Субмезомасштабный циклонический вихрь за мысом Гвардейский в Юго-Восточной Балтике: спутниковые наблюдения и подспутниковые измерения

Е. В. Краюшкин, К. Р. Назирова, О. Ю. Лаврова, Н. А. Князев

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mails: box evk@mail.ru, olavrova@iki.rssi.ru

Представлены результаты синхронных подспутниковых измерений субмезомасштабного циклонического вихря за м. Гвардейский (юго-восточная часть Балтийского моря), который чётко отразился на изображении, полученном с помощью MSI Sentinel-2B. Данный вихрь сформировался за м. Гвардейский Самбийского п-ова под действием устойчивых в течение трёх дней ветров восточных румбов, что само по себе достаточно редкое явление, поскольку в данном районе формируются в основном антициклонические вихри и вихревые диполи вследствие преобладания западных ветров. Совместный анализ данных спутникового зондирования и полностью синхронных с ним измерений с помощью акустического доплеровского профилографа течений ADCP позволил не только определить характерные горизонтальные размеры вихря, но и доказать, что он распространяется по всей водной толще от поверхности до дна. Натурные измерения, проведённые в одном и том же районе с разницей почти в 7 ч, позволили также оценить скорость смещения центра вихря, которая составила 8,5 см/с. Субмезомасштабный циклонический вихрь проявился на спутниковом изображении за счёт трассера, которым в данном случае стали скопления цианобактерий, что нашло подтверждение в результате измерений с помощью датчика концентрации хлорофилла а в вихре и вне его.

Ключевые слова: субмезомасштабный циклонический вихрь, течения за мысами, спутниковые наблюдения, MSI Sentinel-2, концентрация хлорофилла *a*, подспутниковые измерения, акустический доплеровский профилограф течений, Юго-Восточная Балтика

Одобрена к печати: 02.09.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-290-299

В связи с появлением и широкой доступностью для научных исследований данных спутникового зондирования высокого пространственного разрешения удалось серьёзно продвинуться в изучении субмезомасштабных процессов, в частности вихрей, радиус которых меньше бароклинного радиуса деформации Россби (Зацепин и др., 2011; Костяной и др., 2010; Лаврова и др., 2011; Munk et al., 2000). Механизмы образования субмезомасштабных вихрей многообразны. К основным можно отнести: ветровой импульс, неоднородности атмосферного потока, сдвиговая неустойчивость течений, речной сток, взаимодействие вихрей разных масштабов и их диссипация, взаимодействие течений с мелкомасштабными особенностями береговой линии (обтекание мысов и бухт) (Гинзбург и др., 2015; Зацепин и др., 2011; Костяной и др., 2010; Лаврова и др., 2011, 2015). Изучение субмезомасштабных вихрей базируется в первую очередь на данных спутникового зондирования (Гинзбург и др., 2015; Митягина, Лаврова, 2009; Karimova, Gade, 2016), а также численного (Zhurbas et al., 2006, 2019) и лабораторного моделирования (Елкин, Зацепин, 2013). Измерение параметров мелкомасштабных вихрей в натурных условиях оказывается непростой задачей в силу их малых размеров, нестационарности, спонтанности появления. Несмотря на то, что по спутниковой информации были определены места их постоянной генерации, авторам известны только единичные случаи синхронных измерений параметров субмезомасштабных вихрей дистанционными и контактными методами (см., например, работы (Lavrova et al., 2018; Marmorino et al., 2010)).

