# Трёхмерная структура и динамика вод в прибрежных вихревых диполях в юго-восточной части Балтийского моря: результаты спутниковых наблюдений и подспутниковых измерений летом 2021 года

# Е.В. Краюшкин, О.Ю. Лаврова, К.Р. Назирова, Д.А. Елизаров

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: box\_evk@mail.ru

Представлены результаты квазисинхронных спутниковых и экспериментальных наблюдений двух проявлений субмезомасштабных вихревых диполей в прибрежной зоне юго-восточной части Балтийского моря у побережья Калининградской обл. По данным последовательных спутниковых изображений высокого разрешения определены параметры динамики вихревых диполей, а именно: срок существования таких процессов в акватории моря, скорость и направление распространения в пространстве, а также описаны атмосферные условия для возникновения подобных вихревых диполей. По результатам подспутниковых натурных экспериментов с использованием акустического профилографа течений и гидрологического зонда определены характерные особенности трёхмерной структуры вихревых диполей. Представлены результаты о глубине проникновения процессов в толщу вод и показано, что такого рода процессы не являются сугубо поверхностными проявлениями, а оказывают влияние до глубин не менее 20 м. Прямые измерения скорости и направления течений внутри отдельных частей вихревого диполя говорят о существенно большей динамике вод внутри подобных образований, чем их собственная скорость перемещения в пространстве. Проведена оценка различий в антициклонических и циклонических областях диполя. По результатам гидрологических наблюдений показано влияние активной циклонической области вихревого диполя на окружающие её воды, что проявляется как в вовлечении (подъёме) нижележащих вод в область существования циклона, так и в аккумуляции поверхностно-активных веществ в её пределах.

**Ключевые слова:** Балтийское море, вихревой диполь, трёхмерная структура, спутниковый мониторинг, подспутниковые измерения

Одобрена к печати: 23.12.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-265-279

### 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 зал., так и в акватории северней Самбийского п-ова (Гинзбург и др., 2015; Гурова, 2012; Каримова и др., 2011; Краюшкин и др., 2020; 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 проводились подспутниковые измерения (*puc. 1a*, см. с. 266), характеризуется отсутствием постоянных установившихся вдольбереговых течений, а основным фактором, определяющим динамику вод в данном регионе, выступает атмосферное воздействие (Zhurbas et al., 2006, 2019). Рельеф дна акватории юго-восточной части Балтийского моря не имеет резких перепадов глубин и отличается постепенным увеличением глубины от береговой линии в открытое море. При этом береговая линия характеризуется наличием нескольких выдающихся в море мысов (Гвардейский и Таран), при обтекании которых вдольбереговой поток способен формировать субмезомасштабные вихревые структуры (Елкин, Зацепин, 2013; Зацепин и др., 2011). Благоприятной особенностью данного региона для проведения исследований субмезомасштабных вихревых структур представляется обильное цветение фитопланктона в летнее время. Наличие активного процесса цветения фитопланктона и, как следствие, образование 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.







*Рис 1.* Район исследования (*a*). Фрагменты спутниковых изображений высокого пространственного разрешения, содержащих проявления вихревых диполей: MSI Sentinel-2B, 11.07.2021, 09:55 UTC (*b*); MSI Sentinel-2B, 14.07.2021, 10:05 UTC (*b*); C-SAR Sentinel-1A 14.07.2021, 16:20 UTC (*c*); C-SAR Sentinel-1B 15.07.2021, 16:20 UTC (*d*); MSI Sentinel-2A, 16.07.2021, 09:54 UTC (*e*)

Изучение субмезомасштабных вихрей проводится в настоящее время в первую очередь по данным спутникового зондирования (Гинзбург и др., 2015; Митягина, Лаврова, 2009; Karimova, Gade, 2016), а также численного (Zhurbas et al., 2006, 2019) и лабораторного (Елкин, Зацепин, 2013) моделирования. Экспедиционные наблюдения субмезомасштабных вихревых образований в натурных условиях представляют собой крайне сложную задачу ввиду незначительного масштаба процесса и спонтанности его появления. Несмотря на то, что в регионе юго-восточной части Балтийского моря часто по спутниковой информации бывают известны места постоянной генерации субмезомасштабных вихревых структур, авторы знают только о единичных случаях квазисинхронных измерений их параметров дистанционными и контактными методами (см., например, работы (Краюшкин и др., 2018, 2020; Lavrova et al., 2016, 2018; Marmorino et al., 2010)). Ввиду того, что экспедиционные наблюдения субмезомасштабных вихревых процессов крайне редки, до сих пор ещё остаются нерешёнными вопросы об их трёхмерной структуре, особенностях динамики, а также о причинах возникновения. В настоящей работе представлены результаты совместных наблюдений двух грибовидных вихревых диполей с использованием данных спутникового зондирования и квазисинхронных контактных измерений.

