## О НИЗКОЧАСТОТНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПОЛЕЙ ВЕТРА И ГЕОСТРОФИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ. ЧАСТЬ 1: СЕЗОННЫЙ ЦИКЛ

# **А.Б.** Полонский $^{1,2,3}$ , **А.Н.** Серебренников $^{1}$

1 Институт природно-технических систем,

РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

E-mail: apolonsky5@mail.ru; swsilv@gmail.com

 $^{2}$  Филиал МГУ в г. Севастополе, РФ, г. Севастополь, ул. Героев Севастополя, 7

<sup>3</sup> Севастопольский государственный университет,

РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

На основе ежедневной спутниковой информации о приповерхностном ветре за 1988–2017 гг. и аномалиях уровенной поверхности за 1993–2017 гг. исследована сезонная изменчивость приповерхностного ветра и его завихренность, связанная с боковым сдвигом, а также сезонная изменчивость геострофических течений для всего бассейна Черного моря. Показано, что амплитуда сезонной изменчивости приповерхностного ветра максимальна в северной части моря и минимальна на юго-востоке акватории. Циклоническая завихренность среднеклиматического приповерхностного ветра преобладает в восточной части бассейна, антициклоническая – в западной. Циклоническая циркуляция геострофических течений усиливается зимой и ослабевает летом, в значительной степени (но не полностью!) определяясь завихренностью ветра.

**Ключевые слова:** приповерхностный ветер, геострофическое течение, экмановская накачка, завихренность ветра.

Поступила в редакцию: 05.06.2019. После доработки: 11.06.2019.

Введение. Состояние Черного моря и окружающей среды прилегающих территорий важно не только для населения, проживающего в прибрежных областях, но и имеет существенное значение для всей РФ. В первую очередь, это связано с рекреационной привлекательностью региона и его стратегической важностью. Изменение климата, рост численности населения, сопровождающееся усилением антропогенного воздействия на Черное море, могут привести к неблагоприятным региональным последствиям. В связи с этим, контроль состояния Черного моря и прогнозирование долгопериодных изменений параметров среды в регионе (на масштабах до нескольких десятков лет) безусловно актуальны.

Существует много публикаций, посвященных исследованию гидрометеорологического режима, структуры циркуляции вод Черного моря и их изменений [1–15]. Результаты этих работ довольно противоречивы. Это связано с тем, что различные авторы используют не только разные типы данных и реанализов, но и различные периоды их осреднения, а также алгоритмы контроля качества измерений и параметры сглаживания первичной информации. В условиях значительной пространственно-временной изменчивости анализируемых полей, выделение и анализ их низкочастотных вариаций вызывают существенные трудности.

Развитие спутниковых методов в океанографии и их регулярное использование с начала 1980-х гг. позволяет в настоящее время более надежно оценить параметры изменчивости гидрометеорологических полей и состояния поверхности Черного моря в широком диапазоне масштабов - от синоптического до междесятилетнего. Действительно, накоплены достаточно продолжительные массивы спутниковых данных в узлах регулярной сетки с хорошим временным разрешением (порядка 1 суток). Это дает возможность более точно описать характеристики низкочастотной изменчивости гидрометеорологических полей и циркуляции поверхностных вод в регионе и

оценить соответствующие долгопериодные тренды. В настоящей работе будет дано такое описание для сезонных изменений анализируемых полей. Более низкочастотная изменчивость будет проанализирована во второй части работы.

