

Основные районы и классификация проявлений субмезомасштабных вихревых образований в прибрежной зоне Калининградской области по результатам спутникового мониторинга 2014–2024 гг.

Е. В. Краюшкин, Н. А. Князев

*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 2014–2024 гг. Главная задача исследования заключалась в установлении основных районов вихреобразования, а также определении отличительных особенностей вихревой динамики в отдельных географических районах исследуемой акватории. За период исследования было проанализировано в общей сложности 1413 спутниковых изображений высокого разрешения (713 изображений в видимом диапазоне и 700 изображений в радиодиапазоне). В работе предложена классификация вихревых образований, наблюдаемых в прибрежной зоне, включающая в себя восемь классов вихревых процессов, отличающихся как по региону встречаемости, условиям образования, так и по морфометрическим признакам. Представлены яркие примеры проявления вихревой активности в открытой части моря, где процесс вихреобразования происходит исключительно под влиянием атмосферных условий. Далее рассмотрен широкий массив спутниковых изображений, на которых идентифицируются вихревые процессы в прибрежной зоне, где процесс вихреобразования происходит с учётом взаимодействия прибрежной структуры течений с береговой линией. Выделены и описаны ситуации возникновения вихревых процессов за выдающимися мысами Таран и Гвардейский, а также предложено разделение вихрей на четыре класса в зависимости от характера прибрежной циркуляции и региона проявления. Рассмотрены случаи проявления субмезомасштабных вихрей вблизи относительно ровных участков береговой линии, а также описаны их морфометрические характеристики. Показаны случаи образования вихревых диполей на выносе вод из Калининградского залива. Результаты работы обобщены и предложена общая классификация форм вихревой активности в прибрежной зоне Калининградской области.

Ключевые слова: Балтийское море, субмезомасштабные вихри, спутниковый мониторинг

Одобрена к печати: 08.10.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-357-369

Введение

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 заливе, так и в акватории северней Самбийского полуострова (Гинзбург и др., 2015; Гурова, 2012; Каримова и др., 2011; Краюшкин, 2025; 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, сдвиговая неустойчивость течений, речной сток, взаимодействие вихрей разных масштабов и их диссипация во времени, взаимодействие течений с мелкомасштабными особенностями береговой линии (обтекание мысов и бухт) (Гинзбург и др., 2015; Елкин, Зацепин, 2013; Зацепин и др., 2011; Костяной и др., 2010; Краюшкин и др., 2020; Лаврова и др., 2011, 2015).

Одной из важных задач исследования вихревых образований в прибрежной части моря, и в частности в юго-восточной части Балтийского моря, является необходимость прогнозирования их возникновения в будущем, а также получения оценок по их пространственным масштабам и срокам жизни. В настоящее время вопрос прогнозирования появления в акватории прибрежной зоны субмезомасштабных вихревых образований решается в основном

средствами численного моделирования (Zhurbas et al., 2006, 2019). Однако, ввиду сложной природы вихревых процессов, необходимо привлечение и других возможных способов прогноза. В связи с появлением и широкой доступностью для научных исследований данных спутникового зондирования высокого пространственного разрешения удалось серьёзно продвинуться в изучении субмезомасштабных процессов (Лаврова и др., 2011), а также появилась возможность провести обобщение многолетних накопленных массивов спутниковых данных с проявлениями вихревой активности (Краюшкин, 2025). В настоящей работе представлены результаты мониторинга проявлений субмезомасштабных вихревых образований в юго-восточной части Балтийского моря в 2014–2024 гг. по данным дистанционного зондирования Земли из космоса с использованием сенсоров высокого разрешения с целью определения основных районов формирования субмезомасштабных вихревых процессов, их отличительных форм и пространственных масштабов, а также сроков жизни в зависимости от географических особенностей региона проявлений. В работе сделана попытка классифицировать характерные проявления вихревых процессов.

Регион исследования и спутниковые данные

Исследование характерных проявлений субмезомасштабных вихревых образований проводилось в регионе юго-восточной части Балтийского моря в прибрежной зоне Калининградской области. На *рис. 1* показан район исследования, а также указаны акватории с наиболее частым проявлением вихревых процессов.

