

В. Н. Белокопытов<sup>1</sup>, Н. В. Никольский<sup>2</sup><sup>1</sup>Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва

### УСТОЙЧИВЫЕ АНТИЦИКЛОНИЧЕСКИЕ ВИХРИ У ЮЖНОГО И ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КРЫМА

На основе данных спутниковых альтиметрических измерений за 20-летний период уточнены представления о синоптических вихрях в прибрежной зоне Крыма. Описана пространственная структура и сезонная изменчивость квазистационарных антициклонических вихрей. На примере района вблизи побережья Севастополя рассмотрена взаимосвязь общей и региональной циркуляции вод на сезонном и межгодовом масштабах изменчивости.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** динамическая топография, альтиметрия, синоптические вихри, Черное море.

Среди различных факторов, обуславливающих особенности региональной циркуляции вод, велика роль мезомасштабных и синоптических вихревых образований. Особо выделяются устойчивые (квазистационарные) антициклоны, которые можно отнести к элементам общей циркуляции моря. Для района, примыкающего к побережью Крыма, известно о трех устойчивых антициклонах: Севастопольском, Керченском и Крымском (или Ялтинском). Использование данных дистанционного зондирования за период последних 20 лет позволяет уточнить сложившиеся представления о синоптических вихрях в Черном море, например, в [1 – 6], с детализацией для прибрежной зоны Крыма.

**Методы исследования.** Существует несколько методов выделения океанических вихрей по экспериментальным данным: анализ полей температуры, солености и динамической топографии по судовым съемкам, выделение вихрей на спутниковых снимках в оптическом и инфракрасном диапазонах, анализ траекторий дрейфующих буев, обработка спутниковых альтиметрических данных. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, для данного исследования выбраны измерения уровня моря спутниковым альтиметром, как наиболее регулярные во времени и пространстве.

В работе использовались ежедневные данные об аномалиях уровня моря за период 1993 – 2014 гг. с пространственным разрешением 14 км [7]. Расчет абсолютной топографии поверхности моря и геострофических течений производился согласно [8]. Основное внимание уделялось анализу относительной завихренности поля течений – дополнительной характеристике, позволяющей одновременно учитывать локальный центр вращения, его знак и интенсивность

$$\zeta = \text{rot}_z V = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость течения относительно Земли.

Вихревая кинетическая энергия течений рассчитывалась как

$$\text{ВКЭ} = \frac{1}{2} \rho (u'^2 + v'^2), \quad (2)$$

где  $u'$ ,  $v'$  – аномалии составляющих скорости течения в виде отклонений от среднего за текущий месяц;  $\rho$  – плотность воды.

Повышенные значения ВКЭ характеризуют районы с преобладанием нестационарных вихревых образований, малые значения ВКЭ свидетельствуют о высокой степени стационарности антициклонов.

В работах, посвященных анализу синоптических вихрей в Мировом океане, обычно не ограничиваются расчетами относительной завихренности  $\zeta$ , применяя различные методы идентификации вихрей, в том числе с целью разделить деформационную и вращательную компоненты вихревого поля. Методы выделения вихрей могут быть достаточно сложными, такими как вейвлет-анализ  $\zeta$  или метод анализа линий тока “windingangles” (для Черного моря использовался в [6]). Более простым и наиболее распространенным методом является критерий *Okubo-Weiss (OW)* [9, 10].

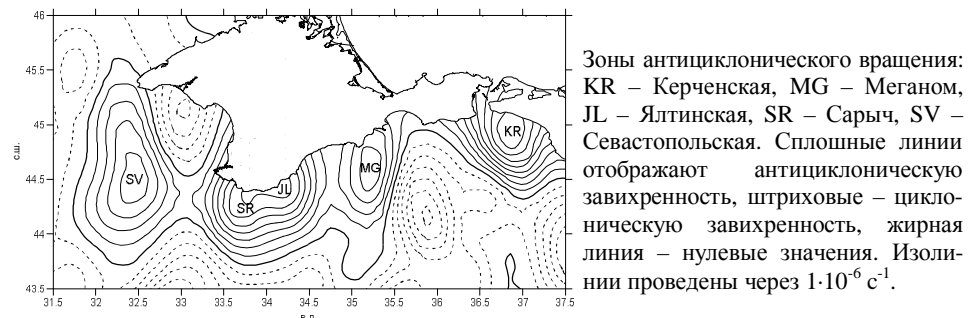
$$OW = s_n^2 + s_s^2 - \zeta^2, \quad (3)$$

где  $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$  – относительная завихренность;  $s_n = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$  – деформация

растяжения;  $s_s = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$  – деформация сдвига.

