

Временные особенности проявлений субмезомасштабных вихревых образований в прибрежной зоне Калининградской области по результатам спутникового мониторинга 2014–2024 гг.

Е. В. Краюшкин

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: box_evk@mail.ru*

Представлены результаты многолетнего спутникового мониторинга прибрежной зоны юго-восточной части Балтийского моря в летние месяцы за период 2014–2024 гг. Основная задача исследования заключалась в определении многолетних особенностей проявлений субмезомасштабных вихревых процессов на поверхности моря, а также оценка применимости спутниковых данных в оптической и радиолокационной части электромагнитного спектра. За время изучения было проанализировано в общей сложности 1413 спутниковых изображений высокого разрешения (713 изображений в видимом диапазоне и 700 — в радиодиапазоне). По результатам исследования был составлен массив изображений со всеми проявлениями вихревых процессов в регионе, а также показано, что проявления процессов вихревой динамики отображаются на каждом втором безоблачном спутниковом снимке в оптическом диапазоне. При этом из всей выборки спутниковых изображений лишь половина доступна к анализу на предмет идентификации вихревых процессов, в то время как вторая половина изображений непригодна из-за наличия обильной облачности. По результатам мониторинга региона исследования по спутниковым изображениям в радиолокационном спектре было показано, что лишь на 16 % изображений были идентифицированы вихревые процессы на поверхности моря. При этом для идентификации вихревых процессов доступны все спутниковые изображения в радиолокационной части электромагнитного спектра. Было также показано, что на первые четыре тёплых месяца (май, июнь, июль и август) в среднем приходится одинаковое количество проявлений вихревых процессов (60, 75, 58, 53 соответственно), а в сентябре вихревая активность существенно падает (всего 28 проявлений за 10 лет мониторинга). Как правило, спутниковые изображения в оптическом диапазоне электромагнитного спектра остаются более информативным источником мониторинга вихревой активности на поверхности моря.

Ключевые слова: Балтийское море, субмезомасштабные вихри, спутниковый мониторинг

Одобрена к печати: 28.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-212-220

Введение

Субмезомасштабные вихри (вихри, радиус которых меньше бароклинного радиуса деформации Россби) представляют собой сложный комплекс гидродинамических процессов, определяющих многие природные процессы, начиная от переноса взвешенных субстанций по акватории моря, их аккумуляции и перераспределения в пространстве, формирования особенностей динамической структуры течений, а также влияния на количество и таксономическую структуру фитопланктона в акватории.

Субмезомасштабные вихревые процессы в прибрежной зоне обладают широким масштабом пространственной и временной изменчивости, что существенно осложняет задачу их изучения и прогнозирования как во времени, так и по пространству. Основным методом исследования субмезомасштабных вихревых процессов в морях по-прежнему остаётся мониторинг с использованием данных дистанционного зондирования Земли из космоса.

Район юго-восточной части Балтийского моря известен своей вихревой активностью. Субмезомасштабные вихри, а также их разновидности в форме грибовидных диполей регулярно наблюдаются как в Гданьском зал., так и в акватории северной Самбийского п-ова (Гинзбург и др., 2015; Гурова, 2012; Каримова и др., 2011; Краюшкин и др., 2020, 2022;

Gurova, Chubarenko, 2012; Kostianoy et al., 2018; Lavrova et al., 2018). Механизмы образования субмезомасштабных вихревых структур многообразны. К основным из них можно отнести: ветровой импульс, неоднородности атмосферного потока, сдвиговую неустойчивость течений, речной сток, взаимодействие вихрей разных масштабов и их диссипацию во времени, взаимодействие течений с мелкомасштабными особенностями береговой линии (обтекание мысов и бухт) (Гинзбург и др., 2015; Зацепин и др., 2011; Костяной и др., 2010; Краюшкин и др., 2020; Лаврова и др., 2011, 2015).

