

**О влиянии изменчивости течения
в глубоководной зоне Черного моря
на динамику вод узкого северокавказского шельфа**

© 2016 А.Г. Зацепин¹, Д.Н. Ёлкин¹, А.О. Корж², С.Б. Куклев³,
О.И. Подымов³, А.Г. Островский¹, Д.М. Соловьев⁴

¹*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
E-mail: zatsep@ocean.ru*

²*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Атлантическое отделение,
Калининград, Россия*

³*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Южное отделение,
Геленджик, Россия*

⁴*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

Поступила в редакцию 15.03.2016 г.

Предложен и обоснован данными контактных измерений, анализом спутниковой информации и результатами лабораторного моделирования механизм образования цепочек субмезомасштабных циклонических и антициклонических вихрей на узком северокавказском шельфе под влиянием изменчивости динамики прилегающей глубоководной части Черного моря. Установлено, что при прижатом к континентальному склону Основном Черноморском течении на шельфе образуются субмезомасштабные антициклоны, а при наличии над континентальным склоном мезомасштабного антициклонического вихря, или меандра Основного Черноморского течения, – цепочки субмезомасштабных циклонов.

Ключевые слова: северокавказский шельф, субмезомасштабные процессы, кросс-шельфовый перенос, Черное море.

Введение. В работах [1 – 9] на основе данных контактных измерений, численного и лабораторного моделирования и спутниковой альтиметрии было показано, что бассейновая динамика глубоководной зоны Черного моря, основным элементом которой является Основное Черноморское течение (ОЧТ) [10, 11], определяется главным образом скоростью экмановской (ветровой) накачки $W_E = \text{rot}_z \tau / \rho f$, где τ – напряжение трения ветра на поверхности моря, ρ – плотность воды, f – параметр Кориолиса. Она имеет ярко выраженный годовой ход. Как для моря в целом, так и для его северо-восточной части W_E достигает максимальных положительных значений в зимний период, а минимальных – в весенне-летний. Соответственно циклоническая циркуляция Черного моря усиливается зимой и ослабевает летом. Осенью и зимой ОЧТ представляет собой струйное течение, прижатое к континентальному склону. Весной и летом оно сильно меандрирует и иногда распадается на вихревые структуры [8, 9, 12, 13]. Поскольку сдвиг фазы между изменением скорости экмановской накачки и реакцией ОЧТ на это изменение составляет от 15 до 30 сут [6, 14], возможны и внутрисезонные вариации динамики глу-

боководной зоны моря, обусловленные изменением крупномасштабной завихренности напряжения трения ветра над Черноморским регионом.

Наряду с вынужденной, существует собственная мода изменчивости ОЧТ, проявляющаяся даже в периоды интенсивной ветровой накачки. Эта мода связана с его бароклинно-баротропной неустойчивостью и выражается в меандрировании ОЧТ [11]. Вследствие этого стрежень струи течения то приближается к берегу, то удаляется от него. При приближении струи к берегу скорость вдольберегового течения, как правило, увеличивается, а при удалении от берега – уменьшается и даже меняет знак на противоположный. Характерный период изменчивости скорости вдольберегового течения, обусловленного меандрированием ОЧТ, составляет 10 сут [15 – 20].

Результаты наблюдений. Вышесказанное наглядно подтверждается данными измерений заякоренного зонда-профилографа «Аквалог» [21], расположенного на геленджикском подспутниковом полигоне на глубине 270 м [14]. Профилограф сканирует водную толщу, перемещаясь вниз и вверх по натянутому тросу и совершая четыре цикла зондирования в сутки. При этом измеряются вертикальные распределения температуры, солености, плотности и горизонтальной составляющей скорости течения воды. На рис. 1 построена временная последовательность вертикальных распределений условной плотности и скорости вдольберегового течения в верхнем 200-метровом слое моря в период с 5 ноября по 27 декабря 2012 г. по данным зонда «Аквалог».