## Данные и методы

В качестве спутниковой информации использовались данные доступных сенсоров высокого разрешения: MSI (*англ*. Multispectral Instrument) Sentinel-2A/В в видимом диапазоне и C-SAR (*англ*. Synthetic Aperture Radar) Sentinel-1A/В в радиолокационном диапазоне электромагнитного спектра. Отличительные особенности цветосинтезированных и спутниковых радиолокационных изображений (РЛИ) серии спутников Sentinel — высокое пространственное разрешение (до 10 м в пикселе) при полосе захвата до 290 км у спутников Sentinel-2A/В и 250 км у спутника Sentinel-1. В *табл*. *1* представлена информация об используемых в данной работе спутниковых изображениях.

Дата	Время, UTC	Сенсор	Спутник	Разрешение в пикселе, м	Подспутниковые измерения, дата и время, UTC	
11.07.2021	09:55:22	MSI	Sentinel-2B	10	11.07.2021, 08:43–18:55	
14.07.2021	10:05:13				14.07.2021, 07:50-21:42	
14.07.2021	16:20:46	C-SAR	Sentinel-1A		14.07.2021, 07:50-21:42	
15.07.2021	04:59:47				Не проводились	
16.07.2021	09:54:28	MSI			16.07.2021–17.07.2021, 04:48–00:38	

Таблица 1. Список используемых в работе спутниковых изображений высокого разрешения

Как следует из *табл. 1*, спутниковая информация высокого разрешения в период с 11 по 16 июля 2021 г. была доступна практически непрерывно, не говоря о данных среднего пространственного разрешения, таких как MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Terra/Aqua и OLCI (*англ.* Ocean and Land Colour Instrument) Sentinel-3. Подспутниковые океанографические исследования проводились в период с 11 по 22 июня 2021 г. В ходе работ было выполнено четыре выхода в море (11, 14, 16 и 22 июня) на маломерном судне «Фламинго».

Океанографические работы включали в себя проведение исследований структуры течений в прибрежной акватории при помощи судового акустического доплеровского измерителя течений Teledyne RD Instruments WorkHorse Monitor 300 kHz (ADCP — Acoustic Doppler Current Profiler, акустический доплеровский измеритель течения), установленного в шахту судна. ADCP позволяет непрерывно измерять профиль течений с выбранной дискретностью по глубине от подповерхностного слоя до дна в пределах распространения акустического сигнала. В настоящем исследовании дискретность измерения по глубине составляла 4 м (размер одной ячейки 4 м), центр первой ячейки располагался на глубине 4 м. Единичное измерение профиля течений проводилось с частотой 0,5 Гц непрерывно с момента начала работ. При обработке данных ADCP использовалась методика осреднения единичных измерений профиля течений для получения гладких полей скорости и направления течений, при этом проводилась фильтрация измерений с использованием программных пакетов Teledyne RD Instruments WinRiver II и алгоритмов фильтрации в информационной системе See the Sea (STS) (Лаврова и др., 2019), а также процедура удаления единичных измерений, в которых судно останавливалось для проведения океанографических станций. Измерения при помощи ADCP сопровождались проведением CTD-съёмки (*англ.* Conductivity, Temperature and Depth — проводимость, температура и глубина) при помощи гидрологического CTD-зонда RBR Concerto, на котором установлены дополнительные измерительные датчики концентрации хлорофилла *a* и мутности воды. При обработке данных измерений гидрологическим зондом осуществлялась фильтрация выбросов при зондировании толщи вод и осреднение измерений в пределах выбранного окна по глубине (в настоящей работе вертикальное осреднение параметров проходило внутри ячейки 0,5 м). Обработка результатов измерений проводилась с использованием заводского программного пакета Ruskin и алгоритмов фильтрации в информационной системе STS (Лаврова и др., 2019).

Совместная обработка данных спутникового зондирования и подспутниковых измерений выполнялась в информационной системе STS (Лаврова и др., 2019), для чего в системе были реализованы новые функциональные возможности, ориентированные на работу с данными натурных инструментальных измерений. Были разработаны программные решения, позволяющие в автоматическом режиме проводить предварительную обработку и коррекцию исходных данных измерений, а затем запись в базу данных, созданную для этих целей. Специальный веб-интерфейс обеспечивает пользователям возможность ввода данных в систему, управления ими, отображения их в графической и табличной формах. Помимо этого, реализована интеграция с основным картографическим интерфейсом системы STS, что позволяет проводить совместный анализ данных натурных измерений со спутниковыми изображениями, метеорологическими и тематическими данными. Все результаты инструментальных измерений, полученные в ходе проведения океанографических работ, были включены в STS.