Регион Юго-Восточной Балтики, где проводился долгопериодный спутниковый мониторинг, характеризуется отсутствием постоянных установившихся вдольбереговых течений, а основным фактором, определяющим динамику вод в данной области, представляется атмосферное воздействие (Zhurbas et al., 2006, 2019). При этом береговая линия характеризуется наличием нескольких выдающихся в море мысов (м. Гвардейский и м. Таран), при обтекании которых вдольбереговой поток способен формировать субмезомасштабные вихревые структуры (Елкин, Зацепин, 2013; Зацепин и др., 2011). Благоприятной особенностью данного региона для проведения мониторинга проявлений субмезомасштабных вихревых структур выступает обильное цветение фитопланктона в летнее время. Наличие активного процесса цветения фитопланктона и, как следствие, образования на поверхности моря биогенных плёнок создаёт благоприятные условия для проведения спутникового мониторинга как в области видимого диапазона, так и в области радиолокационной части электромагнитного спектра.

В настоящей работе представлены результаты мониторинга проявлений субмезомасштабных вихревых образований по данным дистанционного зондирования Земли из космоса с использованием сенсоров высокого разрешения за период 2014–2024 гг.

Данные и методы

Работа по статистическому исследованию проявлений субмезомасштабных вихревых образований проводилась в регионе юго-восточной части Балтийского моря в прибрежной зоне Калининградской обл. На *рис. 1* (см. с. 214) представлен район исследования и рабочая область долгопериодного мониторинга проявлений субмезомасштабных вихревых образований в информационной системе STS (*англ.* See the Sea).

Работа по статистическому анализу проявлений вихревых образований проводилась исключительно в тёплое время года (в период с мая по сентябрь включительно в каждом году). Летний тёплый период в юго-восточной части Балтийского моря характеризуется обильным цветением фитопланктона. Как известно (Лаврова и др., 2011), именно процесс цветения фитопланктона создаёт яркие цветовые оптические неоднородности на поверхности воды, позволяя идентифицировать динамические процессы вихреобразования по цветосинтезированным спутниковым изображениям, и тонкую поверхностную плёнку, за счёт которой можно наблюдать неоднородности шероховатости поверхности моря по радиолокационным спутниковым снимкам. Наиболее интересующие районы представляли собой следующие области: районы м. Таран и м. Гвардейский, Куршская коса, регион выноса вод из Калининградского зал. и открытая часть Гданьского зал.

В качестве основной информации в работе использовались спутниковые данные доступных сенсоров высокого разрешения, полученные за весь исследуемый период 2014–2024 гг.: ETM+ (*англ.* Enhanced Thematic Mapper Plus) Landsat-7 (пространственное разрешение в точке — 30 м, время мониторинга — май 2014 г. — настоящее время (н. в.) в видимом диапазоне, OLI (*англ.* Operational Land Imager) Landsat-8 (пространственное разрешение в точке — 30 м, время мониторинга — май 2014 г. — н. в.) в видимом диапазоне, MSI (*англ.* Multispectral Instrument) Sentinel-2A, -2B (пространственное разрешение в точке — 10 м, время мониторинга — август 2015 г. — н. в. для MSI Sentinel-2A и май 2018 г. — н. в. для MSI Sentinel-2B) в видимом диапазоне, а также C-SAR (*англ.* C-band Synthetic Aperture Radar) Sentinel-1A, -1B (пространственное разрешение в точке — 10 м, время мониторинга — июнь 2015 г. — н. в.)

в радиолокационном диапазоне электромагнитного спектра. В общей сложности за время проведения мониторинга исследуемой области было получено и проанализировано 1413 спутниковых изображений высокого разрешения.

