюдается во все месяцы, кроме октября и декабря. Максимальный рост Т<sub>а</sub> приходится на май (+2,4°С/период), максимальное отрицательное приращение наблюдалось в октябре (-1,4°С/период). В целом за 2005–2019 гг. ежегодный рост среднегодовой температуры воздуха составляет +0,04°С/год, соответственно, приращение равно +0,6°С/период. Однако линейный тренд статистически незначим.

### Температура поверхности моря

Среднегодовая ТПМ в акватории исследования равна  $10,3 \pm 0,3^\circ\text{C}$ . Самые высокие среднегодовые значения ТПМ ( $10,6 - 10,8^\circ\text{C}$ ) выявлены в 2008, 2014 – 2019 гг., самые низкие ( $9,8 - 9,9^\circ\text{C}$ ) – в 2009 – 2012 гг., тогда же наблюдались минимальные значения среднегодовой температуры воздуха (см. табл. 3).

Минимум в годовом ходе ТПМ приходится на февраль и март ( $2,6$  и  $2,7^\circ\text{C}$  соответственно). Максимальной ТПМ становится в августе ( $19,3^\circ\text{C}$ ) (табл. 4). Положительное приращение средней ТПМ наблюдается с марта по июнь. В период с августа по октябрь происходит ежегодное понижение ТПМ. Для ТПМ прослеживается тенденция, аналогичная наблюдаемой для Та: наибольшее положительное приращение ТПМ происходит в мае ( $+1,5^\circ\text{C}/\text{период}$ ), а наибольшее отрицательное приращение – в октябре ( $-1,5^\circ\text{C}/\text{период}$ ). При этом в самый теплый месяц года (август) происходит снижение ТПМ со скоростью  $-1,1^\circ\text{C}/15$  лет, в то время как Та показывает рост  $+0,9^\circ\text{C}/15$  лет.

В целом за 2005 – 2019 гг. рост ТПМ в районе исследования составляет  $+0,01^\circ\text{C}/\text{год}$  и  $+0,2^\circ\text{C}/\text{период}$  (рис. 4). Однако линейный тренд статистически незначим.

Рост Та опережает рост ТПМ (рис. 4), поскольку водоемы обладают большей термической инерцией и, соответственно, медленнее реагируют на потепление климата.

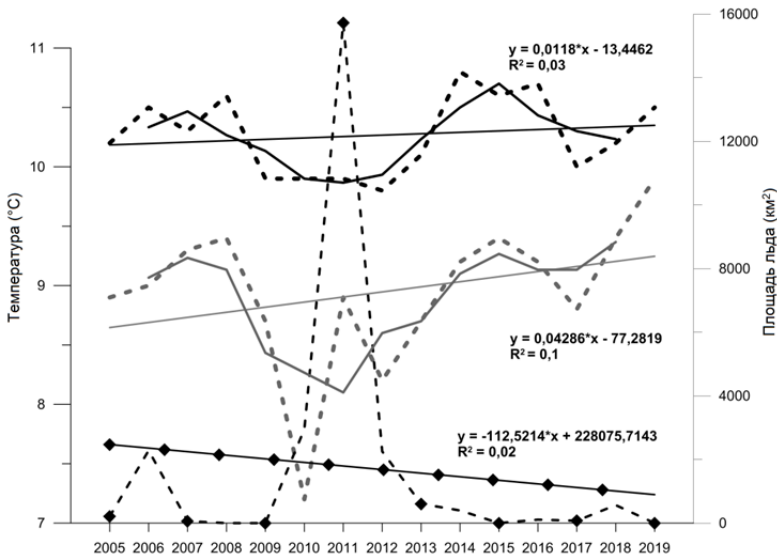


Рис. 4. Межгодовая изменчивость среднегодовой температуры поверхности моря (черная пунктирная линия), температуры воздуха (серая пунктирная линия) и площади морского льда (черная пунктирная линия с ромбами).