### Результаты спутниковых наблюдений

Фрагменты спутниковых изображений высокого разрешения, полученных за время проведения экспедиционных работ, на которых идентифицируются вихревые диполи, показаны на *рис. 16–е*.

На спутниковом изображении MSI Sentinel-2В за 11.07.2021, представленном на рис. 16, как и на всех остальных изображениях видимого диапазона, вихревой диполь визуализируется за счёт трассера, которым являются цианобактерии. Этот субмезомасштабный диполь сформировался за м. Гвардейским и распространился в мористую часть Балтийского моря. Диполь имеет чётко прослеживающуюся «ножку» и выраженную циклоническую часть. При этом антициклоническая часть диполя на спутниковом изображении практически не идентифицируется. На изображении MSI Sentinel-2B, полученном через трое суток после первого, 14.07.2021 (см. рис. Ів), нашёл своё отражение уже второй вихревой диполь, который сформировался севернее м. Таран. У данного диполя также чётко прослеживается ножка, отчётливо видна циклоническая часть, а также проявляется антициклоническая часть. При этом на данном спутниковом изображении также проявляется и первый вихревой диполь, выявленный на изображении от 11.07.2021. Однако к 14 июля эта дипольная структура заметно смещается мористее в северо-восточном направлении. Циклоническая часть первого диполя попрежнему чётко определяется на цветосинтезированном изображении видимого диапазона. 14 июля, через 6 ч, сенсором C-SAR Sentinel-1А было получено радиолокационное изображение, на котором за счёт биогенных плёнок отображаются оба вихревых диполя (см. *рис. 1г*). У первого диполя чётко прослеживается его циклоническая часть, а также заметна ножка, а второй диполь выражен менее ярко, чем на изображении видимого диапазона. Ещё одно радиолокационное изображение было получено 15 июля, через 12 ч после первого РЛИ, на котором продолжает чётко прослеживаться циклоническая часть и ножка первой грибовидной структуры, а также менее ярко отображается и вторая структура, находящаяся у м. Таран (см. *рис. 1д*). И наконец, на пятом спутниковом изображении, полученном 16 июля сенсором MSI Sentinel-2A, продолжают отображаться оба диполя, чётко прослеживается ножка и циклоническая часть каждого из вихревых образований, однако заметно изменение их формы в пространстве и смещение в северо-восточном направлении.

Таким образом, было получено и проанализировано пять последовательных спутниковых изображений, что позволило определить скорость перемещения вихревых образований и оценить их пространственно-временную изменчивость. На основе совместного анализа спутниковых изображений была построена схема расположения определяемых визуально контуров диполя за разные временные отрезки. Схема распространения вихревых диполей представлена на *рис. 2*; красной линией показан контур диполя, впервые идентифицированного 11.07.2021, синей линией — диполь, проявившийся 14.07.2021.



*Рис. 2.* Схема распространения вихревых диполей с момента образования и до момента последнего проявления на спутниковых изображениях. Красными и синими точками показаны центры циклонических вращений каждой вихревой структуры

Отличительной особенностью перемещения диполей во времени является тот факт, что «красная» структура существовала не менее 5 сут, а «синяя» — не менее 2 сут. Возможно, срок жизни подобных образований и больше, однако из-за отсутствия безоблачных спутниковых изображений видимого диапазона на последующие дни этого нельзя было определить. Другое важное отличие динамики данных вихревых диполей состоит в том, что обе структуры в среднем смещались почти одинаково в северо-восточном направлении, при этом согласно ветровой ситуации в регионе (*puc. 3*, см. с. 270) наблюдались преимущественно ветры южных и северных румбов, что позволяет говорить о том, что на их распространение в первую очередь оказала влияние совокупность прибрежных течений, сформировавшихся ранее при другой ветровой ситуации, а не преобладающий приводный ветер в момент наблюдений. Ниже будет показано, что преобладающие течения в районе образования вихревых структур будут иметь направление с запада на восток, тем самым перемещая их в указанном направлении. Также отличительной особенностью динамики вихревых диполей в районе является то, что структуры не распространяются строго вдоль изобат: в момент формирования обе структуры двигались мористее по уклону дна, при последующем распространении они также пересекали изобаты, что в первом приближении позволяет говорить о том, что влияние рельефа дна не оказывает существенного воздействия на динамику подобных структур.