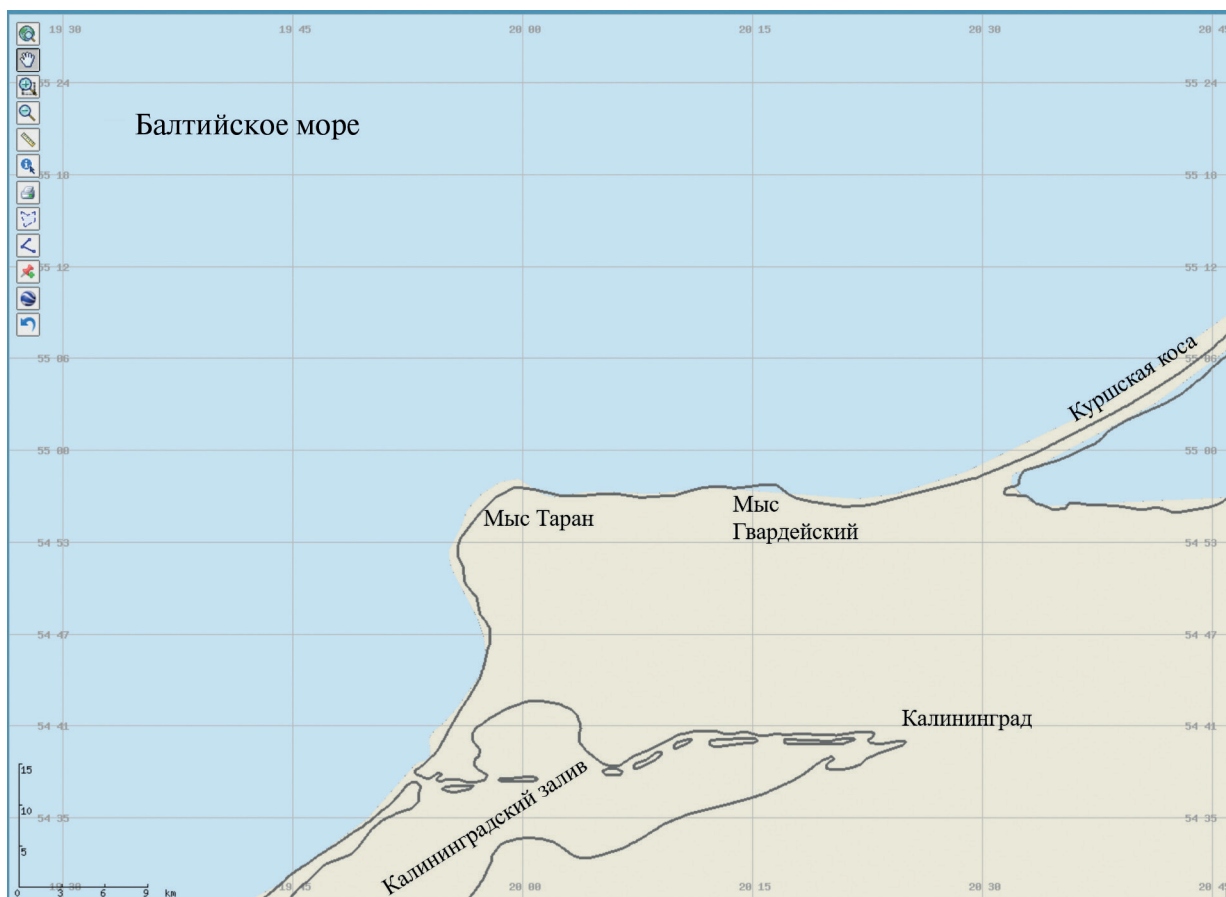


Рис. 1. Регион исследования и рабочая область мониторинга в информационной системе See the Sea

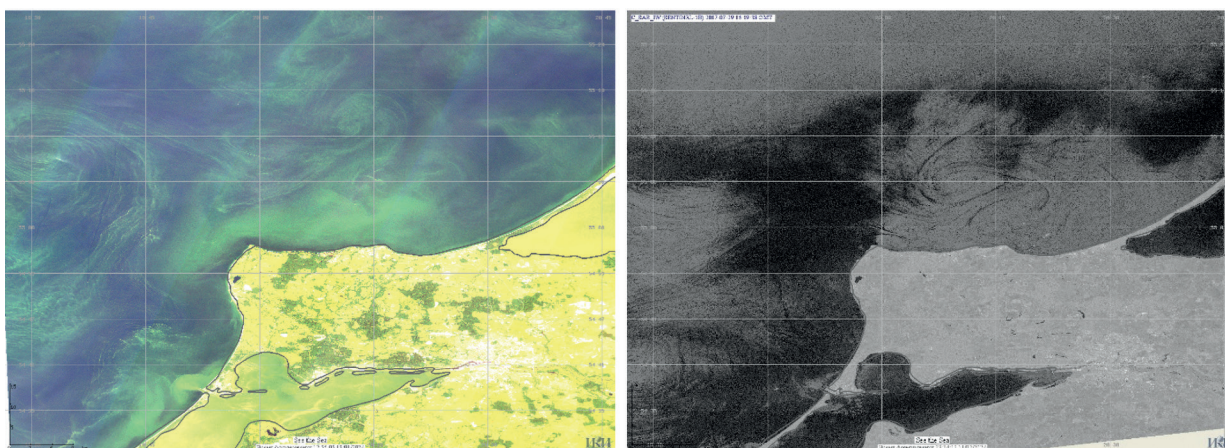


Рис. 2. Пример проявления вихревых процессов в системе STS. Спутниковое изображение MSI Sentinel-2A от 7 августа 2015 г. (слева), C-SAR Sentinel-1 от 29 июля 2017 г. (справа)

Получение и обработка данных спутникового зондирования осуществлялась в информационной системе STS (Лаврова и др., 2019). Наличие вихревого процесса в акватории определялось визуальными методами (рис. 2).

