

РАСПРОСТРАНЕНИЕ МОРСКОГО ЛЬДА В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ДАННЫМ (2004–2019 гг.)

Крек Е.В., Стонт Ж.И., Буканова Т.В.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
Россия, 117997, Москва, Нахимовский пр-кт, 36,
e-mail: ocean_stont@mail.ru, elenka_krek@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 30.06.2020, одобрена к печати 28.08.2020

Российская часть Юго-Восточной Балтики обладает своеобразным ледовым режимом, который определяется географическим положением и климатическими условиями. Климатические изменения глобального масштаба привели к резкому изменению ледовых условий. Для исследования распространения морского льда в акватории широко используются спутниковые данные. Преимуществами радиолокационных изображений (РЛИ) со спутников, оснащенных радаром с синтезированной апертурой (РСА), являются широкая полоса обзора и независимость от дневного света и облачности. За 2004–2019 гг. с 1 декабря по 31 марта проанализировано 840 радиолокационных изображений Юго-Восточной Балтики. Показано, что в современных условиях ледяные явления в ЮВ Балтике происходят не каждый год. Выявленные пространственно-временные изменения ледового режима определяются последствиями климатических изменений в юго-восточной части Балтийского моря. Интенсивность льдообразования варьируется в зависимости от температурных условий. Установлено, что льдообразование начинается преимущественно во второй половине января–начале февраля. Для существования устойчивых ледяных полей необходимы среднесуточные температуры воздуха ниже -5°C , наблюдающиеся в течение 5 и более дней. Средняя продолжительность наблюдения морского льда составляет 22 дня за сезон. Вероятность наблюдения морского льда со спутника максимальна в феврале. Самый ледовитый месяц – февраль с максимальной продолжительностью наблюдения льда и максимальной площадью распространения.

Ключевые слова: Юго-Восточная Балтика, радиолокационные данные, климатические условия, морской лед, льдообразование, площадь распространения морского льда

Введение

Ледовый режим Балтийского моря определяется географическим положением и климатическими условиями отдельных его районов, интенсивностью теплообмена открытой части моря с заливами и Северным морем. Происходящие изменения характеристик климата Калининградской области в пределах российского сектора юго-восточной части Балтийского моря обусловлены климатическими изменениями глобального масштаба. Согласно данным Росгидромета (Росгидромет, 2020), на территории России в последние десятилетия потепление

климата происходило быстрее и масштабнее, чем в среднем по Земному шару. Известно, что чем севернее расположена территория, тем наиболее выражены изменения, обусловленные комплексом гидрометеорологических факторов (Chubarenko, Chubarenko, 2002).

Район исследования представляет собой часть акватории Юго-Восточной Балтики площадью 18045 км², примыкающую к берегу и ограниченную с запада 19° в.д. и с севера 56° с.ш. Район исследований включает прибрежную зону особо охраняемой природной территории – Куршской косы – памятника всемирного природного и культурного наследия ЮНЕСКО. Мелководье Юго-Восточной Балтики признано HELCOM одним из экологически и биологически значимых районов Балтийского моря. Поэтому особое внимание было уделено прибрежной зоне Куршской косы и северного побережья Самбийского полуострова, площадь которой составляет 5911 км², или 33% от района исследований (рис. 1).

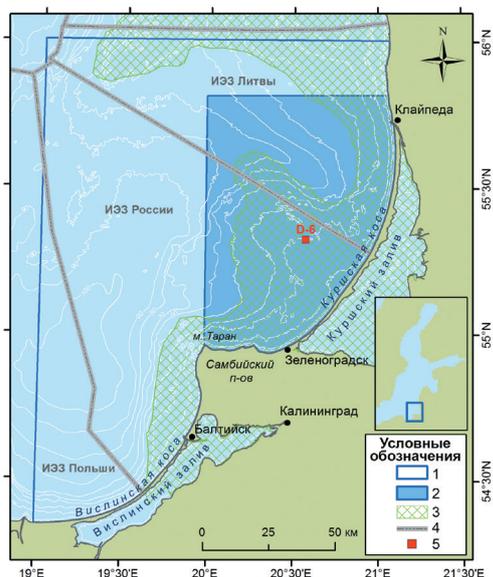


Рис. 1. Район исследований. Условные обозначения: 1 – район исследований морского льда в Юго-Восточной Балтике; 2 – прибрежная зона Куршской косы и северного побережья Самбийского п-ова; 3 – экологически/биологически значимые районы Балтийского моря (HELCOM); 4 – исключительная экономическая зона; 5 – МЛСП D-6.

Самые старые документированные записи ледовых условий в Балтийском море относятся к VII в. Ледовые наблюдения в Балтийском море были доступны с начала 1800-х годов. Система регулярных ледовых наблюдений была организована на прибрежных маяках и включала в себя даты формирования ледяного покрова (Jevejeva et al., 2004). Для исследования ледовых условий полярных и средних широт используются спутниковые радиолокационные данные, позволяющие получить в том числе и информацию о площадном распределении морского льда (Askne et al., 2008; Wakabayashi et al., 1995; Stont et al., 2010). В работе (Лаврова и др., 2010) рассматривался «ледовый механизм» визуализации на РЛИ поверхностных течений в проливе Каттегат, когда молодой несплоченный лед вовлекался в вихревое движение.

Благодаря комплексным методам наблюдений, усилению зимней навигации и повышению осведомленности о климате и изменениях окружающей среды, исследования ледовых условий Балтийского моря становятся все более активными.

Морской лед был признан чувствительным индикатором изменений климата (Vihta, Naarala, 2009).

Климатические изменения глобального масштаба повлекли за собой резкие изменения ледовых условий. За последние 20 лет снизилась частота суровых зим, которые приводили к полному оледенению Балтийского моря. Максимальная площадь ледяного покрова моря уменьшается со скоростью 3400 км² за 10 лет (ВАСС, 2015).

Лед появляется на Балтике каждый год, хотя интенсивность явления носит переменный характер. Продолжительность ледового сезона на севере составляет от 4 до 7 месяцев. В марте в ясные дни лед в Балтике начинает таять (Leppäranta, Murgberg, 2009). Изменчивость ледяного покрова Южной Балтики зависит от тепловых условий в течение данной зимы и от батиметрических условий в морском бассейне. Появление морского льда вдоль Польского и Калининградского побережий наблюдается только во время морозной зимы, тогда как открытое море обычно свободно ото льда (Dyrcz, 2019; Girjatowicz, 2011).