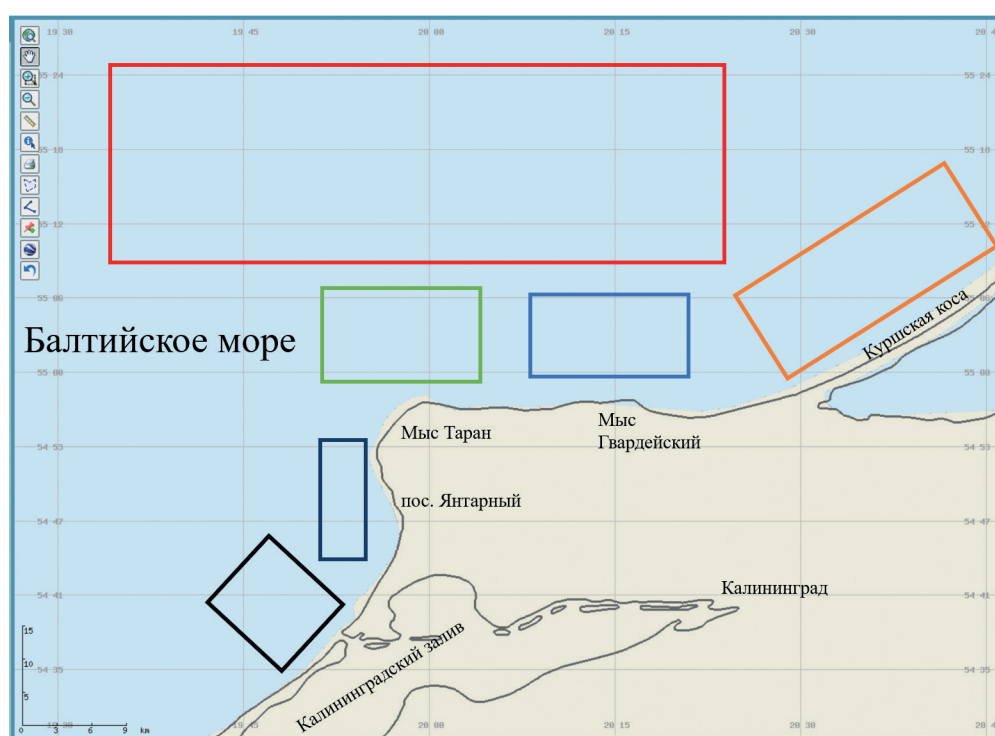


Рис. 1. Схема региона исследования с выделенными участками акватории наиболее частого проявления вихревых процессов

В ходе проведения работ наибольшее внимание было уделено следующим регионам в районе прибрежной зоны Калининградской области: открытая часть Балтийского моря (красный прямоугольник), акватория Куршской косы (оранжевый прямоугольник), акватория перед мысом Гвардейский (голубой прямоугольник), акватория мыса Таран (зелёный прямоугольник), район пляжа у посёлка Янтарный (тёмно-синий прямоугольник), а также

район выноса вод из Калининградского залива (чёрный прямоугольник). Каждый из рассмотренных регионов имеет как свои отличительные особенности географического положения, так и характерные динамические особенности поверхностной циркуляции, определяющие процесс образования вихревых процессов. Формирование субмезомасштабных вихревых процессов в области открытого моря происходит без влияния береговой линии и морского дна, а также зависит от разнообразия атмосферных воздействий на поверхность моря. С другой стороны, отличительно, что данный регион не имеет и установившейся структуры поверхностных течений. Формирование же вихревых процессов в прибрежной зоне моря подвержено влиянию как береговой линии, так и морского дна, а также происходит под действием чередующихся ситуаций характерной структуры прибрежной циркуляции вод (апвеллинговый или даунвеллинговый тип вдольбереговых течений в зависимости от преобладающего характера атмосферного воздействия на акваторию моря).

Очертания береговой линии моря в Калининградской области также вносит свои особенности в формирование вихревых процессов, так, за мысами Таран и Гвардейский формирование субмезомасштабных структур определяется присутствием выдающегося в море мыса, обтекание которого прибрежным течением формирует особые формы вихревых образований. В то время как на участках акватории перед относительно ровными частями береговой линии (Куршская коса и район пляжа у посёлка Янтарный) формируются отличные формы вихревых образований. Отдельным регионом исследуемой области является район выноса вод из Калининградского залива, где формирование вихревых образований происходит во многом за счёт динамического влияния притока вод из залива.

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. – наст. время) в видимом диапазоне, OLI (*англ.* Operational Land Imager) Landsat-8 (пространственное разрешение в точке 30 м, время мониторинга май 2014 г. – наст. время) в видимом диапазоне, MSI (*англ.* Multispectral Instrument) Sentinel-2A, -2B (пространственное разрешение в точке 10 м, время мониторинга август 2015 г. – наст. время для MSI Sentinel-2A и май 2018 г. – наст. время 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. – наст. время) в радиолокационном диапазоне электромагнитного спектра. В общей сложности за время проведения мониторинга исследуемой области было получено и проанализировано 1413 спутниковых изображений высокого разрешения.

Получение и обработка данных спутникового зондирования осуществлялись в информационной системе STS (*англ.* See the Sea) (Лаврова и др., 2019). Наличие вихревого процесса в акватории определялось визуальными методами.

Характерные формы и отличительные особенности проявлений вихревых процессов

За период 2014–2024 гг. было проанализировано в общей сложности 1413 спутниковых изображений в исследуемом регионе (713 изображений в видимом диапазоне и 700 изображений в радиодиапазоне электромагнитного спектра) в тёплые месяцы май–сентябрь. Согласно работе (Краюшкин, 2025), было показано, что проявления вихревых процессов в исследуемом регионе наблюдаются на 151 спутниковом изображении в оптическом диапазоне и на 112 спутниковых изображениях в радиолокационной части электромагнитного спектра. Далее опишем характерные формы и отличительные особенности проявлений вихревых процессов в исследуемой акватории.

На *рис. 2* (см. с. 360) представлен характерный тип проявлений вихревых процессов в юго-восточной части Балтийского моря при огибании прибрежным течением выдающегося в море мыса Таран.