Материалы и методы. В ходе работы проанализированы ежедневные векторные карты приповерхностного ветра с разрешением  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  за 30-летний период (с 1988 по 2017 гг.), полученные с сайта NCEP (National Centers for Environmental Prediction), и ежедневные карты аномалий уровня моря с разрешением 0,125°×0,125° за 26-летний период (с 1993 по 2018 гг.), полученные с сайтов AVISO+ (Archiving, Validation Interpretation of Satellite Oceanographic data) и CMEMS. По этим данным рассчитаны сезонные изменения среднеклиматических значений ежемесячных величин модуля скорости приповерхностного ветра (ПВ), модуля скорости аномалии геострофического течения (АГТ) и вертикальной скорости экмановской накачки (Wэн) для всего бассейна Черного моря. ПВ и Wэн рассчитывались за 30-летний период с 1988 по 2017 гг., АГТ – за 26-летний период с 1993 по 2018 гг. Вертикальная скорость подъема воды за счет экмановской накачки рассчитывалась из компонентов касательного напряжения ветра по следующей формуле [16]:

$$W_{H} = (\text{rot }\tau) \, / \, (\rho_{w} \times f) + (\beta \times \tau_{x} \, ) / (\rho_{w} \times f^{2}),$$

где т и т  $_{x}$  — касательное напряжение приводного ветра и его зональная компонента, соответственно;  $\rho_{w}$  — плотность морской воды; f — параметр Кориолиса;  $\beta$  =  $\partial f$  /  $\partial y$ . Изменение f с широтой известно как « $\beta$ -эффект». Wэн определяет ветровую завихренность, которая связана с боковым сдвигом скорости ветра. Вертикальная ось направлена вверх. Поэтому положительные значения Wэн определяют циклоническую завихренность (т.е. подъем воды), а отрицательные — антициклоническую.

Отметим, что среднеклиматические карты и среднеквадратичные отклонения (с.к.о.) исследуемых параметров рассчитывалась по среднеарифметическим зна-

чениям для каждой точки по всем среднемесячным величинам (суммирование и деление на 12). Например, если  $U_{i,j}$ ,  $V_{i,j}$ ,  $W_{i,j}$  — среднемесячные климатические значения зональной (U), меридиональной (V) составляющих и модуля (W) скорости ветра для каждой точки поля і и для каждого месяца ј (j = 1,...,m, где m=12), то среднеклиматическое значение и с.к.о. для каждой точки і вычислялись по нижеследующим формулам:

$$W_{i,av} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} W_{i,j},$$

$$W_{i,sd} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^{m} (W_{i,j} - W_{i,av})^2},$$

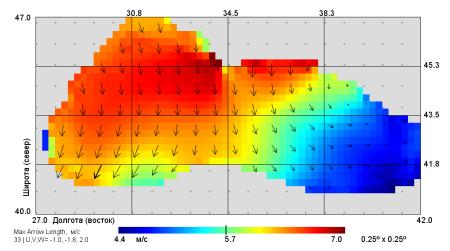
где  $W_{i,av}$  и  $W_{i,sd}$  — среднеклиматическое значение и с.к.о. скорости W для каждой точки i. Климатические векторные компоненты ПВ рассчитываются аналогично. Это приводит к хорошо известному несоответствию климатической скорости ветра, вычисленной путем осреднения среднемесячной скорости, и определенной после векторного осреднения ежемесячных векторов и расчета модуля осредненного вектора ветра.

Результаты и их анализ. Поле ветра и его сезонная изменчивость. Среднеклиматическая карта поля приводного ветра, построенная за весь исследуемый период (30 лет), показывает, что над акваторией Черного моря в среднем преобладают северные ветра. Вектора ветра над юго-западной частью акватории закручиваются в западном направлении, а над юго-восточной - в восточном (рис. 1). Таким образом современный климатический ветер над акваторией моря характеризуется циклонической завихренностью в восточной части региона и антициклонической - в западной. Причем максимальные климатические скорости ветра приурочены к западной части акватории. В целом, это соответствует опубликованным результатам, полученным по данным ре-анализов (более подробное обсуждение завихренности поля ветра и ее сезонной изменчивоcти - cм. ниже).