*Рис. 3.* Временной ряд скорости и направления приземного ветра и температуры воздуха в порту Пионерский по данным массива www.rp5.ru в период с 02:00, 06.07.2021 по 23:00, 16.07.2021 (местное время, UTC+2)

*Таблица 2*. Площади, занимаемые вихревыми диполями, определённые по спутниковым изображениям

Дата и время спутникового изображения, UTC	Площадь «красного» диполя, км <sup>2</sup>	Площадь «синего» диполя, км <sup>2</sup>
11.07.21, 09:55	101,68	Нет данных
14.07.21, 10:05	254,74	143,19
15.07.21, 04:59	Нет данных	237,96
16.07.21, 09:54	311,88	228,70

Были посчитаны количественные характеристики изменчивости самих структур во времени и пространстве, сделана оценка скорости распространения вихревых диполей. На рис. 2 красными точками последовательно показаны центры циклонической части диполя, определённые визуальным способом по спутниковым изображениям. Для расчёта скорости движения общей структуры диполя были выбраны именно центры устойчивых циклонических вихрей как однозначный маркер одних и тех же точек внутри вихревого диполя. Оценка скорости перемещения диполей следующая: «красная» структура двигалась в период с 11 по 14 июля с минимальной скоростью ~9 см/с, а в период с 14 по 16 июля — со скоростью ~6 см/с. При этом «синий» диполь в период с 14 по 16 июля распространялся также с минимальной скоростью ~6 см/с. Вторым количественным параметром изменчивости вихревых диполей, рассчитанным по спутниковым изображениям, выступает оценка меры диссипации структур во времени. По последовательным спутниковым изображениям видимого диапазона наглядно видно (см. *рис. 1*), что яркость проявления вихревых диполей уменьшается с момента образования к моменту последних проявлений, однако такой параметр даёт лишь косвенную оценку диссипации. Количественной оценкой может служить расчёт площади, занимаемой процессом в пространстве, с учётом предположения, что приток воды в вихревой диполь

прекращается при отрыве диполя от береговой линии, где, как будет показано ниже, наблюдалось достаточно сильное вдольбереговое течение. В *табл. 2* представлены расчёты площадей, занимаемых каждым из диполей.

Из *табл. 2* видно, что обе структуры быстро растут по площади в течение первых суток с момента обнаружения. «Красный» диполь увеличил за ~1 сут свою площадь на 240 %, т.е. вырос более чем в два раза относительно дня первого обнаружения. «Синий» диполь за ~19 ч увеличился в размерах по площади на 166 %, это составляет в суточном эквиваленте 210 %, что эквивалентно суточному увеличению площади «красного» диполя. В дальнейшем вихревые диполи при удалении от берега ведут себя по-разному: если «красный» диполь продолжает расти, но уже с заметно меньшей скоростью — порядка 60 % за сутки, то «синий» диполь остаётся примерно тех же размеров и даже уменьшается по площади.

#### Ветровая ситуация на момент образования вихрей

Для оценки ветровой ситуации в районе наблюдений вихревых диполей был проанализирован массив метеорологической информации, в первую очередь данных о ветре, за пять дней до момента первого обнаружения вихревого диполя и до момента последнего обнаружения обеих структур 16.07.2021. Массив параметров скорости и направления приземного ветра был получен из архива информационного ресурса www.rp5.ru для наземной метеорологической станции в г. Пионерский (координаты местоположения станции: 54° 57,114′ с.ш. и 20° 13,92′ в.д.). На *рис. 3* представлен временной ход скорости и направления приземного ветра в районе порта Пионерского за период с 02:00, 06.07.2021 по 23:00, 16.07.2021 (местное время, UTC+2).

Отличительная особенность временного хода параметров приземного ветра — отсутствие ярко выраженного устойчивого направления ветра в выбранный период времени. С 02:00, 6 июля до момента первого обнаружения вихревого диполя на спутниковом изображении от 11 июля наблюдалась периодическая смена направления ветра с циклоническим характером вращения. В период с 02:00, 6 июля по 12:00, 7 июля наблюдались преимущественно южные ветры со скоростью не более 3 м/с. При этом они также не были устойчивыми и менялись в пределах от юго-западных до юго-восточных направлений. Далее с 12:00, 7 июля по 18:00, 8 июля преобладали устойчивые северные ветры с минимальной скоростью не более 2 м/с. Впоследствии до момента обнаружения вихревого диполя преобладающие ветры вновь менялись на южные в диапазоне направлений юго-восток — юго-запад. Примечательно, что до образования первого вихревого диполя не наблюдалось устойчивой ветровой динамики, а наоборот, направление преобладающих ветров периодически менялось в течение не более полутора суток. Периоду, предшествующему обнаружению вихревого диполя, соответствовала ветровая ситуация с отличительным характером циклонической завихренности и отсутствием сильных ветров.