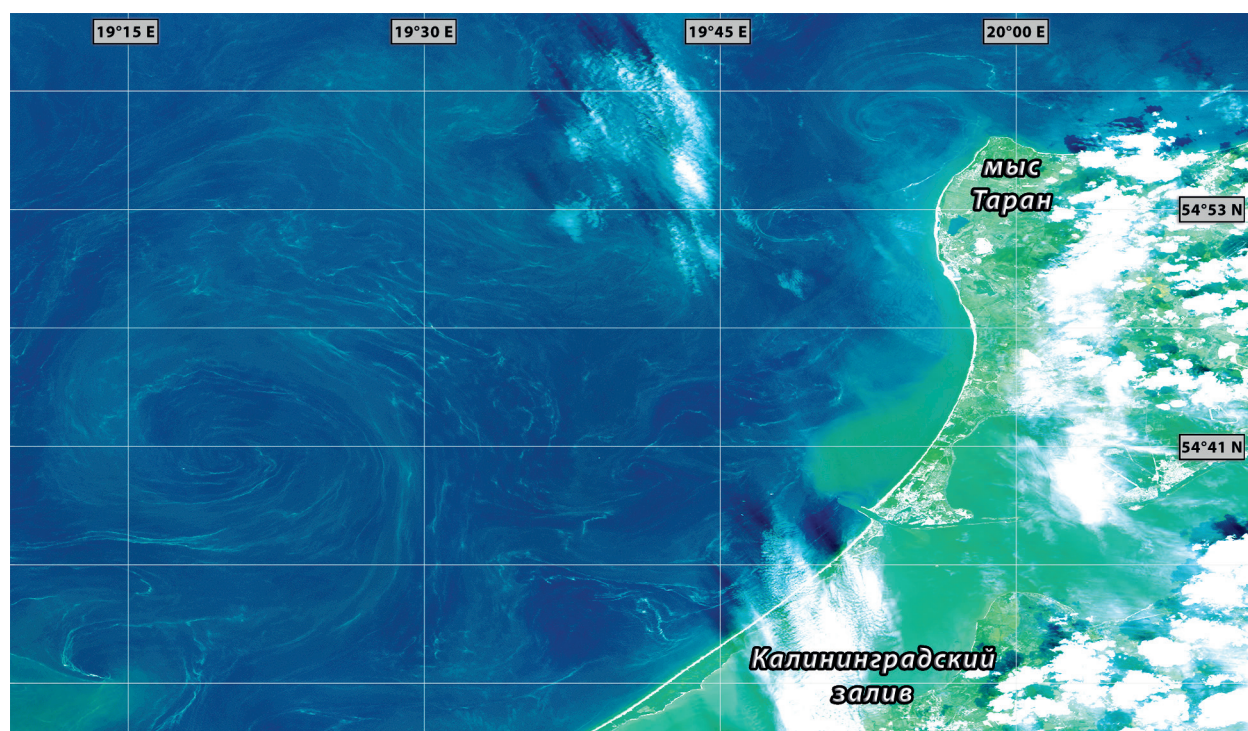


Рис. 2. Проявления вихревых образований при огибании течением мыса Таран.
Циклонический вихрь по данным OLI Landsat-8 от 20.05.2014

Как показал долговременный мониторинг, на спутниковых изображениях в районе мыса Таран могут проявляться как циклонические, так и антициклонические вихревые структуры, в первую очередь в зависимости от характера действующей прибрежной циркуляции в юго-восточной части Балтийского моря. При наличии апвеллингового типа течений (Zhurbas et al., 2006, 2019) формируется поток, направленный вдоль берега на запад, который при обтекании мыса Таран зачастую создаёт циклонический вихрь. При наличии даунвеллингового типа прибрежных течений (Zhurbas et al., 2006, 2019), который формирует прибрежную структуру течений, направленную на восток вдоль береговой линии, образуется прибрежный антициклонический вихрь. Существуют различия между характеристиками данных типов образующихся вихрей, а именно: циклонические вихри представляют собой более масштабные образования (средние характерные размеры которых варьируются в пределах 10–20 км), в то время как антициклонические вихри — структуры меньшего масштаба, характерные размеры до 10 км, а также, как правило, более прижаты к береговой линии. Срок жизни циклонических вихрей может быть достаточно длительным — до 7 сут, характерные центры циклонической завихренности в дальнейшем могут идентифицироваться на большом удалении от места формирования. Срок жизни антициклонических вихрей существенно меньше и не превышает трёх дней с момента образования.

Другой частой формой проявлений вихревых процессов в прибрежной зоне юго-восточной части Балтийского моря являются вихревые процессы, формирующиеся в открытой части моря. На рис. 3 (см. с. 361) представлен характерный пример таких проявлений.

Причиной образования таких структур в открытой части моря является в первую очередь атмосферное воздействие (Гинзбург и др., 2015) на удалении от береговой линии. Ввиду того, что существует множество факторов, определяющих атмосферное воздействие на поверхность моря, то и характер проявления вихревых образований имеет широкий диапазон форм проявлений. В ходе исследования было показано, что вихревые процессы, образующиеся в открытой части моря и проявляющиеся в прибрежной зоне, могут представлять собой как отдельные ядра завихренности, чаще циклонической направленности, так и цепочку небольших циклонических или антициклонических вихрей, формирующихся на большой акватории

(см. *рис. 3*). Пространственные масштабы вихрей открытого моря также существенно варьируются от первых километров в случае отдельных цепочек вихрей до образований диаметром 30 км в случае больших устойчивых циклонических вихревых диполей. Диапазоны срока жизни данных процессов также широко варьируются. Например, устойчивые диполи, приходящие в район прибрежной зоны юго-восточной части Балтийского моря, могут наблюдаться на последовательных спутниковых изображениях до 10 сут, в то время как мелкомасштабные цепочки вихрей могут разрушаться уже на следующие сутки после проявления на спутниковых изображениях.

