

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ СУБМЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ В МОРЯХ РОССИИ

Костяной А.Г.¹, Гинзбург А.И.¹, Лаврова О.Ю.², Митягина М.И.²

¹Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, Нахимовский пр., 36, 117997,
г. Москва, тел. +7 499 124-8810, +7 499 129-1954,

e-mail: kostianoy@gmail.com, ginzburg@ocean.ru

²Институт космических исследований РАН, ул. Профсоюзная, 84/32, 117997,
г. Москва, тел. +7 499 333-4256,

e-mail: olavrova@iki.rssi.ru, mityag@iki.rssi.ru

Satellite images of high resolution, primarily radar images, have shown that submesoscale eddies (characteristic diameters of 2–8 km) are a common element of water dynamics of the inland Russian seas (the Black, Caspian, Baltic, and White). Examples of satellite images of such eddies are presented, and mechanisms of their generation are discussed.

Многочисленные натурные измерения (начиная с 1970-х годов, когда проводились советский эксперимент Полигон-70, американский эксперимент MODE и советско-американский эксперимент POLYMODE) и спутниковые изображения показали, что океаны и моря полны вихрей, имеющих различные механизмы формирования и различные пространственные и временные характеристики. Среди них – фронтальные вихри крупномасштабных течений, вихри открытого моря, топографические вихри, вихри, создаваемые при атмосферном воздействии, внутритермоклинные линзы, диполи, триполи и т.д. Их диаметры варьируются в широких пределах: от нескольких километров до более 200 км и время жизни – от нескольких дней до десятков месяцев и даже лет (в случае внутритермоклинных линз). Вихри с горизонтальным масштабом порядка внутреннего радиуса деформации Россби относятся к мезомасштабным (синоптическим в русской литературе) вихрям. Эти геострофические или квазигеострофические вихри, имеющие антициклоническое или циклоническое вращение (по часовой стрелке или против часовой стрелки в Северном полушарии соответственно), наиболее изучены до настоящего времени как измерениями in-situ, так и спутниковыми наблюдениями. Они являются мощным механизмом горизонтального (из-за вовлечения окружающих вод на периферии вихря)

и вертикального (из-за восходящего / нисходящего движения воды в центре вихря) перемешивания в океане.

Спутниковые фотографии в областях солнечного блика на поверхности моря американских океанографов показали, что в различных районах Мирового океана существуют субмезомасштабные вихри [1–4]. Они, как правило, имели спиральную форму и вращались в циклоническом направлении. Такие вихри также были обнаружены на радарных изображениях в разных регионах океанов и морей (например, [5–7]).

Предполагается, что субмезомасштабные вихри характеризуются большим числом Россби (Ro порядка $O(1)$) и более высокой (по порядку величины) вертикальной скоростью, чем мезомасштабные вихри, что определяет их важную роль в вертикальном обмене между поверхностными и более глубокими слоями океанов и морей. Однако на сегодняшний день информация о механизмах их генерации, эволюции и вертикальной структуры явно недостаточна. Измерения *in-situ* в областях таких вихрей практически отсутствуют из-за их спорадического проявления, небольшого времени жизни и небольших пространственных размеров. Таким образом, накопление спутниковых наблюдений субмезомасштабных вихрей в различных регионах Мирового океана вместе с соответствующей информацией о гидрофизических и метеорологических условиях чрезвычайно важно.

В этом докладе обсуждаются наблюдения субмезомасштабных вихрей в российских морях (Черном, Каспийском, Балтийском и Белом), а также сделаны предположения о возможных механизмах их образования.

Спутниковое дистанционное зондирование показало, что субмезомасштабные вихри являются общим элементом динамики внутренних российских морей [6–15]. Они имеют короткое время жизни (день или несколько дней) и небольшие размеры (2–8 км), поэтому основным инструментом для их наблюдения является спутниковая информация с высоким пространственным разрешением. Такие вихри в значительной степени обуславливают горизонтальное перемешивание в открытом море и водообмен между шельфом и открытым морем; последнее особенно важно для морских приморских территорий с высоким уровнем загрязнения речными стоками, городскими сбросами и туристическими отходами.