Статистический анализ проявлений вихревых процессов

На рис. 3 представлена помесечная статистика наблюдаемых проявлений вихревых образований в период май – сентябрь включительно за 2014–2024 гг.

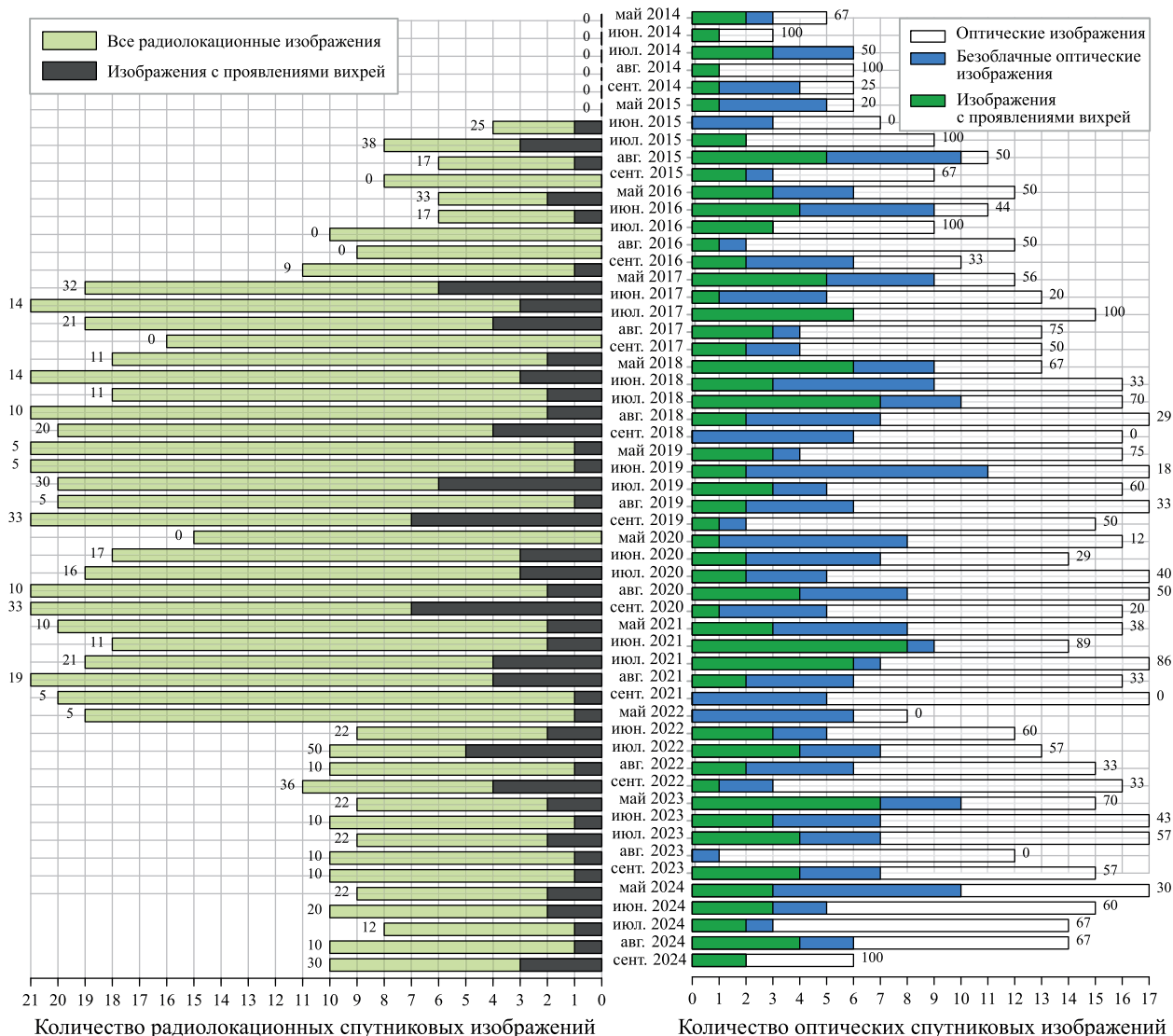


Рис. 3. Статистическое распределение проявлений вихревых процессов по данным спутниковых изображений высокого разрешения. Гистограмма изображений в радиолокационной части спектра (слева), в оптическом диапазоне (справа)