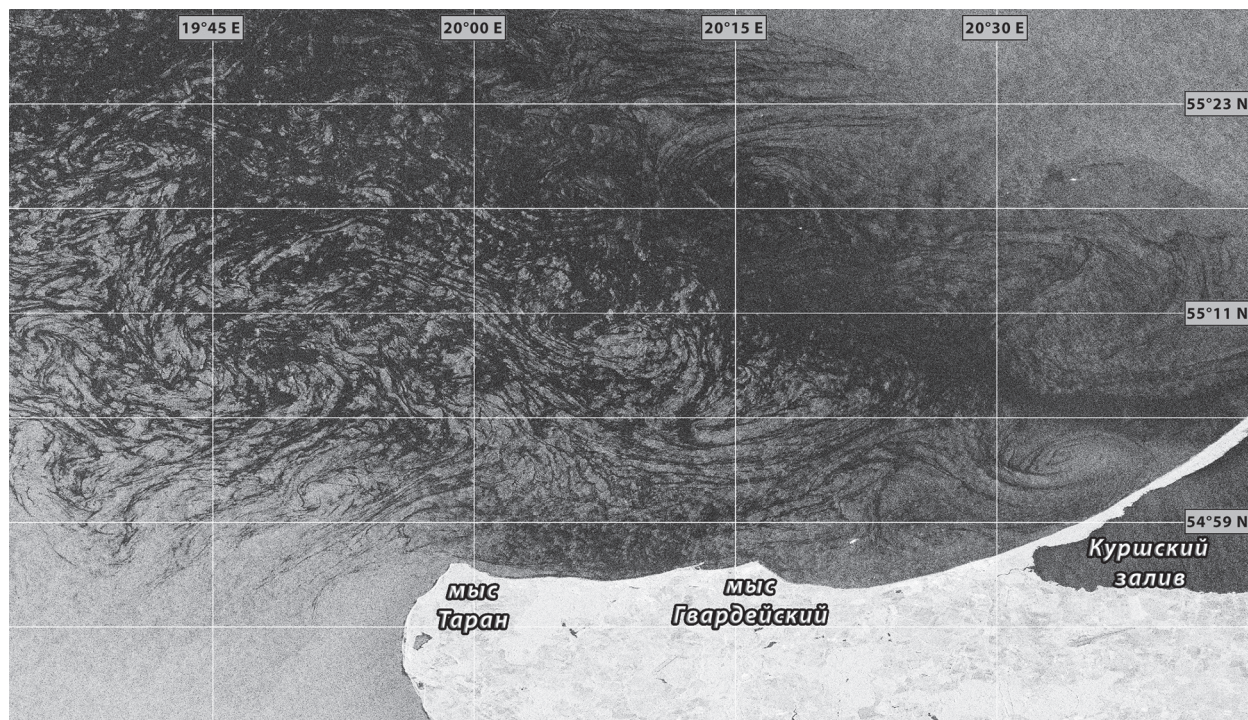


Рис. 3. Проявления вихревых образований в открытой части моря юго-восточной части Балтийского моря. Цепочка вихрей по данным C-SAR Sentinel-1A от 07.09.2022

Следующей частой формой проявления вихревых процессов в исследуемом регионе являются вихревые диполи, образующиеся как в районе мыса Таран, так и восточнее — в районе мыса Гвардейский. В отличие от уже ранее описанных ситуаций с образованием отдельных вихрей циклонической или антициклонической завихренности, при огибании течением выдающихся мысов зачастую может образовываться и более сложная структура в виде вихревого диполя. На *рис. 4* (см. с. 362) представлен характерный пример таких образований.

Вихревые диполи существенно отличаются по своим морфометрическим признакам от одиночных вихрей, так как в них, как в единой структуре, проявляются оба центра циркуляции (циклонический и антициклонический центры вращений на периферии), а также отчётливо выделяется «ножка» диполя, в которой, как правило, наблюдается течение, направленное от береговой линии в мористую часть (Краюшкин и др., 2022). По результатам наблюдений показано, что циклоническая часть вихревого диполя проявляется более чётко, может наблюдаться не менее 6 сут с момента его образования и сохраняет свои отличительные признаки даже после разрушения самого диполя. Антициклоническая часть, как правило, менее выражена на спутниковых проявлениях и разрушается существенно быстрее (срок жизни не более 1–2 сут). Вихревые диполи могут вовлекать в динамику воды большой акватории, средний размер таких процессов достигает 30 км в самой широкой части. По результатам многолетнего мониторинга определено, что подобные вихревые диполи преимущественно образуются в районах выдающихся мысов, в то время как на ровных участках береговой линии подобные структуры практически не возникают.

