

## Изменчивость температуры поверхности моря в Юго-Восточной Балтике по данным MODIS

Т.В. Буканова<sup>1,2</sup>, Ж.И. Стонт<sup>1,2</sup>, О.А. Гущин<sup>2</sup>

*<sup>1</sup>Атлантическое отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова  
Калининград, 236022, Россия*

*E-mail: tatiana.bukanova@gmail.com*

*<sup>2</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта  
Калининград, 236041, Россия*

*E-mail: ocean\_stont@mail.ru*

Работа посвящена исследованию межгодовой, сезонной и пространственной изменчивости температуры поверхности моря (ТПМ) в юго-восточной части Балтийского моря, в том числе в Куршском и Вислинском заливах. Анализируются данные сканера MODIS спутников Aqua и Terra за 2003–2012 гг. Рассчитаны линейные тренды изменения ТПМ в сезонном и межгодовом аспекте за рассматриваемый период. Установлен рост ТПМ в Юго-Восточной Балтике, составляющий  $0,70 \pm 0,27$  °C за десятилетие. Наблюдаемое потепление неоднородно в пространстве – прибрежная зона характеризуется более высокими темпами роста ТПМ по сравнению с открытой частью моря. В заливах отмечается запаздывание темпов роста ТПМ относительно открытой части моря. Тем не менее тенденции изменения ТПМ в заливах по сезонам совпадают по знаку с открытым морем. Анализируется взаимосвязь изменения ТПМ и температуры воздуха. Показано совпадение сезонных тенденций изменения температуры воздуха и ТПМ: положительные тренды наблюдаются в теплый период года (лето и весна), а отрицательные – в холодный (зима, осень). Установлена высокая степень корреляции натуральных измерений температуры поверхности моря со спутниковыми данными MODIS.

**Ключевые слова:** температура поверхности моря, MODIS, Юго-Восточная Балтика, межгодовая изменчивость ТПМ, сезонная изменчивость ТПМ, линейный тренд ТПМ, температура воздуха

### Введение

Температура воды напрямую или косвенно оказывает влияние на большинство процессов, происходящих в планктонных сообществах, воздействует на такие физиологические процессы, как скорость метаболизма, смертность, жизнеспособность, а также такие экологические аспекты, как распределение биомассы, биоразнообразие, структура сообщества и изменения в доминировании определенных видов (Muren et al., 2005; Neumann et al., 2012; Walther et al., 2002). Это один из ведущих факторов эвтрофикации – важнейшей экологической проблемы Балтийского моря (HELCOM, 2009). Повышение температуры поверхности воды в зимний и весенний периоды препятствует возникновению конвекции и, в результате, перераспределению питательных веществ, что оказывает влияние на первичную продукцию и структуру морских сообществ различных трофических уровней (Wasmund et al., 1998). Сильный летний прогрев воды может стимулировать «цветение» потенциально токсичных цианобактерий в Балтийском море (Александров, 2010; Janssen et al., 2004; Wasmund, Uhlig, 2003; Wiktor, Plinski, 1992).

Установлено, что Балтийское море особенно чувствительно к изменчивости климата в связи с устойчивой стратификацией и постоянным галоклином (Backhaus, 1996; Hordoir, Meier, 2011; Omstedt, Nyberg, 1996; Störmer, 2011). Береговая зона, замкнутые мелководные лагуны и районы речного стока относятся к наиболее уязвимым к эвтрофированию и изменению температурного режима морским участкам (Störmer, 2011).

Юго-восточная часть Балтийского моря представляет собой особенно чувствительную акваторию, которая включает все вышеперечисленные факторы: замкнутые мелководные Куршский и Вислинский заливы, зоны выноса реки Вислы, Калининградского и Клайпедского каналов.

Последние исследования динамики температуры поверхности Мирового океана выявили стремительное потепление Европейских морей за 1982–2006 гг., температура поверхности Балтийского моря увеличилась на 1,35 °C (Belkin, 2009). Согласно оценкам авторов (Siegel et al., 2006) за 1990–2004 гг., (ВАСС, 2008) за 1990–2008 гг., (Bradtke et al., 2010) за 1986–2005 гг., (Lehmann et al., 2011) за 1990–2008 гг., (Voss et al., 2012) за 1969–2005 гг., рост температуры поверхности Балтийского моря составляет 0,3–0,8 °C за декаду. Повышение температуры поверхности моря в южной части Балтийского моря составляет 0,6–0,8 °C/10 лет, а в северной – более 1 °C/10 лет по оценкам (ВАСС, 2008) за 1990–2008 гг., (Bradtke et al., 2010) за 1986–2005 гг. и (Lehmann et al., 2011) за 1990–2008 гг. В будущем ожидается рост температуры моря, причем во всех районах Балтики поверхностные слои будут прогреваться быстрее, чем глубинные (ВАСС, 2008; HELCOM, 2013; Rhein et al., 2013).

Известно, что определяющим фактором в изменении температуры поверхности воды является температура воздуха (Cayan, 1992). В регионе Балтийского моря с 1871 г. среднегодовая температура воздуха увеличивается со скоростью 0,11 °C за декаду севернее 60° с.ш. и 0,08 °C южнее 60° с.ш., в то время за 1861–2000 гг. рост глобальной температуры воздуха составил 0,05 °C за декаду (HELCOM, 2013). Анализ, проведенный для польского побережья Балтийского моря за 1966–2009 гг., показал рост температуры приповерхностного воздуха, составляющий 0,3 °C за декаду (Tylkowski, 2013).

