

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ И ИЗМЕРЕНИЯМ ТЕРМОКОСЫ

С.А. Мысленков^{1,2,3}, В.А. Кречик⁴, Д.М. Соловьев^{2,5}

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

²*Институт океанологии имени П.П. Шириова РАН, г. Москва*

³*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации*

⁴*Атлантическое отделение Института океанологии
им. П.П. Шириова РАН, г. Калининград*

⁵*Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь
stasocean@gmail.com*

Введение

Исследованию температуры вод в Юго-Восточной части Балтийского моря посвящено большое количество работ [1, 5, 8, 10, 16, 21, 23]. Данные о температуре вод Балтийского моря в основном получают при выполнении океанологических работ с дискретным зондированием [4, 8, 16, 17]. Такие данные позволяют выявлять пространственные неоднородности, сезонную и межгодовую изменчивость температуры воды. Одним из важных источников данных является производственный экологический мониторинг нефтяного месторождения «Кравцовское» (Д-6) [13]. Мониторинг термохалинных характеристик основан на ежемесячных зондированиях, выполняемых от поверхности до дна непосредственно с морской ледостойкой стационарной платформы (в течение всего года), а также на шести станциях, расположенных в прибрежной зоне вдоль северного побережья Калининградской области (с апреля по октябрь) [13].

Для исследования температуры поверхности также используются данные спутников, но из-за сильной облачности, характерной в некоторые сезоны для Балтийского моря, эти данные очень нерегулярны во времени, и существует возможность оценивать только сезонную и межгодовую изменчивость [1, 7, 21, 23]. С другой стороны, преимуществом спутниковых данных является большой пространственный охват.

Гирлянды термодатчиков (термокосы) в Балтийском море используются редко [22], однако этот метод успешно применяется в других морях и позволяет эффективно исследовать параметры распространения

внутренних волн и высокочастотную изменчивость температуры воды [9, 14, 15].

В данной статье выполнен анализ длительного ряда данных термоко-сы, установленной на нефтедобывающей платформе Д-6 в прибрежной зоне Балтийского моря. Измерения проводились в течение 15 месяцев с дискретностью 1 мин. Проведено сопоставление данных термоко-сы со спутниковыми данными.

Данные и методы

В работе использованы данные термоко-сы, установленной на морской стационарной платформе Д-6 приблизительно в 20 км от берега в прибрежной зоне Балтийского моря (рис. 1) [11]. Термоко-са состоит из 10 датчиков Starmon mini, расположенных на горизонтах: -0,9; 0,1; 1; 3; 5; 8; 10; 13; 24; 28 м. Глубина в месте установки составляет 29 м. Самый верхний термодатчик располагался на воздухе (на высоте около 90 см от воды), следующий был заглублен на 10 см. Данная постанковка позволяет получать данные о температуре приводного воздуха и тонкого верхнего слоя воды в условиях отсутствия волнения.

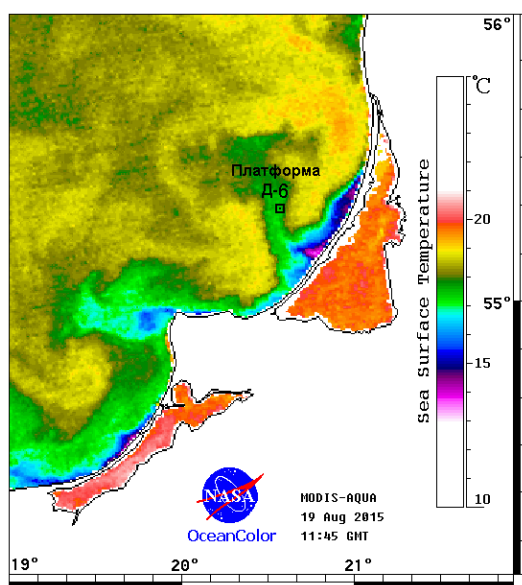


Рис. 1. Температура поверхности моря 19.08.2015 г. в Юго-Восточной Балтике по данным MODIS-AQUA.