Характер развития ледовых процессов в исследуемом районе из года в год подвержен значительным колебаниям в зависимости от температурного режима, времени наступления осенне-зимних заморозков и запасов тепла, накопленных морем. Средние глубины района исследования – 10–50 м. На мелководье конвекция проникает до дна, при этом формируется квазиоднородный по температуре (1.5–1.8°C) и солёности (7.0–7.6 psu) слой. Таким образом, температура замерзания морской воды в районе исследования варьирует в узком диапазоне от –0.38°C до –0.42°C, а значит максимальные пространственные и временные вариации солёности в пределах района исследования не могли повлечь за собой значимые изменения температуры замерзания морской воды. Таким образом, при обсуждении связи площади распространения морского льда и температуры поверхности воды, авторы решили пренебречь изменениями температуры замерзания за счет солёности.

Цель настоящей работы – проанализировать основные черты современного ледового режима в юго-восточной части Балтийского моря по радиолокационным изображениям в условиях климатических изменений глобального масштаба.

Материалы и методы

Для исследования ледовых условий были использованы радиолокационные изображения (РЛИ) со спутников, оснащенных радаром с синтезированной апертурой (РСА). К таким спутникам относятся ENVISAT (Европейское космическое агентство, ESA), RADARSAT-1 (Канадское космическое агентство, CSA, Канада), RADARSAT-2 (МакДональд, Деттвилер и партнеры, MDA, Канада), TerraSAR-X (Германский центр авиации и космонавтики, DLR, Германия), Cosmo-SkyMED (Итальянское космическое агентство, ASI, Италия) и Sentinel-1A/B (ESA). Краткие характеристики спутниковых РЛИ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Краткие характеристики спутниковых РЛИ

Спутник	Период использования	Размер снимка, км	Пространственное разрешение, м
ENVISAT	с 01.2005 по 04.2012	400×400	150×150
RADARSAT-1	с 01.2005 по 03.2013	300×300	50×50
RADARSAT-2	с 12.2008 по наст. вр.	300×300 500×500	50×50 100×100
COS- MO-SkyMed-1,-2,-3,-4	с 04.2013 по 12.2015	200×200	100×100
TerraSAR-X	с 02.2015 по 12.2017	300×300	50×50
Sentinel-1A/B	с 01.2016 по наст. вр.	250×250	10×10

Радар с синтезированной апертурой (РСА), установленный на спутниках, чувствителен к шероховатости морской поверхности. Пленки различного происхождения, в том числе и лед различных типов, локально подавляют капиллярные волны, присутствующие на морской поверхности, что фиксирует РСА. Преимуществами РСА являются широкая полоса обзора и независимость от дневного света и облачности.

Всего в 2004–2019 гг. за период с 1 декабря по 31 марта было проанализировано 840 РЛИ, на 165 из них был обнаружен лед. Интервал между двумя последовательными радиолокационными съемками составлял 12–72 часа. При временных интервалах 24 часа и более выполнялась линейная интерполяция площадей льда, обнаруженного на двух последовательных РЛИ. Такая интерполяция выполнялась при сохранении метеорологических условий для льдообразования: среднесуточная температура воздуха сохранялась ниже 0°C, среднесуточная скорость ветра не превышала 12 м/с. В случае длительного (более 72 часов) перерыва в радиолокационных данных для подтверждения существования морского льда привлекались оптические изображения со спутников Aqua и Terra (Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства, NASA, США), оснащенные спектрорадиометрами MODIS. Оптические снимки были доступны только в дневное время и в безоблачную погоду. Пространственное разрешение таких снимков составляет 1 км.

Обнаруженные ледяные поля были оцифрованы в программном пакете ArcGIS 10.0. Там же были вычислены их площади. Оцифровка ледяных полей по снимкам MODIS не выполнялась. Пример оцифровки ледяных полей, наблюдаемых на РЛИ при различных ветровых условиях, показан на рис. 2.

Метеорологические данные получены с АГМС, установленной на морской ледостойкой стационарной платформе (МЛСП) D-6, расположенной на расстоянии 22 км от побережья Куршской косы (см. рис. 1). Данные по температуре воздуха и ветровым условиям являются репрезентативными для анализа метеорологических условий в рассматриваемом районе, т.к. платформа открыта всем ветрам, что исключает влияние суши. Известно, что в холодный период среднemesячная

температура воздуха над районом исследований выше, чем в прибрежной зоне (Нефть и окружающая среда, 2012).