Применение критерия *OW* основывается на том, что при  $OW < 0$  вращательная компонента преобладает над деформационной, а локальный минимум (ниже определенного значения) соответствует ядру вихря. Среднее распределение критерия *OW* в Черном море показывает, что районы антициклонической завихренности различаются по соотношению между «чистым» вращением столба воды и деформационной составляющей.

**Анализ результатов.** Пространственная картина циркуляции вод вблизи Крымского побережья на основе анализа полей завихренности геострофических течений (рис.1) выглядит следующим образом. К трем известным антициклонам добавляется зона антициклонической завихренности у м.Мега-ном, простирающаяся на восток до Феодосийского залива, а в Крымском антициклоне выделяются два ядра – в Ялтинском заливе и у м.Сарыч. Интенсивность антициклонической завихренности течений достаточно велика,



Р и с . 1 . Средняя относительная завихренность  $\zeta$  геострофических течений на поверхности моря вблизи побережья Крыма по альтиметрическим данным.

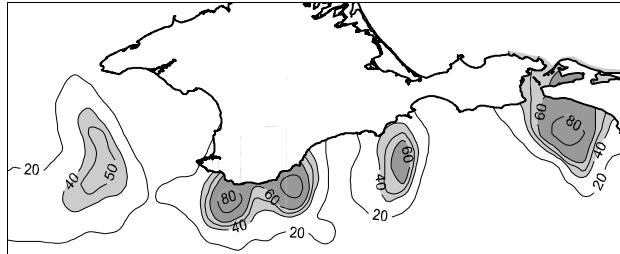


Рис. 2. Повторяемость случаев антициклонического вращения (в %) с  $\zeta < -5 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ .

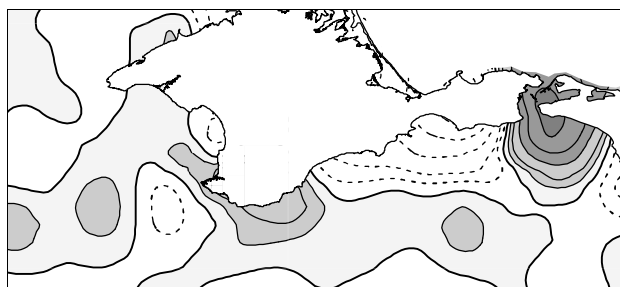


Рис. 3. Среднее значение критерия *Okubo-Weiss*. Сплошные линии отображают отрицательные значения, штриховые – положительные значения. Изолинии проведены через  $1 \cdot 10^{-10} \text{ с}^{-2}$ .

Распределение повторяемости антициклонов (рис.2) соответствует распределению средних значений  $\zeta$  (рис.1). В Керченском районе и у ЮБК значения повторяемости достигают 80 %, в Севастопольском антициклоне – до 50 %. Соответственно, значения повторяемости циклонического вращения уменьшаются в этих районах до 10 – 20 %.

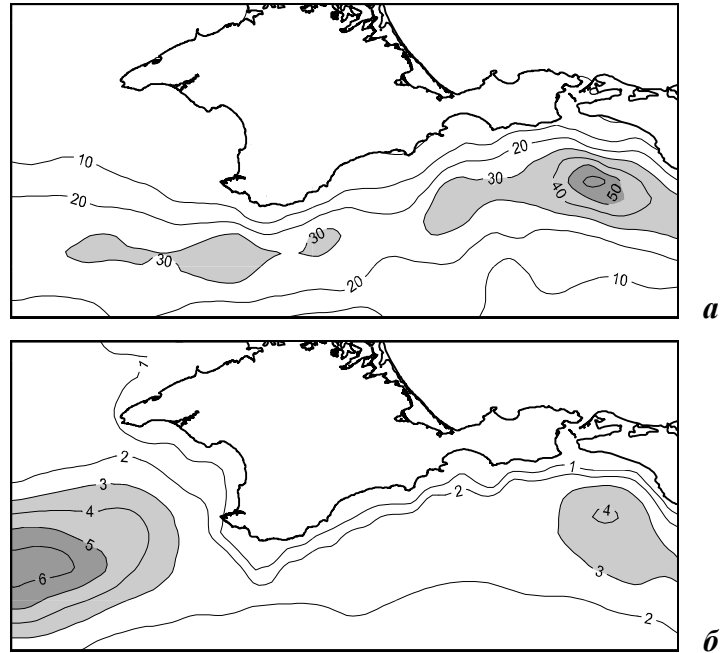
По среднему распределению критерия *OW* (рис.3) можно сделать вывод о значительной доле вращательной компоненты, особенно в Керченском антициклоне. Исключение составляет зона антициклонической завихренности у м.Меганом, где деформационная составляющая вихря преобладает, т.е. нет четко выраженного ядра вращения.