При возникновении сильного волнения первые четыре датчика периодически находились и на воздухе, и в воде, однако эти данные могут быть однозначно отфильтрованы по резкому увеличению дисперсии температуры. Дискретность измерений температуры составляет 1 мин, точность $\pm 0,025$ °С. Проанализирован ряд данных, полученных в период с 5.08.2015 г. по 1.02.2017 года.

Также использованы данные метеостанции, установленной на платформе Д-6 на высоте 27 м [13].

Данные о температуре поверхности моря были получены с помощью сканеров MODIS, установленных на спутниках Terra и Aqua, запущенных NASA (Национальное аэрокосмическое агентство США) в 1999–2000 гг., и исправно функционирующих в настоящее время. Оба аппарата составили единую спутниковую систему по мониторингу Земли (EOS), предназначенную для получения комплексных данных об атмосфере, суше и океане (температура поверхности, содержание взвеси и хлорофилла). Многофункциональные 36-канальные сканеры MODIS позволяют получать информацию об оптических свойствах подстилающей поверхности с пространственным разрешением 250, 500 и 1000 м в надире, а также тепловые изображения в ИК-диапазоне с разрешением 1000 м. Полоса обзора шириной 2330 км позволяет спутнику видеть любую точку Земли с периодичностью 1–2 дня.

Данные сканера MODIS (Terra и Aqua) в формате NetCDF были получены из оперативного архива OceanColor NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>). Пространственное разрешение составило 1 км, уровень обработки – L2. Из всего набора предлагаемых параметров были выбраны данные о температуре поверхности моря. Использовались значения температуры, восстановленные по длинноволновому тепловому излучению в дневное время. Такие данные имеют более высокое качество, так как поставщик применяет фильтрацию массивов на основе синхронных оптических каналов, что позволяет исключить возможное влияние температуры верхней кромки облаков или туманных образований над акваторией. Карты для температуры поверхности моря строились с учетом исходного разрешения приборов и достаточного охвата исследуемой акватории. При трансформации в карту применялась прямоугольная цилиндрическая проекция с постоянным шагом. Размер выдаваемой карты определялся в соответствии с пространственными и спектральными характеристиками интересующих особенностей, а также с размером района наблюдения.

Для обработки и анализа получаемых данных использовалось программное обеспечение BEAM-Visat (version 4.10) и собственный оригинальный комплекс вспомогательных утилит, позволяющий

автоматизировать процесс построения карт распределения физических параметров и их тематическую обработку.

Несмотря на достаточную периодичность получения снимков MODIS (по 1–2 изображения в сутки с каждого спутника Terra и Aqua), наблюдения нередко ограничивались облачностью над интересующей акваторией, особенно в холодное время года. Вторым лимитирующим фактором был недостаточно высокий уровень регистрируемого сигнала в зимнее время, затруднявший выявление существенных неоднородностей в поверхностном слое моря. Для всех безоблачных снимков по району интереса был произведен автоматический отбор спутниковых измерений температуры в ближайшем узле к платформе Д-6. Собранный таким образом массив спутниковых данных за весь период натурных измерений был сопоставлен с данными термоксы. Всего для анализа пространственной и временной изменчивости температуры воды обработано 98 спутниковых снимков радиометра MODIS за период с 5 августа 2015 г. по 3 января 2017 г. На рис. 1 приведен пример снимка за 19 августа 2015 г., а черным квадратом отмечено расположение платформы, где были получены данные для анализа. Помимо самого ближайшего к платформе узла, для оценки пространственной неоднородности температуры по снимкам были отобраны данные еще в четырех узлах, расположенных на расстоянии около 1 км от Д-6.