Таким образом, к 2100 году прогнозируется увеличение температуры поверхности моря на 2–3 °C в большинстве районов моря при одновременном росте температуры воздуха (Hordoir, Meier, 2011).

Цель работы – проанализировать пространственную и временную изменчивость ТПМ в Юго-Восточной Балтике за 2003–2012 гг. и оценить последние тенденции изменения ТПМ на основе линейных трендов.

## **Материалы и методы**

Для оценки изменчивости температуры поверхности моря (ТПМ) в Юго-Восточной Балтике (ЮВБ) использовались данные, полученные дистанционным методом со сканера цвета океана MODIS, установленного на спутниках Aqua и Terra Национального управления по воздухоплаванию и исследованию космического пространства США. Регистрация ТПМ сканером MODIS ведется в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн с точностью до 0,5 °C (Barton, 1995). Спутниковый сканер MODIS позволяет проводить оперативный мониторинг ЮВБ в режиме реального времени с периодичностью

наблюдений 2 раза в сутки (Brown, Minnett, 1999). Спутниковые данные инфракрасного диапазона ограничены или полностью отсутствуют при наличии облачности. Данные MODIS-Terra/Aqua 2 уровня с пространственным разрешением 1 км были обработаны в программе BEAM (версия 4.10.3).

Массивы данных по ТПМ получены для 30 произвольных экспериментальных точек в ЮВБ, из которых 19 находятся в открытой части моря, 6 – в Куршском заливе, 5 – в Вислинском. В работе рассматривается район, ограниченный с севера широтой 56°N, с запада долготой 18°E (рис. 1).

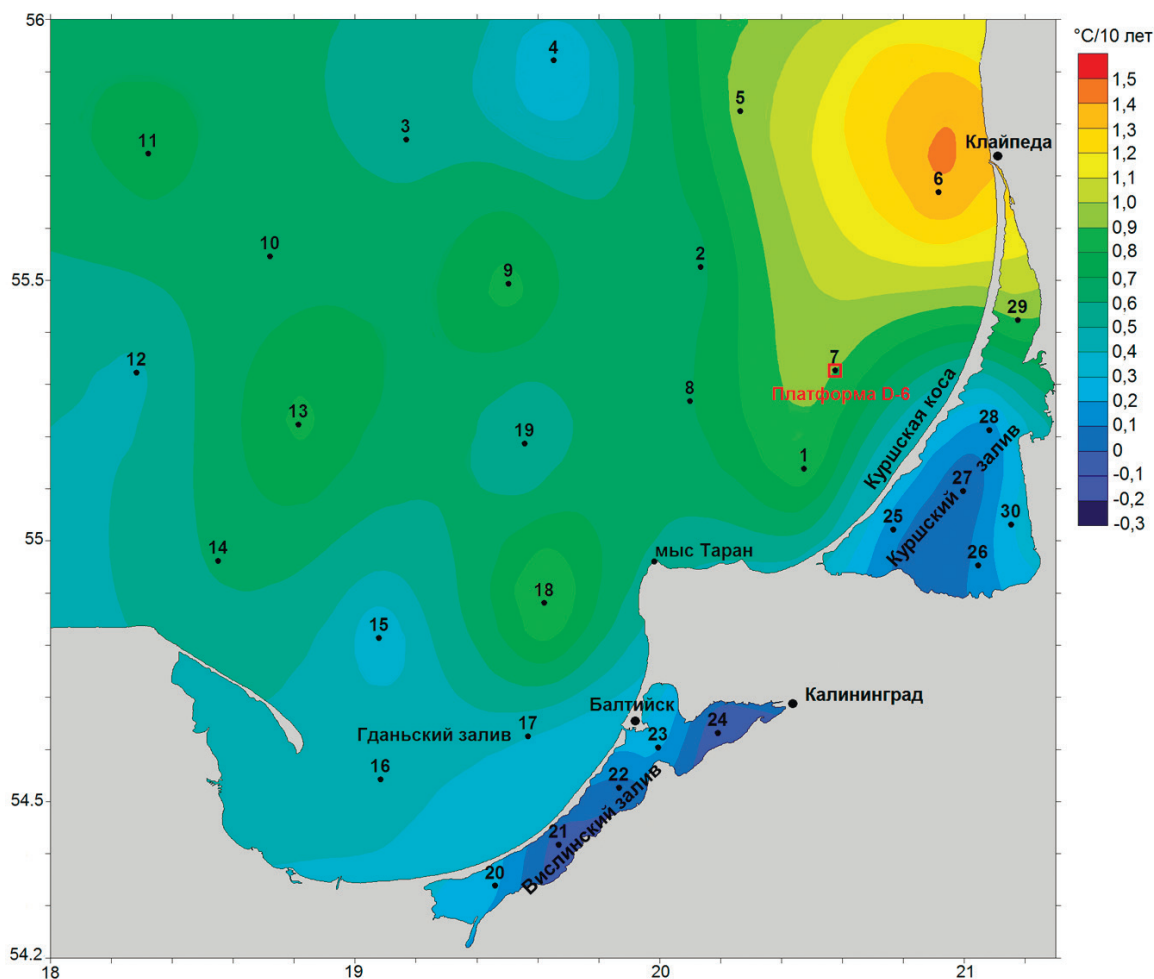


Рис. 1. Пространственное распределение трендовых приращений температуры поверхности моря для 30 экспериментальных точек в Юго-Восточной Балтике по данным MODIS за 2003–2012 гг.

