



## О прибрежных апвеллингах и даунвеллингах, обусловленных вихревой динамикой вод в северо-восточной части Черного моря<sup>1</sup>

Зацепин А.Г., Подымов О.И.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Физическую природу апвеллингов в Мировом океане обычно связывают с ветровым воздействием, экмановским переносом поверхностных вод от берега и компенсирующим восходящим движением глубинных вод [1–4]. В прибрежной зоне Черного моря ветер также считается основной причиной прибрежных апвеллингов [5]. Однако направление и интенсивность вдольбереговых геострофических течений в верхнем слое океана также играют важную роль в формировании апвеллингов и даунвеллингов, причем такие течения зачастую не имеют прямой связи с ветром [6, 7].

Для Черного моря характерна циклоническая циркуляция, которая влияет на весь бассейн и вызывает подъем вод в его центральной части и их опускание на периферии. Основным структурным элементом этой циркуляции является Основное черноморское течение (ОЧТ) — кольцевое бароклинное течение с максимальной скоростью вблизи поверхности моря. Стрежень ОЧТ в среднем рас-

положен возле подножия черноморского континентального склона, примерно в 20–30 км от берега в северо-восточной части моря, где шельф и материковый склон — узкие. Скорость ОЧТ, в среднем составляющая 0,15–0,25 м/с, но иногда превышающая 1 м/с, быстро уменьшается с глубиной, убывая в несколько раз в области перманентного пикноклоина (далее — пикноклин), который расположен в диапазоне глубин 50–200 м. Вертикальный турбулентный перенос в этом слое сильно подавлен. Из-за этого вертикальный поток растворенного кислорода оказывается недостаточным для того, чтобы эффективно окислить органическое вещество и, начиная с нижней части пикноклина и до дна моря, располагается бескислородная зона, зона сероводородного заражения вод. Следует отметить, что динамика вод активно влияет на процессы вертикального перемешивания и вентиляцию вод пикноклина, а также на положение границы между кислородосодержащими и бескислородными водами.

В северо-восточной части моря, где шельфово-склоновая зона — узкая, из-за меандрирования ОЧТ его стрежень, то приближается к берегу (в циклоническом меандре), то отдаляется от него (в антициклоническом меандре). Вследствие этого течение в прибрежной зоне демонстрирует преиму-

<sup>1</sup>Работа выполнена по теме госзадания FMWE-2021-0002 и при поддержке гранта РНФ №23-17-00056.

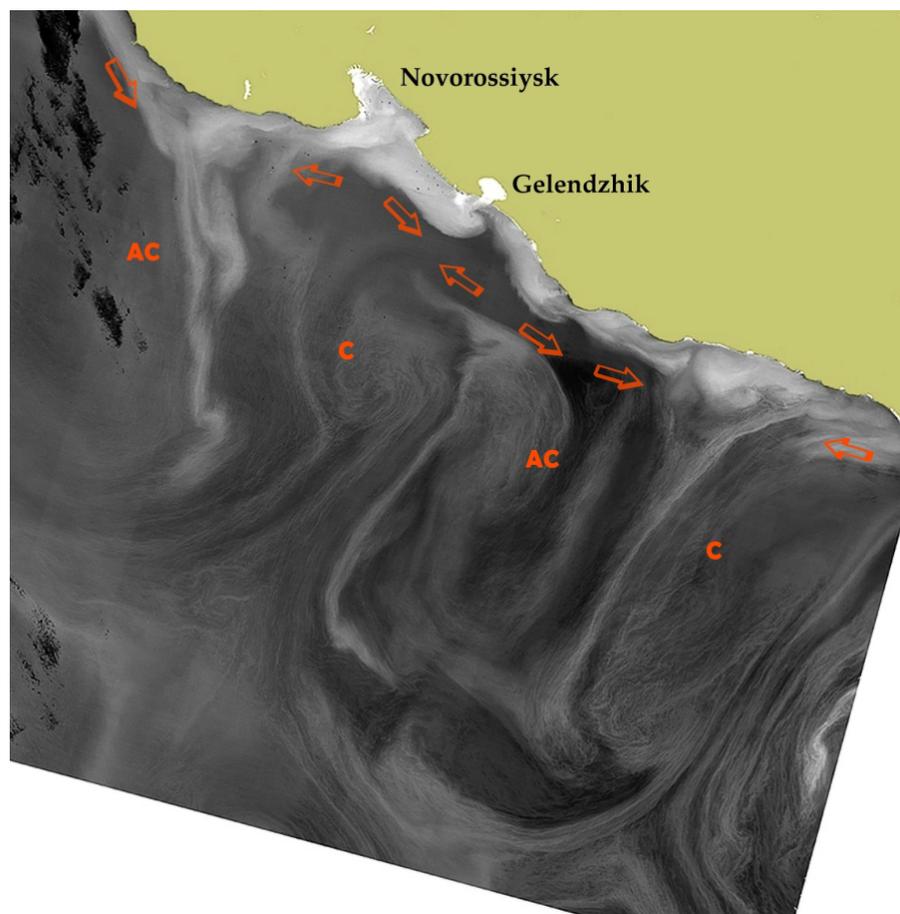


Рис. 1. Череда циклонических (С) и антициклонических (АС) меандров ОЧТ и вихрей в северо-восточной части Черного моря. Красными стрелками показаны знакопеременные вдольбереговые течения на шельфе и верхней части континентального склона. Спутниковый снимок, Ландсат-8, 15 апреля 2015 г. (предоставлен С.В. Станичным, ФИЦ МГИ РАН)