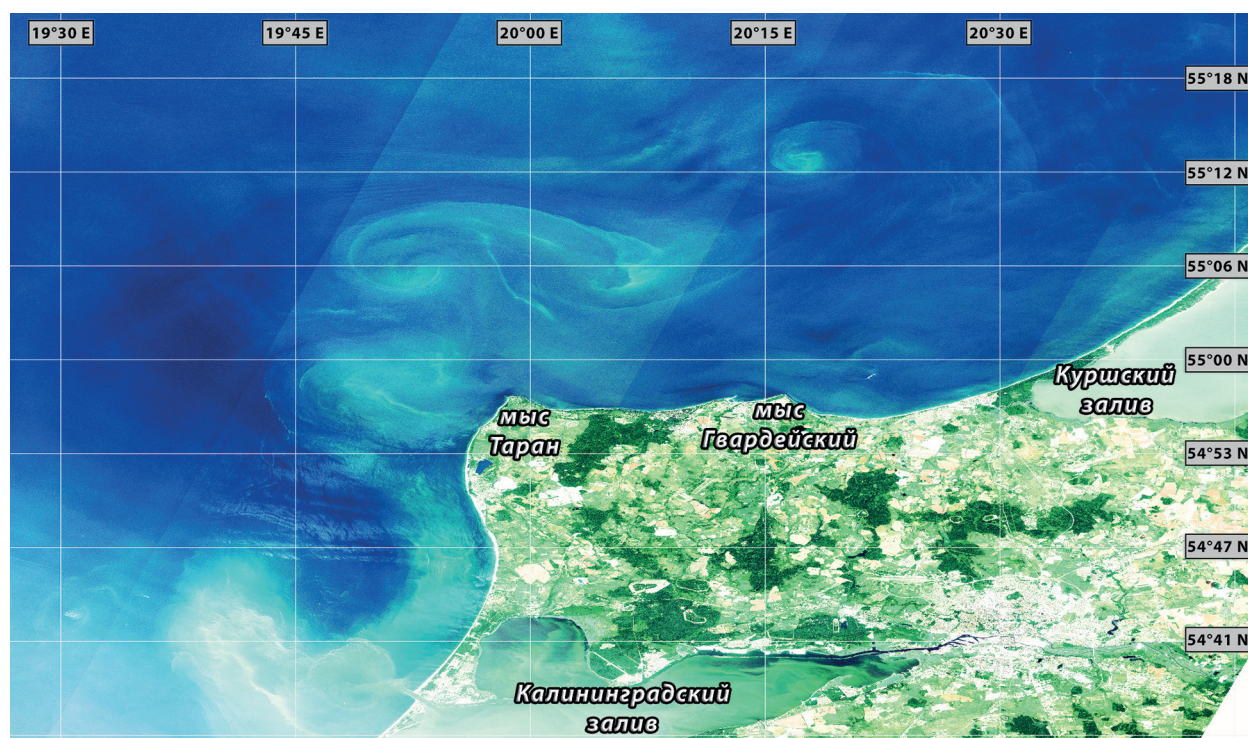


Рис. 4. Формирование вихревого диполя за мысом Таран по данным MSI Sentinel-2В от 14.07.2021

Ещё одной отличной формой проявления вихревых процессов являются вихревые структуры, которые возникают на характерных косах и относительно ровных участках береговой линии в юго-восточной части Балтийского моря. На рис. 5 показан характерный пример проявления вихревых процессов на песчаных участках береговой линии.

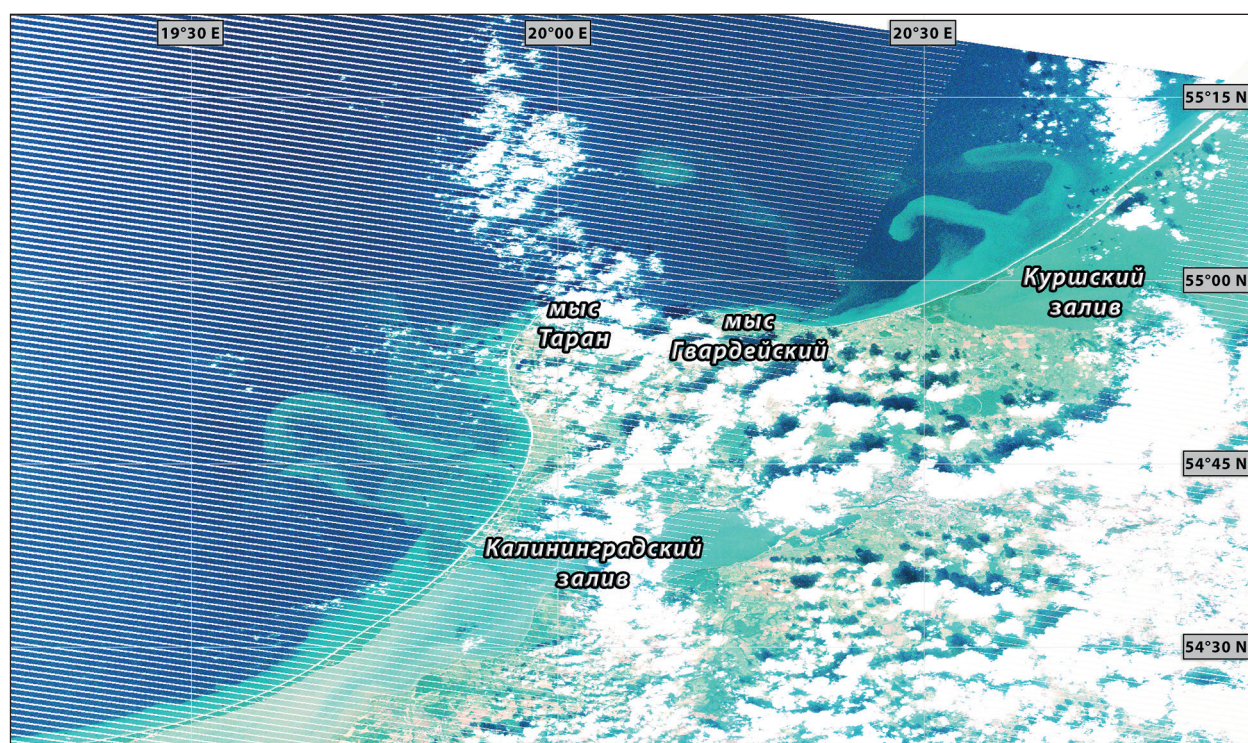


Рис. 5. Проявление вихревого процесса в виде «пальцев» на Куршской косе по данным ETM+ Landsat-7 от 26.09.2014

Как правило, формирование вихревых образований в подобных районах проявляется в виде характерных вытянутых в открытое море узких «пальцев», заканчивающихся ядром циклонического вращения. Подобные пальцы могут представлять собой как единичные проявления, так и последовательные цепочки до четырёх отдельных вихревых образований. Реже формирование вихревых процессов на косах проявляется в виде оформленных вихревых диполей, схожих со структурами диполей, образующихся за выдающимися мысами. По своим пространственным масштабам данные структуры имеют небольшие размеры (до 10 км в длину и не более 1–2 км в ширину). Срок жизни таких образований по результатам наблюдений не превышает трёх дней.