Район Юго-Восточной Балтики известен вихревой активностью. Субмезомасштабные вихри регулярно наблюдаются как в Гданьском заливе, так и в акватории северней Самбийского п-ова (Каримова и др., 2011; Гинзбург и др., 2015; Gurova, Chubarenko, 2012; Kostianoy et al., 2018; Lavrova et al., 2018). Физическое объяснение вихреобразования в данном районе, основанное на результатах лабораторного моделирования, описано в работах (Zhurbas et al.,

2006, 2019). В данном районе нет постоянного вдольберегового течения. Прибрежные течения формируются в первую очередь под действием ветра (Lavrova et al., 2016). При ветре влево вдоль береговой линии, если наблюдатель смотрит на море в Северном полушарии, образуются циклоны как за мысом, так и просто вдоль береговой линии; вдольбереговое течение имеет то же направление, что и ветер. И соответственно, при ветре противоположного направления образуются антициклоны. У м. Таран чаще образуются антициклоны (Гурова, 2012), так как преобладают ветры западных румбов или вихревые диполи (Краюшкин и др., 2018). При восточном ветре устанавливается течение, направленное на запад, что способствует отрыву вихрей циклонической направленности.

Во время очередных экспедиционных работ 15 августа 2020 г. нам удалось провести тщательные измерения параметров циклонического вихря, который сформировался за м. Гвардейский (рис. 1) при устойчивом ветре восточных румбов. Данный вихрь чётко проявился на спутниковом изображении сенсора MSI (англ. MultiSpectral Instrument) Sentinel 2B, полученном синхронно с натурными измерениями.

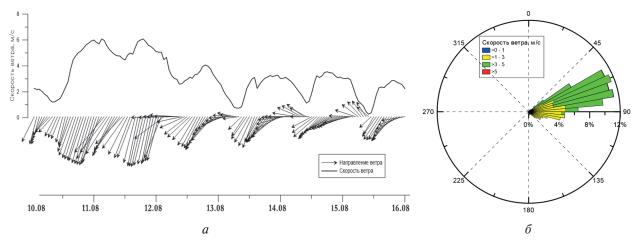


Puc. 1. Проявление субмезомасштабного циклонического вихря на цветосинтезированном изображении MSI Sentinel-2B от 15 августа 2020 г.

Информация о скорости и направлении ветра в узле с координатами 54,98° с. ш. и 19,98° в.д., находящемся в одной миле севернее от м. Таран, была получена с метеорологического сервиса meteoblue.com. Данные моделирования meteoblue основаны на расчётах поля ветра глобальной моделью NEMSGLOBAL с размером ячейки 3×3 км. График скорости и направления ветра в районе м. Таран в период с 10 по 15 августа 2020 г., построенный на основе данных meteoblue, представлен на рис. 2a (см. с. 292). С 10 по 12 августа 2020 г. в районе натурных измерений преобладали ветры северо-северо-восточных румбов со скоростью 5–6 м/с. Затем направление ветра сменилось на устойчивые северо-восточные-восточные румбы со средней скоростью 2—4 м/с. Преобладание восточных румбов подтверждает роза ветров во время проведения измерений параметров прибрежных течений 15 августа 2020 г., построенная по данным судовой метеостанции (рис. 26).

Синхронные со спутниковой съёмкой измерения проводились с борта маломерного судна «Фламинго» с использованием акустического доплеровского профилографа течений ADCP Teledyne RD Instruments WorkHorse Monitor 300 Гц, а также CTD-зонда RBR Concerto (англ. Conductivity, Temperature and Depth — проводимость, температура и глубина)

для определения температуры и солёности воды от поверхности до дна. Кроме того, определялись значения параметров общей мутности вод с помощью датчика обратного рассеивания света Seapoint Turbidity и концентрации хлорофилла а в воде с помощью датчика флюоресценции хлорофилла а Turner Design Cyclops-7. Метеорологическая обстановка в районе работ бралась с судовой метеостанции Airmar 50WX. На рис. 3 показана схема проведённых измерений за 15.08.2020, включая: ход маломерного судна с записью ADCP в направлении порт Пионерский — м. Таран (красные кружки) в промежуток времени 09:01—10:22 UTC и в направлении м. Таран — порт Пионерский в обратном направлении (белые кружки) в промежуток 15:45—17:02 UTC. Синими квадратами нанесены станции CTD-зондирования.