В зоне Основного черноморского течения (ОЧТ) значительно возрастает общая кинетическая энергия течений (КЭ), локальные максимумы приурочены к перифериям антициклонов (рис.4, а). На пространственном распределении вихревой кинетической энергии (ВКЭ) выделяются две области максимальных значений: в Керченском антициклоне и к западу от Севастопольского антициклона (рис.4, б). Здесь велика доля нестационарных, интенсивно передвигающихся вихревых образований.

Сезонный ход КЭ у всех антициклонов вблизи Крыма одинаков: минимум наблюдается в теплую половину года, максимум – в холодную половину (рис.5, а), что характерно для всего бассейна. Сезонный ход завихренности течений для большей части вихрей аналогичен сезонному ходу КЭ, но есть районы со своими особенностями внутригодового цикла. Так, зона антициклонической завихренности у м.Меганом активизируется не зимой,

достигая максимума в Керченском антициклоне и у Южного берега Крыма (ЮБК). Кроме квазистационарных антициклонических вихрей, существует и зона устойчивого циклонического вращения – между Каламитским заливом и п-овом Тарханкут.

Другим показателем вихревой активности может служить повторяемость случаев со значениями  $\zeta$ , превышающих определенный порог. На рис.2 показана повторяемость случаев с  $\zeta < -5 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ . В данном диапазоне  $\zeta$  находится большинство антициклонических вихрей, выявляемых на исходных картах.

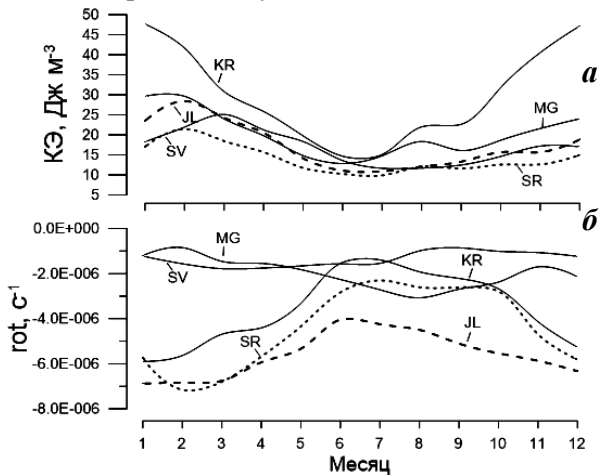


Р и с . 4 . Средние значения (в Дж·м<sup>-3</sup>) общей кинетической энергии (а) и вихревой кинетической энергии (б) географических течений на поверхности моря.

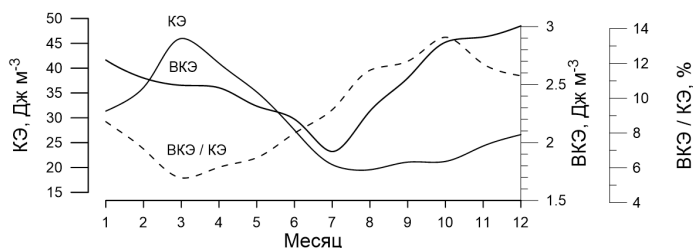
а в летний период. Севастопольский антициклон имеет в целом невысокую завихренность и малую амплитуду сезонного хода.

В связи с тем, что существуют различные точки зрения о внутригодовом ходе синоптической изменчивости в Черном море, представляет интерес оценка сезонного цикла ВКЭ. Из рис.6 следует, что интенсивность нестационарных вихревых образований минимальна летом и возрастает к осени. Более равномерный вид имеет график сезонного цикла отношения ВКЭ/КЭ. Вклад нестационарных вихрей в общую кинетическую энергию максимален в октябре, к марту он снижается приблизительно в 2 раза.

