# Характеристики течений в антициклоническом вихре по результатам дрифтерных и спутниковых наблюдений

# С. В. Станичный, М.А. Кузьмина, Р. Р. Станичная, Е. М. Лемешко

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия E-mail: sstanichny@mail.ru

На основе анализа перемещения серии дрифтеров в северо-западной части Чёрного моря, размещённых в антициклоническом вихре, предварительно идентифицированном по спутниковым изображениям, проведён анализ скоростей дрифтеров в вихревой структуре. Рассчитаны вращательная и транспортная компоненты скорости в вихре. Продемонстрировано хорошее совпадение расчётных скоростей перемещения центра вихря по дрифтеров АVHRR, MODIS в оптическом и инфракрасном диапазонах. Траектории вращаются по часовой стрелке. Показано, что частота изменения скорости в вихре приблизительно в два раза больше частоты вращения, что характерно для эллиптического движения с постоянной угловой скоростью. Продемонстрировано прямое воздействие усиления ветра на смещение всей вихревой структуры.

**Ключевые слова:** Чёрное море, дрифтеры, мезомасштабные вихри, спутниковые изображения, скорости перемещения, ветровое воздействие

Одобрена к печати: 01.07.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-208-215

### Введение

Мезомасштабные вихри в Чёрном море играют важную роль в процессах вертикального и горизонтального перемешивания, в том числе кросс-шельфового обмена. Интерес к их исследованию возник в конце прошлого века при выявлении таких структур в данных судовых гидрологических съёмок (Гришин, Субботин, 1993; Латун, 1989; Oguz et al., 1993). При появлении регулярной спутниковой информации стало понятно, что вихревая динамика в бассейне играет не меньшую роль в транспорте физических, химических и биологических компонент (характеристик) в морской экосистеме, чем средняя циркуляция, определяемая Основным Черноморским течением (ОЧТ) (Гинзбург и др., 2000; Ginzburg, 1994; Shapiro et al., 2010; Sur, Ilvin, 1997; Zatsepin et al., 2003). Проведённые исследования показали, что вихревые структуры не являются стационарными, а зарождаются в определённых местах, перемещаются и диссипируют (Kubryakov, Stanichny, 2015). Скорости перемещения вихрей достаточно хорошо определяются по последовательным данным в оптическом, инфракрасном (ИК) диапазонах и альтиметрии (Гинзбург, 1994; Kubryakov, Stanichny, 2015). Однако структура течений внутри вихрей не описана хорошо. Можно отметить контактные данные (Лемешко, 2008). В то же время проведённые дрифтерные эксперименты позволяют провести исследование особенностей течений в вихревой структуре. Цель настоящей работы заключается в изучении особенностей транспорта вихря и структуры течений в вихре в ходе комплексного эксперимента 2004 г., когда дрифтеры были запущены внутри антициклонического вихря в северо-западной части Чёрного моря (Лемешко, 2008).

# Используемые данные

Для исследований были использованы данные шести SVP (*англ*. Surface Velocity Project) дрифтеров (Lumpkin, Pazos, 2007), состоящих из поплавка и цилиндрического паруса с центром давления на 15 м с номерами WMO (*англ*. World Meteorological Organization) 47603–47608 в Северо-западной части Чёрного моря. Размещённые в обнаруженном ранее по спутниковым данным антициклоническом вихре дрифтеры были вовлечены в вихревое движение и совершили от 2 до 6 полных оборотов. Для анализа были использованы данные за период с 136го по 160-й день (15 мая – 4 июня) 2004 г. На *рис. 1* показаны траектории дрифтеров, наложенные на изображение сканера MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) за 22 мая, 143-й день (начальные положения дрифтеров отмечены цветными кружками). Вихревая структура хорошо выделяется в видимом диапазоне за счёт вовлечения во вращательное движение вод с отличающимися оптическими характеристиками. Были получены в среднем 6–7 регистраций положения дрифтеров в сутки. Как видно, кроме вращения дрифтеры имели существенную транспортную компоненту за счёт смещения вихря в юго-западном направлении. Дополнительно для определения характеристик изучаемого вихря использовались данные сканеров AVHRR (*англ.* Advanced Very-High-Resolution Radiometer) и MODIS. Скорость ветра для изучаемого района бралась из архива NCEP (National Centers for Environmental Prediction, Национальный центр экологических прогнозов) для точки с координатами 44° с. ш., 32° в. д.



*Рис. 1.* RGB-карта сканера MODIS за 22 мая с нанесёнными траекториями дрифтеров за первые 15 дней с 14 по 29 мая (135–150-й дни)

# Методика обработки данных

Для получения непрерывного ряда наблюдений с одинаковым интервалом широта и долгота положения дрифтеров линейно интерполировались на интервал 1 ч для всех данных. Примеры исходных и интерполированных траекторий для дрифтеров 47607 и 47606 показаны на *рис. 2* (см. с. 210).