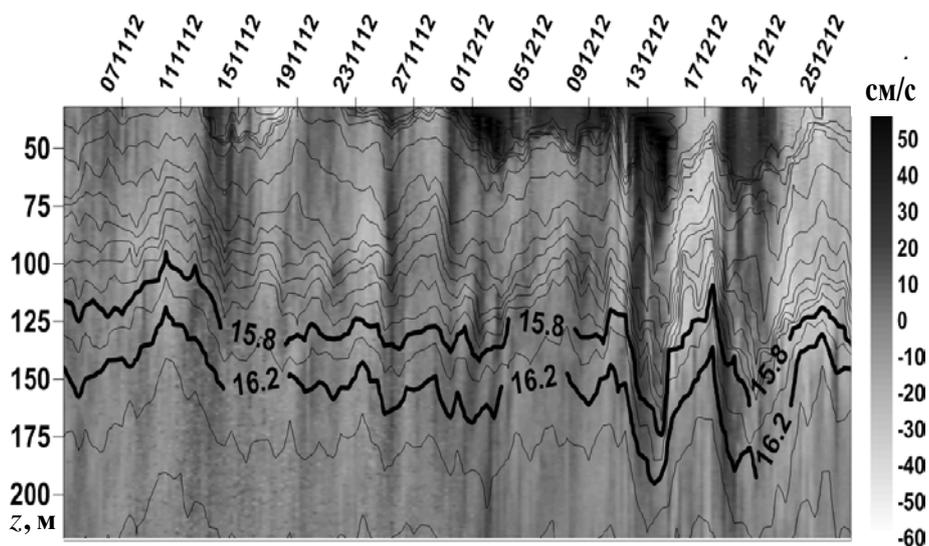


Рис. 1. Временная последовательность вертикальных распределений условной плотности и скорости вдольберегового течения (тонкие черные линии – изолинии условной плотности, изопикна 15,8 усл. ед. – нижняя граница кислородсодержащего слоя, изопикна 16,2 усл. ед. – верхняя граница сероводородного слоя; градиентами серого маркирована скорость течения, положительные значения – северо-западное направление течения, отрицательные – юго-восточное)

Характерной особенностью временной изменчивости полей скорости течения и условной плотности, представленной на рис. 1, является наличие ин-

тенсивных колебаний положения перманентного пикно-халоклина (14,4 – 16,2 усл. ед.) с периодом 5 – 15 сут. Эти колебания вызывают короткопериодные изменения толщины кислородсодержащего слоя на 20 – 40 м (см. положение изопикны 15,8 усл. ед.), что может составлять до одной трети его общей толщины. Использование зонда-профилографа «Аквалог» позволяет получить наиболее наглядный образ этих колебаний, свидетельствующий в том числе об их нелинейности (узкие впадины и широкие вершины). Их наличие затрудняет получение достоверной оценки толщины кислородсодержащей зоны по данным единичных наблюдений, так как нужен учет погрешности, связанный с этими колебаниями. То же относится и к оценке глубины залегания верхней границы сероводородной зоны, ассоциирующей с изопикной 16,2 усл. ед.

Как уже указывалось выше, причиной колебаний изопикнических поверхностей является изменение скорости вдольберегового течения за счет меандрирования струи ОЧТ и формирования мезомасштабных вихрей (рис. 2). Когда струя ОЧТ в циклоническом меандре прижимается к континентальному склону, скорость северо-западного вдольберегового течения возрастает, уровень моря в прибрежной зоне моря повышается, а изопикны, в силу геострофического приспособления, опускаются. Когда же в антициклоническом меандре (вихре) струя ОЧТ отходит от континентального склона, уровень моря понижается, а изопикны поднимаются по направлению к берегу.