Puc. 2. Скорость и направление ветра в районе м. Таран 10-15 августа 2020 г. (*a*) (©www.meteoblue.com); роза ветров по данным судовой метеостанции за 15 августа 2020 г. (*б*)

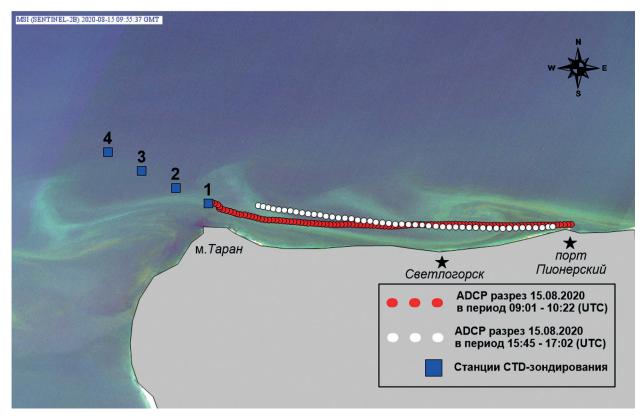


Рис. 3. Схема натурных измерений 15 августа 2020 г. Подложка — спутниковое изображение MSI Sentinel-2B, полученное в тот же день в 09:55 UTC

При измерениях параметров течения с помощью ADCP использовалась ячейка по глубине с размером 2 м, центр первой ячейки располагался на глубине 4 м. Осреднение данных по глубине не проводилось для получения максимально высокого разрешения вертикального распределения векторов течения, величина осреднения вдоль трека ADCP составляла 30 измерений, что соответствует дискретности по расстоянию \sim 135 м. Как показали измерения, на первом разрезе порт Пионерский — м. Таран, выполненном в период 09:01–10:02, т.е. квазисинхронно со спутниковой съёмкой, наблюдалось течение, направленное сначала в юго-восточном направлении (140–180°), а затем — в южном и юго-западном (100–140°) (рис. 4).

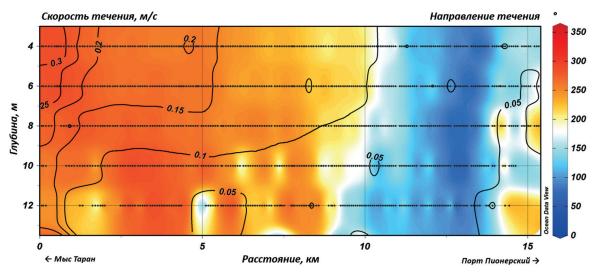
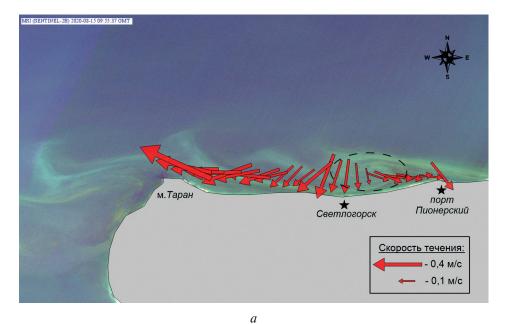
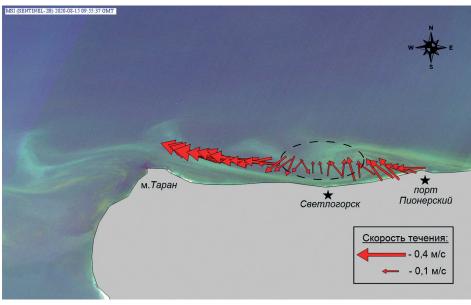


Рис. 4. Вертикальный разрез поля течений, выполненный 15 августа 2020 г. в период 09:01–10:22 UTC (см. *рис.* 3, красные кружки). Цветом показано направление течения, изолиниями — скорость течения. Точками отмечены центры ячеек, в которых проводились измерения параметров течений с использованием ADCP