Для анализа пространственной и временной изменчивости ТПМ в ЮВБ получено и обработано 822 спутниковых снимка радиометра MODIS за 2003–2012 гг. Сбор спутниковых данных осуществлялся через Интернет с сайта Годдардского аэрокосмического центра NASA Ocean Color Web (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>). Время пролета спутников Terra и Aqua над исследуемым районом 09:30–12:30 UTC. Выборка данных по ТПМ за 2003–2012 гг. составила 18036 значений. Распределение спутниковых данных по месяцам в течение периода наблюдений показано на рис. 2.

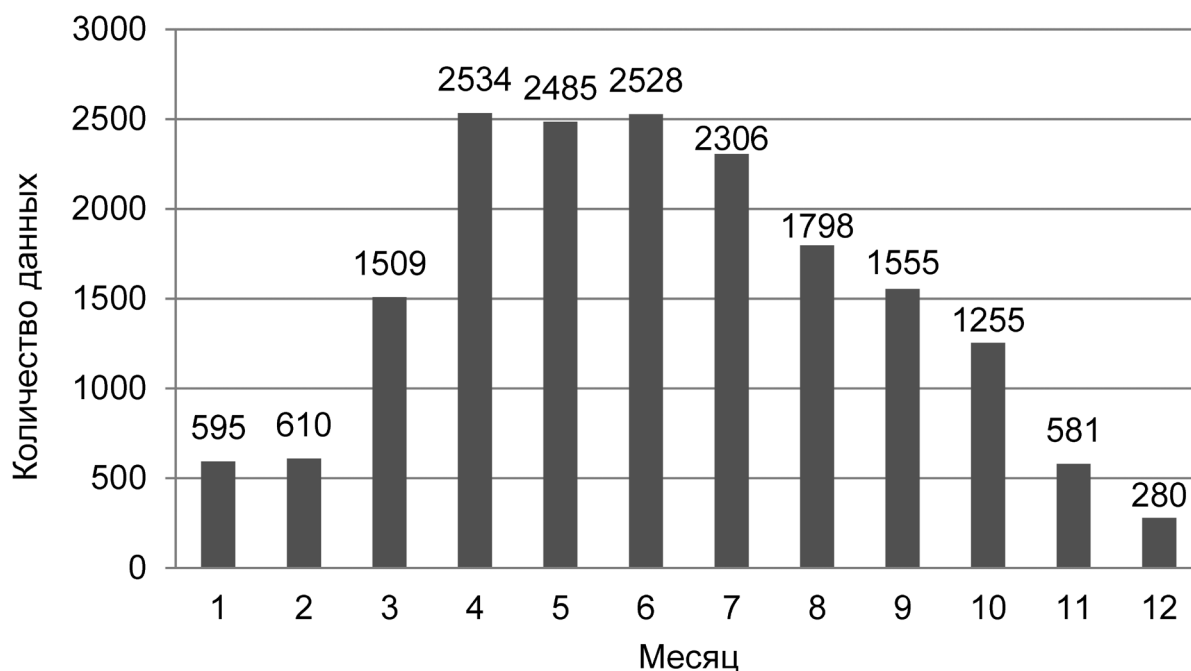


Рис. 2. Количественное распределение по месяцам данных по температуре поверхности моря на спутниковых снимках MODIS за 2003-2012 гг.

Последние тенденции изменения ТПМ в регионе оценивались согласно линейным трендам, полученным для 30 точек (рис. 1). Для расчета долговременных трендов изменения ТПМ использовалась линейная аппроксимация временных рядов методом наименьших квадратов. Оценка значимости коэффициентов линейной зависимости, а также достоверности полученных результатов осуществлялась с помощью t-критерия Стьюдента. Статистики по сезонам и общий тренд неаддитивны.

Была проведена валидация значений ТПМ, полученных по спутниковым данным MODIS-Aqua и MODIS-Terra и натурных измерений температуры поверхности моря в ЮББ. Судовые измерения ТПМ проводятся в рамках комплексного экологического мониторинга нефтяной платформы D-6, располагающейся в открытой части моря, в 22,5 км от побережья Куршской косы (Нефть ..., 2012) (рис. 1). Для сравнения с измерениями *in situ* были взяты значения ТПМ по данным MODIS 0 и 1 уровней качества в окне 3×3 пикселя для экспериментальной точки 7, соответствующей положению платформы D-6, с учетом разницы во времени между измерениями ТПМ *in situ* и пролетом спутника не более 3 часов.

Для исследования взаимосвязи изменчивости ТПМ и температуры воздуха в ЮББ получены линейные тренды изменения температуры воздуха в сезонном и межгодовом аспекте за 9-ти летний период наблюдений (2004–2012). Средняя температура воздуха была рассчитана по ежечасным наблюдениям автоматической гидрометеорологической станции (АГМС), установленной на высоте 27 м над уровнем моря на вертолетной площадке платформы D-6, расположенной в открытой части акватории, что исключает влияние суши на приповерхностный воздух.