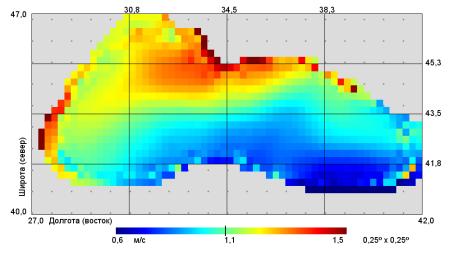
Климатическое с.к.о. модуля вектора ветра по всей акватории моря показано

на рис. 2. На рисунке хорошо видно, что максимальные амплитуды сезонных вариаций в поле ветра наблюдаются в северной и западной частях моря. Это лишь частично подтверждает опубликованные в последние 10 лет результаты [11, 12]. Действительно, авторы этих работ утверждают, что интенсивность сезонной изменчивости скорости ветра максимальна в открытых районах запад-

ной части моря, а также на северозападном шельфе и в северо-восточной части моря. Принимая во внимание низкой качество спутникового ветра в прибрежных частях акватории, можно заключить, что северо-восточная часть Черного моря не относится к акваториям с максимальными амплитудами сезонной изменчивости поля ветра.



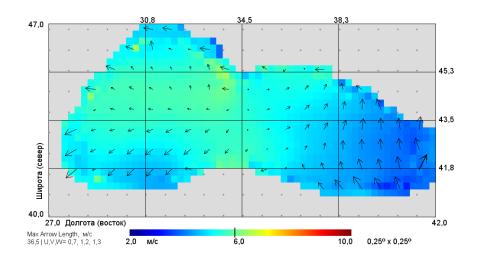
**Рис. 1.** Среднеклиматические значения скорости приповерхностного ветра и его векторных компонент (стрелочки) за весь период. Стрелочка с максимальной длиной (слева внизу, более толстая) имеет длину 33 пикселя при зональной и меридиональной компонентах -1,0 и -1,8 м/с



**Рис. 2.** Сезонная изменчивость модуля вектора приповерхностного ветра, представленная как поле с.к.о., за весь период

При рассмотрении карт ПВ за каждый месяц видно, что восточнее 38,3° в.д. направление ветра с ноября по апрель преимущественно южное. В мае и октябре преобладают ветра переменных направлений, а с июля по сентябрь — северные ветра (рис. 3 и 4). Скорость сред-

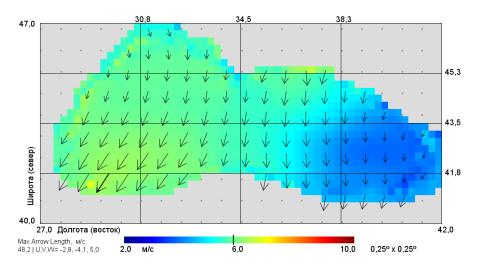
немесячного ветра максимальна в январе, когда она превышает 7-8 м/с, а минимальна — в мае, когда типичные климатические скорости ветра не превышают 4-5 м/с. В целом, это соответствует опубликованным данным.



**Рис. 3.** Среднеклиматические значения скорости приповерхностного ветра и его векторных компонент (стрелочки) для апреля. Стрелочка с максимальной длиной (справа, более толстая) имеет длину 36,5 пикселей при зональной и меридиональной компонентах 0,7 и 1,2 м/с

Завихренность поля ветра и ее сезонная изменчивость. Карта среднеклиматической завхренности ПВ, построенная за весь исследуемый период, указывает на преимущественно циклоническую завихренность ветра в восточной части бассейна и антициклоническую – в западной (рис. 5), что подтверждает сделанный выше качественный вывод. В среднем по морю вертикальная скорость, генерируемая климатическим полем вет-

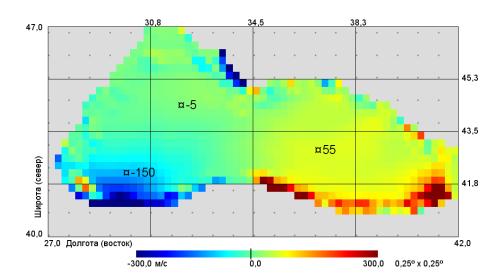
ра, направлена вверх и составляет около  $6.5 \cdot 10^{-7}$  м/с. На рис. 6, демонстрирующем карту сезонной изменчивости завихренности ПВ, видно, что в юго-западной части моря изменчивость вертикальной экмановской скорости, обусловленной завихренностью ПВ, максимальна. Она достигает значения  $0.5 \cdot 10^{-5}$  м/с, в то время, как на севере — не превышает  $1 \cdot 10^{-6}$  м/с (в терминах с.к.о.), т.е. уменьшается на полпорядка.