Указанное направление течений имело место по всей толще воды, начиная как минимум с 4 м и до глубины 15 м. При этом скорость течения в указанной области была небольшая и составляла не более 10 см/с как на поверхности, так и у дна. При дальнейшем движении в сторону м. Таран направление течения менялось с преобладанием западных компонент с постепенным переходом на устойчивое западное течение в районе мыса. При этом скорость потока также равномерно возрастала, начиная с 10 см/с в точке резкой смены течений и до 35 см/с у м. Таран (рис. 5a, см. с. 294). Причём увеличение скорости течения происходит преимущественно в поверхностном слое. Таким образом, измеренное распределение параметров течения свидетельствует о наличии циклонического вихря, проникающего от поверхности моря до придонных горизонтов. Примечательно, что в районе порта Пионерский, где наблюдалось течение восточных румбов, скорость течения минимальна (не более 10 см/с), в то время как на противоположной периферии вихревого образования, где присутствуют течения западных румбов, возрастает и их скорость до 20 см/с. Данная особенность может быть объяснена тем фактом, что в районе порта Пионерский вихревое образование испытывает дополнительное трение о прилегающую береговую линию, в то время как противоположная часть вихря испытывает влияние сильного западного течения, огибающего м. Гвардейский (см. puc. 5a). Важно отметить, что спутниковое изображение MSI Sentinel-2B было получено практически одновременно с моментом прохождения маломерного судна через вихревое образование, а именно в 09:55 UTC.

Измерения, выполненные на вечернем разрезе в промежуток времени 15:45—17:02 UTC в обратном направлении от м. Таран до порта Пионерский, подтвердили наличие циклонического вихря (*puc. 56*). Проведение измерений в одном и том же районе с разницей в 6 ч позволило оценить скорость распространения центра циклонического вихря.





Puc. 5. Схема поверхностных течений на глубине 3-5 м по данным измерений с помощью ADCP 15 августа 2020 г.: a — в период 09:01—10:22 UTC; δ — в период 15:45—17:02 UTC. Овалами отмечено положение циклонического вихря

Центр вихря в утренние часы имел координаты примерно 54° 57,814′ с. ш., 20° 9,008′ в. д., что подтверждается как данными ADCP, так и картиной, наблюдаемой по спутниковому изображению. Центр вихря, определённого по данным измерений АDCP на вечернем разрезе, находился в точке с координатами примерно 54° 57,778′ с. ш., 20° 7,034′ в.д., что подтверждается исключительно данными судового ADCP. Между прохождениями двух вышеуказанных точек в утренние и вечерние часы прошло 6 ч, 57 мин и 8 с, что даёт возможность провести оценку скорости распространения центра вихревого образования в западном направлении, совпадающем с генеральным западным направлением течений в районе работ. Скорость распространения центра вихря в западном направлении составила ~8,5 см/с.

Совместный анализ дистанционных данных и данных контактных измерений позволил определить также пространственные характеристики циклонического вихря, который имел форму эллипса с размерами большой полуоси 1,6 км и малой — 1,42 км.

Отметим, что описываемый нами циклонический вихрь проявился на спутниковом изображении за счёт трассера, которым в данном случае оказались скопления цианобактерий, интенсивное цветение которых характерно для Юго-Восточной Балтики. В периоды с длительной маловетреной и солнечной погодой цианобактерии объединяются в агрегаты, которые поднимаются к поверхности, образуя поверхностные или подповерхностные скопления. Под воздействием ветра и течений эти скопления переносятся как пассивные трассеры, прорисовывая, таким образом, поверхностные течения (Siegel, Gerth, 2008; Каримова и др., 2011), в частности вихревые структуры. 15 августа 2020 г. нам удалось выполнить короткий разрез к северо-западу от м. Таран (см. рис. 3), тем самым провести зондирование как в области повышенного рассеяния (у береговой зоны, ст. № 1), так и в области относительно «чистой» морской воды (ст. \mathbb{N}_2). На *puc.* 6 представлен вертикальный профиль распределения концентрации хлорофилла a на этих двух станциях. На графике отчётливо видно, что на прибрежной станции (\mathbb{N}_{2} 1) максимальные значения концентрации хлорофилла a более чем в два раза превышают аналогичные значения на ст. № 2. На ст. № 1 слой с повышенной концентрацией хлорофилла a расположен на горизонтах 2,5-10 м с максимум 12 мкг/л, а на ст. № 2 этот слой уже немного заглублён и располагается на 5-15 м, но максимальные значения не превышают 5 мкг/л.