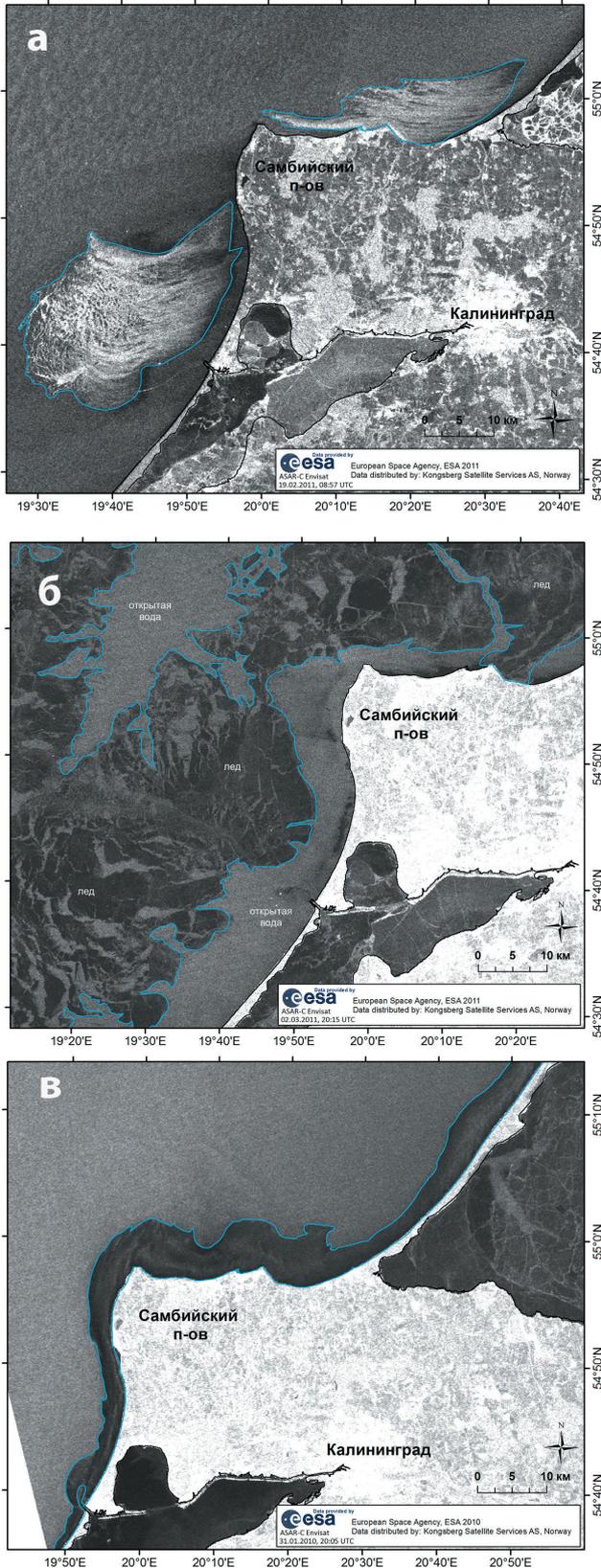
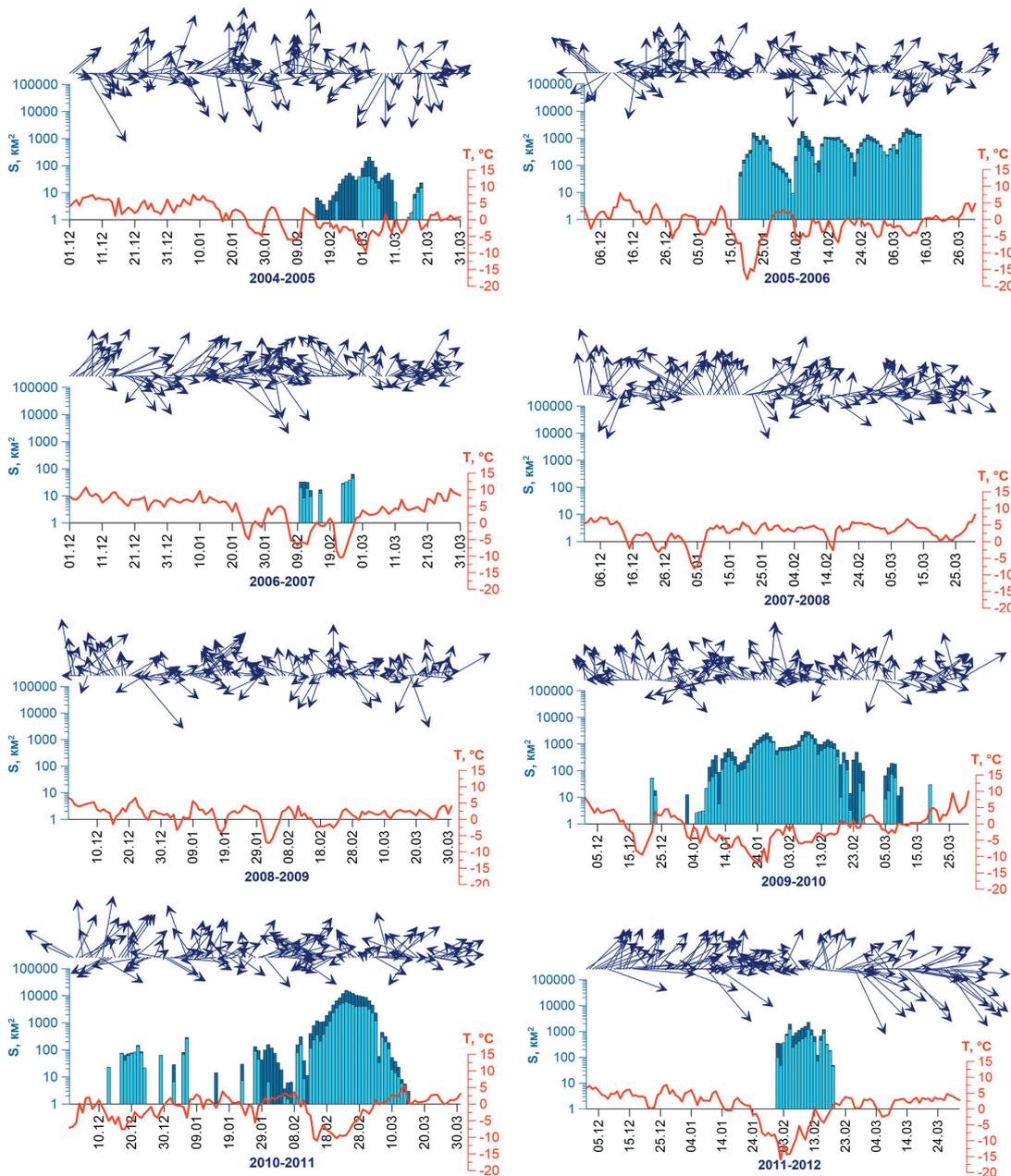


Рис. 2. Примеры оцифровки ледяных полей на РЛИ.
а – фрагмент Envisat, 19.02.2011 (08:57 UTC), восточный ветер, 9–10 м/с;
б – фрагмент Envisat, 02.03.2011 (20:15 UTC), юго-восточный ветер, 3–4 м/с;
в – фрагмент Envisat, 31.01.2010 (20:05 UTC), западный ветер, 8–9 м/с. Контур ледяных полей показан голубой линией.

Результаты

По результатам анализа РЛИ и метеоусловий было отмечено, что образование ледяного покрова в Юго-Восточной Балтике происходит через 5–7 дней после установления устойчивых морозов (рис. 3, табл. 2). Такой период определяется как сроком выхолаживания поверхности, обусловленным различием физических свойств атмосферы и водной толщи, так и преобладанием сильных ветров в осенне-зимнее время.