Ветровая ситуация в период с момента обнаружения вихревых диполей и до последнего их проявления на спутниковых изображениях во многом повторяет ветровую ситуацию, предшествующую моменту образования диполей. С 12:00, 11 июля до 23:00, 16 июля наблюдались неустойчивые ветры южных и северных направлений, ветер кардинально менялся на 180° в течение не более 12 ч с периодическим преобладанием ветров восточных румбов. Скорость ветра в момент развития вихревых диполей была незначительна во всём исследуемом интервале времени и составляла не более 2 м/с.

### Результаты подспутниковых измерений

Квазисинхронно со спутниковыми наблюдениями за вихревыми диполями в районе исследований проводились океанографические подспутниковые измерения. Благодаря оперативному получению спутниковых данных удалось так организовать измерения, чтобы пересечь обнаруженные вихревые структуры. Такие измерения были проведены трижды: 11, 14 и 16 июля. В данной работе рассмотрен пример пересечения вихревого диполя 14.07.2021 маломерным судном с установленным на борту акустическим профилографом течений ADCP и съёмкой CTD-параметров океанографическим зондом. На *рис. 4* показана схема измерений приповерхностных течений при пересечении вихревого диполя, наложенная на цветосинте-зированное спутниковое изображение, полученное в этот же день.



*Рис. 4.* Схема проведения экспериментальных работ по исследованию структуры течений в районе обнаружения вихревого диполя 14.07.2021: *а* — общая схема; *б* —увеличенный фрагмент, соответствующий пересечению судном вихревого диполя

Общая структура течений в районе проведения экспериментальных работ крайне разнообразная. Остановимся на нескольких отличительных особенностях. В прибрежной части моря наблюдалось сильное, прижатое к берегу течение со скоростью до 30 см/с, направленное с востока на запад. По мере удаления в мористую часть скорость течения постепенно ослабевала до значений 15 см/с. После огибания потоком м. Таран подобных величин скорости течений уже не наблюдалось: структура течений представляла собой хаотичное поле с величинами не более 10 см/с. Данная особенность поля течений указывает, что воды, поступающие в район м. Таран, вовлекаются в ножку вихревого диполя, наблюдаемого на спутниковом изображении.

Более подробно стоит рассмотреть область самого вихревого диполя, которую пересекали при проведении экспериментальных работ. На увеличенном фрагменте (см. puc. 46) показана структура течений в месте обнаружения вихревого диполя. Разница во времени между получением спутникового изображения и проведением измерений в области вихревого диполя акустическим профилографом течений составляла порядка 6-8 ч. Поле направлений течений повторяет циклонический характер циркуляции вод в районе обнаружения циклонической части вихревого диполя. При пересечении циклонической части направления течений меняются с южных (на кромке циклонической части) на восточные (в центральной части вихря) и далее переходят к северным в области ножки вихревого диполя. Скорость течения на периферии циклонической части достигала 20 см/с, в центральной части вихря — не более 12 см/с, а в области обнаружения ножки диполя составляла в среднем 15–17 см/с. При продвижении на восток поле направлений течений продолжает повторять структуру вихревого диполя в области антициклонической части вихря, которая была выявлена на спутниковом изображении. Направление течения последовательно меняется с северного, в ножке, на восточное в антициклонической части вихря. Далее при выходе из диполя направление течения вновь меняется на западное, постепенно усиливаясь по мере приближения к берегу. Характерная скорость вращения антициклонической части диполя существенно ниже, чем в циклонической и в ножке. На периферии антициклонической части скорость течения составляла не более 10 см/с, а в центре антициклонической структуры уменьшалась до величин, ставших пределом погрешности ADCP. Таким образом, наши измерения показали, что структура течений в исследуемом районе чётко соответствует наличию в данном районе вихревого диполя с ярко выраженной циклонической частью и ножкой (относительно высокие скорости течений) и менее выраженной антициклонической частью. Отдельно отметим, что косвенно было обнаружено поступление вод от прижатого вдольберегового течения в район обнаружения ножки вихревого грибовидного диполя.