За 2014–2024 гг. было проанализировано в общей сложности 1413 спутниковых изображений в исследуемом регионе (713 изображений в видимом диапазоне и 700 — в радиодиапазоне электромагнитного спектра). Спутниковые изображения в оптическом диапазоне разделялись на три группы: общее количество спутниковых изображений, количество изображений без облачности или с наличием небольшой доли облачности, которая не мешала визуальной идентификации вихревых процессов на поверхности моря, а также спутниковые снимки с проявлениями вихревых процессов. Спутниковые изображения, полученные в радиодиапазоне, разделялись на две группы: общее количество спутниковых изображений и количество изображений с проявлениями вихревых процессов на поверхности моря. Для каждого месяца была рассчитана доля (в %) спутниковых изображений с проявлениями вихревых процессов от общего числа безоблачных спутниковых снимков.

По результатам исследования было показано, что в среднем вихревые процессы в юго-восточной части Балтийского моря проявляются на каждом втором безоблачном спутниковом изображении в оптическом диапазоне (средняя расчётная величина составляет 50 % по всей выборке данных). Однако, как можно заметить по *рис. 3*, распределение как общего числа безоблачных изображений, так и изображений с проявлениями неоднородно как по годам, так и внутри каждого года. Например, в июне 2016 г. вихревые процессы проявились на всех безоблачных спутниковых снимках, в то время как в мае 2022 г. ни на одном безоблачном изображении их проявлений не было. Также необходимо заметить, что в среднем лишь 44 % спутниковых изображений в оптическом диапазоне в целом могут быть использованы для анализа наличия проявлений вихревых процессов, т. е. лишь каждое второе изображение безоблачно, что существенно ограничивает возможности спутникового мониторинга в данном районе в оптическом диапазоне.

В общей сложности в оптическом диапазоне было выбрано 148 спутниковых изображений высокого разрешения, на которых идентифицировались вихревые процессы в юго-восточной части Балтийского моря за выбранный период.

В свою очередь статистический анализ доступных спутниковых изображений в радиолокационной части электромагнитного спектра имеет большие преимущества ввиду того, что прохождению радиолокационного сигнала не мешает облачность, а следовательно все доступные изображения могут быть проанализированы на предмет обнаружения вихревых процессов. С другой стороны, как показал статистический анализ, вихревые процессы в исследуемой акватории проявляются на радиолокационных изображениях лишь в 16 % случаев (проявления вихревых процессов обнаруживались примерно на каждом пятом изображении), что существенно реже обнаружения процесса по данным спутниковых изображений в оптическом диапазоне. Этот факт объясняется тем, что вихревые образования на поверхности моря, как правило, отображаются за счёт поверхностно-активных плёнок, которые в свою очередь разрушаются при скорости ветра более 5 м/с (Лаврова и др., 2011). Регион юго-восточной части Балтийского моря даже в летнее время характеризуется активной атмосферной динамикой, которая зачастую разрушает поверхностные проявления вихревых процессов.

В общей сложности в радиолокационном диапазоне было выбрано 109 спутниковых изображений высокого разрешения, на которых идентифицировались вихревые процессы в юго-восточной части Балтийского моря за выбранный период времени.

На *рис. 4* представлено распределение спутниковых изображений в период 2014–2024 гг. в среднем по каждому исследуемому месяцу.

По приведённому распределению показано, что наиболее активными месяцами, в которых наблюдается вихревая активность, стали май (60 проявлений), июль (57) и июль (58).

В августе вихревая активность начинает постепенно уменьшаться — 53 проявления, а в сентябре было идентифицировано всего 28 проявлений. Также примечательно, что в мае и июле наиболее информативно использовать оптические спутниковые изображения для обнаружения вихревой динамики — количество проявлений по оптическим изображениям в 2–3 раза больше проявлений в радиолокационном спектре.