Скользящие средние (интервал сглаживания 3 года):

для температуры поверхности моря – черная ломаная линия, для температуры воздуха – серая ломаная линия. Линейные тренды: для температуры поверхности моря – черная прямая линия, для температуры воздуха – серая прямая линия, для площади морского льда – черная прямая линия с ромбами



Максимальные площади морского льда приходятся на февраль, гораздо реже на январь и март (см. табл. 3). Рекордный максимум площади льда отмечен в зимний сезон 2010/11 гг.: в феврале 2011 г. она достигла 15725 км<sup>2</sup> при средней многолетней максимальной площади морского льда 1683 км<sup>2</sup> (рис. 1, табл. 3). В отдельные зимы (2007/08, 2008/09, 2014/15, 2018/19) льда не наблюдалось (табл. 4).

В связи с устойчивым ростом температуры воздуха и воды закономерно сокращается площадь морского льда, наблюдаемого в прибрежной зоне района исследования. Для максимальных площадей ледового покрытия выявлен отрицательный тренд  $-112,5$  км<sup>2</sup>/год, что соответствует  $-1838$  км<sup>2</sup>/период (рис. 4).

### Заключение

Выявлены следующие характерные особенности межгодовой и сезонной динамики гидрологических условий в юго-восточной части Балтийского моря за 2005–2019 гг.:

1. Среднегодовое атмосферное давление близко к нормальному и составляет  $1014,6 \pm 1,7$  гПа. Самый стабильный ход атмосферного давления наблюдается в сентябре, наиболее изменчиво оно в январе. Установлен рост атмосферного давления в регионе со скоростью  $0,10$  гПа/год ( $1,5$  гПа/период).

2. Растет количество штормов ( $+2$  шторма/15 лет), однако снижается их продолжительность и уменьшается максимальная скорость ветра.

3. Среднегодовая температура воздуха возросла на  $1,6$  °С по сравнению с серединой XX в. Минимальная среднегодовая температура воздуха приходится на февраль ( $-0,4$  °С), в то время как в середине XX в. минимум наблюдался в январе и был на  $1,6$  °С ниже. Температура воздуха в регионе стабильно растет со скоростью  $0,04$  °С/год ( $+0,6$  °С/период).

4. Среднегодовая температура поверхности акватории исследования равна  $10,3 \pm 0,3$  °С. Минимум температуры приходится на февраль и март ( $2,6$  и  $2,7$  °С соответственно), а максимум наблюдается в августе ( $19,3$  °С). Как и температура воздуха, температура поверхности моря показывает тенденцию роста в мае и понижения в октябре. Среднегодовая температура поверхности юго-восточной части Балтийского моря повышается со скоростью  $0,01$  °С/год, что значительно медленнее повышения температуры воздуха.

5. Максимальная площадь морского льда отмечается в феврале. Однако ввиду общей тенденции потепления в регионе сокращается площадь ледового поля, наблюдаемого в море ( $-112,5$  км<sup>2</sup>/год).

Выявленные тенденции потепления региона связаны с циркуляционными процессами в атмосфере: при пониженных значениях индекса САК (2005–2010, 2012 гг.) в юго-восточной части Балтийского моря усиливается антициклоническая активность, наблюдаются морозы до  $-15$  °С, экстремально увеличивается температура воздуха летом (до  $31$  °С) [21]. При преобладании положительных значений индекса САК



усиливается Исландский минимум и перенос воздушных масс в широтном (западно-восточном) направлении. В результате повышается среднегодовая температура воздуха и поверхности моря [20; 39], что в итоге приводит к мягким зимам и сокращению продолжительности ледового сезона и площади льда в прибрежной зоне моря.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калининградской области в рамках проекта №19-45-390012 (в части анализа данных), а также государственного задания ИО РАН №0149-2019-0013 (в части сбора и обработки спутниковой информации).*