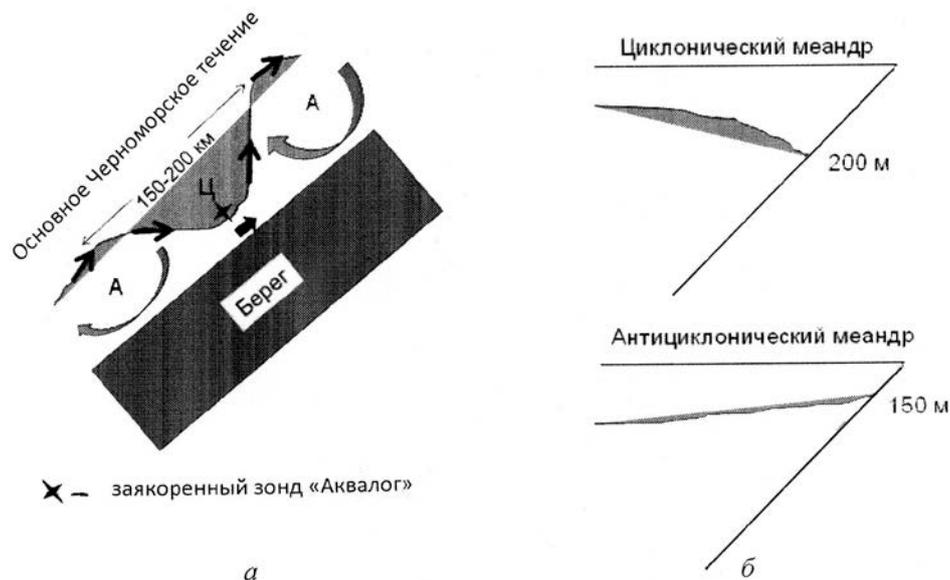


Рис. 2. Схема меандрирования ОЧТ – а (черные стрелки на сером фоне – стрежень течения; А и серая вогнутая стрелка – антициклонический меандр ОЧТ, Ц – циклонический; черная короткая стрелка – скорость смещения системы меандров в направлении ОЧТ) и наклон изопикнической поверхности 16,2 усл. ед., соответствующей верхней границе сероводородной зоны в циклоническом и антициклоническом меандрах – б

Вышеописанные колебания скорости вдольберегового течения вблизи бровки шельфа создают внешние условия для реализации различных динами-

ческих режимов вод шельфа и формирования субмезомасштабных прибрежных вихревых структур [4, 16, 22, 23]. Эти вихри, как циклонические, так и антициклонические, имеют диаметр, сопоставимый с шириной шельфа (6 – 10 км в геленджикском районе Черного моря), угловую скорость вращения, по модулю превышающую параметр Кориолиса (модуль числа Россби $|Ro| > 1$), а их радиус – меньше значения бароклинного радиуса деформации Россби на шельфе. Предположительно эти вихри оказывают существенное влияние на экологию вод шельфа, участвуют в их вентиляции, кросс-шельфовом и вертикальном обмене, а также в диссипации кинетической энергии мезомасштабных и крупномасштабных течений.

В 2007 – 2013 гг. в летне-осенний сезон была выполнена 21 съемка поля скорости на акватории геленджикского полигона с помощью буксируемого за судном прибора *ADCP* в обтекаемой гондоле. В 16 съемках были обнаружены субмезомасштабные вихри (рис. 3) (15 циклонов и 16 антициклонов), в 5 съемках – нет. Вихри, как правило, наблюдались только в верхнем квазиоднородном слое (ВКС), а в термоклине затухали. Характерные значения диаметра вихря, эксцентриситета и числа Россби: для циклонов – $D = 2 - 4$ км, $\varepsilon = 0,75$, $Ro = 1,4$; для антициклонов – $D = 3 - 6$ км, $\varepsilon = 0,80$, $Ro = 0,8$.