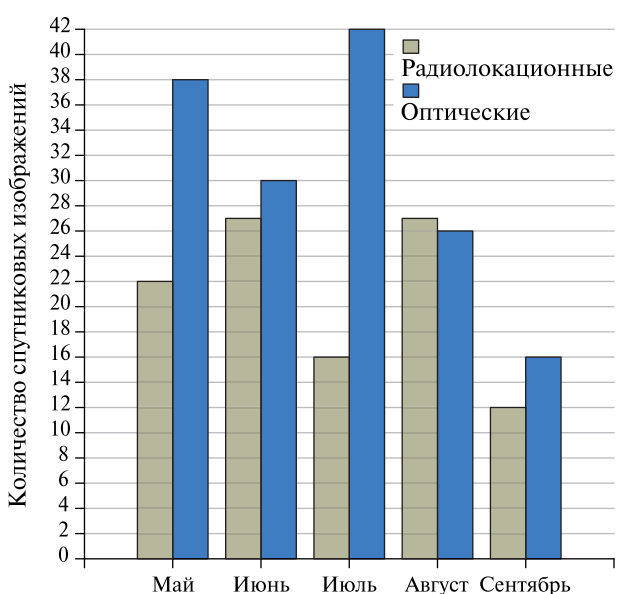


Рис. 4. Статистическое распределение проявлений вихревых процессов по данным спутниковых изображений высокого разрешения в среднем по каждому месяцу за период 2014–2024 гг.

В то же время в июне, августе и сентябре информативность использования обоих типов спутниковых изображений практически одинаковая. За 10-летний период мониторинга в августе оказалось более информативно применять радиолокационные спутниковые изображения.

Заключение

Исследование вихревых процессов в морях по-прежнему остаётся актуальной задачей современной океанологии. Субмезомасштабные вихревые процессы в юго-восточной части Балтийского моря играют важную роль в формировании общей динамики вод региона, а также оказывают влияние на многие процессы перераспределения различных субстанций по акватории моря. Основным источником информации для наблюдения за вихревой динамикой в прибрежной зоне является долговременный спутниковый мониторинг.

По результатам статистического анализа спутниковых изображений высокого разрешения в оптической и радиолокационной части электромагнитного спектра было проанализировано 1413 спутниковых изображений за период 2014–2024 гг. Было показано, что проявления процессов вихревой динамики отображаются на каждом втором безоблачном спутниковом снимке в оптическом диапазоне. При этом по данным всей выборки спутниковых изображений лишь половина из них доступна к анализу на предмет идентификации вихревых процессов, в то время как вторая половина изображений непригодна из-за наличия обильной облачности. По результатам мониторинга региона исследования по спутниковым изображениям в радиолокационном спектре показано, что лишь на 16 % изображений были идентифицированы вихревые процессы на поверхности моря. При этом для идентификации вихревых процессов доступны все спутниковые изображения в радиолокационной части электромагнитного спектра.

Было показано, что на первые четыре тёплых месяца (май, июнь, июль и август) в среднем приходится одинаковое количество проявлений вихревых процессов (60, 75, 58, 53 соответственно), а в сентябре вихревая активность существенно падает (всего 28 проявлений за 10 лет мониторинга). Как правило, спутниковые изображения в оптическом диапазоне электромагнитного спектра остаются более информативным источником мониторинга вихревой активности на поверхности моря.

Обработка и анализ спутниковых данных проводились с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» с помощью инструментария информационной системы See the Sea.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-27-00269, <https://rscf.ru/project/24-27-00269>.

Литература

1. Гинзбург А. И., Булычева Е. В., Костяной А. Г., Соловьев Д. М. Вихревая динамика в Юго-Восточной Балтике по данным спутниковой радиолокации // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 6. С. 893–902. DOI: 10.7868/S0030157415060064.
2. Гурова Е. С. О формировании и динамике вихря у побережья Юго-Восточной Балтики по данным дистанционного зондирования // *Вестн. Балтийского федер. ун-та им. И. Канта*. 2012. Вып. 1. С. 16–21.
3. Елкин Д. Н., Зацепин А. Г. Лабораторное исследование механизма периодического вихреобразования за мысами в прибрежной зоне моря // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 1. С. 29–41. DOI: 10.7868/S0030157412050061.
4. Зацепин А. Г., Баранов В. И., Кондратов А. А., Корж А. О., Кременецкий В. В., Островский А. Г., Соловьев Д. М. Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 4. С. 592–605.