Рассмотрим вертикальные распределения скорости и направления течения, полученные с помощью ADCP при пересечении вихревого диполя (*puc. 5*) на разрезе, выполненном 14 июля 2021 г. С учётом квазисинхронного со спутниковой съёмкой характера измерений на рисунках показано расположение циклонического вихря, который был пересечён маломерным судном. Ноль расстояния соответствует западной части разреза.



*Рис. 5.* Вертикальные распределения направления (*a*) и скорости (*б*) течения на океанографическом разрезе через вихревой диполь 14.07.2021

Наиболее отличительной чертой распределения направления течения вдоль разреза представляется сохранение направления на всём разрезе в пределах интервала глубин 0—20 м. Вихревой диполь как в области циклонической части, так и в области ножки практически однороден по глубине, и лишь глубже 20 м вихревая динамика уже не проявляется. Такое распределение показывает, что градиентные зоны смены направлений располагаются и в вертикальной плоскости разреза. Область циклонической части диполя, выявленная по спутниковому изображению, точно лежит в пределах градиентных областей.



*Рис. 6.* Вертикальные распределения температуры воды (*a*) и концентрации хлорофилла *a* (б) на океанографическом разрезе через вихревой диполь 14.07.2021

Поле скорости течений имеет несколько иное распределение. Относительно высокие скорости потока, примерно 10–15 см/с, наблюдаются до глубин не более 10 м. Глубже 10 м скорость потока уменьшается практически равномерно на всём протяжении разреза до значений 5 см/с. В циклонической части диполя и в ножке значения скорости течения примерно одинаковые, порядка 15–17 см/с, в то время как в антициклонической части величина скоро-

сти течения существенно ниже — менее 10 м/с. Локальные максимумы скорости потока расположены не на самой поверхности воды, а несколько глубже — 5–7 м.

Синхронно со съёмкой с помощью ADCP проводились измерения с помощью CTDзонда и его дополнительных датчиков. В частности, измерялась температуры воды и концентрации хлорофилла *a*. Их распределения на разрезе, выполненном 14 июля 2021 г. через вихревой диполь, представлены на *puc. 6* (см. с. 274). С учётом квазисинхронного со спутниковой съёмкой характера CTD-измерений (разница во времени 6–8 ч) на рисунках показано расположение циклонического вихря, который был пересечён разрезом.

Отличительной особенностью распределений является тот факт, что в области обнаружения по спутниковым изображениям циклонической части вихревого диполя наблюдается характерный для циклонической завихренности подъём вод, что выражается в локальном подъёме изотерм к поверхности. Величина вовлечения (подъёма) нижележащих вод в циклоническую завихренность на примере изотермы 20 °C составляет порядка 5 м относительно областей разреза вне вихревого диполя и областей внутри ножки. Подъём вод прослеживается с глубины ~12 до ~7 м в центральной части циклонического вихря. При движении в область антициклонической части диполя, которая, как правило, менее ярко выражена в подобного рода структурах в юго-восточной части Балтийского моря, не наблюдается характерного ло-кального опускания вод, однако при этом прослеживается общее постепенное заглубление изотерм с запада на восток.

Необходимо отметить, что в поле солёности характерного подъёма вод не обнаруживается, а изогалины также постепенно заглубляются при движении по разрезу от циклонической к антициклонической части вихревого диполя.

При анализе данных измерений *in situ* было выявлено, что максимумы концентрации хлорофилла a на разрезе через вихревой диполь наблюдаются не на поверхности, а несколько глубже, на глубине ~5–7 м. Эта особенность прослеживается на протяжении всего разреза. Однако в области циклонического вихря фиксируется локальное увеличение концентрации хлорофилла a до величин ~6 мкг/л относительно фоновых концентраций 3–4 мкг/л. Данная особенностью характерна только для области циклонического вращения не только вовлекают в вертисаральть вывод о том, что области циклонического вращения не только вовлекают в вертикальное перемещение и поднимают к поверхности нижележащие слои, но и аккумулируют внутри себя фитопланктонные сообщества.

#### Заключение

В результате совместного анализа спутниковых данных и квазисинхронных подспутниковых измерений была определена трёхмерная структура, отличительные особенности и динамика прибрежных вихревых диполей в июле 2021 г. в районе юго-восточной части Балтийского моря севернее Самбийского п-ова. На основе сопоставления пяти последовательных спутниковых изображений с проявлениями двух вихревых диполей удалось оценить динамику подобных процессов в пространстве и во времени. Показано, что такие вихревые образования в прибрежной зоне моря могут существовать не менее 5 сут. Формирование дипольных структур в районе исследований происходит в результате ветрового воздействия с выраженным циклоническим характером завихренности и при отсутствии действия длительных ветров одного направления. Вихревые диполи распространяются с минимальной скоростью порядка 6-9 см/с, существенно увеличиваясь в размерах с момента образования — более чем в два раза. При удалении от береговой линии происходит постепенная их диссипация, что связано, скорее всего, с отсутствием подпитки за счёт прибрежных вдольбереговых течений. Распространение вихревых диполей происходило в одном направлении и определялось воздействием сформировавшихся ранее течений. Преобладающая ветровая динамика в данном районе оказала меньшее влияние на направление их распространения.