*Авторы благодарят ООО «ЛУКОЙЛ-КМН» за предоставленные данные АГМС.*

### Список литературы

1. BACC I Author Team : Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Berlin, 2008.
2. BACC II Author Team : Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Springer International Publishing, 2015.
3. Leppäranta M., Myrberg K. Physical Oceanography of the Baltic Sea. Berlin, 2009.
4. Climate Change 2008 : IPCC, Fourth Assessment Report. Cambridge University Press, 2008.
5. Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner [et al.] (eds.). Cambridge University Press, 2013.
6. Rutgersson A., Jaagus J., Schenk F., Stendel M. Observed changes and variability of atmospheric parameters in the Baltic Sea region during the last 200 years // Climate Research. 2014. №61. P. 177–190.
7. Bates B. C., Kundzewicz Z. W., Wu S., Palutikof J. P. Climate Change and Water / IPCC Secretariat. Geneva, 2008.
8. Omstedt A., Elken J., Lehmann A. et al. Progress in physical oceanography of the Baltic Sea during the 2003–2014 period // Progress in Oceanography. 2014. №128. P. 139–171.
9. Michalska B. Tendencje zmian temperatury powietrza w Polsce // Prace i Studia Geograficzne. 2011. Vol. 47. P. 67–75.
10. Tytkowski J. Temporal and spatial variability of air temperature and precipitation at the Polish coastal zone of the southern Baltic Sea // Baltica. 2013. Vol. 26, №1. P. 83–94.
11. Ерёмкина Т.Р., Исаев А.В., Рябченко В.А. Оценка и прогноз тенденций в эволюции экосистемы восточной части Финского залива при различных сценариях изменения биогенной нагрузки в будущем климате // Учен. зап. ПИГМУ. 2014. №36. С. 118–127.
12. Dailidienė I., Baudler H., Chubarenko B., Navrotskaya S. Long term water level and surface temperature changes in the lagoons of the southern and eastern Baltic // Oceanologia. 2011. №53. P. 293–308.
13. Lehmann A., Getzlaff K., Harlaß J. Detailed assessment of climate variability in the Baltic Sea area for the period 1958 to 2009 // Climate Research. 2011. №46. P. 185–196.
14. Siegel H., Gerth M., Tschersich G. Sea surface temperature development of the Baltic Sea in the period 1990–2004 // Oceanologia. 2006. №48(S). P. 119–131.
15. Bradtke K., Herman A., Urbański J. A. Spatial and inter-annual variations of seasonal sea surface temperature patterns in the Baltic Sea // Oceanologia. 2010. №52 (3). P. 345–362.