Механизмами генерации субмезомасштабных вихрей в прибрежных зонах морей являются: импульс ветра; сдвиговая неустойчивость прибрежных течений; речной сток; взаимодействие вихрей и их диссипация; взаимодействие течений с мелкомасштабными особен-

ностями береговой линии (мысы, косы) или неровностями рельефа дна. В глубоком море они могут быть результатом фронтальной неустойчивости, включая неустойчивость на границах мезомасштабных структур (вихри, струи апвеллинга). Менее очевидны механизмы формирования субмезомасштабных вихрей или полей таких вихрей в областях, где отсутствуют фронты или сдвиги скорости (примеры радиолокационных изображений таких вихревых полей в Черном, Каспийском и Балтийском морях представлены в докладе). Нами было высказано предположение, что их образование может быть результатом атмосферных импульсных эффектов или конвекции. Дальнейшие исследования с помощью спутниковых данных совместно с анализом гидрометеорологической информации помогут прояснить эту проблему.

Работа выполнена за счет гранта РФФИ № 14-17-00555 «Исследование влияния динамических и циркуляционных процессов на распространение антропогенных и биогенных загрязнений морской поверхности на основе комплексного использования спутниковой информации».

ЛИТЕРАТУРА

1. Scully-Power P. Navy Oceanographer Shuttle Observations, STS 41-G, Mission Report // Naval Underwater Systems Center Tech. Rep. NUSC TD 7611. 1986. 71 p.
2. Stevenson R.E. Oceanography from the Space Shuttle // Office of Naval Research. The University Corporation for Atmospheric Research. 1989. 200 p.
3. Stevenson R.E. Spiral eddies: the discovery that changed the face of the oceans // 21st Century Science and Technology. 1998. Vol. 11. P. 58–71.
4. Munk W., Armi L., Fischer K., Zachariasen F. Spirals on the sea // Proc. Royal Society. Lond. A. 2000. Vol. 456. P. 1217–1280.
5. Eldevik T., Dysthe K.B. Spiral eddies // J. Phys. Oceanogr. 2002. Vol. 32. No. 3. P. 851–869.
6. Ivanov A. Yu., Ginzburg A.I. Oceanic eddies in synthetic aperture radar images // Proc. Indian Academy of Sciences. Earth and Planetary Sciences. 2002. Vol. 111. No. 3. P. 281–295.
7. Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Мелкомасштабные вихри Черного моря // Седьмая Всероссийская открытая конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. Москва, 16–20 ноября 2009 г. / Сборник тезисов конференции. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 201.
8. 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.
9. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинз-

- бург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 470 с.
10. Зацепин А.Г., 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. 554–567.
 11. Lavrova O.Yu., Kostianoy A.G., Stochkov A.Yu. Mesoscale and submesoscale eddies on the sea shelf and their impact on oil spill spread // SPIE Remote Sensing Conference. 19–22 September 2011. Prague Czech Republic [8175–19].
 12. Каримова С.С. Статистический анализ субмезомасштабных вихрей Балтийского, Черного и Каспийского морей по данным спутниковой радиолокации // *Исследование Земли из космоса*. 2012. № 3. С. 3147.
 13. Родионов А.А., Романенков Д.А., Зимин А.В., Козлов И.Е., Шапрон Б. Субмезомасштабные структуры вод Белого моря и их динамика. Состояние и направления исследований // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2014. Т. 7. № 3. С. 29–41.
 14. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 335 с.
 15. Kostianoy A.G., Ginzburg A.I., Lavrova O.Yu., and Mityagina M.I. Satellite remote sensing of submesoscale eddies in the Russian Seas // In: *The Ocean in motion*. (Eds.) M.G. Velarde, R. Tarakanov, A. Marchenko. Springer Oceanography. Springer, Cham, Switzerland, 2018, P. 397413. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_24.