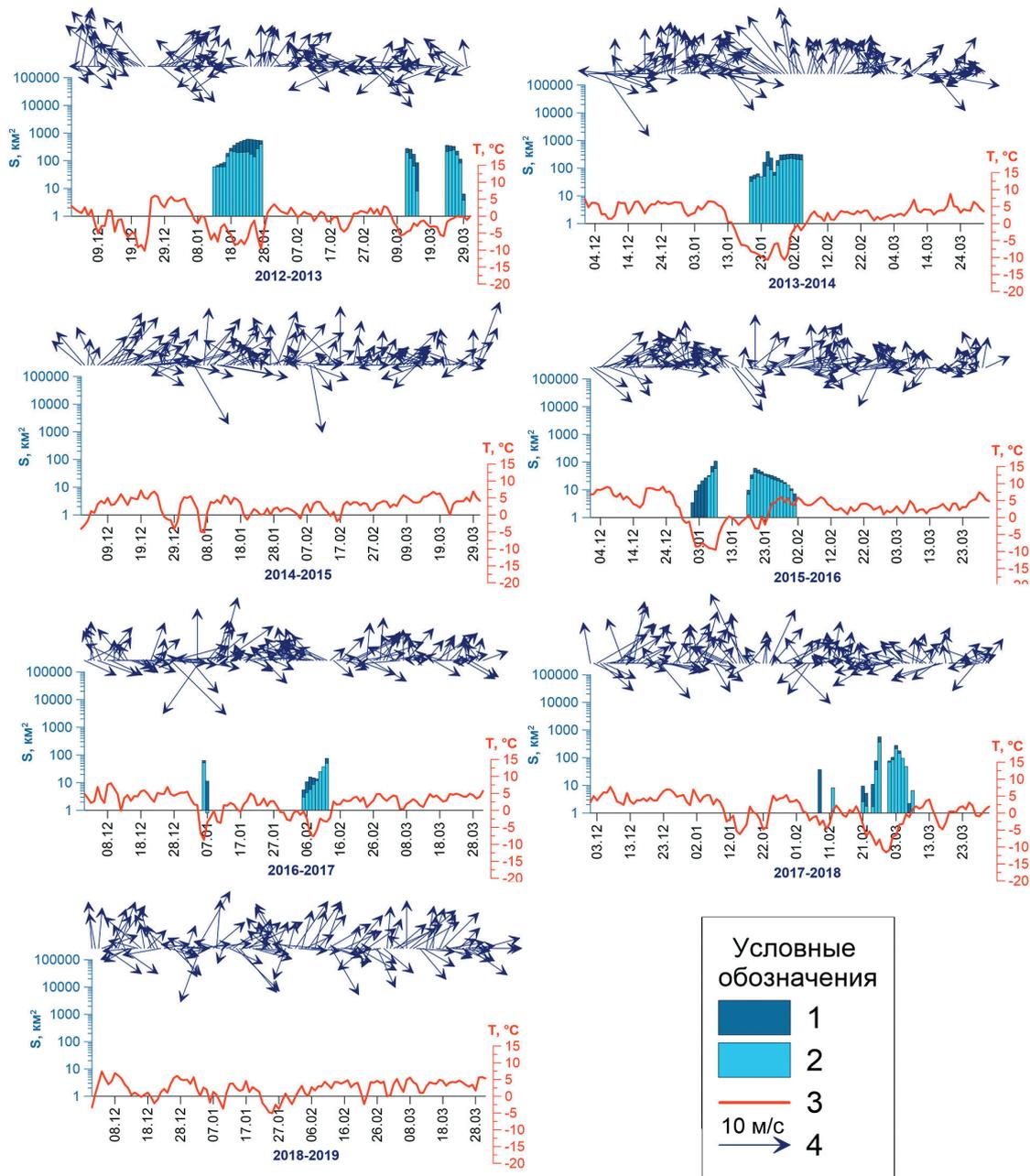


Рис. 3. Изменчивость площади морского льда в Юго-Восточной Балтике по спутниковым данным. Условные обозначения: 1 – площадь морского льда в юго-восточной части Балтийского моря, км²; 2 – площадь морского льда в прибрежной зоне Куршской косы и северного побережья Самбийского п-ова, км²; 3 – среднесуточная температура воздуха, °С; 4 – среднесуточный вектор скорости ветра.

Льдообразование в юго-восточной части Балтийского моря начинается преимущественно во второй половине января–начале февраля (табл. 2).

Исключениями являлись декабрь 2009 и 2010 гг. 22 декабря 2009 г., через 9 дней после начала морозов с понижением температуры до -9.4°C (рис. 3) вдоль Куршской косы, наблюдалась полоса начального вида льда шириной до 1 км (рис. 4). Ледяной покров просуществовал не более 2-х дней и был разрушен при

усилении ветра западных румбов до штормового и повышении среднесуточной температуры воздуха до +3.8°C (рис. 3).

Таблица 2. Характеристики ледовых условий в юго-восточной части Балтийского моря

Зимний сезон	Ср. темп-ра воздуха, °С	Сумма градусо-дней мороза (СГДМ, °С)	Наблюдение льда		Кол-во дней со льдом	S _{max} льда, км ²	Дата наблюдения S _{max} льда
			первое	последнее			
2004–2005	2.3	146.2	15.02.2005	19.03.2005	29	209	03.03.2005
2005–2006	–0.1	258.0	18.01.2006	14.03.2006	56	2283	10.03.2006
2006–2007	3.7	95.1	10.02.2007	26.02.2007	9	63	26.02.2007
2007–2008	3.4	43.8	–	–	0	–	–
2008–2009	1.4	58.7	–	–	0	–	–
2009–2010	–1.2	295.4	22.12.2009	10.03.2010	62	2953	08.02.2010
2010–2011	–1.4	255.1	13.12.2010	15.03.2011	63	15725	24.02.2011
2011–2012	0.9	187.5	01.2.2012	19.02.2012	19	2254	11.02.2011
2012–2013	–1.2	252.3	13.01.2013	29.03.2013	25	606	23.01.2013
2013–2014	2.3	138.9	20.01.2014	04.02.2014	16	397	25.01.2014
2014–2015	2.7	34.4	–	–	0	–	–
2015–2016	2.8	91.8	01.01.2016	01.02.2016	23	109	08.01.2016
2016–2017	2.2	70.9	06.01.2017	13.02.2017	10	75	12.02.2017
2017–2018	0.7	88.3	08.02.2018	08.03.2018	19	565	26.02.2018
2018–2019	2.4	42.4	–	–	0	–	–

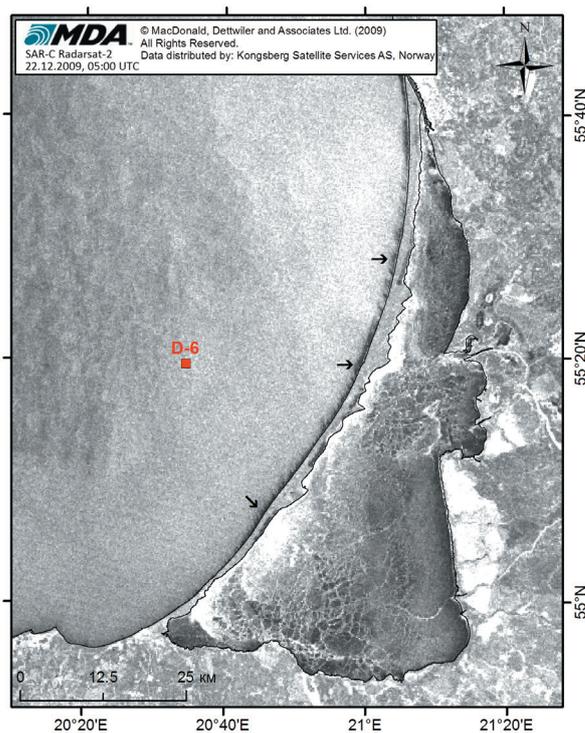


Рис. 4. Начало формирования морского льда в прибрежной части района исследований вдоль побережья Куршской косы 22.12.2009 г. по данным Radarsat-2. Распространение льда показано стрелками.