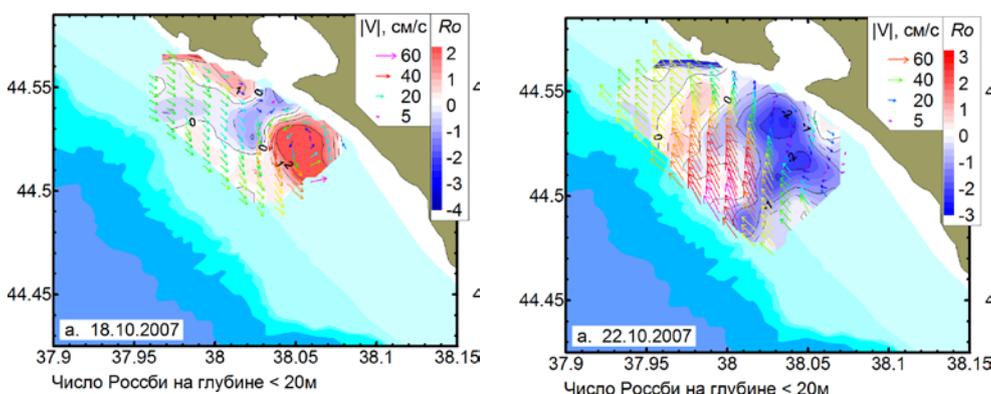


Рис. 3. Субмезомасштабные шельфовые вихри по данным буксируемого прибора *ADCP* на геленджикском полигоне (стрелки – векторы скорости, осредненные по толщине ВКС 20 м; цветом маркированы значения числа Россби, $Ro = \omega / f$, где ω – завихренность поля горизонтальной скорости течения, f – параметр Кориолиса; красным цветом обозначена область, соответствующая циклоническому вихрю, в котором $Ro > 1$; синим цветом – соответствующая антициклоническому вихрю, в котором $Ro < -1$)

Характерная орбитальная скорость вихрей — 20 – 50 см/с. Максимальная зарегистрированная продолжительность существования вихря – 4 сут (антициклон).

Выполненные натурные исследования, а также лабораторные и численные эксперименты позволяют предложить следующий сценарий формирования динамики вод северокавказского шельфа в зависимости от внешних условий, создаваемых меандрирующим ОЧТ.

При прижатом к континентальному склону ОЧТ (циклонический меандр) у берега в области мысов и выпуклых участков береговой линии развивается быстрое ($|V| > 40$ см/с) течение северо-западного направления, хорошо вентилирующее прибрежную зону моря. При этом за мысами происходит отрыв

течения от берега и образование запрпятственных субмезомасштабных вихрей антициклонического знака. Начальный диаметр вихря в поперечном берегу направлении приблизительно равен размеру выступающей части мыса, а в продольном направлении он может быть вдвое большим.

При ускоряющемся или стационарном вдольбереговом течении вихри не отрываются от препятствия. Они могут увеличиваться в диаметре со временем или оставаться неизменными. За тыловой частью вихря и ниже его по течению динамика вод является слабой, поэтому вентиляция прибрежной зоны за счет водообмена с глубоководной частью моря незначительна. Можно сказать, что мыс и присоединенный к нему вихрь экранируют запрпятственную область от вдольберегового течения, и скорость течения там невелика (застойная зона).

Через некоторое время, не превышающее, как правило, двух суток, вдольбереговое течение у мыса начинает ослабевать (циклонический меандр проходит), и возникают условия периодического отрыва вихрей от мыса и образования новых. Таким образом, могут образоваться 2-3 субмезомасштабных антициклона, которые перемещаются вниз по течению друг за другом в северо-западном направлении (рис. 4).