Используя среднее пространственное распределение антициклонов по альтиметрическим данным, можно на качественном уровне оценить знаки агеострофических составляющих из уравнения баланса вихря,



Р и с . 5 . Сезонный ход кинетической энергии (а) и завихренности течений (б) в квазистационарных антициклонах. Буквенные обозначения антициклонов согласно рис.1.



Р и с . 6 . Сезонный ход кинетической энергии ОЧТ и вихревой кинетической энергии в Крымском регионе.

Т а б л и ц а . Оценки вклада агеострофических составляющих баланса вихря.

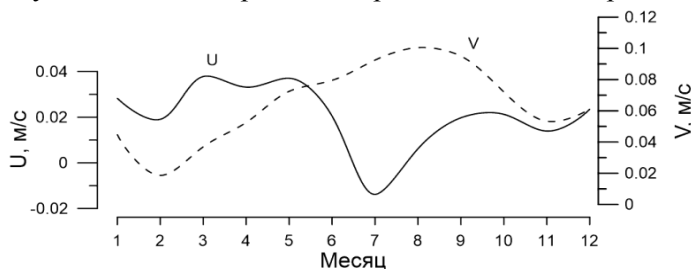
антициклон	$dH$	$\text{div}\mathbf{V}$	$\frac{\partial\rho}{\partial z}$	$u\frac{\partial\zeta}{\partial x} + v\frac{\partial\zeta}{\partial y}$	$\text{rot}\tau$
SV	+	+		+	+ лето
SR	+				+ осень
JL	+				+ осень
MG		+			+ осень
KR	+	+	+	+	

Примечание:  $dH$  – изменение глубины по направлению потока,  $\text{div}\mathbf{V}$  – крупномасштабная дивергенция потока,  $\frac{\partial\rho}{\partial z}$  – стратификация плотности,

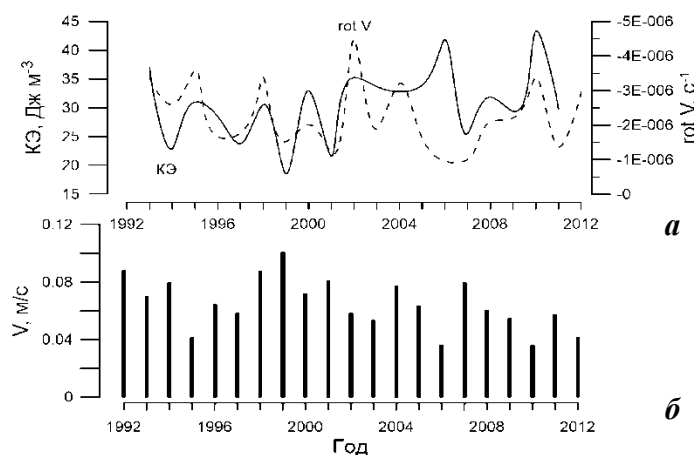
$u\frac{\partial\zeta}{\partial x} + v\frac{\partial\zeta}{\partial y}$  – адвекция вихря,  $\text{rot}\tau$  – завихренность касательного напряжения ветра, + – благоприятствующий фактор для формирования антициклона.

выделив благоприятствующие факторы для возникновения антициклонического вращения в различных районах (табл.). Наибольшее количество факторов, способствующих формированию антициклонической завихренности, отмечено для Керченского и Севастопольского антициклонов.

В качестве примера воздействия квазистационарных антициклонов на циркуляцию вод в прибрежной зоне рассмотрим район вблизи юго-западной оконечности Крыма. На рис.7 представлен сезонный ход геострофических течений в одном из узлов сетки альтиметрических данных – на взморье Севастополя (точка 44°45' с.ш., 33°25' в.д.). В конце лета – начале осени, когда общая циркуляция моря ослаблена (рис.6), антициклоническая завихренность в Севастопольском антициклоне минимальна (рис.5), а меридиональный перенос вод от ОЧТ к шельфу возрастает (рис.7). В конце зимы – начале весны, при интенсивном развитии ОЧТ и антициклонических вихрей поступление вод открытого моря ослабевает, возрастает перенос вод шельфа



Р и с . 7 . Сезонный ход зональной и меридиональной составляющей геострофических течений у побережья Севастополя.