5. Каримова С. С., Лаврова О. Ю., Соловьев Д. М. Наблюдение вихревых структур Балтийского моря с помощью радиолокационных и радиометрических спутниковых данных // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 5. С. 15–23.
6. Костяной А. Г., Гинзбург А. И., Шеремет Н. А., Лаврова О. Ю., Митягина М. И. Мелкомасштабные вихри Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 248–259.
7. Краюшкин Е. В., Назирова К. Р., Лаврова О. Ю., Князев Н. А. Субмезомасштабный циклонический вихрь за мысом Гвардейский в Юго-Восточной Балтике: спутниковые наблюдения и подспутниковые измерения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 290–299. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-290-299.
8. Краюшкин Е. В., Лаврова О. Ю., Назирова К. Р., Елизаров Д. А. Трёхмерная структура и динамика вод в прибрежных вихревых диполях в юго-восточной части Балтийского моря: результаты спутниковых наблюдений и подспутниковых измерений летом 2021 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. С. 265–279. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-265-279.
9. Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Митягина М. И., Гинзбург А. И., Шеремет Н. А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 480 с.
10. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Сабинин К. Д., Серебряный А. Н. Изучение гидродинамических процессов в шельфовой зоне на основе спутниковой информации и данных подспутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 98–129.
11. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Уваров И. А., Лупян Е. А. Текущие возможности и опыт использования информационной системы See the Sea для изучения и мониторинга явлений и процессов на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 266–287. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
12. Gurova E., Chubarenko B. Remote-sensing observations of coastal sub-mesoscale eddies in the south-eastern Baltic // Oceanologia. 2012. V. 54. Iss. 4. P. 631–654. DOI: 10.5697/oc.54-4.631.
13. Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Lavrova O. Y., Mityagina M. I. Satellite remote sensing of submesoscale eddies in the Russian Seas // The Ocean in Motion. Circulation, Waves, Polar Oceanography / eds. Velarde M., Tarakanov R., Marchenko A. Springer-Verlag, 2018. P. 397–413. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_24.
14. Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V., Nazirova K. R., Strochkov A. Ya. Vortex structures in the Southeastern Baltic Sea: satellite observations and concurrent measurements // Proc. SPIE. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2018. V. 10784. Article 1078404. DOI: 10.1117/12.2325463.
15. Zhurbas V., Oh I. S., Park T. Formation and decay of a longshore baroclinic jet associated with transient coastal upwelling and downwelling: A numerical study with applications to the Baltic Sea // J. Geophysical Research: Oceans. 2006. V. 111. Article C04014. DOI: 10.1029/2005JC003079.
16. Zhurbas V., Väli G., Kostianoy A., Lavrova O. Hindcast of the mesoscale eddy field in the Southeastern Baltic Sea: Model output vs satellite imagery // Russian J. Earth Sciences. 2019. V. 19. Article ES4006. DOI: 10.2205/2019ES000672.

Temporal features of submesoscale eddy manifestations in the coastal zone of Kaliningrad Region, according to the results of satellite monitoring in 2014–2024

E. V. Krayushkin

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mails: box_evk@mail.ru

The article presents the results of long-term satellite monitoring of the coastal zone of the southeastern Baltic Sea in summer months for the period 2014–2024. The main objective of this study was to determine the long-term features of manifestations of submesoscale eddy processes on the sea surface, as well as to assess the applicability of satellite data in the optical and radar parts of the electromagnetic

spectrum. During the study, a total of 1413 high-resolution satellite images were analyzed (713 images in the visible range and 700 images in the radio range). Based on the results, an array of images with all manifestations of eddy processes in the region was compiled, and it was shown that manifestations of eddy dynamics processes were displayed on every second cloudless optical image. At the same time, of the entire number of analyzed satellite images, only half were available for identification of eddy processes, while the other half were unsuitable due to the presence of abundant cloudiness. The results of monitoring the study region using radar images showed that eddy processes at the sea surface were identified only in 16 % of the images. At the same time, all radar images were available for identifying eddy processes. It was also shown that the first four warm months (May, June, July and August) had on average the same number of eddy manifestations (60, 75, 58, 53, respectively), and in September, eddy activity dropped significantly (only 28 manifestations over 10 years of monitoring). As a rule, optical satellite images remain a more informative source for monitoring eddy activity at the sea surface.