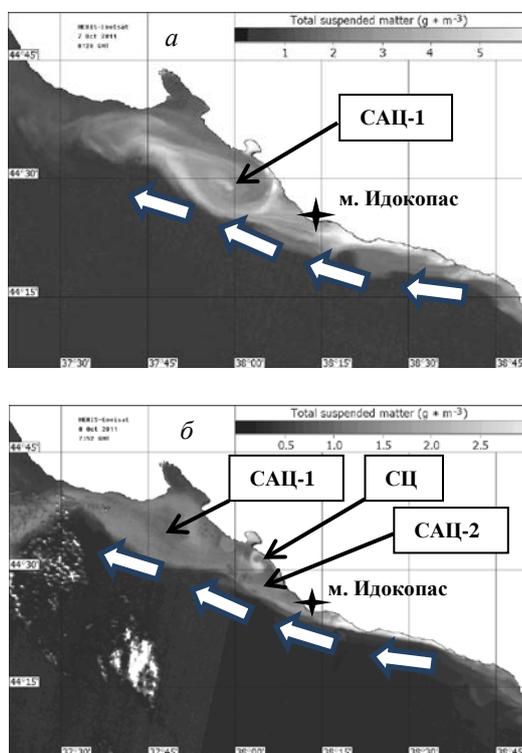


Рис. 4. Отрыв ОЧТ от м. Идокопас и формирование субмезомасштабных вихрей в поле концентрации суммарного взвешенного вещества на двух последовательных снимках сканера *MERIS* спутника *Envisat*: *a* – САЦ-1 – субмезомасштабный антициклон, оторвавшийся от м. Идокопас, 07.10.2011 г.; *б* – САЦ-1 и САЦ-2 – субмезомасштабные антициклоны, СЦ – субмезомасштабный циклон, 08.10.2011 г.

Диаметр этих вихрей составляет 5 – 10 км, орбитальная скорость 20 – 50 см/с. На периферии этих антициклонов в области циклонического сдвига скорости возникают небольшие циклоны диаметром 1 – 2 км. По мере своего распространения субмезомасштабные антициклоны постепенно затухают и разрушаются, но иногда, при продолжающейся подпитке энергией и завихренностью от ОЧТ, они вырастают в размерах и превращаются в мезомасштабные вихри диаметром более 20 км. В среднем время их существования не превышает нескольких суток. Субмезомасштабные антициклоны концентрируют загрязнения на своей периферии и обеспечивают их быстрый транспорт от берега в область внешнего шельфа и далее. Можно заключить, что они играют важную роль в вентиляции вод шельфа, в особенности в препятственных областях с вогнутой линией берега, где динамика вод ослаблена по сравнению с областями шельфа с выпуклой линией берега.

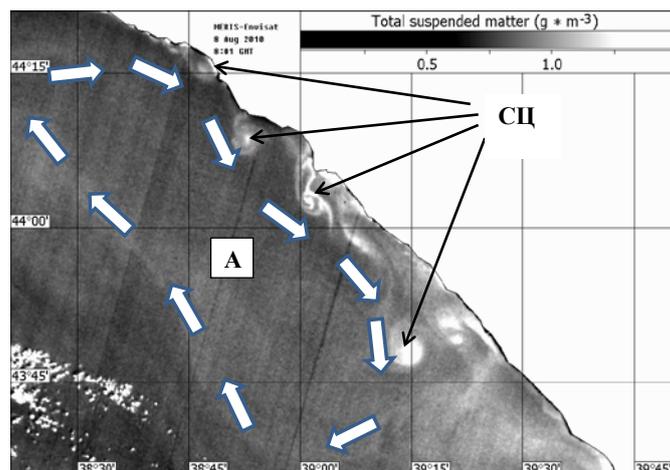


Рис. 5. Субмезомасштабные циклоны (СЦ) на периферии мезомасштабного антициклона (А) в северо-восточной части Черного моря (снимок сканера *MERIS* спутника *Envisat*, 8 августа 2010 г., поле концентрации взвешенного вещества)