Для разделения вращательной и транспортной компонент движения дрифтера предполагалось:

$$X(t) = a \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t + x(t), \quad Y(t) = b \cdot \cos \frac{2\pi}{T} t + y(t),$$

где X(t) и Y(t) — соответственно долгота и широта; t — время; T — период вращения; x(t), y(t) — смещения, обусловленные транспортной компонентой; a и b имеют смысл полуосей предполагаемых эллипсов вращения.



*Рис. 2.* Траектории движения дрифтеров 47607 (*a*) и 47606 (*б*) до интерполяции координат (синие окружности) и после интерполяции (красные точки)



*Рис. 3.* Рассчитанные положения центра вихря для пяти дрифтеров и средняя траектория (чёрная линия)

Далее были рассчитаны спектры и выделены максимумы для определения интервалов осреднения (периода Т). Затем рассчитывались скользящие значения медианных средних для широты и долготы за интервалы, соответствующие полученным периодам вращения (90-110 ч). Предполагается, что вращательная компонента при таком осреднении близка к нулю. Таким образом получали компоненты движения центра вихря x(t), y(t) для каждого из дрифтеров. Траектории движения центра для всех дрифтеров показаны на рис. 3 (см. с. 210). Для сокращения номера траекторий на шкалах указаны последние цифры номера дрифтера (3 соответствует 47603 и т.д.). Как видно, такой подход достаточно хорошо описывает положение центра вихря, и данные для разных дрифтеров дают небольшие отклонения в единицы километров. На каждый



Рис. 4. Вращательная траектория для дрифтера 47607, координаты в градусах относительно центра вихря

момент времени из реальных координат вычитались значения положения центра, чтобы получить вращательную компоненту движения дрифтера. Траектории строились относительно полученных координат центра вихря в отклонениях, измеряемых в градусах или километрах.

Траектория дрифтера после такой операции показана для дрифтера 47607 на *рис. 4*. Отметим, что траектории имели эллиптическую форму с отношением длин осей 1,2–1,3.

#### Результаты

Антициклонический вихрь был обнаружен на снимках в середине апреля вблизи Крымского п-ова, далее продвигался на запад (на *puc. 5* показана карта WLR (*анел.* Water Leaving Radiance) за 9 мая, на которой вихревая структура хорошо выделяется).



*Рис. 5.* Карта WLR сканера MODIS-Aqua, на которой хорошо проявляется изучаемый вихрь радиусом 40 км



*Рис. 6.* Рассчитанная средняя траектория движения центра вихря (красная линия) и положение центра вихря, интерактивно полученное для безоблачных снимков (синие окружности)

14 мая (135-й день) в ядро вихря были размещены 6 дрифтеров. Вихрь по спутниковым изображениям имел радиус до 40 км. Средние радиусы вращения для разных дрифтеров менялись от 5–6 км (дрифтер 47606) до 20 км (дрифтер 47608 — первые два оборота, на третьем обороте этот дрифтер был вынесен из вихря). Таким образом, дрифтеры были размещены ближе к центру вихря, их радиусы вращения не превышали 1/2 от радиуса вихря.

Сравнения положения центра вихря с данными, полученными со спутниковых изображений в ИК- и оптическом диапазонах, продемонстрировали достаточно хорошее соответствие (*puc. 6*). Отклонения от расчётной траектории составили единицы километров. Средняя транспортная скорость (скорость перемещения центра вихря) составила 6 см/с. В то же время вращательная компонента скорости изменялась от 11 см/с — для дрифтера 47606, находящегося вблизи центра вихря, до 32 см/с — для двух первых оборотов дрифтера 47608, что приблизительно соответствует твёрдотельному вращению, учитывая радиусы вращения дрифтеров.

Интересный результат был получен при анализе вращательной компоненты скорости дрифтера. Частота изменчивости этой скорости приблизительно в два раза превышала частоту вращения. В качестве примера на *рис.* 7 показана изменчивость вращательной компоненты скорости дрифтера и широты. Такое распределение скорости характерно для эллиптического вращения с постоянной скоростью. Полученное отношение осей эллипса составило 1,2-1,3. Отметим, что оси эллипса также вращаются по часовой стрелке со скоростью приблизительно  $5-8^{\circ}$  в сутки. На *рис.* 8 показано изменение скорости дрифтера на интервале 138-142-й дни (17–21 мая).





*Рис.* 7. Изменения широты вращательной компоненты дрифтера (км) (синяя линия) и вращательной скорости (см/с) для дрифтера 47607 (красная линия)

Рис. 8. Изменение скорости дрифтера на одном вращении, дни 138,55–141,8-й. Цветная шкала — скорость (см/с); оси — километры относительно центра вихря

Интересная особенность в траекториях всех дрифтеров — увеличение скорости смещения центра вихря в 144-й день (23 мая) в западном направлении.