## Результаты

### *Сопоставление спутниковых и натурных данных по температуре поверхности моря*

Сопоставление спутниковых значений ТПМ по данным MODIS и данных измерений *in situ* в точке 7 для 23 пар показывают высокую степень корреляции: квадрат коэффициента корреляции  $R^2 = 0,95$ , систематическая ошибка – 1,1 °С, случайная – 1,72 °С. Спутниковые данные дают небольшое систематическое завышение по сравнению с данным *in situ*. Полученный результат соответствует итогам валидации ТПМ по данным буйковых станций в Литве, изложенным в статье (Kozlov et al., 2012).

Таким образом, демонстрируя высокую степень корреляции с натурными измерениями, спутниковые данные по ТПМ могут использоваться в дальнейших исследованиях изменчивости температурного режима в регионе ЮВБ.

### *Пространственная и межгодовая изменчивость температуры поверхности моря*

Начиная с 2003 г., в открытой части ЮВБ изменения ТПМ по спутниковым данным характеризуются положительными линейными трендами от 0,03 (точка 4) до 0,14 (точка 6) °С/год. Рост ТПМ варьирует от 0,33 (точка 4) – 1,42 (точка 6) °С/период (табл. 1).

Линейные тренды и приращения за 2003–2012 гг. для прибрежных точек опережают приращения для открытой части ЮВБ. Так, точка 4, имеющая наименьший прирост температуры (0,33 °С/период), находится в открытом море, а 1, 6, 7 и 18 точки с максимальными приращениями (до 1,4 °С/период) – это прибрежные точки, находящиеся у северной оконечности Куршской косы. Все северное побережье Калининградской области (от мыса Таран вдоль Куршской косы) – это район максимальных трендовых приращений, подверженный влиянию пресных вод из Клайпедского канала (рис. 1, табл. 1). Согласно литературным данным, в районах выноса распресненных речных вод (точка 6, соответствующая выносу Клайпедского канала) в теплый период наблюдаются повышенные значения поверхностной температуры по сравнению с окружающими водами (Belkin, 2009; Kozlov et al., 2012). Это вызвано усилением плотностной стратификации, ослаблением перемешивания поверхностного слоя, что в результате способствует захвату большего количества солнечного излучения. Однако данная теория не подтверждается для акватории Гданьского залива – района выхода реки Вислы. Это еще один район с минимальной скоростью роста температуры воды – точки 15, 16, 17 (тренды 0,36; 0,47; 0,4 °С/период). В среднем по экспериментальным точкам линейный тренд составляет  $0,07 \pm 0,03$  °С/год, и приращение за период 2003–2012 гг. (десять лет) составило  $0,7 \pm 0,27$  °С (табл. 1). Полученные результаты полностью согласуются с известными оценками изменчивости температуры вод Балтийского моря (ВАСС, 2008; Bradtke et al., 2010; Lehmann et al., 2011; Voss et al., 2012).

Данные пяти точек, расположенных в Вислинском заливе, показывают положительное трендовое приращение ТПМ  $0,07 \pm 0,20$  °С/10 лет (табл. 1). Максимальное приращение отмече-

но для точки 20, расположенной в южной (закрытой) части залива (рис. 1). Видно, что скорость трендового приращения ТПМ в заливе в ~ 10 раз меньше скорости в открытой части ЮВБ.

Таблица 1. Средняя температура поверхности моря и ее приращения (в соответствии с трендом) по данным спутникового сканера MODIS за 2003–2012 гг. (рассматриваются календарные сезоны)