После прохождения циклонического меандра и прихода на его место антициклонического (меандра, или мезомасштабного вихря) генеральное направление течения за бровкой шельфа меняет знак, и вдольбереговой перенос становится юго-восточным. Если юго-восточное течение является достаточно сильным ($V > 30$ см/с) и прижимается к бровке шельфа, то между ним и берегом формируется зона со значительным сдвигом горизонтальной скорости, имеющим циклоническую завихренность. При этом в области сдвигового течения иногда формируются цепочки интенсивных субмезомасштабных циклонических вихрей. Эти вихри хорошо видны на спутниковых снимках в поле концентрации суммарного взвешенного вещества (рис. 5), благодаря выходу к поверхности богатых фитопланктоном холодных вод, поднимающихся снизу из верхней части термоклина за счет генерируемого вихрем локального апвеллинга [16]. Вследствие быстрого орбитального вращения воды уровень моря в центрах субмезомасштабных циклонов может быть на несколько сантиметров ниже, чем на их периферии. При разрушении субмезо-

масштабного циклона апвеллинг в его ядре замещается даунвеллингом, в результате взвешенное вещество опускается на нижнюю границу ВКС, и вихри перестают быть видимыми на спутниковых изображениях в полях концентрации взвешенного вещества и температуры.

Следует отметить, что при наличии юго-восточного вдольберегового течения генерация вихрей за мысами не является столь очевидной, как при наличии северо-западного течения, и уж во всяком случае запрятанные циклонические вихри если и формируются, то не отрываются от мысов и не образуют вихревых цепочек. В свою очередь, при наличии северо-западного течения в области сдвига скорости между стрежнем течения и берегом, как правило, не наблюдается цепочек антициклонических вихрей, образующихся за счет сдвиговой неустойчивости течения. Эти эмпирические данные наблюдений подтверждаются результатами лабораторных экспериментов [24, 25]. Такая асимметрия условий образования циклонических и антициклонических субмезомасштабных вихрей обусловлена влиянием вращения Земли и в невращающейся жидкости отсутствует.

Обобщение и выводы. Концептуальная схема формирования циклонических и антициклонических субмезомасштабных вихрей на узком северокавказском шельфе между мысами Идокопас и Утриш представлена на рис. 6.

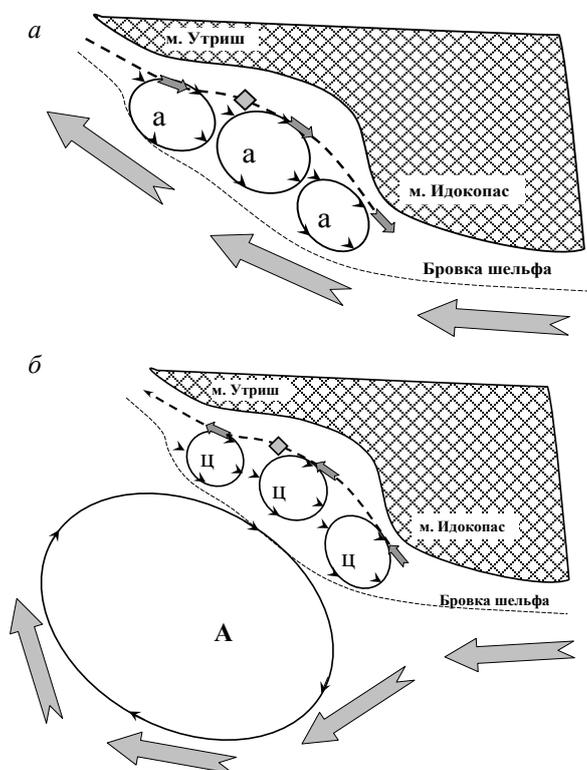


Рис. 6. Схема формирования субмезомасштабных вихрей на узком северокавказском шельфе: *а* – при наличии прижатого к континентальному склону ОЧТ (северо-западное течение у бровки шельфа) из-за отрыва течения от берега за мысами формируются антициклонические вихри; *б* – при наличии антициклонического меандра, или вихря ОЧТ (юго-восточное течение у бровки шельфа) из-за сдвиговой неустойчивости формируются циклонические вихри