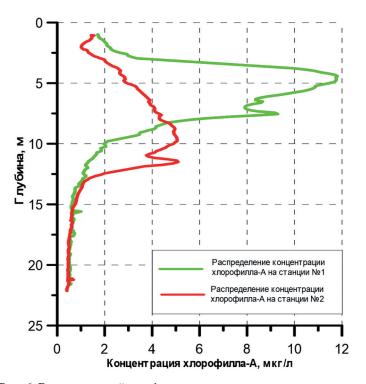


Рис. 6. Вертикальный профиль распределения концентрации хлорофилла a на ст. № 1 и № 2 за 15 августа 2020 г.

В заключение отметим, что представленные результаты оказались нечастым и успешным примером определения параметров циклонического вихря, образовавшегося под влиянием восточного ветра за м. Гвардейским в Юго-Восточной Балтике, что само по себе достаточно редкое явление, поскольку в данном районе преобладают западные ветры и, соответственно, формируются в основном антициклонические вихри. Совместный анализ данных спутникового зондирования и синхронных с ним измерений с помощью АDCP позволил не только определить характерные горизонтальные размеры вихря, но и доказать, что он распространяется по всей водной толще от поверхности до дна. Проведение натурных измерений в одном и том же районе с разницей в почти 7 ч позволило также оценить скорость смещения центра вихря, которая составила 8,5 см/с.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 01.20.0.2.00164 (тема «Мониторинг»). Обработка и анализ спутниковых данных проводились с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-мониторинг» (Лупян и др., 2019) с помощью инструментария информационной системы See the Sea (Лаврова и др., 2019). Авторы благодарят Журбаса В. М. (Институт океанологии Российской академии наук им. П. П. Ширшова) за полезное обсуждение.

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. 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.
- 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., 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. 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.
- 9. *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.
- 10. *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.
- 11. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- 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-east-ern 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.
- 15. *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. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_24.
- 16. 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. 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. V. 115. Iss. C5. CiteID C05010. URL: https://doi.org/10.1029/2009JC005863.
- 19. Munk W., Armi L., Fischer K., Zachariasen F. Spirals on the sea // Proc. Royal Society A. 2000. V. 456. P. 1217–1280.
- 20. *Siegel H.*, *Gerth M.* Optical remote sensing applications in the Baltic Sea // Remote sensing of the European Seas / eds. Barale V., Gade M. Springer-Verlag, 2008. P. 91–102.
- 21. *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. C04014.
- 22. *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. ES4006. DOI: 10.2205/2019ES000672.

Submesoscale cyclonic eddy behind Cape Gvardeisky in the southeastern Baltic Sea: satellite observation and concurrent measurements

E. V. Krayushkin, K. R. Nazirova, O. Yu. Lavrova, N. A. Knyazev

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mails: box evk@mail.ru, olavrova@iki.rssi.ru

The results of concurrent satellite and boat observations of a submesoscale cyclonic eddy displayed in a Sentinel-2B MSI image behind Cape Gvardeisky (southeastern Baltic Sea) are presented. The eddy originated downstream of Cape Gvardeisky of the Sambian Peninsula by force of easterly winds that persisted for 3 days. This is a rare occasion as usually there occur anti-cyclonic eddies and dipoles due to mostly westerly winds. Joint analysis of the satellite data and fully synchronous measurements with an acoustic Doppler current profiler made it possible not only to estimate the horizontal dimensions of the eddy but also demonstrate that it spans the entire water column, from the surface to the bottom. Consecutive boat measurements with a time interval of about 7 h revealed the displacement of the eddy center at a velocity of 8.5 cm/s. The eddy was displayed in the satellite image due to the presence of a tracer in the surface layer of water. In this case, it was an aggregation of cyanobacteria that was confirmed by probing with a chlorophyll *a* concentration meter inside and outside the eddy.