Keywords: Baltic Sea, submesoscale eddies, remote sensing

Accepted: 28.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-212-220

References

1. Ginzburg A. I., Bulycheva E. V., Kostianoy A. G., Solovyov D. M., Vortex dynamics in the Southeastern Baltic Sea from satellite radar data, *Oceanology*, 2015, V. 55, No. 6, pp. 805–813, DOI: 10.1134/S0001437015060065.
2. Gurova E. S., On the formation and dynamics of an eddy at the coast of southeast Baltic based on remote sensing data, *Vestnik Baltiiskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta*, 2012, Iss. 1, pp. 16–21 (in Russian).
3. Elkin D. N., Zatsepin A. G., Laboratory investigation of the mechanism of the periodic eddy formation behind capes in a coastal sea, *Oceanology*, 2013, V. 53, No. 1, pp. 24–35, DOI: 10.1134/S00014370120500625.
4. Zatsepin A. G., Baranov V. I., Kondrashov A. A. et al., Submesoscale eddies at the caucasian Black Sea shelf and the mechanisms of their generation, *Oceanology*, 2011, V. 51, No. 4, pp. 554–567, DOI: 10.1134/S0001437011040205.
5. Karimova S. S., Lavrova O. Yu., Solov'ev D. M., Observation of eddy structures in the Baltic Sea with the use of radiolocation and radiometric satellite data, *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2012, V. 48, No. 9, pp. 1006–1013, DOI: 10.1134/S0001433812090071.
6. Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Small-scale eddies in the Black Sea, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, V. 7, No. 1, pp. 248–259 (in Russian).
7. Krayushkin E. V., Nazirova K. R., Lavrova O. Yu., Knyazev N. A., Submesoscale cyclonic eddy behind Cape Gvardeisky in the southeastern Baltic Sea: satellite observation and concurrent measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 4, pp. 290–299 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-290-299.
8. Krayushkin E. V., Lavrova O. Yu., Nazirova K. R., Elizarov D. A., Three-dimensional structure and dynamics of waters in coastal eddy dipoles in the southeastern Baltic Sea: results of concurrent satellite and field measurements in summer 2021, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 6, pp. 265–279 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-265-279.
9. Lavrova O. Yu., Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* (Complex satellite monitoring of the Russian seas), Moscow: IKI RAN, 2011, 480 p. (in Russian).
10. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Sabinin K. D., Serebryany A. N., Study of hydrodynamic processes in the shelf zone on the basis of satellite information and data from subsatellite measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, V. 12, No. 5, pp. 98–129 (in Russian).
11. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Uvarov I. A., Loupian E. A., Current capabilities and experience of using the See the Sea information system for studying and monitoring phenomena and processes on the sea surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 3, pp. 266–287 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
12. Gurova E., Chubarenko B., Remote-sensing observations of coastal sub-mesoscale eddies in the South-Eastern Baltic, *Oceanologia*, 2012, V. 54, Iss. 4, pp. 631–654, DOI: 10.5697/oc.54-4.631.
13. Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Lavrova O. Y., Mityagina M. I., Satellite remote sensing of submesoscale eddies in the Russian Seas, In: *The Ocean in Motion. Circulation, Waves, Polar Oceanography*,

- Velarde M., Tarakanov R., Marchenko A. (eds.), Springer-Verlag, 2018, pp. 397–413, https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_24.
14. Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V., Nazirova K. R., Stochkov A. Ya., Vortex structures in the Southeastern Baltic Sea: satellite observations and concurrent measurements, *Proc. SPIE. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*, 2018, V. 10784, Article 1078404, DOI: 10.1117/12.2325463.
 15. Zhurbas V., Oh I. S., Park T., Formation and decay of a longshore baroclinic jet associated with transient coastal upwelling and downwelling: A numerical study with applications to the Baltic Sea, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2006, V. 111, Article C04014, DOI: 10.1029/2005JC003079.
 16. Zhurbas V., Väli G., Kostianoy A., Lavrova O., Hindcast of the mesoscale eddy field in the Southeastern Baltic Sea: Model output vs satellite imagery, *Russian J. Earth Sciences*, 2019, V. 19, Article ES4006, DOI: 10.2205/2019ES000672.