16. Voss R., Petereit C., Schmidt J.O. et al. The spatial dimension of climate-driven temperature change in the Baltic Sea and its implication for cod and sprat early life stage survival // *Journal of Marine Systems*. 2012. №100–101. P. 1–8.
17. *Climate change in the Baltic Sea Area: HELCOM thematic assessment in 2013* // *Baltic Sea Environment Proceedings*. 2013. №137.
18. Elmgren R., Blenckner T., Andersson A. Baltic Sea management: Successes and failures // *Ambio*. 2015. №44. P. 335–344.
19. Wibig J., Glowicki B. Trends of minimum and maximum temperature in Poland // *Climate Research*. 2002. №20. P. 123–133.
20. Stont Z.I., Bukanova T.V. General features of air temperature over coastal waters of the south-eastern Baltic Sea for 2004–2017 // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2019. Vol. 19, №3. P. 1–9.
21. *Климат России* / под ред. Н.В. Кобышевой. СПб., 2001.
22. Дроздов В.В., Смирнов Н.П. Многолетняя динамика климата и гидрологического режима в районе Балтийского моря и ее причины // *Метеорология и гидрология*. 2011. №5. С. 77–87.
23. Стонт Ж.И., Чубаренко Б.В., Гуцин О.А. Изменчивость гидрометеорологических характеристик для побережья Юго-Восточной Балтики // *Известия РГО*. 2010. Т. 142, вып. 4. С. 48–56.
24. Абрамов Р.В., Гуцин О.А., Навроцкая С.Е., Стонт Ж.И. Гидрометеорологический мониторинг побережья Юго-Восточной Балтики в 1996–2010 гг. // *Известия РАН. Сер. географическая*. 2013. №1. С. 54–61.
25. Абрамов Р.В., Стонт Ж.И. «Витязь» и «Балтийская коса». Погода и экологическая обстановка 1997–2002 гг. Данные лаборатории морской метеорологии АО ИО РАН / отв. ред. Е.В. Краснов. Калининград, 2004.
26. Берникова Т.А., Дубравин В.Ф., Нагорнова Н.Н., Стонт Ж.И. Климатические сезоны Южной Балтики // *Инновации в науке и образовании*. Калининград, 2007. С. 53–55.
27. *Справочник по климату СССР*. Вып. 6 : Литовская ССР и Калининградская обл. РСФСР. Ч. 3 : Ветер. Л., 1966.
28. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР*. Т. 3 : Балтийское море. Вып. 1 : Гидрометеорологические условия. СПб., 1992.
29. Тушикин С.Н. Структурный анализ штормовых ветров в Юго-Восточной Балтике и Калининградской области // *Комплексное изучение бассейна Атлантического океана : сб. науч. тр. / под ред. В.В. Орленка*. Калининград, 2003. С. 59–63.
30. Pietrek S.A., Jasinski J.M., Winnicki I.A. Analysis of a storm situation over the southern Baltic Sea using direct hydrometeorological and remote sensing measurements results // *Zeszyty Naukowe. Akademia Morska w Szczecinie*. 2014. Vol. 38, №110. P. 81–88.
31. Дорфман Ц.Я., Укмергишкис А.Д. Ветровой режим на территории Литовской ССР и Калининградской области РСФСР. Вильнюс, 1964.
32. Стонт Ж.И., Гуцин О.А., Дубравин В.Ф. Штормовые ветра Юго-Восточной Балтики по данным автоматической метеорологической станции в 2004–2010 гг. // *Известия РГО*. 2012. Т. 144, Вып. 1. С. 51–58.
33. *Климат морей России и ключевых районов Мирового океана : электрон. атлас* // Российский национальный центр океанографических данных ГУ «ВНИИГМИ-МЦД». Обнинск, 2007. URL: [http://data.oceaninfo.info/atlas/atlas\\_help.htm/](http://data.oceaninfo.info/atlas/atlas_help.htm/) (дата обращения: 01.12.2019).
34. Jonsson T., Hanna E. A new day-to-day pressure variability index as a proxy of Icelandic storminess and complement to the North Atlantic Oscillation index 1823–2005 // *Meteorologische Zeitschrift*. 2007. Vol. 16. P. 25–36.
35. *Rp5.ru* : [погодный сайт]. URL: [www.rp5.ru](http://www.rp5.ru) (дата обращения: 17.12.2019).



36. Бобыкина В.П., Стонт Ж.И. О зимней штормовой активности 2011–2012 гг. и ее последствиях для побережья Юго-Восточной Балтики // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, №3. С. 322–328.

37. Стонт Ж.И., Ульянова М.О., Крек Е.В. и др. Штормовая активность в осенне-зимний период 2018–2019 гг. в юго-восточной части Балтийского моря // Известия КГТУ. 2019. №53. С. 61–72.

38. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 1 : Балтийское море. Вып. 1 : Балтийское море без заливов. Л., 1983.

39. Стонт Ж.И., Демидов А.Н. Современные тенденции изменчивости температуры воздуха над акваторией Юго-Восточной Балтики // Вестник Московского университета. Сер. 5: География. 2015. №2. С. 50–58.

#### Об авторах

Жанна Ивановна Стонт – канд. геогр. наук, ст. науч. сотр., Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия.

E-mail: ocean\_stont@mail.ru

Татьяна Васильевна Буканова – канд. геогр. наук, науч. сотр., Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия.

E-mail: tatiana.bukanova@gmail.com

Елена Владимировна Крек – науч. сотр., Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия.

E-mail: elena321@mail.ru

#### The authors

Dr Zhanna I. Stont, Shirshov Institute of Oceanology, Senior Researcher, Russian Academy of Sciences, Russia.

E-mail: ocean\_stont@mail.ru

Dr Tatiana V. Bukanova, Shirshov Institute of Oceanology, Researcher, Russian Academy of Sciences, Russia.

E-mail: tatiana.bukanova@gmail.com

Elena V. Krek, Researcher, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Russia.

E-mail: elena321@mail.ru