Результаты

Подробный анализ данных термоксы за период с 5.08.2015 г. по 25.05.2016 г. приведен в [11], где были выявлены колебания температуры различных временных масштабов изменчивости: сезонные, синоптические, суточные, инерционные. В нашем случае были доступны данные за более продолжительный период, однако характер изменчивости температуры не изменился. Периодически в температуре воды наблюдался суточный ход, конвективное перемешивание, апвеллинги, инерционные колебания.

В данной работе сначала было проведено сопоставление спутниковых данных о температуре воды с данными измерений термоксы. Так как ближайший узел, где была восстановлена спутниковая температура, находится в 300 м от платформы, то формально необходимо оценить пространственную неоднородность температуры воды на поверхности в исследуемом районе. Для этого проведено сравнение температуры по пяти ближайшим узлам со спутника, находящимся на расстоянии 1–1,5 км от платформы. Стандартное отклонение по пяти узлам за период с августа по декабрь 2015 г. (всего 35 измерений) меняется от 0,05

до $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ и в среднем составляет $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Учитывая, что разрешение спутниковых данных по температуре составляет $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, вполне можно предполагать однородность поля температуры при сравнении данных термокосы с ближайшим узлом спутниковых данных.

Затем было выполнено сравнение температуры воды со спутников с данными термокосы на глубине 1 м (рис. 2). Верхний датчик термокосы находился на глубине 10 см, однако из-за ветрового волнения этот датчик периодически оказывался на воздухе, и использовать эти данные можно только в штилевых условиях. Разность температуры воды по данным термокосы и спутника меняется от $-1,5$ до $2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3).

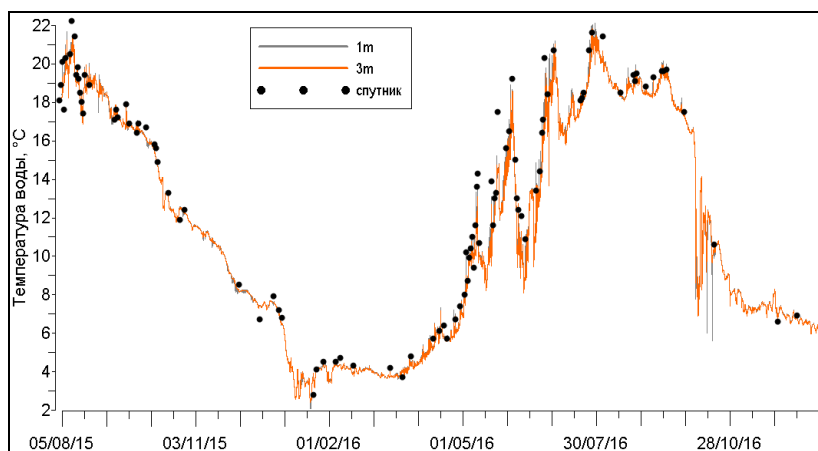


Рис. 2. Температура воды по данным термокосы и спутников с 5.08.2015 г. по 3.01.2017 г. на платформе Д-6.

Средняя разность (систематическая ошибка) спутника по всему ряду данных (98 значений) составила $+0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$. В большинстве случаев была получена положительная разность, т. е. значения спутниковой температуры выше, чем результаты измерения термодатчиков. Наличие отклонений более $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, вероятно, связано с сильным дневным прогревом тонкого верхнего слоя. Для проверки этого предположения были рассчитаны разницы температуры термокосы между горизонтами 1 и 3 м. Если разность между этими слоями невелика, то, следовательно, весь верхний слой хорошо перемешан. Значит, и градиент между значениями температуры на глубине 1 м и в тонком верхнем слое не должен быть большим. В период весеннего прогрева наблюдаются максимальные разности между температурой на горизонтах 1 и 3 м (рис. 3). Если исключить

из сравнения случаи, когда разность температуры между горизонтами 1 и 3 м была более $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, то диапазон разности температуры воды по данным термоксы и спутника уже существенно сужается и составляет от $-0,75$ до $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Систематическая ошибка спутника по всему ряду данных (61 значение) составила $+0,14\text{ }^{\circ}\text{C}$, среднеквадратическое отклонение $0,38\text{ }^{\circ}\text{C}$.