Номер точки	Средняя ТМП ± σ, °С	Приращение, °С /10 лет				
		10 лет	зима	весна	лето	осень
<b>Юго-Восточная Балтика</b>						
1	10,9±6,67	0,91*	0,3	1,0	1,8	-0,8
2	10,5±6,32	0,66*	0,1	0,5	0,7	-0,2
3	10,5±6,22	0,55	-0,3	0,3	0,9	-2,1
4	10,3±6,27	0,33	-1,4	0,5	0,9	-2,0
5	10,5±6,49	0,94*	-1,2	0,9	1,1	0,7
6	10,9±6,46	1,42*	-0,5	0,8	1,4	0,0
7	10,7±6,46	0,91*	-1,1	1,0	1,3	-0,9
8	10,8±6,48	0,69*	-0,3	0,8	1,1	-0,7
9	10,3±6,33	0,87*	-0,8	0,3	0,6	-0,5
10	10,5±6,16	0,62*	-0,5	0,4	0,9	-2,7
11	10,1±6,24	0,76*	0,1	0,2	0,6	-2,2
12	10,5±6,27	0,47	-0,6	-0,2	0,8	-0,4
13	10,5±6,28	0,84*	-0,6	0,2	1,6	-1,8
14	10,6±6,28	0,62*	0,0	0,2	0,8	-1,2
15	10,9±6,32	0,36	-0,5	0,1	1,1	-1,6
16	11,4±6,36	0,47*	-0,2	0,2	1,0	0,8
17	11,5±6,44	0,40	0,6	0,1	1,3	0,0
18	11,1±6,39	0,98*	0,6	1,2	1,3	-0,8
19	10,5±6,38	0,44	-0,5	0,4	1,8	0,1
<b>Среднее ± σ</b>	<b>10,7±0,40</b>	<b>0,70±0,27</b>	<b>-0,4±0,6</b>	<b>0,5±0,4</b>	<b>1,1±0,4</b>	<b>-0,9±1,0</b>
<b>Вислинский залив</b>						
20	13,8±6,46	0,22	-0,5	0,6	1,7	-1,5
21	13,6±6,52	-0,07	-0,5	1,2	1,0	-2,2
22	13,3±6,69	0,04	-1,3	1,0	1,4	-1,1
23	13,5±6,74	0,25	-0,7	1,2	1,7	0,0
24	13,5±6,79	-0,11	-0,5	1,0	1,7	-0,6
<b>Среднее ± σ</b>	<b>13,5±0,20</b>	<b>0,07±0,20</b>	<b>-0,7±0,4</b>	<b>1,0±0,2</b>	<b>1,5±0,3</b>	<b>-1,1±0,8</b>
<b>Куршский залив</b>						
25	13,1±6,79	0,11	-1,1	1,1	1,2	-1,2
26	12,9±6,75	0,14	-0,9	1,4	1,1	-1,3
27	13,1±6,78	0	-1,0	1,2	0,7	-1,2
28	13,1±6,80	0,11	-0,4	0,8	1,3	-0,7
29	12,7±6,88	0,93*	-0,7	1,3	1,8	-0,8
30	13,1±6,91	0,32	-0,6	1,8	0,7	-1,5
<b>Среднее ± σ</b>	<b>13,0±0,2</b>	<b>0,27±0,38</b>	<b>-0,8±0,3</b>	<b>1,3±0,3</b>	<b>1,1±0,4</b>	<b>-1,1±0,3</b>

\* уровень значимости ≤ 0,25

В Куршском заливе максимальный положительный тренд (0,93 °С/10 лет) наблюдается в северной части залива в точке 29, которая имеет хороший водообмен с морем (рис. 1).



Точки 26, 28 и 30 подвержены влиянию впадающих в залив рек Неман и Дейма. В среднем рост температуры поверхности воды в Куршском заливе составляет  $0,27 \pm 0,38$  °C/10 лет, что в 4 раза больше, чем в Вислинском заливе и в 3 раза меньше, чем в открытой части моря (табл. 1).

Запаздывание темпов роста ТПМ в заливах относительно открытой части моря обусловлено, во-первых, меньшим теплозапасом мелководных заливов по сравнению с более глубоким районом ЮВБ, во-вторых – меньшей тепловой инерцией, в результате чего хорошо прогреваемые мелководные участки отдают в атмосферу гораздо большее количество влаги. По-видимому, именно высокие величины испарения с водной поверхности обусловили большую стабильность температурного режима заливов.

#### *Сезонная изменчивость температуры поверхности моря*

В течение рассматриваемого периода основной трендовый прирост ТПМ в ЮВБ происходил в теплое время года: весной ( $0,5 \pm 0,4$  °C/10 лет), максимальный прирост летом ( $1,1 \pm 0,4$  °C/10 лет). Приращение в соответствии с трендом за зимний и осенний периоды отрицательно и составляет  $-0,4 \pm 0,6$  °C/10 лет и  $-0,9 \pm 1,0$  °C/10 лет соответственно (табл. 1).

Зимой максимальный отрицательный прирост до  $-1,4$  °C/10 лет наблюдался на севере района (точки 4, 5 и 7). В то время как прибрежные точки 1, 17 и 18 демонстрируют наибольшие положительные трендовые приращения в этот период (до  $0,6$  °C/10 лет) (табл. 1). Положительные тренды отмечены на всех прибрежных точках летом и весной. Весной максимальные положительные тренды, достигающие  $1,4$  °C/период, наблюдаются вдоль побережья Куршской косы (табл. 1).

В Куршском и Вислинском заливах сохраняется аналогичная открытому морю тенденция понижения ТПМ в холодный период (зима и осень) и роста температуры в теплый период (лето и весна).

#### *Взаимосвязь изменения температуры поверхности моря и температуры воздуха*

За 2004–2013 гг. рост температуры приповерхностного воздуха в районе платформы D-6 составляет  $+0,36$  °C/10 лет (уровень значимости  $< 0,05$ ) (Стонт, Демидов, 2015).

Результаты сопоставления температуры воздуха и ТПМ для 87 пар измерений показывают высокую степень корреляции: квадрат коэффициента корреляции  $R^2 = 0,91$ , систематическая ошибка –  $1,33$  °C, случайная –  $1,73$  °C, что подтверждает высокую степень взаимосвязи изменения ТПМ и температуры воздуха (Bulycheva et al., 2014).

Для температуры приповерхностного воздуха так же, как и для ТПМ, характерна отрицательная тенденция роста в холодный сезон и положительная – в теплый. Максимальный отрицательный тренд наблюдается зимой ( $-0,4$  °C/год). Ежегодное понижение температуры воздуха осенью также составляет  $-0,07$  °C/год. Весной ежегодное увеличение температуры воздуха составляет  $0,07$  °C, а летом –  $0,04$  °C.