Р и с . 8 . Межгодовая изменчивость кинетической энергии ОЧТ вблизи Крыма и завихренности Севастопольского антициклона (а); меридиональной составляющей геострофических течений у побережья Севастополя.

по периферии Севастопольского антициклона.

Подобная зависимость прослеживается и в межгодовом диапазоне изменчивости (рис.8). К концу 90-х гг. интенсивность ОЧТ снижалась, а в последнее десятилетие значительно усиливается. При этом вместе с усилением ОЧТ отмечается повышение интенсивности завихренности Севастопольского антициклона. Соответственно, максимальный перенос вод открытого моря к побережью Севастополя наблюдался в 1999 – 2001 гг. при ослаблении ОЧТ. Уменьшение кинетической энергии при межгодовых колебаниях ОЧТ в 1,5 раза сопровождается увеличением вдольберегового потока в северном направлении в 2 раза, что значительно ниже, чем для среднего сезонного цикла.

**Выводы.** Устойчивые или квазистационарные антициклонические вихри являются элементами общей циркуляции моря, они передают энергию от ОЧТ к прибрежной зоне, влияя на локальный водообмен и термохалинную структуру вод.

Сезонный цикл интенсивности большинства антициклонических вихрей подобен сезонному циклу кинетической энергии ОЧТ с максимумом зимой и минимумом летом.

Наибольшее количество агеострофических факторов, способствующих формированию антициклонической завихренности, отмечено для Керченского и Севастопольского антициклонов.

Интенсивность водообмена между шельфом и открытой частью моря в районе вблизи юго-западной оконечности Крыма находится в обратной зависимости от энергии ОЧТ и Севастопольского антициклона. Эта закономерность хорошо прослеживается для сезонного цикла и сохраняется для межгодового диапазона изменчивости циркуляции вод.

Результаты работы получены при поддержке регионального гранта РФФИ № 14-45-01640.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Korotaev G.K., Saenko O.A., Koblinsky C.* Satellite altimetry observations of the Black Sea level // *J. Geophys. Res.*– 2001.– 106.– P.917-933.
2. *Korotaev G., Oguz T., Nikiforov A., Koblinsky C.* Seasonal, interannual, and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data // *J. Geophys. Res.*– 2003.– 108 (C4).
3. *Sokolova E., Stanev E.V., Yakubenko V., Ovchinnikov I., Kosyan R.* Synoptic variability in the Black Sea: Analysis of hydrographic survey and altimeter data // *J. Mar. Syst.*– 2001.– 31.– P.45-63.
4. *Poulain P.-M., Barbanti R., Motyzev S., Zatsepin A.* Statistical description of the Black Sea near-surface circulation using drifters in 1999 – 2003 // *Deep-Sea Res., I.*– 2005.– 52.– P.2250-2274.
5. *Ginzburg A.I., Zatsepin A.G., Kostianoy A.G., Sheremet N.A.* Mesoscale water dynamics / A.Kostianoy, A.Kosarev (Eds) *The Handbook of Environmental Chemistry.*– v.5, Part Q.– Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.– P.196-215.
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., I.*– 2015.– 97.– P.80-91.
7. *URL: <http://www.avisioceanobs.com>.*
8. *Kubryakov A.A., Stanichny S.V.* Mean Dynamic Topography of the Black Sea, computed from altimetry, drifter measurements and hydrology data // *Ocean Sci.*– 2011.– 7.– P.745-753.
9. *Okubo A.* Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularity such as convergences // *Deep-Sea Res.*– 1970.– P.17445-17454.
10. *Weiss J.B.* The dynamics of enstrophy transfer in two dimensional hydrodynamics // *Physica.*– 1991.– D 48.– P.273-294.

Материал поступил в редакцию 25.10.2015 г.

V.N.Belokopytov, N.V.Nikol'sky

#### **STATIONARY ANTICYCLONIC EDDIES NEAR THE SOUTH AND WEST COASTS OF CRIMEA**

Mesoscale eddies in the coastal zone of Crimea are investigated on the basis of satellite altimetry data. Spatial structure and seasonal variability of quasi-stationary anticyclonic eddies are described. Interaction of general and regional circulation on the seasonal and interannual time-scale is considered on the example of Sevastopol coast.