По результатам экспериментальных исследований показано, что формирование прибрежных вихревых образований происходит в районах выдающихся в море мысов при огибании их сильным прибрежным вдольбереговым течением. По данным измерений акустическим профилографом течений показано отсутствие за выдающимися в море мысами установившихся течений, наблюдавшихся до момента подхода к мысу. Этот факт позволяет говорить о вовлечении прибрежных вод в динамический процесс формирования ножки вихревого диполя. Прямые контактные измерения, проведённые в различных частях вихревого диполя, показали, что влияние подобных структур прослеживается до глубины 20 м, а сами структуры не являются сугубо поверхностными проявлениями местной циркуляции вод. При этом динамика вод внутри вихревых диполей неоднородна: циклоническая часть диполя имеет более высокие скорости горизонтального движения вод (до 20 см/с), в то время как скорости потока в антициклонической части существенно ниже (не более 10 см/с). Скорость движения вод внутри самих структур значительно выше скоростей распространения подобных диполей как единого целого.

На основе результатов контактных океанографических измерений установлено влияние вихревых диполей на гидрологическую структуру вод. Активная циклоническая часть способна поднимать нижележащие слои воды. Величина вовлечения (подъёма) нижележащих вод в циклонической части составляет порядка 5 м относительно областей внутри ножки вихревого диполя или в районах отсутствия данной динамической структуры.

Было выявлено, что более активные области циклонического вращения вихревых диполей, чётко проявляемые как на цветосинтезированных, так и на радиолокационных спутниковых изображениях, аккумулируют в себе пассивные частицы, и в частности фитопланктонные сообщества. Показано существенное увеличение концентрации хлорофилла *a* в приповерхностных областях циклонической части вихревого диполя. Этот механизм аккумуляции, в том числе квазипассивных биологических клеток водорослей, позволяет на длительных промежутках времени чётко прослеживать на спутниковых изображениях циклоническую часть вихревого диполя.

Авторы благодарны экипажу судна «Фламинго» и Князеву Н.А. (Институт космических исследований РАН) за помощь в проведении подспутниковых измерений. Работа выполнена в рамках темы «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8.

### 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 федерального 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., Лаврова О. Ю., Назирова К. Р., Алферьева Я. О., Соловьев Д. М. Формирование и распространение вихревого диполя за мысом Таран в Юго-Восточной Балтике // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 214–221. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-214-221.
- 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 подспутни-

ковые 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. 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.
- 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. *Митягина М. И., Лаврова О. Ю.* Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 5. С. 72–79.
- 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. *Karimova S., Gade M.* Improved statistics of submesoscale eddies in the Baltic Sea retrieved from SAR imagery // Intern. J. Remote Sensing. 2016. V. 37(10). P. 2394–2414. DOI: 10.1080/01431161.2016.1145367.
- 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.
- Lavrova O., Krayushkin E., Golenko M., Golenko N. Effect of wind and hydrographic conditions on the transport of Vistula Lagoon waters into the Baltic Sea: results of a combined experiment / IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. V. 9. Iss. 9. P. 5193–5201. DOI: 10.1109/ JSTARS.2016.25806022016.
- 17. *Lavrova O.Yu., Krayushkin E.V., Nazirova K.R., Strochkov A.Ya.* Vortex structures in the Southeastern Baltic Sea: satellite observations and concurrent measurements // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2018. V. 10784. Art. No. 1078404. DOI: 10.1117/12.2325463.
- Marmorino G. O., Holt B., Molemaker M. J., DiGiacomo P. M., Sletten M. A. Airborne synthetic aperture radar observations of "spiral eddy" slick patterns in the Southern California Bight // J. Geophysical Research. 2010. V. 115. Iss. C5. Art. No. C05010. https://doi.org/10.1029/2009JC005863.
- 19. *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. 2006. V. 111. Art. No. C04014.
- 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. Art. No. ES4006. DOI: 10.2205/2019ES000672.