Самое раннее наблюдение морского льда за период исследований состоялось 13.12.2010 г. Этому способствовали продолжительные морозы до -11°C (рис. 3, табл. 2). Среднемесячная температура воздуха в декабре 2010 г. составила -2.9°C , сумма градусо-дней мороза (СГДМ) 97.1°C . Это самый холодный декабрь за период исследования. Из-за сильного ветра, скорость которого достигала 15 м/с , что способствовало вертикальному перемешиванию поверхностных вод, задействованных в льдообразовании, формирование ледяного покрова происходило медленно (рис. 3). Максимальная площадь ледяного покрова составила 97 км^2 (табл. 2). Короткие периоды интенсивного льдообразования, начавшегося в декабре, были прерваны теплым периодом в январе, когда погода формировалась под влиянием фронтальных систем от атлантических циклонов, один за другим смещающихся по северу Европейского континента. Температура воздуха поднималась до 5°C , не опускаясь ниже -5°C (СГДМ $20,0^{\circ}\text{C}$) (рис. 3, табл. 2). С середины февраля 2011 г. на ЮВ Балтику распространилось влияние отрога холодного Скандинавского антициклона, наполненного арктическим воздухом, который поддерживал аномально холодную погоду до конца февраля. Температура воздуха в отдельные дни опускалась до -14°C . По наблюдениям за 2004–2019 гг. это один из самых холодных месяцев: среднемесячная температура -3.8°C , СГДМ 129.9°C . Морская вода на мелководье выхолотилась, вдоль берега наблюдалась полоса начальных форм льда. Площадь распространения ледяных полей в ЮВ Балтике увеличивалась и к концу февраля составила $15\,725\text{ км}^2$, или 87% от общей площади всего района. Время покрытия льдом – 63 дня (с 13.12.2010 г. по 15.03.2011 г.). Это максимальное распространение льда за исследуемый период времени (рис. 5). Последний раз лед на РЛИ наблюдался 24.02.2011 г.

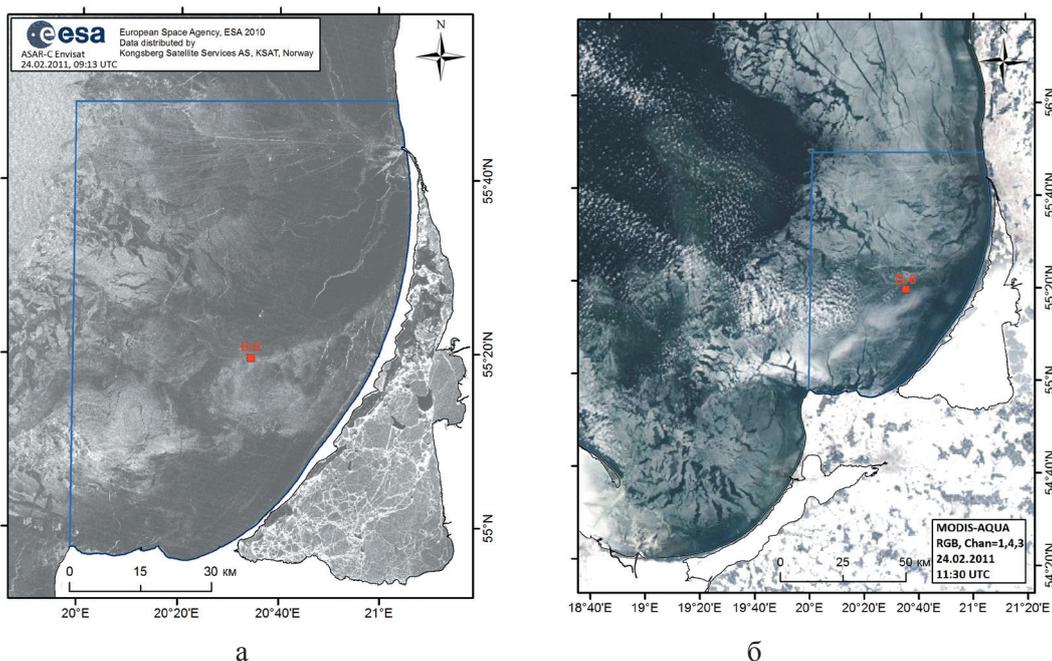


Рис. 5. Максимальное распространение морского льда в районе исследований, отмеченное 24.02.2011 г. по спутниковым данным: а – по данным Envisat (ASAR); б – по данным Aqua (MODIS).

Продолжительному наблюдению ледяного покрова способствуют среднесуточные температуры воздуха ниже -5°C , наблюдающиеся в течение 5 и более дней. При повышении температуры воздуха выше нуля лед начинает разрушаться вплоть до полного исчезновения.

Средняя продолжительность наблюдения морского льда в Юго-Восточной Балтике – 22 дня за сезон. Наиболее продолжительными периодами непрерывного наблюдения ледяных полей являлись: 56 дней с 18.01.2006 г. по 14.03.2006 г. и 53 дня с 05.01.2010 г. по 10.03.2010 г. (табл. 2; рис. 3). В отдельные годы льда не наблюдалось. Самый ледовитый месяц – февраль – средняя продолжительность наблюдения льда в феврале составляет 10 дней. Далее идет январь – 7 дней. Средняя продолжительность наблюдения льда в марте составляет 4 дня, в декабре – меньше 1 дня.