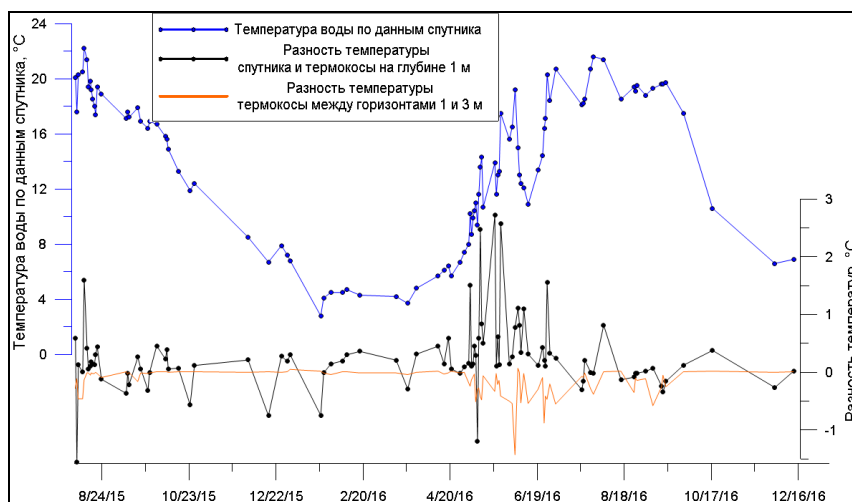


Рис. 3. Температура воды и разности температур по данным спутников и термоксы.

Похожие результаты были получены в [1]. По результатам сопоставления спутниковых значений ТПИМ (MODIS) и данных ежемесячных зондирований также в точке Д-6 для ряда из 23 пар систематическая ошибка составила $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, случайная – $1,72\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1]. В другой работе [21] были использованы данные натурных наблюдений в прибрежной зоне Литвы и показано, что систематическая ошибка также положительная, среднеквадратическая ошибка составляет $0,49\text{ }^{\circ}\text{C}$. В нашем случае, благодаря фильтрации ряда по наличию верхнего перемешанного слоя, полученные значения ошибок несколько меньше. Важным моментом для корректного сопоставления является высокая временная дискретность данных термоксы, так как даже в пределах одного часа временная изменчивость температуры может превышать $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Спутниковые данные также эффективно используются для обнаружения и изучения апвеллингов, которые характерны для данного региона

[2, 3, 5]. В [7] на основе спутниковых данных в исследуемом районе было выявлено 135 прибрежных апвеллингов за 2000–2014 гг. В нашем случае по данным термоксы был зарегистрирован один полный апвеллинг и несколько неполных, проявившихся в поднятии холодных вод на нескольких придонных горизонтах. Методика выделения неполных апвеллингов изложена в [15].

Рассмотрим подробно один из апвеллингов, наблюдавшийся с 13 по 19 августа 2015 г. (рис. 4). Перед этим событием вертикальное распределение температуры характеризовалось ее уменьшением с глубиной от 20–21°C на поверхности до 16–17°C на горизонтах 13–28 м. Далее значения температура на придонном горизонте (28 м) резко снизились до 10°C, а затем до 7,5°C. При этом на горизонте 24 м практически никаких изменений зафиксировано не было. Также отметим, что с 13 по 19 августа на глубине 28 м наблюдалась сильная изменчивость температуры, что вызвано расположением термоклина вблизи этого горизонта.