## Заключение

Проведенная оценка пространственной и временной изменчивости ТПМ в регионе ЮВБ на основе анализа данных, собранных путем обработки спутниковой информации MODIS-Aqua и MODIS-Terra за 2003–2012 гг., показала высокую степень корреляции спутниковых данных MODIS с натурными измерениями ТПМ, что доказывает возможность их использования для дальнейшего исследования изменчивости ТПМ в этом районе.

Выявлено повышение ТПМ, которое составляет  $0,70 \pm 0,27$  °C за 2003–2012 гг. Положительный тренд ТПМ обусловлен интенсивным ростом температуры в теплый период года (лето и весна). Холодный период (зима, осень) характеризуется отрицательными трендами ТПМ. Наблюдаемое потепление в районе неоднородно в пространстве – прибрежная зона характеризуется более высокими темпами роста ТПМ, по сравнению с открытой частью моря. Рост ТПМ в Куршском и Вислинском заливах происходит гораздо медленнее, чем в открытой части ЮВБ, в 3 и 10 раз соответственно. Тенденции изменения ТПМ в заливах по сезонам совпадают по знаку с открытым морем.

Одним из факторов роста ТПМ считается повышение температуры воздуха. Отмечено совпадение сезонных тенденций изменения температуры воздуха и ТПМ – положительные тренды обусловлены интенсивным прогревом в теплый период года (лето и весна). Рост ТПМ за период исследования (приращение  $+0,7$  °C) был интенсивнее роста температуры воздуха (приращение  $+0,36$  °C). Это обусловлено тем, что максимальные отрицательные приращения среднесезонной температуры воздуха приходятся на зимний период ( $-0,4$  °C/год), а с другой стороны, температура воды определяется теплообменом не только с воздухом, но и водным обменом и циркуляцией.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» Минобрнауки России, уникальный идентификатор RFMEFI57414X0091. Авторы выражают благодарность архивному центру НАСА Ocean Biology Distributed Active Archive Center за спутниковые данные MODIS.

## Литература

1. Александров С.В. Влияние климатических изменений на уровень эвтрофирования Куршского залива // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. Калининград: Изд-во РГУ им. И. Канта. 2010. Вып. 1. С. 49–57.
2. Нефть и окружающая среда Калининградской области. Под ред. В.В. Сивков, Ю.С. Каджоян, О.Е. Пичужкина, В.Н. Фельдман. Калининград: Терра Балтика, 2012. Т. 2. 576 с.
3. Стонт Ж.И., Демидов А.Н. Современные тенденции изменчивости температуры воздуха над акваторией Юго-Восточной Балтики // Вестник Моск. Ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 2. С. 50–58.
4. ВАСС Author Group. Assessment of climate change for the Baltic Sea basin. Berlin: Springer-Verlag. 2008. 473 p.
5. Backhaus J.O. Climate-sensitivity of European marginal seas, derived from the interpretation of modelling studies // Journal of Marine Systems. 1996. No. 7. P. 361–382.
6. Barton I.J. Satellite-derived sea surface temperatures: current status // Journal of Geophysical Research. 1995. No. 100 (C5). P. 8777–8790.