**Рис. 4.** То же, что и на рис. 2, только для августа. Стрелочка с максимальной длиной (слева внизу, более толстая) имеет длину 48,2 пикселя при зональной и меридиональной компонентах -2,8 и -4,1 м/с

Анализ среднеклиматических полей завихренности поля ветра за каждый месяц показывает преимущественно циклоническую завихренность с октября по

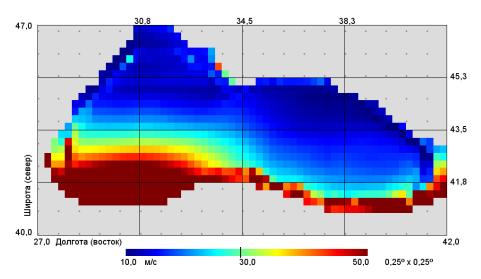
март (рис. 7). С июля по сентябрь, напротив, преобладает антициклоническая завихренность (рис. 8).



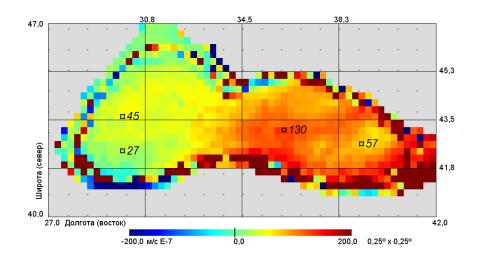
**Рис. 5.** Среднеклиматические значения завихренности приповерхностного ветра за весь период ( $\times 10^{-7}$  м/с)

Геострофические течения на поверхности моря. Карта среднеклиматических значений аномалий геострофических течений, построенная за весь исследуемый период (26 лет), указывает на преимущественно циклоническую завихренность крупномасштабных течений в Черном море, образующих многократно описанный циклонический круговорот, с двумя суб-бассейновыми структурами (т.н. «очки Книповича») (рис. 9). Помесячный анализ среднеклиматических полей аномалий геострофических течений показал, что циклоническая завихренность крупномас-

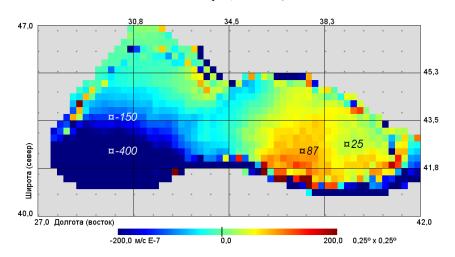
штабных круговоротов преобладает в течение 6 месяцев: с ноября по апрель (рис. 10). С мая по октябрь, напротив, преобладает антициклоническая завихренность (рис. 11). Необходимо специально выделить наиболее сильное вихревое течение в юго-восточной области Черного моря, совпадающее по направлению с крупномасштабным круговоротом, которое, в свою очередь, усиливает (при циклоническом направлении) или ослабляет Основное Черноморское Течение (ОЧТ) (рис. 10, 11). В летний период это вихревое образование известно, как «Батумский антициклон».