## 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

## E.V. Krayushkin, O.Yu. Lavrova, K.R. Nazirova, D.A. Elizarov

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

The results of quasi-synchronous satellite and experimental field observations of two submesoscale eddy dipoles in the coastal zone of the southeastern Baltic Sea near the coast of Kaliningrad Region are presented. The parameters of eddy dipole dynamics, namely, duration of the process in the sea water and its propagation velocity and direction, as well as atmospheric conditions favorable for the occurrence of eddy dipoles are determined from consecutive satellite images of high resolution. The characteristics of the three-dimensional structure of eddy dipoles are determined using the data

of an acoustic current profiler and a hydrological probe obtained concurrently with satellite survey. The depth of vortical motion penetration into the water column is discussed and it is shown that such processes are not purely surface phenomena but have their influence down to a depth of 20 m and more. Direct measurements of current velocities and directions within particular parts of eddy dipole demonstrate essentially greater dynamics of waters inside such formations compared to their displacement velocity. The differences in the anticyclonic and cyclonic parts of the dipoles are evaluated. Hydrological observations show the influence of the active cyclonic part of a dipole on surrounding waters manifested in both capture (rise) of deeper water and accumulation of surfactants within it.

**Keywords:** Baltic Sea, eddy dipole, three-dimensional structure, satellite monitoring, concurrent field and satellite measurements

Accepted: 23.12.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-265-279

### References

- 1. Ginzburg A., Bulycheva E., Kostianoy A., Solovyov D., Vortex dynamics in the Southeastern Baltic Sea from satellite radar data, *Oceanology*, 2015, Vol. 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, Issue 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, *Ocanology*, 2013, Vol. 53, No. 1, pp. 24–35, DOI: 10.1134/S00014370120500625.
- 4. Zatsepin A.G., Baranov V.I., Kondrashov A.A., Korzh A.O., Kremenetskiy V.V., Ostrovskii A.G., Soloviev D.M., Submesoscale Eddies at the Caucasian Black Sea Shelf and the Mechanisms of Their Generation, *Oceanology*, 2011, Vol. 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, Vol. 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, Vol. 7, No. 1, pp. 248–259 (in Russian).
- Krayushkin E. V., Lavrova O. Yu., Nazirova K. R., Alferyeva Ya. O., Soloviev D. M., Formation and propagation of an eddy dipole at Cape Taran in the southeast Baltic Sea, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 214–221 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-214-221.
- 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, Vol. 17, No. 4, pp. 290–299 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-290-299.
- 9. Lavrova O. Yu., Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., *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, Vol. 12, No. 5, pp. 98–129 (in Russian).
- 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, Vol. 16, No. 3, pp. 266– 287 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
- 12. Mityagina M. I., Lavrova O. Yu., Satellite Observations of Eddy and Wave Processes in the Coastal Waters of the North-Eastern Black Sea, *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 5, pp. 72–79 (in Russian).
- 13. Gurova E., Chubarenko B., Remote-sensing observations of coastal sub-mesoscale eddies in the southeastern Baltic, *Oceanologia*, 2012, Vol. 54(4), pp. 631–654.
- 14. Karimova S., Gade M., Improved statistics of submesoscale eddies in the Baltic Sea retrieved from SAR imagery, *Intern. J. Remote Sensing*, 2016, Vol. 37(10), pp. 2394–2414, DOI: 10.1080/01431161.2016.1145367.
- 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*, Velarde M., Tarakanov R., Marchenko A (eds.), Springer-Verlag, 2018, pp. 397–413, https://doi. org/10.1007/978-3-319-71934-4\_24.

- Lavrova O., Krayushkin E., Golenko M., Golenko N., Effect of wind and hydrographic conditions on the transport of Vistula Lagoon waters into the Baltic Sea: results of a combined experiment, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, Vol. 9, Issue 9, pp. 5193–5201, DOI: 10.1109/JSTARS.2016.25806022016.
- 17. Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V., Nazirova K. R., Strochkov A. Ya., Vortex structures in the Southeastern Baltic Sea: satellite observations and concurrent measurements, *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*, 2018, Vol. 10784, Art. No. 1078404, DOI: 10.1117/12.2325463.
- 18. Marmorino G. O., Holt B., Molemaker M. J., DiGiacomo P. M., Sletten M. A., Airborne synthetic aperture radar observations of "spiral eddy" slick patterns in the Southern California Bight, *J. Geophysical Research*, 2010, Vol. 115, Issue C5, Art. No. C05010, https://doi.org/10.1029/2009JC005863.
- 19. 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*, 2006, Vol. 111, Art. No. C04014.
- 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, Vol. 19, Art. No. ES4006, DOI: 10.2205/2019ES000672.