7. *Belkin I.M.* Rapid warming of Large Marine Ecosystems // *Progress in Oceanography*. 2009. No. 81. P. 207–213.
8. *Bradtke K., Herman A., Urbański J. A.* Spatial and inter-annual variations of seasonal sea surface temperature patterns in the Baltic Sea // *Oceanologia*. 2010. No. 52 (3). P. 345–362.
9. *Brown O.B., Minnett P.J.* MODIS infrared sea surface temperature algorithm. Tech. Report ATBD25, FL 33149–1098. Miami: University of Miami. 1999. 91 p.
10. *Bulycheva E., Stont Z., Bukanova T.* Variations of sea surface temperature and ice conditions in the South-Eastern Baltic over the last decade // *Proceedings of Baltic International Symposium IEEE/OES*. Tallinn. 2014. P. 1–10.
11. *Cayan D. R.* Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: driving the sea surface temperature // *J. Phys. Oceanogr.* 1992. No. 22. P. 859–881.
12. *HELCOM.* Eutrophication in the Baltic Sea – An integrated thematic assessment of the effects of nutrient enrichment and eutrophication in the Baltic Sea region // *Baltic Sea Environment Proceedings*. 2009. No. 115B. 148 p.
13. *HELCOM.* Climate change in the Baltic Sea Area: HELCOM thematic assessment in 2013 // *Baltic Sea Environment Proceedings*. 2013. No. 137. 66 p.
14. *Hordoir R., Meier H.E.M.* Effect of climate change on the thermal stratification. // *Climate Dynamics* 2011. No. 38 (9–10). P. 1–11.
15. *Janssen F., Neumann T., Schmidt M.* Interannual variability of cyanobacterial blooms in the Baltic Sea controlled by wintertime hydrographic conditions // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2004. No. 275. P. 59–68.
16. *Kozlov I., Dailidienė I., Korosov A., Klemas V., Mingėlaitė T.* MODIS-based sea surface temperature of the Baltic Sea Curonian Lagoon // *Journal of Marine Systems*. 2012. No. 129. P. 157–165.
17. *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. No. 46. P. 186–195.
18. *Muren U., Berglund J., Samuelsson K., Andersson A.* Potential effects of elevated sea–water temperature on pelagic food webs // *Hydrobiologia*. 2005. No. 545. P. 153–166.
19. *Neumann T., Eilola K., Gustafsson B., Muller–Karulis B., Kuznetsov I., Meier M.H.E., Savchuk O.P.* Extremes of Temperature, Oxygen and Blooms in the Baltic Sea in a Changing Climate // *AMBIO*. 2012. No. 41. P. 574–585.
20. *Omstedt A., Nyberg L.* Response of Baltic Sea ice to seasonal, interannual forcing and Climate change // *Tellus*. 1996. No. 48A (5). P. 644–662.
21. *Rhein M., Rintoul S.R., Aoki S., Campos E., Chambers D., Feely R.A., Gulev S., Johnson G.C., Josey S.A., Kostianoy A., Mauritzen C., Roemmich D., Talley L.D., Wang F.* Observations: Ocean. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2013. 1535 p.
22. *Siegel H., Gerth M., Tschersich G.* Sea surface temperature development of the Baltic Sea in the period 1990–2004 // *Oceanologia*. 2006. No. 48. P. 119–131.
23. *Störmer O.* *Climate Change Impacts on Coastal Waters of the Baltic Sea* // *Global Change and Baltic Coastal Zones*. Dordrecht: Springer. 2011. Vol. 1. P. 51–69.
24. *Tylkowski J.* Temporal and spatial variability of air temperature and precipitation at the Polish coastal zone of the southern Baltic Sea // *Baltica*. 2013. No. 26 (1). P. 83–94.
25. *Voss R., Petereit C., Schmidt J.O., Lehmann A., Makarchouk A., Hinrichsen H.H.* 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. No. 100–101. P. 1–8.
26. *Walther G.R., Post, E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J., Fromentin J.M., Hoegh–Goldberg O., Bairlein F.* Ecological responses to recent climate change // *Nature*. 2002. No. 416. P. 389–395.
27. *Wasmund N., Nauch G., Matthäus W.* Phytoplankton spring blooms in the southern Baltic Sea–spatio-temporal development and long-term trends // *Journal of Plankton Research*. 1998. No. 20. P. 1099–1117.
28. *Wasmund N., Uhlig S.* Phytoplankton trends in the Baltic Sea // *ICES Journal of Marine Science*. 2003. No. 60. P. 177–186.
29. *Wiktor K., Plinski M.* Long-term changes in the biocoenosis of the Gulf of Gdansk // *Oceanologia*. 1992. No. 32. P. 69–79.

# Variability of sea surface temperature in the South–Eastern Baltic Sea from MODIS data

T.V. Bukanova<sup>1,2</sup>, Zh.I. Stont<sup>1,2</sup>, O.A. Goushchin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Atlantic Branch of P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS  
Kaliningrad, 236022, Russia

E-mail: [tatiana.bukanova@gmail.com](mailto:tatiana.bukanova@gmail.com)

<sup>2</sup> Immanuel Kant Baltic Federal University

Kaliningrad, 236041, Russia

E-mail: [ocean\\_stont@mail.ru](mailto:ocean_stont@mail.ru)

The paper focuses on the analysis of interannual, seasonal, and spatial variability of sea surface temperature (SST) in the south–eastern part of the Baltic Sea, including the Curonian and Vistula Lagoons. The data sets are derived from MODIS instrument on Aqua and Terra satellites, and analyzed for 2003–2012. Linear trends of seasonal and interannual SST change are calculated. SST increase is estimated at a rate of  $0.70 \pm 0.27$  °C/decade in the open part of the South–Eastern Baltic. The observed warming is spatially inhomogeneous – the coastal area demonstrates faster warming rates of SST than the open part of the sea. The Curonian and Vistula Lagoons represent significantly lower rates of warming. However, seasonal tendencies of SST change in the Lagoons and the open part of the sea coincide. Correlation between SST and air temperature changes is analyzed. A coincidence of air temperature and SST seasonal development is observed – positive trends occur in the warm period (spring and summer), negative trends – in the cold period (winter and autumn). A strong correlation between MODIS-derived SST and *in situ* data is detected.

**Keywords:** sea surface temperature, MODIS, South–Eastern Baltic, interannual variability of SST, seasonal change of SST, SST linear trend, air temperature