Заключительной рассмотренной и отдельно выделенной формой образования вихревых процессов в исследуемом регионе являются вихри, формирующиеся выносом вод из Калининградского залива. На *рис. 6* представлен пример подобных образований.

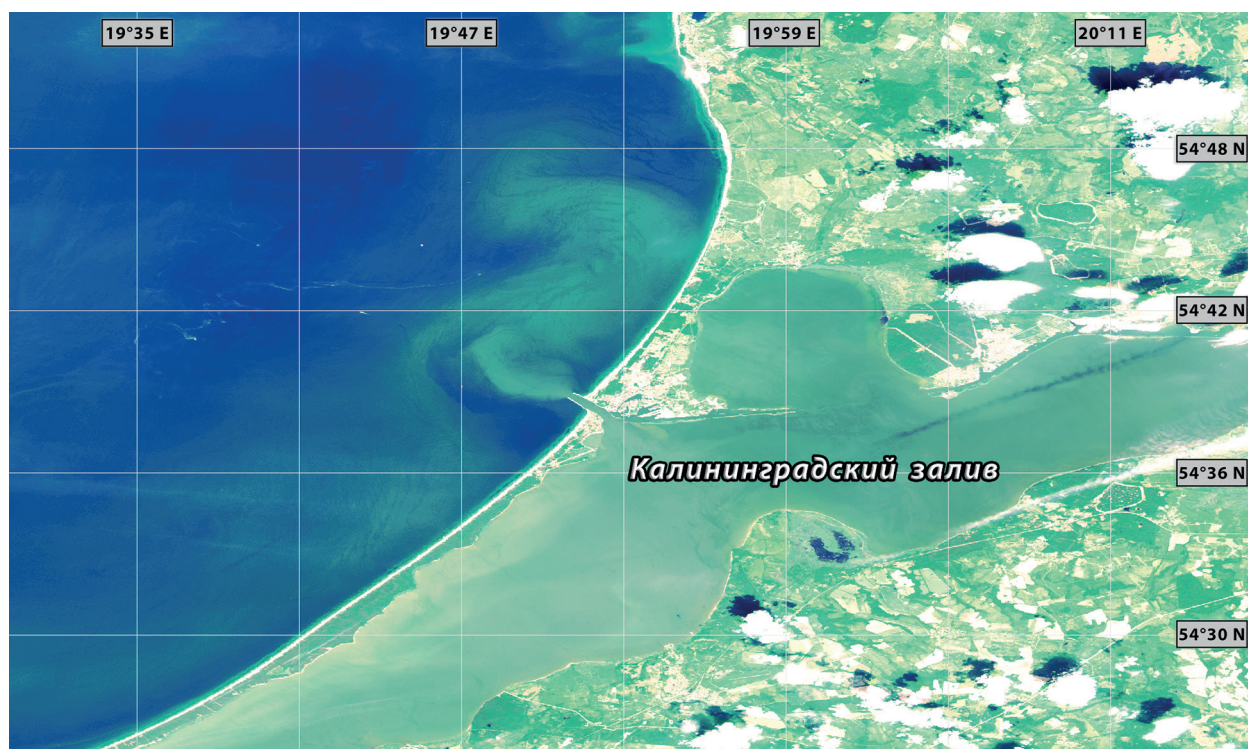


Рис. 6. Проявление вихревого диполя на выносе вод из Калининградского залива по оптическим данным OLI Landsat-8 от 03.06.2016

Данные формы вихревых процессов наблюдаются существенно реже других типов и проявляются только в случаях активного выноса вод из Калининградского залива в акваторию Балтийского моря. Чаще всего формой проявления подобных процессов являются небольшие вихревые диполи с отличительными циклоническими и антициклоническими ядрами вращения. Подобные структуры небольшие и не превышают 5–7 км в диаметре, существуют короткие промежутки времени: за время наблюдений не удалось идентифицировать ни одной пары последовательных изображений, на которых последовательно проявлялись бы вихревые процессы на выносе вод.

Классификация вихревых процессов в прибрежной зоне

Как было уже показано выше, диапазон отличительных особенностей проявлений и пространственных масштабов вихревых процессов в юго-восточной части Балтийского моря крайне широк. Однако, как показывают данные многолетнего мониторинга, проявления

вихревых процессов наблюдаются неоднородно по акватории моря. В то же самое время каждый из ранее описанных характерных типов (см. *рис. 2–6*), как правило, приурочен к конкретной характерной акватории, а также зачастую к определённому характеру преобладающего атмосферного воздействия на акваторию моря. В *таблице* представлены сводные результаты наблюдений проявлений вихревых процессов по различным спутниковым изображениям, а также предложена классификация вихревых процессов по их отличительным признакам, условиям формирования и региону встречаемости.

Основные типы проявлений вихревой активности

Тип вихревого процесса	Регион встречаемости/условия формирования	Количество проявлений	
		на оптических изображениях	на радиолокационных изображениях
Антициклональный вихрь (реже диполь) при огибании выдающегося мыса	Мыс Таран при атмосферной циркуляции западных румбов	31	13
Грибовидный диполь или реже циклонический вихрь при огибании выдающегося мыса	Мыс Таран при атмосферной циркуляции восточных румбов	26	12
Антициклональный или циклонический вихрь при огибании выдающегося мыса	Мыс Гвардейский при атмосферной циркуляции западных румбов	11	8
Грибовидный диполь при огибании выдающегося мыса	Мыс Гвардейский при атмосферной циркуляции восточных румбов	7	5
Цепочка последовательных вихрей пальцев или единичный диполь у Куршской косы	Куршская коса при различном характере атмосферного воздействия	21	15
Вихри в открытом море (либо формирование в открытом море, либо отрыв от берега циклонической части гриба)	Открытая часть моря при различном характере атмосферного воздействия	33	46
Диполи, образующиеся на выносе вод из Калининградского залива	Гданьский залив при наличии мощного выноса вод из Калининградского залива	7	12
Циклонические вихри в районе посёлка Янтарный	Район посёлка Янтарный при атмосферной циркуляции западных румбов	15	1