Keywords: submesoscale cyclonic eddy, currents behind capes, satellite observations, Sentinel-2 MSI, chlorophyll *a* concentration, concurrent measurements, acoustic Doppler current profiler, southeastern Baltic Sea

Accepted: 02.09.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-290-299

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., O formirovanii i dinamike vikhrya u poberezh'ya Yugo-Vostochnoi Baltiki po dannym distantsionnogo zondirovaniya (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.

- 3. Zatsepin A. G., Kremenetskiy V. V., Ostrovskii A. G., Baranov V. I., Kondrashov A. A., Korzh A. O., Soloviev D. M., Submesoscale eddies at the Caucasus Black Sea shelf and the mechanisms of their generation, *Oceanology*, 2011, Vol. 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, Vol. 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, Vol. 48, No. 9, pp. 1006–1013, URL: https://doi.org/10.1134/S0001433812090071.
- 6. Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Melkomasshtabnye vikhri Chernogo morya (Small-scale eddies in the Black Sea), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 1, pp. 248–259.
- 7. Krayushkin E. V., Lavrova O. Yu., Nazirova K. R., Alferyeva Ya. O., Soloviev D. M., Formirovanie i rasprostranenie vikhrevogo dipolya za mysom Taran v Yugo-Vostochnoi Baltike (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, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-214-221.
- 8. 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.
- 9. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Sabinin K. D., Serebryany A. N., Izuchenie gidrodinamicheskikh protsessov v shel'fovoi zone na osnove sputnikovoi informatsii i dannykh podsputnikovykh izmerenii (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.
- 10. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Uvarov I. A., Loupian E. A., Tekushchie vozmozhnosti i opyt ispol'zovaniya informatsionnoi sistemy See the Sea dlya izucheniya i monitoringa yavlenii i protsessov na morskoi poverkhnosti (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, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
- 11. Loupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Kashnitskii A.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Konstantinova A.M., Kobets D.A., Mazurov A.A., Marchenkov V.V., Matveev A.M., Radchenko M.V., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Opyt ekspluatatsii i razvitiya tsentra kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh (TsKP IKI-Monitoring) (Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- 12. Mityagina M. I., Lavrova O. Yu., Sputnikovye nablyudeniya vikhrevykh i volnovykh protsessov v pribrezhnoi zone severo-vostochnoi chasti Chernogo morya (Satellite observations of eddy and wave processes in the coastal waters of the north-eastern Black Sea), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 5, pp. 72–79.
- 13. Gurova E., Chubarenko B., Remote-sensing observations of coastal sub-mesoscale eddies in the south-eastern Baltic, *Oceanologia*, 2012, Vol. 54, No. 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, No. 10, pp. 2394–2414, DOI: 10.1080/01431161.2016.1145367.
- 15. 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-Verglag, 2018, pp. 397–413, available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4 24.
- 16. 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, 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, Iss. C5. CiteID C05010, available at: https://doi.org/10.1029/2009JC005863.
- 19. Munk W., Armi L., Fischer K., Zachariasen F., Spirals on the sea, *Proc. Royal Society A*, 2000, Vol. 456, pp. 1217–1280.
- 20. Siegel H., Gerth M., Optical remote sensing applications in the Baltic Sea, *Remote Sensing of the European Seas*, Barale V., Gade M. (eds.), Springer-Verlag, 2008, pp. 91–102.

- 21. 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, C04014.
- 22. Zhurbas V., Väli G., Kostianoy A., Lavrova O., Hindcast of the mesoscale eddy field in the Southeastern Baltic Sea: Model output vs satellite imagery, *Russia J. Earth Sciences*, 2019, Vol. 19, ES4006, DOI: 10.2205/2019ES000672.