Исходя из того, что характерный период колебания генерального направления вдольберегового течения, обусловленного меандрированием ОЧТ, составляет порядка 10 сут, на протяжении одной половины периода (циклонический меандр, или прижатое к бровке шельфа ОЧТ) на шельфе должны наблюдаться преимущественно антициклоны (рис. 6, *а*), а на протяжении другой половины периода (антициклонический меандр, или мезомасштабный вихрь) – циклоны (рис. 6, *б*). К сожалению, непрерывных и протяженных во времени данных наблюдений, позволяющих восстанавливать поле скорости в районе геленджикского подспутникового полигона ИО РАН пока получить не удалось. Приведенная выше статистика обнаружения шельфовых субмезомасштабных вихрей путем проведения разрозненных ADCP-съемок поля скорости течения в теплое время года показала, что количество циклонов и антициклонов приблизительно одинаково. При этом шельфовые вихри на полигоне ИО РАН в теплое время года наблюдались приблизительно в 75% случаев проведения съемок. Однако остается малоизвестным, что происходит на шельфе в холодное время года. Можно предположить, что усиление ветровой накачки в зимний период, приводящее к интенсификации ОЧТ и его более тесному примыканию к континентальному склону, должно вызвать образование преимущественно субмезомасштабных шельфовых антициклонов.

Подытоживая, отметим, что имеющиеся данные наблюдений не противоречат вышеприведенной схеме формирования динамической структуры вод шельфа. Вместе с тем ее следует признать достаточно грубой и нуждающейся в дальнейшем уточнении.

Работа выполнена при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество», грант № 13-05-41450, договор № 10/2013/РГО-РФФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Поярко С.Г. и др.* Влияние поля ветра на динамику вод Черного моря // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / Под ред. А.Г. Зацепина, М.В. Флинта. – М.: Наука, 2002. – С. 91 – 105.
2. *Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Станичный С.В. и др.* Бассейновая циркуляция и мезомасштабная динамика Черного моря под ветровым воздействием // Современные проблемы динамики океана и атмосферы. – Сб. статей, посвященный 100-летию со дня рождения П.С. Линейкина / Под ред. А.В. Фролова, Ю.Д. Реснянского. – М.: Триада ЛТД, 2010. – С. 345 – 368.
3. *Москаленко Л.В.* Расчет стационарных ветровых течений в Черном море // Океанология. – 1975. – 15, вып. 2. – С. 245 – 250.
4. *Овчинников И.М., Титов В.Б.* Антициклоническая завихренность течений в прибрежной зоне Черного моря // Докл. АН СССР. – 1990. – 314, № 5. – С. 1236 – 1239.
5. *Korotaev G.K., Oguz T., Nikiforov A. et al.* Seasonal, interannual, and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data // J. Geophys. Res. – 2003. – 108, № С4. – P. 3122.
6. *Kubryakov A.A., Stanichny S.V.* Seasonal and interannual variability of the Black Sea eddies and its dependence on characteristics of the large-scale circulation // Deep-Sea Res. Part I: Oceanogr. Res. Pap. – 2015. – 97. – P. 80 – 91.
7. *Stanev E.V.* On the mechanisms of the Black Sea circulation // Earth-Sci. Rev. – 1990. – 28. – P. 285 – 319.