Данная классификация проявлений вихревых процессов основана как на особенностях морфометрических признаков вихревых образований (диполи, отдельные центры завихренности), так и на особенностях географических проявлений (огибание течением выдающихся мысов, образование на вытянутых участках береговой линии и т.д.). Третьим фактором, определяющим общую классификацию вихрей, является характер атмосферного воздействия, при котором возникают те или иные образования в конкретном географическом регионе. Отдельно остановимся на каждом типе проявлений вихревых процессов.

Наиболее часто в рамках многолетнего мониторинга наблюдались вихревые процессы, образующиеся и приходящие в прибрежную зону юго-восточной части Балтийского моря из открытой части моря. Подобного рода вихревые образования хорошо проявляются как по данным оптических сенсоров (33 проявления), так и по данным в радиолокационном спектре (46 проявлений). Диапазон форм проявлений, морфометрических признаков и условий образования, как было показано выше, крайне широк. Отдельно стоит сказать, что иногда в открытой части моря могут проявляться остатки вихревых процессов, которые со временем переместились из прибрежной зоны в её мористую часть, тем самым осуществляя переход из одного типа вихревого образования в другой. Другим наиболее частым проявле-

нием вихревой активности в регионе являются вихревые процессы, возникающие при обгании выступающих мысов (мыс Таран и мыс Гвардейский). Всего за время мониторинга было определено 75 таких ситуаций по оптическим данным и 38 случаев по радиолокационным. Однако многообразие возникающих форм вихревой активности требует дальнейшего разделения в классификации. В первую очередь классифицирование определяется характером преобладающей атмосферной циркуляции в регионе и, как следствие, возникновением определённой структуры прибрежных течений. Атмосферная циркуляция западных румбов формирует, как правило, единичные вихри, чаще антициклональной завихренности как в районе мыса Таран, так и в районе мыса Гвардейский (таких случаев было определено в сумме по обоим типам сенсоров 44 для акватории мыса Таран и 19 для акватории мыса Гвардейский). Заметим, что количество проявлений для акватории мыса Таран существенно больше, что определяется тем, что мыс Таран представляет собой большее препятствие для прибрежного течения, нежели меньший по пространственному протяжению мыс Гвардейский.

Отличное проявление вихревой активности за мысами представляет собой ситуация, когда над акваторией юго-восточной части Балтийского моря устанавливается атмосферная циркуляция восточных румбов, ведущая к установлению апвеллингового типа вдольбереговых течений. В данном случае за выдающимися мысами формируются чаще всего характерные грибовидные диполи (см. *рис. 4*). Таких ситуаций было определено 38 по наблюдениям для мыса Таран и 12 — для мыса Гвардейский. Характерно, что проявления вихревых диполей в исследуемом регионе существенно чаще происходят именно при обтекании течением мыса Таран из-за его большего пространственного масштаба.

Отдельную форму проявления вихревых процессов в юго-восточной части Балтийского моря представляют собой процессы, формирующиеся на вытянутых участках суши (косах). Наиболее интересной такой формой являются процессы, образуемые на Куршской косе (см. *рис. 5*). Подобные проявления в виде отдельных вытянутых узких пальцев, заканчивающихся ядром циклонического вращения, наблюдались при различных характерах атмосферного воздействия. Данные структуры выявлялись в 21 случае по оптическим данным и в 15 — на радиолокационных изображениях. Подобные образования имеют характерные особенности проявлений чаще в виде цепочек последовательных пальцев, что вместе с региональными особенностями проявлений позволяет выделить этот тип в отдельный класс. Схожие процессы отмечаются и на другом участке вытянутого побережья исследуемой акватории — протяжённом пляже в районе посёлка Янтарный. Отличительной особенностью данного типа проявлений является образование не характерных пальцев, а в виде отдельных циклонических вихрей, формирующихся при атмосферной циркуляции западных румбов. Такие структуры наблюдались существенно реже (всего 15 проявлений по данным оптических изображений и лишь 1 — по радиолокационным данным).

Заключительным классом вихревых образований исследуемой акватории являются небольшие диполи, образующиеся на выносе вод из Калининградского залива (см. *рис. 6*). Отличительной особенностью данного класса является именно сам процесс образования, который определяется не столько атмосферным влиянием, сколько наличием и мощностью выноса вод из Калининградского залива. Подобных проявлений вихревой активности в регионе было обнаружено всего 7 случаев по данным оптических сенсоров и 12 — по данным радиолокационных наблюдений.

Заключение

По результатам многолетнего спутникового мониторинга юго-восточной части Балтийского моря в период 2014–2024 гг. были выделены основные районы вихреобразования, а также предложена классификация вихревых процессов в прибрежной зоне Калининградской области. Всего было выделено восемь классов типовых форм вихревых образований, имеющих отличительные морфометрические особенности и конкретный регион локализации.

Наиболее часто встречающимися проявлениями вихревой активности в прибрежной зоне остаются вихревые процессы, формирующиеся в открытой части моря под действием разнообразных атмосферных условий (всего 79 проявлений). Подобные образования могут иметь широкий диапазон форм, пространственных масштабов и сроков жизни.