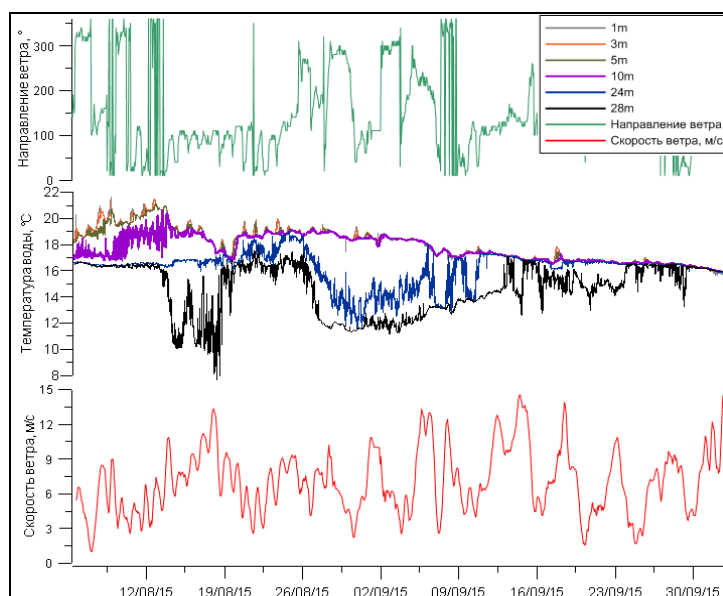


Рис. 4. Температура воды на различных горизонтах по данным термоксы, скорость и направление ветра по данным метеостанции.

Произошедшее событие – классический экмановский апвеллинг, причиной которого стал северо-восточный ветер, дувший со скоростью 8–12 м/с на протяжении всего события (рис. 4). После смены направления

ветра 19 августа апвеллинг прекратился. Для этого временного отрезка имеются несколько спутниковых снимков, один из которых (за 19 августа) представлен на рис. 1. По данным спутника температура воды в прибрежной зоне составляла около 13–14 °С, однако это наблюдалось в узкой полосе вдоль берега шириной около 5 км. Следовательно, подъем холодных вод проявился на поверхности только вблизи побережья, а на расстоянии 20 км наблюдался неполный апвеллинг, выраженный на нижних горизонтах. Также по данным спутника в температуре воды видна струя более холодных вод (16 °С), направленная от берега на север и достигающая 19 августа платформы Д-6 (рис. 1). В это время снижение значений температуры было также зафиксировано и на верхних горизонтах термоксы (рис. 4). Температура воды в придонном горизонте резко выросла 19 августа, что, вероятно, связано с уменьшением скорости ветра и изменением направления на северные румбы. С другой стороны, это может быть результатом адвекции струи, наблюдаемой на спутниковом изображении. В результате к моменту пролета спутника 19 августа температура воды на всех горизонтах составляла около 17 °С.

Другой апвеллинг наблюдался с 5 по 12 июня 2016 г. (рис. 5). Тогда температура на верхних горизонтах упала с 19 до 9 °С. Значения температуры на глубине 24–28 м практически не изменились. В этот период наблюдался сильный северный ветер.

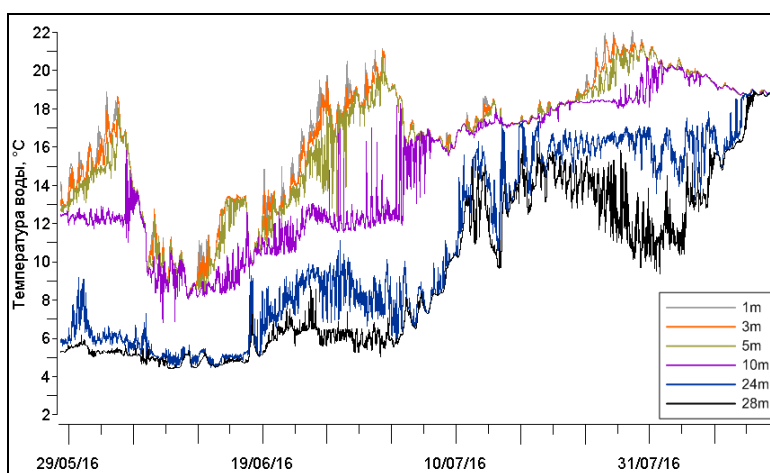


Рис. 5. Температура воды на различных горизонтах по данным термоксы с 28.05.2016 г. по 14.08.2016 г.