*Рис. 9.* Изменение транспортной скорости движения вихря (м/с) (красная кривая) и зональная компонента скорости ветра (м/с) (синяя линия) в интервале 140–150-й дни

Совместный анализ ветровой обстановки позволил предположить, что данное увеличение транспортной скорости вихря как единого объекта было вызвано усилением ветра (*puc. 9*). По этой же причине дрифтер 47608, двигавшийся по максимальному радиусу, был вытеснен за пределы вихря.



#### Заключение

Рассмотрено движение серии из шести SVP-дрифтеров, размещённых в ядро антициклонического вихря в северо-западной части Чёрного моря в мае 2004 г. Положение вихря было заранее определено по спутниковым изображениям оптического и ИК-диапазонов. Дрифтеры совершили до 5-6 оборотов в вихре. Предложенным методом были разделены вращательная и транспортная компоненты движения дрифтеров. Радиусы вращения для разных дрифтеров менялись от 5-6 до 20 км. Радиусы вращения дрифтеров существенно не изменялись от витка к витку, т.е. отсутствовало спиралевидное движение. Траектории движения имели эллипсовидную форму с отношением осей 1,2–1,3. Оси эллипсов вращались по часовой стрелке со скоростями 20-30° за оборот. Периоды вращения находились в пределах 3,2-4,2 сут для разных дрифтеров и оборотов. Рассчитанная транспортная компонента (движение центра вихря) была сопоставлена с последовательными спутниковыми изображениями. Вихрь хорошо выделялся как на оптических, так и на тепловых инфракрасных изображениях. Средняя транспортная скорость составила 0,06 м/с. Вращательные скорости для разных дрифтеров менялись от 0,11 до 0,32 м/с в зависимости от среднего радиуса вращения. С учётом этого фактора движение было близко к твёрдотельному. Обнаружена интересная особенность изменения скорости на одном периоде: частота изменения скорости приблизительно в два раза превышала частоту вращения. Такого рода зависимость характерна для эллиптического движения с постоянной угловой скоростью. Ветровое воздействие (144-й день, 23 мая) повлияло на смещение вихря как единого объекта, изменив транспортную скорость в этот период в 2,5 раза.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0555-2021-0003 «Оперативная океанология», обработка спутниковых данных проводилась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-45-920065).

# Литература

- 1. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Незлин Н. П., Соловьев Д. М., Станичная Р. Р., Станичный С. В. Антициклонические вихри над северо-западным материковым склоном Черного моря и их роль в переносе богатых хлорофиллом шельфовых вод в глубоководный бассейн // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 3. С. 71–81.
- 2. *Гришин Г.А., Субботин А.А.* Особенности гидрологической структуры и циркуляции вод северо-западной части Черного моря: судовые и спутниковые наблюдения 1988–1990 гг. // Морской гидрофиз. журн.1993. № 1. С. 61–68.
- 3. *Латун В. С.* Антициклонические вихри в Черном море летом 1984 г. // Морской гидрофиз. журн. 1989. № 3. С. 27–35.
- 4. Лемешко Е. М., Морозов А. Н., Станичный С. В., Mee L. D., Shapiro G. I. Вертикальная структура поля скорости течений в северо-западной части Черного моря по данным LADCP в мае 2004 года // Морской гидрофиз. журн. 2008. № 6. С. 25–37.

- 5. *Ginzburg A. I.* Horizontal exchange processes in the near-surface layer of the Black Sea // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 1994. No. 2. P. 75–83.
- 6. *Kubryakov A.A., Stanichny S.V.* Mesoscale eddies in the Black Sea from satellite altimetry data // Oceanology. 2015. V. 55. No. 1. P. 56–67. DOI: 10.1134/S0001437015010105.
- 7. *Lumpkin R., Pazos M.* Measuring surface currents with Surface Velocity Program drifters: the instrument, its data, and some recent results // Lagrangian analysis and prediction of coastal and ocean dynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. P. 39–67. DOI: 10.1017/CBO9780511535901.003.
- Oguz T., Latun V.S., Latif M.A., Vladimirov V.V., Sur H. I., Markov A.A., Özsoy E., Kotovshchikov B.B., Eremeev V.V., Ünlüata Ü. Circulation in the surface and intermediate layers of the Black Sea // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 1993. V. 40. No. 8. P. 1597–1612. DOI: 10.1016/0967-0637(93)90018-X.
- 9. *Shapiro G. I., Stanichny S. V., Stanychna R. R.* Anatomy of shelf-deep sea exchanges by a mesoscale eddy in the North West Black Sea as derived from remotely sensed data // Remote Sensing of Environment. 2010. V. 114. No. 4. P. 867–875.
- 10. *Sur H. I., Ilyin Y. P.* Evolution of satellite derived mesoscale thermal patterns in the Black Sea // Progress in Oceanography. 1997. V. 39. No. 2. P. 109–151. DOI: 10.1016/S0079-6611(97)00009-8.
- 11. Zatsepin A. G., Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Kremenetskiy V. V., Krivosheya V. G., Stanichny S. V., Poulain P. Observations of Black Sea Mesoscale Eddies and Associated Horizontal Mixing // J. Geophysical Research. 2003. V. 108. No. C8. P. 2-1–2-27. DOI: 10.1029/2002JC001390.