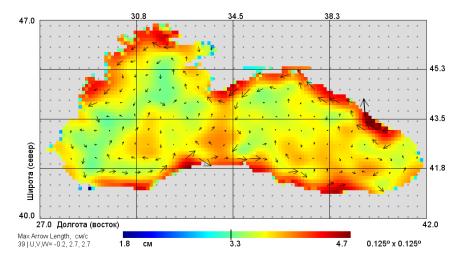
**Рис.6.** Сезонная изменчивость завихренности приповерхностного ветра, представленная как поле с.к.о. среднемесячных величин экмановской вертикальной скорости за весь климатический период  $(\times 10^{-7} \text{ м/c})$ 



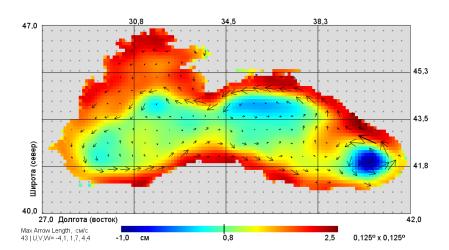
**Рис.7.** Среднеклиматические значения завихренности приповерхностного ветра за январь ( $\times 10^{-7}$  м/с)



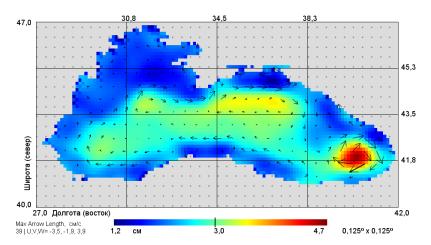
**Рис. 8.** Среднеклиматические значения завихренности приповерхностного ветра за август ( $\times 10^{-7}$  м/с)



**Рис. 9.** Среднеклиматические значения аномалий геострофических течений за весь период. Стрелочка с максимальной длиной (справа, более толстая) имеет длину 39 пикселей при зональной и меридиональной компонентах -0,2 и 2,7 см/с



**Рис. 10**. Среднеклиматические значения аномалий геострофических течений с ноября по апрель. Стрелочка с максимальной длиной (справа, более толстая) имеет длину 43 пикселя при зональной и меридиональной компонентах -4,1 и 1,7 см/с

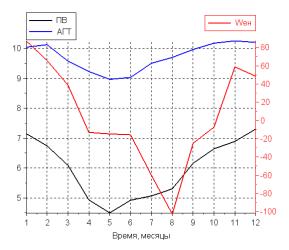


**Рис. 11.** Среднеклиматические значения аномалий геострофических течений с мая по октябрь. Стрелочка с максимальной длиной (справа, более толстая) имеет длину 39 пикселей при зональной и меридиональной компонентах -3,5 и -1,9 см/с

Связь сезонной изменчивости поля ветра и геострофической циркуляции. Совместный анализ графиков скоростей ПВ и АГТ, указывает на тесную связь между ними (рис. 12). Максимальное ослабление ветра в мае влияет на максимальное ослабление скорости геострофических течений в мае - июне. В весенне-летний период скорости ветра и геострофического течения минимальны, а завихренность в полях ветра и геострофических течений - антициклоническая. В осенне-зимний период скорости ветра и геострофических течений увеличиваются. завихренность становится циклонической.

Отметим, что существенный вклад в формирование суммарной завихренности касательного напряжения ветра над глубоководной частью Черного моря играет его восточная часть, где наблюдаются ее наиболее высокие значения. Авторы работы [17] предположили, что экмановская накачка в северо-восточной части моря имеет определяющее значение в формировании общей циклонической циркуляции вод Черного моря, что было позднее показано авторами работы [13]. Также было отмечено, что экмановская накачка, как для моря в целом, так и для его северо-восточной части, достигает максимального значения в зимний период, а минимального - в весеннелетний. Это хорошо согласуется с нашими исследованиями. Таким образом, наши результаты подтверждают, что сезонную изменчивость крупномасштабной циркуляции Черного моря (и интенсивности ОЧТ) в значительной степени определяет экмановская накачка (завихренность ветра). Циклоническая циркуляция должна усиливаться зимой и ослабевать летом. Вместе с тем, на существование климатической циркуляции в Черном море циклонического характера безусловно влияют термохалинные факторы. Это было убедительно доказа-

но в модельных исследованиях [4, 6] и подтверждается нашими результатами. Действительно, циклонический характер климатической циркуляции вод моря выделяется по спутниковым данным, несмотря на незначительную завихренность климатического поля ветра над его акваторией (рис. 5 и 12).