Данное событие хорошо прослеживается на снимке MODIS от 6 июня (рис. 6). По спутниковым данным видно, что широкая полоса (около

25–30 км) холодных вод (до 8–9 °С) вытянута вдоль побережья Литвы и Калининградской области. На снимке также видно, что охлаждение поверхностного слоя менее выражено у северного побережья Калининградской области. Это вызвано зональным расположением береговой линии в этом районе, следовательно, ветер северных румбов не должен вызывать здесь экмановский апвеллинг.

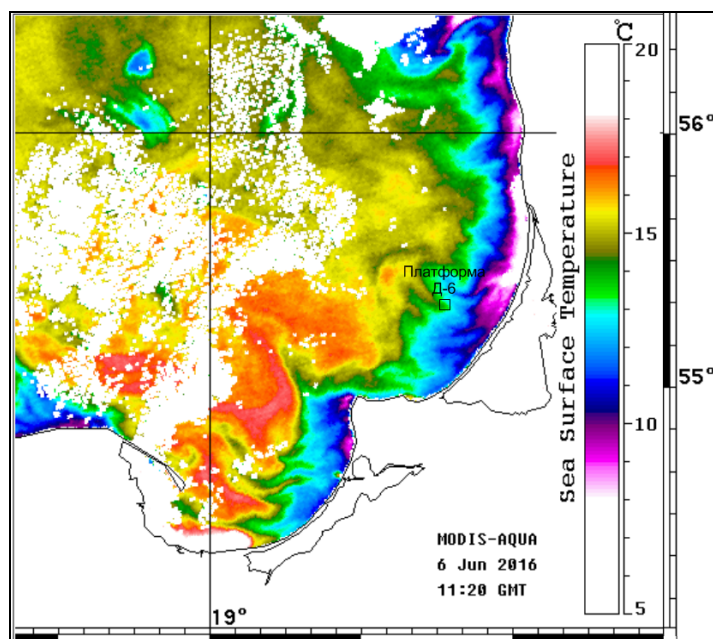


Рис. 6. Температура поверхности моря 6.06.2016 г. в Юго-Восточной Балтике по данным MODIS-AQUA.

Заключение

На основе длительного ряда измерений термоксы и спутниковых данных проведен анализ температуры вод в прибрежной зоне Юго-Восточной части Балтийского моря. Проведено сопоставление спутниковых данных о температуре воды с данными измерений термоксы на глубине 1 м. Установлено, что средняя разность по всему ряду данных составляет +0,25 °С. Наличие отклонений более 2 °С связано с сильным дневным прогревом тонкого верхнего слоя. Исключив из сравнения случаи, когда разность на горизонтах 1 и 3 м термоксы была более 0,1 °С,

средняя разность (систематическая ошибка) спутника уменьшается до $+0,14$ °С, среднеквадратическое отклонение составляет $0,38$ °С.

Подробно рассматриваются параметры двух апвеллингов. В первом случае событие наблюдалось на спутниковом снимке в узкой прибрежной зоне и вызвало поднятие холодных вод только на нижнем горизонте термокосы. Во втором случае апвеллинг был очень сильным, и температура на верхних горизонтах термокосы упала на 10 °С.

Данные спутникового зондирования существенно дополняют натурные данные термокосы и помогают анализировать наблюдаемые процессы. Для оценки качества спутниковых данных и их использования для различных климатических расчетов наиболее правильно исключать из рассмотрения случаи, когда ветер отсутствует и возникает сильный прогрев тонкого верхнего слоя.

Авторы выражают благодарность ООО «Лукойл-КМН» (г. Калининград) за помощь в установке оборудования и организации процессов наблюдения и получения данных.