# Characteristics of currents in an anticyclonic eddy based on the results of drifter and satellite observations

# S. V. Stanichny, M. A. Kuzmina, R. R. Stanichnaya, E. M. Lemeshko

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia E-mail: sstanichny@mail.ru

An analysis of the velocities of drifters in the vortex structure in the northwestern part of the Black Sea is carried out. Drifters were deployed in an anticyclonic eddy, previously identified from satellite images. The rotational and transport components of the velocity in the eddy are calculated. A good agreement between the calculated velocities of the vortex center displacement based on drifter data and sequential satellite images obtained from AVHRR, MODIS scanners in the optical and infrared ranges was demonstrated. The trajectories of drifters rotation are elliptical with the ratio of the lengths of the axes 1.2–1.3. The ellipse axes rotate clockwise. It is shown that the frequency of velocity change in a vortex is about twice as much as the rotation frequency. That is characteristic of elliptical motion with a constant angular velocity. The direct effect of wind amplification on the displacement of the entire vortex structure has been demonstrated.

Keywords: Black Sea, drifters, mesoscale eddies, satellite images, travel speeds, wind action

Accepted: 01.07.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-208-215

# References

- 1. Ginzburg A. I., Kostyanoi A. G., Nezlin N. P., Solov'yev D. M., Stanichny S. V., Stanychna R. R., Anticyclonic eddies over northwestern continental slope of the Black Sea and their role in the transfer of chlorophyll enriched self waters to abyssal basin, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2000, No. 3, pp. 71–81 (in Russian).
- 2. Grishin G.A., Subbotin A.A., Features of the hydrological structure and water circulation in the north-western part of the Black Sea: ship and satellite observations, *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 1993, No. 1, pp. 61–68 (in Russian).
- 3. Latun V.S., Anticyclonic eddies in the Black Sea in the summer of 1984, *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 1989, No. 3, pp. 27–35 (in Russian).

- 4. Lemeshko E. M., Morozov A. N., Stanichnyi S. V., Mee L. D., Shapiro G. I., Experimental and field research: vertical structure of the field of current velocities in the northwest part of the Black Sea based on the LADCP data for May 2004, *Physical Oceanography*, 2008, Vol. 18, No. 6, pp. 319–331.
- 5. Ginzburg A. I., Horizontal exchange processes in the near-surface layer of the Black Sea, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1994, No. 2, pp. 75–83.
- 6. Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Mesoscale eddies in the Black Sea from satellite altimetry data, *Oceanology*, 2015, Vol. 55, No. 1, pp. 56–67, DOI: 10.1134/S0001437015010105.
- Lumpkin R., Pazos M., Measuring surface currents with Surface Velocity Program drifters: the instrument, its data, and some recent results, In: *Lagrangian analysis and prediction of coastal and ocean dynamics*, Cambridge: Cambridge University Press, 2007, pp. 39–67, DOI: 10.1017/CBO9780511535901.003.
- Oguz T., Latun V.S., Latif M.A., Vladimirov V.V., Sur H.I., Markov A.A., Özsoy E., Kotovshchikov B.B., Eremeev V.V., Ünlüata Ü., Circulation in the surface and intermediate layers of the Black Sea, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1993, Vol. 40, No. 8, pp. 1597–1612, DOI: 10.1016/0967-0637(93)90018-X.
- 9. Shapiro G. I., Stanichny S. V., Stanychna R. R., Anatomy of shelf-deep sea exchanges by a mesoscale eddy in the North West Black Sea as derived from remotely sensed data, *Remote Sensing of Environment*, 2010, Vol. 114, No. 4, pp. 867–875.
- 10. Sur H. I., Ilyin Y. P., Evolution of satellite derived mesoscale thermal patterns in the Black Sea, *Progress in Oceanography*, 1997, Vol. 39, No. 2, pp. 109–151, DOI: 10.1016/S0079-6611(97)00009-8.
- Zatsepin A. G., Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Kremenetskiy V. V., Krivosheya V. G., Stanichny S. V., Poulain P., Observations of Black Sea Mesoscale Eddies and Associated Horizontal Mixing, *J. Geophysical Research*, 2003, Vol. 108, No. C8, pp. 2-1–2-27, DOI: 10.1029/2002JC001390.