щественно бимодальное поведение. Циклонический меандр вызывает усиление северо-западного течения. Антициклонический — создает антициклонический вихрь и изменяет направление вдольберегового течения на юго-восточное. Вследствие геострофического приспособления поля плотности к полю течения, при этом должна изменяться глубина залегания изопикн в пикноклине и изотерм в сезонном термоклине (далее — термоклин).

На основе анализа данных долговременных совместных измерений вертикальных распределений температуры, плотности и скорости течения на акватории полигона «Геленджик» показано, что квазипериодические подъемы и опускания изопикн и изотерм на шельфе и верхней части континентального склона на синоптическом временном масштабе (5-15 суток), действительно, связаны с изменениями направления и силы вдольберегового течения и геострофическим приспособлением поля плотности к полю скорости [8, 9]. Цик-

лонические и антициклонические меандры ОЧТ (Рис. 1) медленно перемещаются вдоль берега с юго-востока на северо-запад. Вследствие этого, в точке наблюдения на шельфе или, в верхней части континентального склона, возникает квазипериодическое изменение направления вдольберегового течения с северо-западного (циклонический меандр ОЧТ) на юго-восточное (антициклонический меандр ОЧТ, или антициклонический мезомасштабный вихрь). Полный период смены знака течения в среднем составляет около 10 суток. На фазе северо-западного течения пикноклин и термоклин опускаются (фаза даунвеллинга), что приводит к увеличению их толщины и толщины верхнего квазигомогенного слоя (ВКС). На фазе юго-восточного течения пикноклин и термоклин поднимаются (фаза апвеллинга) и сжимаются по вертикали, уменьшается также толщина ВКС.

Установлены статистически значимые линейные зависимости вертикальных смещений изо-

пикн и изотерм от скорости вдольберегового течения, позволяющие оценивать величину «геострофического» апвеллинга или даунвеллинга по данным измерений профиля скорости течения в верхней части континентального склона, на внешнем и внутреннем шельфе. Оценены значения амплитуды колебаний изопикн в пикноклине и изотерм в термоклине, показана их квазисинфазность. При этом отмечено, что геострофический апвеллинг, как правило, бывает неполным, т.е. слой скачка температуры и термоклин не выходят на поверхность моря.

Тем не менее, важным следствием геострофического апвеллинга является приближение сезонного термоклина к поверхности моря, благодаря чему интенсивное воздействие ветра любого направления вызывает значительное турбулентное вовлечение термоклинных вод в ВКС, способствует его охлаждению и обогащению биогенными элементами. Результатом этого может быть повышенная первичная продуктивность: совпадение сильного ветра и геострофического апвеллинга должно оказывать синергетическое воздействие на первичную продуктивность вод прибрежной экосистемы.

Вертикальные колебания изопикн, вызванные геострофическими апвеллингами и даунвеллингами, приводят квазипериодическим изменениям положения нижней границы кислородной зоны и верхней границы сероводородной зоны, которые

могут оказывать влияние на структуру биологических сообществ и глубину распространения бентоса на черноморском шельфе.

### Список литературы

- [1] Ekman V.W. On the influence of the Earth's rotation on ocean currents // Ark. Foer Mat. Astron. Och Fys. 1905. 2. С. 1–53.
- [2] Gill A.E., Clarke A.J. Wind-induced upwelling, coastal currents, and sea-level changes // Deep-Sea Res. 1974. 21. С. 325–345.
- [3] Yentsch C.S. The influence of geostrophy on primary production // Tethys 1974, 6. С. 111–118.
- [4] Kampf J., Chapman P. Upwelling Systems of the World; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2016. P. 433.
- [5] Stanichnaya R.R., Stanichny S.V. Black Sea upwellings // Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa. 2021. 18. P. 195–207. (In Russian)
- [6] Gawarkiewicz G., Korotaev G., Stanichny S., Repetin L., Soloviev D. Synoptic upwelling and cross-shelf transport processes along the Crimean coast of the Black Sea // Cont. Shelf Res. 1999. 19. P. 977–1005.
- [7] 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. Geophys. Res. 2006. 111. C04014.
- [8] Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В. и др. О природе короткопериодных колебаний основного черноморского пикноклина, субмезомасштабных вихрях и реакции морской среды на катастрофический ливень 2012 г. // ФАО. 2013. № 6. С. 717–732.
- [9] Podymov O.I., Ocherednik V.V., Silvestrova K.P., Zatsepin A.G. Upwellings and Downwellings Caused by Mesoscale Water Dynamics in the Coastal Zone of Northeastern Black Sea // J. Mar. Sci. Eng. 2023. 11. 1628. <https://doi.org/10.3390/jmse11081628>