Вихревые процессы, возникающие непосредственно у береговой линии, были разделены на шесть отдельных классов в зависимости от возникаемых характерных морфометрических форм и динамических условий их образования. Так, вихри, формирующиеся за выдающимися в море мысами Таран и Гвардейский, представляют собой наиболее часто проявляющиеся образования (всего 113 проявлений). Однако подобные вихревые процессы в данных регионах проявляются по-разному: при наличии установившегося апвеллингового характера прибрежных течений, направленных на запад вдоль береговой линии, за мысом Таран формируется, как правило, антициклональный вихрь (всего 44 проявления), в то время как при наличии даунвеллингового характера течений — диполь или циклон (всего 38 проявлений). Вихри, образованные в результате обтекания течением мыса Гвардейский, имеют сходную структуру, однако проявляются существенно реже (19 проявлений при апвеллинговом течении и 12 — при даунвеллинговом), а также имеют существенно меньшие пространственные масштабы и сроки жизни. Отдельными двумя классами были выделены вихревые образования, формирующиеся на относительно ровных участках береговой линии Куршской косы и пляжа в районе посёлка Янтарный. Проявления вихревых образований на данных участках акватории существенно отличаются по своим морфометрическим признакам от вихревых образований, формирующихся за мысами, и локализуются, как правило, в виде отдельных вытянутых узких пальцев, заканчивающихся ядром циклонического вращения. Заключительным восьмым классом вихревых процессов в исследуемом регионе можно считать небольшие диполи, образующиеся на выносе вод из Калининградского залива. Отличительной особенностью данного класса является именно сам процесс образования, который определяется не столько атмосферным влиянием, сколько наличием и мощностью самого выноса вод из Калининградского залива. Подобные проявления вихревой активности в регионе были обнаружены 19 раз.

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 «Субмезомасштабные вихревые процессы в прибрежной зоне юго-восточной части Балтийского моря», <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. Зацепин А. Г., Баранов В. И., Кондрашов 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.
4. 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.
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. Временные особенности проявлений субмезомасштабных вихревых образований в прибрежной зоне Калининградской области по результатам спутникового мониторинга 2014–2024 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 1. С. 212–220. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-212-220.
8. 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.
9. 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.
10. 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. 470 с.
11. 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.
12. 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.
13. Gurova E., Chubarenko B. Remote-sensing observations of coastal sub-mesoscale eddies in the south-eastern Baltic // Oceanologia. 2012. V. 54(4). P. 631–654.
14. Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I. Satellite remote sensing of submesoscale eddies in the Russian Seas // The Ocean in Motion. Circulation, Waves, Polar Oceanography / eds. Velarde M. G., Tarakanov R. Yu., Marchenko A. V. Springer-Verlag, 2018. P. 397–413. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_24.
15. Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V., Nazirova K. R., Storchkov 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.
16. 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.
17. 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.

Main regions and classification of submesoscale eddy manifestations in the coastal zone of Kaliningrad Region based on the results of satellite monitoring in 2014–2024

E. V. Krayushkin, N. A. Knyazev

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

The paper presents the results of long-term satellite monitoring of the coastal zone of the southeastern Baltic Sea during the summer months from 2014 to 2024. The primary objective of the study was to identify the main eddy formation areas and determine the distinctive features of eddy dynamics in individual geographic regions of the study area. A total of 1,413 high-resolution satellite images (713 visible and 700 radio images) were analyzed during the study period. The paper proposes a classification of eddy formations observed in the coastal zone, comprising eight classes of eddy processes, differing

in the region of occurrence, formation conditions, and morphometric characteristics. Striking examples of eddy activity in the open sea where eddy formation occurs solely under the influence of atmospheric conditions are presented. Further, a wide array of satellite images is examined, identifying eddy processes in the coastal zone where eddy formation occurs due to the interaction of the coastal current structure with the coastline. Eddy process occurrences beyond the prominent capes of Taran and Gvardeysky are identified and described, and a division of eddies into four classes is proposed based on the nature of the coastal circulation and the region of occurrence. Cases of submesoscale eddies occurring near relatively flat sections of the coastline are considered, and their morphometric characteristics are described. Cases of eddy dipole formation due to water outflow from the Kaliningrad Gulf are shown. The results are summarized, and a general classification of eddy activity forms in the coastal zone of the Kaliningrad Region is proposed.

Keywords: Baltic Sea, submesoscale eddies, remote sensing

Accepted: 08.10.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-357-369

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. 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.
4. 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/S0001437012050062.
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., Temporal features of submesoscale eddy manifestations in the coastal zone of Kaliningrad Region, according to the results of satellite monitoring in 2014–2024, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 1, pp. 212–220 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-212-220.
8. Krayushkin E. V., Nazirova K. R., Lavrova O. Yu., Knyazev N. A., Submesoscale cyclonic eddy behind Cape Gvardeysky 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.
9. 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.
10. 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).
11. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Sabinin K. D., Serebryany A. N., Study of hydrodynamic processes in the shelf zone based on satellite data and subsatellite measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, V. 12, No. 5, pp. 98–129 (in Russian).
12. 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.
13. Gurova E., Chubarenko B., Remote-sensing observations of coastal sub-mesoscale eddies in the south-eastern Baltic, *Oceanologia*, 2012, V. 54(4), pp. 631–654.

14. Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Satellite remote sensing of submesoscale eddies in the Russian Seas, In: *The Ocean in Motion. Circulation, Waves, Polar Oceanography*, Velarde M. G., Tarakanov R. Yu., Marchenko A. V. (eds.), Springer-Verlag, 2018, pp. 397–413, https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_24.
15. Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V., Nazirova K. R., Storchkov 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.
16. 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.
17. 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.