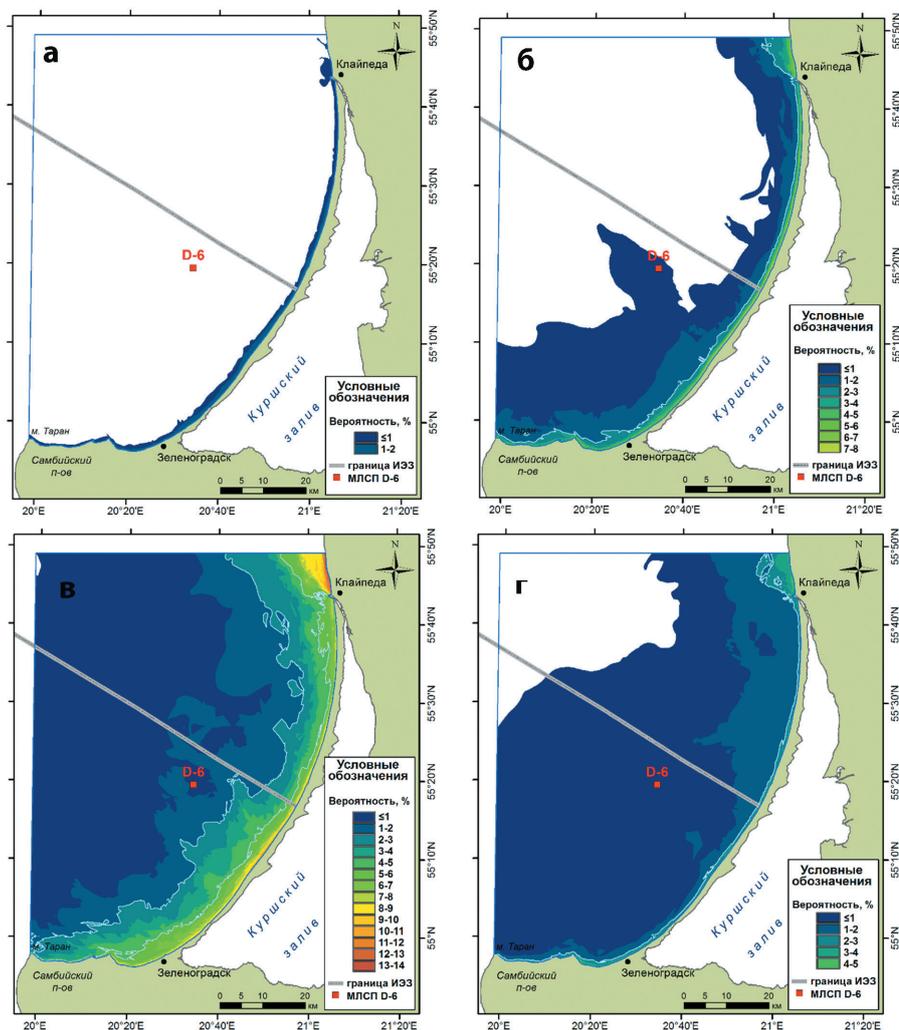


Рис. 6. Вероятность распространения морского льда в акватории Юго-Восточной Балтики, прилегающей к Куршской косе, по результатам спутниковых наблюдений в 2004–2019 гг.: а – в декабре; б – в январе; в – в феврале; г – в марте.

Вероятность наблюдения морского льда со спутника в 1 км зоне от побережья Куршской косы составляет для декабря – 1%, для января – 2.8%, для

февраля – 7%, для марта – 1.3%. В 100-метровой зоне вероятность наблюдения льда в декабре составляет 2%, в январе – 8%, в феврале – 10%, в марте – 3% (рис. 6). Также в феврале наблюдается максимальное распространение льда по акватории исследований, в отдельные годы достигая почти 100%.

Анализ пространственного распространения морского льда в районе исследований показал, что лед, в основном, сосредоточен в прибрежной зоне Куршской косы и северной части Самбийского п-ова (см. рис. 3, 6). Из-за выхолаживания на прибрежном мелководье за счет более низкой температуры берега, происходит образование начальных форм льда. Наблюдение льда в мористой части района исследования, в том числе связано и с перемещением льда от берега сгонными ветрами южных и восточных румбов. Площади ледяных полей увеличиваются за счет дрейфующего льда. Формы наблюдаемого льда относятся к начальным – при изменении направления ветра морской лед начинает перемещаться под его воздействием (см. рис. 2).

Обсуждение

Выявленные пространственно-временные изменения ледового режима и их тенденции за период 2004–2019 гг. определяются последствиями климатических изменений в юго-восточной части Балтийского моря.

За 2004–2019 гг. средняя годовая температура воздуха (T_a) составила $8.9 \pm 0.6^\circ\text{C}$, что превысило среднегодовое значение середины XX века на 1.5°C . Максимум среднегодовой T_a наблюдался в 2019 г. (9.9°C), минимум – 7.2°C в 2010 г. (Стонт и др., 2020).

За этот же период среднегодовая температура поверхности моря (ТПМ) равна $10.3 \pm 0.3^\circ\text{C}$. Самые высокие среднегодовые значения ТПМ (10.6 – 10.8°C) наблюдались в 2008 г. и 2014–2019 гг. Самые низкие среднегодовые ТПМ (9.8 – 9.9°C) выявлены в 2009–2012 гг., тогда же наблюдаются минимальные значения среднегодовой температуры воздуха и максимальные площади распространения морского льда (Стонт и др., 2020).

В годовом ходе температуры воздуха минимум сместился на февраль и составил -0.4°C , что на 1.6°C выше, чем в январе (-2.0°C) прошлого столетия. Причина смещения минимума – изменения циркуляционных условий, приведших к усилению в феврале роли восточной составляющей переноса, вызывающей понижение температуры воздуха. Минимум в годовом ходе ТПМ приходится на февраль и март (2.6°C и 2.7°C соответственно) (Стонт, Демидов, 2015; Stont, Bukanova, 2019). Именно февраль отмечен как самый ледовитый месяц с максимальной средней продолжительностью наблюдения льда 10 дней.

В течение прошлого столетия (1900–2000 гг.) в южной части Балтийского моря (у побережий Германии и Польши) начало ледообразования отмечалось в среднем с 10 по 30 января, самые ранние даты установления льда зафиксированы 1–20 ноября, самые поздние – в середине – конце марта. Среднее количество дней

со льдом не превышало 50 дней, а максимальное составило 122 дня (Jevrejeva et al., 2004). Согласно полученным нами оценкам, для периода 20.05.2004–2019 гг. начало льдообразования отмечается в середине января, при этом самое раннее становление льда отмечено 13 декабря, а самые поздние – 15 февраля; количество дней со льдом составило 22 дня, а максимальное – 63 дня. Таким образом, в начале XXI века в акватории исследования значительно сократилась продолжительность ледового сезона по сравнению с прошлым столетием.