Список использованных источников

1. Буканова Т.В., Стонт Ж.И., Гуцин О.А. Изменчивость температуры поверхности моря в Юго-Восточной Балтике по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 4. С. 86-96.
2. Голенко Н.Н., Голенко М.Н. О структуре динамических полей в Юго-Восточной Балтике при ветровых воздействиях, приводящих к апвеллингу и даунвеллингу // Океанология. 2012. Т. 52, № 5. С. 654.
3. Голенко Н.Н., Голенко М.Н., Щука С.А. Наблюдение и моделирование апвеллинга в Юго-Восточной Балтике // Океанология. 2009. Т. 49, № 1. С. 20-27.
4. Демидов А.Н., Мысленков С.А., Гриценко В.А., Чугаевич В.Я., Султанов П.А., Писарева М.Н., Сильвестрова К.П., Полухин А.А. Особенности структуры и динамики вод в прибрежной части Балтийского моря вблизи Самбийского полуострова // Вестник Московского государственного университета. Серия 5. География. 2011. №1. С. 41-47.
5. Дубравин В.Ф. Эволюции гидрометеорологических полей в Балтийском море. Калининград: Капрос, 2014. 438 с.
6. Дубравин В.Ф., Стонт Ж.И., Гуцин О.А. Эволюции суточного хода гидрометеорологических элементов над Юго-Восточной Балтикой // Известия КГТУ № 17. – Калининград: Изд-во КГТУ. 2010. С. 20-24.
7. Есюкова Е.Е., Чубаренко И.П., Стонт Ж.И. Сезонные вариации характеристик прибрежного апвеллинга: результаты анализа данных дистанционного зондирования юго-восточной части Балтийского моря // Известия КГТУ. 2015. 2(37). С. 20-29.
8. Кречик В.А., Гриценко В.А. Термическая структура прибрежных вод Балтийского моря у северного побережья Калининградской области // Процессы в гео-средах. 2016. № 5. С. 77-84.

9. Кукарин В.Ф., Лятидевский В.Ю., Навроцкий В.В., Храпченко Ф.Ф. Эволюция внутренних волн большой амплитуды в зоне заплеска // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2013. Т. 6, № 2. С. 35-45.
10. Лаврова О.Ю., Краюшкин Е.В., Соловьев Д.М., Голенко М.Н., Голенко Н.Н., Калашикова Н.А., Демидов А.Н. Влияние ветрового воздействия и гидродинамических процессов на распространение вод Калининградского залива в акватории Балтийского моря // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11, № 4. С. 76-99.
11. 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.
12. Медведева А.Ю., Мысленков С.А., Медведев И.П., Архипкин В.С., Кречик В.А., Добролюбов С.А. Моделирование ветрового волнения в Балтийском море на прямоугольной и неструктурной сетках на основе реанализа NCEP/CFRSR // *Труды Гидрометцентра России*. 2016. Вып. 362. С. 37-54.
13. 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.
14. Серебряный А.Н., Химченко Е.Е. Исследования внутренних волн на кавказском и крымском шельфах Черного моря летом 2013 г // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11, № 3. С. 88-104.
15. Сильвестрова К.П., Зацепин А.Г., Мысленков С.А. Прибрежные апвеллинги в Геленджикском районе Черного моря: связь с ветровым воздействием и течением // *Океанология*. 2017. Т. 57, № 4. С. 1-10.
16. 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.
17. Чубаренко И.П., Афон В.В., Чугаевич В.Я., Кречик В.А. Динамика вод над склоном при интенсивном летнем прогреве // *Метеорология и гидрология*. 2013. № 1. С. 66-78.
18. Barton I.J., Satellite-derived sea surface temperatures: current status // *J. Geophys. Res.* 1995. No. 100 (C5). P. 8777-8790.
19. 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.
20. 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.
21. 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
22. Massel S.R. Internal Gravity Waves in the Shallow Seas. *GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences* // Springer. Int. Publ, Switzerland, 2015. 163 p.
23. 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.

Поступила в редакцию 03.05.2017 г.