## References

1. Aleksandrov S., Vliyanie klimaticheskikh izmeneniy na uroven' evtrofirovaniya Kurshskogo zaliva (Climate Change Impact on the Curonian Lagoon Eutrophication Level), *Vestnik of Immanuel Kant Russian State University*, 2010, Issue 1, pp. 49–57.
2. Sivkov V.V., Kadzhoyan Yu.S., Pichuzhkina O.E., Fel'dman V.N.. *Neft' i okruzhayushchaya sreda Kaliningradskoi oblasti* (Oil and environment of the Kaliningrad Region), Kaliningrad: Terra Baltika, 2012, Vol. 2, 576 p.
3. Stont Zh.I., Demidov A.N. Sovremennye tendentsii izmenchivosti temperatury vozdukha nad akvatoriei Yugo-Vostochnoi Baltiki, *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5. Geografiya*, 2015, No. 2, pp. 50–58.
4. BACC Author Group, *Assessment of climate change for the Baltic Sea basin*, Berlin: Springer–Verlag, 2008, 473 p.
5. Backhaus J.O., Climate–sensitivity of European marginal seas, derived from the interpretation of modelling studies, *Journal of Marine Systems*, 1996, No. 7, pp. 361–382.
6. Barton I.J., Satellite-derived sea surface temperatures: current status, *Journal of Geophysical Research*, 1995, No. 100 (C5), pp. 8777–8790.
7. Belkin I.M., Rapid warming of Large Marine Ecosystems, *Progress in Oceanography*, 2009, No. 81, pp. 207–213.
8. Bradtke K., Herman A., Urbański J. A., Spatial and inter–annual variations of seasonal sea surface temperature patterns in the Baltic Sea, *Oceanologia*, 2010, No. 52 (3), pp. 345–362.
9. Brown O.B., Minnett P.J., *MODIS infrared sea surface temperature algorithm. Tech. Report ATBD25*, FL 33149–1098, Miami: University of Miami, 1999, 91 p.
10. Bulycheva E., Stont Z., Bukanova T., Variations of sea surface temperature and ice conditions in the South-Eastern Baltic over the last decade, *Proceedings of Baltic International Symposium IEEE/OES*, Tallinn, 2014, pp. 1–10.
11. Cayan D. R., Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: driving the sea surface temperature, *J. Phys. Oceanogr.*, 1992, No. 22, pp. 859–881.
12. HELCOM, Eutrophication in the Baltic Sea – An integrated thematic assessment of the effects of nutrient enrichment and eutrophication in the Baltic Sea region, *Baltic Sea Environment Proceedings*, 2009, No. 115B, 148 p.
13. HELCOM, Climate change in the Baltic Sea Area: HELCOM thematic assessment in 2013, *Baltic Sea Environment Proceedings*, 2013, No. 137, 66 p.
14. Hordoir R., Meier H.E.M., Effect of climate change on the thermal stratification, *Climate Dynamics*, 2011, No. 38 (9–10), pp. 1–11.
15. Janssen F., Neumann T., Schmidt M., Interannual variability of cyanobacterial blooms in the Baltic Sea controlled by wintertime hydrographic conditions, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 2004, No. 275, pp. 9–68.
16. Kozlov I., Dailidienė I., Korosov A., Klemas V., Mingelaitė T., MODIS–based sea surface temperature of the Baltic Sea Curonian Lagoon, *Journal of Marine Systems*, 2012, No. 129, pp. 157–165.
17. 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, No. 46, pp. 186–195.

18. Muren U., Berglund J., Samuelsson K., Andersson A., Potential effects of elevated sea–water temperature on pelagic food webs, *Hydrobiologia*, 2005, No. 545, pp. 153–166.
19. Neumann T., Eilola K., Gustafsson B., Muller–Karulis B., Kuznetsov I., Meier M.H.E., Savchuk O.P., Extremes of Temperature, Oxygen and Blooms in the Baltic Sea in a Changing Climate, *AMBIO*, 2012, No. 41, pp. 574–585.
20. Omstedt A., Nyberg L., Response of Baltic Sea ice to seasonal, interannual forcing and Climate change, *Tellus*, 1996, No. 48A (5), pp. 644–662.
21. Rhein M., Rintoul S.R., Aoki S., Campos E., Chambers D., Feely R.A., Gulev S., Johnson G.C., Josey S.A., Kostianoy A., Mauritzen C., Roemmich D., Talley L.D., Wang F. Observations: Ocean. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013, pp. 256–315 (1535 p.)
22. Siegel H., Gerth M., Tschersich G., Sea surface temperature development of the Baltic Sea in the period 1990–2004, *Oceanologia*, 2006, No. 48, pp. 119–131.
23. Störmer O., Climate Change Impacts on Coastal Waters of the Baltic Sea. In G. Schernewski, J. Hofstede, T. Neumann (Eds.), *Global Change and Baltic Coastal Zones*, Dordrecht: Springer, 2011, Vol. 1, pp. 69.
24. Tylkowski J., Temporal and spatial variability of air temperature and precipitation at the Polish coastal zone of the southern Baltic Sea, *Baltica*, 2013, No. 26 (1), pp. 83–94.
25. Voss R., Petereit C., Schmidt J.O., Lehmann A., Makarchouk A., Hinrichsen H.H., 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, No. 100–101, pp. 1–8.
26. Walther G.R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J., Fromentin J.M., Hoegh–Goldberg O., Bairlein F., Ecological responses to recent climate change, *Nature*, 2002, No. 416, pp. 389–395.
27. Wasmund N., Nauch G., Matthäus W., Phytoplankton spring blooms in the southern Baltic Sea–spatio–temporal development and long–term trends, *Journal of Plankton Research*, 1998, No. 20, pp. 1099–1117.
28. Wasmund N., Uhlig Š., Phytoplankton trends in the Baltic Sea, *ICES Journal of Marine Science*, 2003, No. 60, pp. 177–186.
29. Wiktor K., Plinski M., Long–term changes in the biocoenosis of the Gulf of Gdansk, *Oceanologia*, 1992, No. 32, pp. 69–79.