В целом за 2005–2019 гг. ежегодный рост среднегодовой T_a составляет $+0.04^\circ\text{C}/\text{год}$ и ТПМ $+0.01^\circ\text{C}/\text{год}$. Суммарное изменение температуры воздуха и поверхности воды за 15 лет, соответствующее линейному тренду, составляет $+0.6^\circ\text{C}$ и $+0.2^\circ\text{C}$ соответственно. Изменения T_a и ТПМ в пределах временного интервала 2005–2019 гг. характеризуются однонаправленными положительными линейными трендами, различающимися по величине. Рост T_a опережает ТПМ, поскольку водоемы обладают большей термической инерцией, и, соответственно, медленнее реагируют на потепление климата (Стонт и др., 2020).

В связи с устойчивым ростом температуры воздуха и воды закономерно сокращается площадь морского льда, наблюдаемого в районе исследования. Для максимальных площадей ледяного покрова выявлен отрицательный тренд – $112.5 \text{ км}^2/\text{год}$ (Стонт и др., 2020).

По результатам анализа РЛИ и метеоусловий было отмечено, что образование ледяного покрова в Юго-Восточной Балтике происходит через 5–7 дней после установления устойчивых морозов. Такой период определяется как сроком выхолаживания поверхности, обусловленным различием физических свойств атмосферы и водной толщи, так и преобладанием сильных ветров в осенне-зимнее время.

Спутниковые наблюдения позволили количественно оценить региональные эффекты влияния повышения средней температуры воздуха и температуры поверхности моря на формирование ледовых условий юго-восточной части Балтийского моря на фоне глобального потепления.

Выводы

В начале XXI века в акватории исследования значительно сократилась продолжительность ледового сезона по сравнению с прошлым столетием.

Ледяные явления в ЮВ Балтике происходят не каждый год. Из рассмотренных 15 лет (2005–2019 гг.) четыре года (26.7%) образования ледяных полей не отмечалось. Интенсивность льдообразования варьировалась в зависимости от температурных условий.

Льдообразование в юго-восточной части Балтийского моря начинается преимущественно во второй половине января–начале февраля.

Наблюдаемые формы льда в районе исследований имеют начальные формы. Стонные ветра способствуют перемещению ледяных полей в мористую часть района исследований из прибрежной зоны.

Крек Е.В., Стонт Ж.И., Буканова Т.В.

Средняя продолжительность наблюдения морского льда в Юго-Восточной Балтике за период исследований – 22 дня/сезон.

Самый ледовитый месяц – февраль – средняя продолжительность наблюдения льда в феврале составляет 10 дней. Далее идет январь – 7 дней. Средняя продолжительность наблюдения льда в марте составляет 4 дня, в декабре – меньше 1 дня.

Продолжительному наблюдению ледяных полей способствуют среднесуточные температуры воздуха ниже -5°C , наблюдающиеся в течение 5 и более дней.

Вероятность наблюдения морского льда со спутника максимальна в феврале (7% для 1 км зоны от побережья и 10% – для 100-метровой зоны). Для других месяцев составляет: для декабря – 1% и 2%; для января – 2.8% и 8%; для марта – 1.3% и 3% соответственно.

Максимальное распространение льда в Юго-Восточной Балтике за период исследований наблюдалось в феврале 2011 г., когда его площадь составляла 87% от площади района исследований.

В связи с устойчивым ростом температуры воздуха и поверхности воды закономерно сокращается площадь морского льда, наблюдаемого в районе исследований. Для максимальных площадей ледяного покрова выявлен отрицательный тренд $-112.5 \text{ км}^2/\text{год}$, что соответствует $-1688 \text{ км}^2/\text{период исследований}$.

Благодарности. Сбор спутниковой информации, метеорологических данных и данных по ТПМ выполнено в рамках государственного задания ИО РАН № 0149-2019-0013. Анализ распространения площади морского льда по спутниковым данным, анализ метеорологических характеристик и ТПМ выполнен при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калининградской области (грант № 19-45-390012).

Литература

- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. М.: Росгидромет, 2020. 97 с. // http://climatechange.igce.ru/index.php?option=com_docman&Itemid=73&gid=27&lang=ru/ (дата обращения: 22.06.2020).
- Лаврова О.Ю., Каримова С.С., Митягина М.И., Бочарова Т.Ю. Оперативный спутниковый мониторинг акваторий Черного, Балтийского и Каспийского морей в 2009–2010 годах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 168–485.
- Нефть и окружающая среда Калининградской области. М.; Калининград: Янтарный сказ, 2008. Т. II: Море / под ред. В.В. Сивкова, Ю.С. Каджояна, О.Е. Пичужкиной, В.Н. Фельдмана. Калининград: Терра Балтика, 2012. 576 с.
- Стонт Ж.И., Буканова Т.В., Крек Е.В. Изменчивость климатических характеристик прибрежной части Юго-Восточной Балтики в начале XXI века // Вестник БФУ им. Канта. 2020. № 1. С.81–94.
- Стонт Ж.И., Демидов А.Н. Современные тенденции изменчивости температуры воздуха над акваторией Юго-Восточной Балтики // Вестник Московского университета.

- Серия 5. География. 2015. № 2. С. 50–58.
- Askne J., Dierking W.* Sea Ice Monitoring in the Arctic and Baltic Sea Using SAR. In: Barale V., Gade M. (eds) Remote Sensing of the European Seas. Springer, Dordrecht, 2008. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6772-3_29.
- BACC II Author Team. Second assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Regional Climate Studies, 2015. Bolle H.-J., Menenti M., Rasool S. I. (eds), Springer Cham Heidelberg, New York Dordrecht, London, 2015. 501 p.
- Dyrz Cz.* Zlodzenie morza Bałtyckiego w latach 2000–2018: Ice conditions in the Baltic Sea in the years 2000–2018 // *Nautologia*. 2019. No. 156. P. 10–16.
- Girjatowicz J.P.* Ice Conditions on the Southern Baltic Sea Coast // *J. Cold Reg. Eng.* 2011. 25:1–15.
- Jevrejeva S., Drabkin V.V., Kostjukov J., Lebedev A.A., Leppäranta M., Mironov Ye.U., Schmelzer N., Sztobryn M.* Baltic Sea ice seasons in the twentieth century // *Climate Research*. 2004. Vol. 25. P. 217–227.
- Leppäranta M., Myrberg K.* Physical Oceanography of the Baltic Sea // Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 2009. 378 p.
- 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. No. 3 (current). DOI: 10.2205/2019ES000657.
- Stont Zh., Bulycheva E., Bukanova T.* Ice conditions in the South-Eastern Baltic by satellite data and field observations in 2006–2013 // *Materials of the Baltic Sea Science Congress. New Horizons for Baltic Sea Science*. 26–30 August, 2013. Klaipeda, Lithuania, 2013. P. 251.
- Vihma T., Haapala J.* Geophysics of sea ice in the Baltic Sea: A review // *Progress in Oceanography*. 2009. Vol. 80. P. 129–148.
- Wakabayashi H., Hirano K., Nishio F., Aota M., Takahashi S.* A study of sea ice in the Sea of Okhotsk with SAR data // *Polar Record*. 1995. Vol. 31(178). P. 305–314. DOI:10.1017/S0032247400013851.