8. *Zatsepin A.G., Ginzburg A.I., Kostianoy A.G. et al.* Variability of water dynamics in the NE Black Sea and its effect on water exchange between near-shore and off-shore parts of the basin // *Oceanology*. – 2002. – 42, Suppl. 1. – P. S1 – S15.
9. *Zatsepin A.G., Denisov E.S., Emelyanov S.V. et al.* Effect of bottom slope and wind on the near-shore current in a rotating stratified fluid: laboratory modeling for the Black Sea // *Ibid.* – 2005. – 45, Suppl. 1. – P. S13 – S26.
10. *Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А. и др.* Изменчивость гидрофизических полей в Черном море. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 240 с.
11. *Богатко О.Н., Богуславский С.Г., Беляков Ю.М. и др.* Поверхностные течения Черного моря // Комплексные исследования Черного моря. – Севастополь: МГИ АН УССР, 1979. – С. 25 – 33.
12. *Гинзбург А.И.* Процессы горизонтального обмена в приповерхностном слое Черного моря // *Исследование Земли из космоса*. – 1994. – № 2. – С. 75 – 83.
13. *Zatsepin A.G., Ginzburg A.I., Kostianoy A.G. et al.* Observations of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing // *J. Geophys. Res.* – 2003. – 108, № C8. – doi: 10.1029/2002JC001390. – P. 2-1 – 2-27.
14. *Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В. и др.* Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2014. – № 1. – С. 16 – 29.
15. *Журбас В.М., Зацепин А.Г., Григорьева Ю.В. и др.* Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрейфтерным данным // *Океанология*. – 2003. – 43, № 6. – С. 1 – 15.
16. *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. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2013. – № 6. – С. 717 – 732.
17. *Титов В.Б.* О характере циркуляции и вертикальной структуре течений в восточной части Черного моря // *Океанология*. – 1980. – 20, № 3. – С. 425 – 431.
18. *Титов В.Б.* Статистические характеристики и изменчивость течений на западном шельфе Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. – 1991. – № 2. – С. 41 – 47.
19. *Титов В.Б., Савин М.Т.* Изменчивость придонных течений на северо-восточном шельфе Черного моря // *Океанология*. – 1997. – 37, № 1. – С. 50 – 55.
20. *Титов В.Б.* Характеристики Основного Черноморского течения и прибрежных антициклонических вихрей в Российском секторе Черного моря // *Там же*. – 2002. – 42, № 5. – С. 668 – 676.
21. *Островский А.Г., Зацепин А.Г., Соловьев В.А. и др.* Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на заякоренной буйковой станции // *Там же*. – 2013. – 53, № 2. – С. 259 – 268.
22. *Зацепин А.Г., Кондрашов А.А., Корж А.О. и др.* Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // *Там же*. – 2011. – 51, № 4. – С. 592 – 605.
23. *Зацепин А.Г., Пиотух В.Б., Корж А.О. и др.* Изменчивость поля течений в прибрежной зоне Черного моря по измерениям донной станции ADCP // *Там же*. – 2012. – 52, № 5. – С. 629 – 642.
24. *Ёлкин Д.Н., Зацепин А.Г.* Лабораторное исследование механизма периодического вихреобразования за мысами в прибрежной зоне моря // *Там же*. – 2013. – 53, № 2. – С. 259 – 268.
25. *Ёлкин Д.Н., Зацепин А.Г.* Лабораторное исследование механизма сдвиговой неустойчивости морского вдольберегового течения // *Там же*. – 2014. – 54, № 5. – С. 614 – 621.

**On influence of current variability in the deep part
of the Black Sea upon water dynamics
of the North-Caucasian narrow shelf**

**A.G. Zatsepin¹, D.N. Elkin¹, A.O. Korzh², S.B. Kuklev³, O.I. Podymov³,
A.G. Ostrovskii¹, D.M. Soloviev⁴**

¹*P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: zatsepin@ocean.ru*

²*Atlantic Branch of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
Kaliningrad, Russia*

³*Southern Branch of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
Gelendzhik, Russia*

⁴*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

Mechanism of sub-mesoscale cyclonic and anticyclonic eddies' formation on the narrow North-Caucasian shelf resulting from influence of dynamics variability of the adjoining Black Sea deep part is proposed. It is grounded by in situ measurement data, satellite information analysis and the results of laboratory modeling. It is shown that when the Rim current is pressed to the continental slope, sub-mesoscale anticyclones are formed on the shelf, and when a mesoscale anticyclonic eddy, or the Rim current meander, is above the continental slope – a series of sub-mesoscale cyclones.

Keywords: North-Caucasian shelf, sub-mesoscale processes, cross-shelf transport, Black Sea.