ICE CONDITIONS IN THE SOUTHEASTERN BALTIC SEA FROM SATELLITE DATA (2004–2019)

Krek E.V., Stont Zh.I., Bukanova T.V.

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences
36, Nakhimovsky prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: ocean_stont@mail.ru, elenka_krek@mail.ru
Submitted 30.07.2020, accepted 28.08.2020*

The Russian part of the Southeastern Baltic Sea has a specific ice regime, which is determined by geographical location and climate conditions. Satellite data are widely used to study the propagation of sea ice. The advantages of radar images (RLI) from satellites equipped with synthetic aperture radar (SAR) are a large area coverage and independence from daylight and cloud-cover conditions. There were 840 SAR images of the Southeastern Baltic Sea analyzed for the period from December 1 to March 31, 2004–2019. It is shown that in modern conditions ice phenomena in the southeast Baltic do not occur every year. It is shown that in recent conditions ice phenomena do not occur every year in the Southeastern Baltic Sea. The revealed spatial and temporal variations in the ice regime are determined by the

consequences of climate changes in the Southeastern part of the Baltic Sea. The intensity of ice formation depend on temperature conditions. Ice formation begins mainly in the second half of January-early February. The average duration of sea ice period is 22 days per season. The probability of observing sea ice from a satellite is maximum in February. Stable ice fields occur when the daily average air temperatures drop below -5°C during 5 or more days. The maximum duration of ice period and maximum ice extent are observed in February.

Keywords: Southeastern Baltic Sea, radar data, climatic conditions, sea ice, ice formation, sea ice extent

Acknowledgments: The collection of satellite information, meteorological data and TPM data was carried out within the framework of the state task of IO RAS No. 0149-2019-0013. The analysis of the sea ice area distribution based on satellite data and the analysis of meteorological characteristics was carried out with the financial support of the Russian Foundation for basic research and the government of the Kaliningrad region (grant no.19-45-390012).

References

- A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2019, http://climatechange.igce.ru/index.php?option=com_docman&Itemid=73&gid=27&lang=ru, (last accessed in 24.04.2020).
- Askne J. and Dierking W. Sea Ice Monitoring in the Arctic and Baltic Sea Using SAR. In: Barale V., Gade M. (eds) Remote Sensing of the European Seas. Springer, Dordrecht, 2008, https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6772-3_29.
- BACC II Author Team. Second assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Regional Climate Studies, 2015. Bolle H.-J., Menenti M., Rasool S.I. (eds.), Springer Cham Heidelberg, New York, Dordrecht, London, 501 p.
- Baltic Marine Environment Protection Commission, <https://helcom.fi/baltic-sea-trends/>, (last accessed in 24.04.2020).
- Chubarenko I.P. and Chubarenko B.V. General water dynamics of the Vistula Lagoon. *Environmental and Chemical Physics*, 2002, No. 4, pp. 213–217.
- Dyrzc Cz. Zlodzenie morza Bałtyckiego w latach 2000–2018. Ice conditions in the Baltic Sea in the years 2000–2018. *Nautologia*, 2019, No. 156, pp. 10–16.
- Girjatowicz J.P. Ice Conditions on the Southern Baltic Sea Coast. *J. Cold Reg. Eng.*, 2011, 25:1–15.
- Jevrejeva S., Drabkin V.V., Kostjukov J., Lebedev A.A., Leppäranta M., Mironov Ye.U., Schmelzer N., and Sztobryn M. Baltic Sea ice seasons in the twentieth century. *Climate Research*, 2004, Vol. 25, pp. 217–227.
- Lavrova O.Yu., Karimova S.S., Mityagina M.I., and Bocharova T.Yu. Operational satellite monitoring of the black, Baltic and Caspian seas in 2009–2010. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2010, Vol. 7, No. 3, pp. 168–485.
- Leppäranta M. and Myrberg K. Physical Oceanography of the Baltic Sea. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 2009, 378 p.
- Oil and environment of the Kaliningrad Region. Moscow; Kaliningrad: Yantarny skaz, 2008. Vol. II: The Sea. Ed. by V.V. Sivkov, Yu.S. Kadzhoyan, O.E. Pichuzhkina, V.N. Feldman. Kaliningrad: Terra Baltica, 2012, 576 p.

- Stont Zh.I., Bukanova T.V., and Krek E.V.* Variability of climatic characteristics over the South-East Baltic coastal waters in the early XXI century. *Vestnik BFU im. I. Kanta*, 2020, No. 1, pp. 81–94.
- Stont Zh.I. and 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, No. 3 (current), doi: 10.2205/2019ES000657.
- Stont Zh., Bulycheva E., and Bukanova T.* Ice conditions in the South-Eastern Baltic by satellite data and field observations in 2006–2013. *Materials of the Baltic Sea Science Congress. New Horizons for Baltic Sea Science. 26–30 August 2013, Klaipeda, Lithuania*, pp. 251.
- Stont Zh.I. and Demidov A.N.* Sovremennye tendencii izmenchivosti temperatury vozduha nad akvatoriej YUgo-Vostochnoj Baltiki. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*, 2015, No. 2, pp. 50–58.
- Vihma T. and Haapala J.* Geophysics of sea ice in the Baltic Sea: A review. *Progress in Oceanography*, 2009, Vol. 80, pp. 129–148.
- Wakabayashi H., Hirano K., Nishio F., Aota M. and Takahashi S.* A study of sea ice in the Sea of Okhotsk with SAR data. *Polar Record*, 1995, Vol. 31(178), pp. 305–314, doi:10.1017/S0032247400013851.