**Рис. 12.** Среднеклиматические значения скорости приповерхностного ветра (ПВ, м/с), модуля скорости аномалии геострофического течения (АГТ, см/с) и вертикальной скорости экмановской накачки (Wэн  $\times$  10<sup>-7</sup>, м/с), усредненные по всему бассейну Черного моря

Заключение. Результаты анализа спутниковых данных за 30-летний период показали, что амплитуда сезонной изменчивости приповерхностного ветра максимальна в северной части Черного моря и минимальна на юго-востоке акватории. При этом амплитуда сезонных вариаций вертикальной экмановской обусловленной скорости, пространственной неоднородностью поля ветра, максимальна в юго-западной части моря. Циклоническая завихренность среднеклиматического приповерхностного ветра преобладает в восточной части бассейна, антициклоническая - в западной. Климатическая завихренность поля ветра, осредненная по всей акватории моря, близка к нулю. Циклоническая циркуляция геострофических течений усиливается зимой и ослабевает летом, в значительной степени (но не полностью!) определяясь завихренностью в поле ветра. На последнее обстоятельство указывает наличие циклонической завихренности климатической циркуляции в Черном море, которая выделяется по спутниковым данным, несмотря на незначительную завихренность среднегодового климатического поля ветра.

Работа выполнена в рамках госзадания (тема № 0012–2019–0002: Фундаментальные исследования процессов в климатической системе, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды глобального и регионального масштабов) при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-45-920014).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Соркина А.И*. Построение карт ветровых полей для морей и океанов // Труды ГОИН. М.: Гидрометеоиздат, 1958. Вып. 44. С. 44–74.
- 2. Леонов А.К. Региональная океанография. Ч. 1. Берингово, Охотское, Японское, Каспийское и Черное моря. Л.: Гидрометеоиздат, 1960. 756 с.
- 3. *Филиппов Д.М*. Циркуляция и структура вод Черного моря. М.: Наука, 1968. 137 с.

- 4. *Stanev E.V.* On the mechanisms of the Black Sea circulation // Earth-Science Rev., 1990. Vol. 28, No. 4. P. 285–319.
- 5. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / под ред. А.И. Симонова, Э.И. Альтмана. СПб.: Гидрометеоиздат, 1991. 430 с.
- 6. *Oguz T., Malanotte-Rizzoli P.* Seasonal variability of wind and thermohalinedriven circulation in the Black Sea: Modeling studies // J. Geophys. Res., 1996. Vol. 101. No. C7. P. 16551–16569.
- 7. Polonskii A.B., Voskresenskaya E.N., Bardin M.Yu. Statistical characteristics of cyclones and anticyclones over the Black sea in the second half of the 20th century // Physical Oceanography. 2007. Vol. 17,  $\mathbb{N}$  6. C. 348–359.
- 8. Risien C.M., Chelton D.B. ASCAT global climatology of surface wind and wind stress fields from eight years of QuikSCAT scatterometer data // J. Phys. Oceanogr. 2008. 38 (11). P. 2379–2413.
- 9. Полонский А.Б., Шокурова И.Г. Десятилетняя изменчивость характеристик пикноклина и геострофической циркуляции вод Черного моря в зимний период // Метеорология и гидрология. 2009. № 4. С. 75–92.
- 10. Полонский А.Б., Шокурова И.Г. Изменения сезонного хода геострофической циркуляции в Черном море // Морской гидрофизический журнал. 2010.  $\mathbb{N}$  1. С. 16–39.
- 11. Romanou A., Tseloudis G., Zerefos C.S, Curry J.A. et al. Evaporation-

- precipitation variability over the Mediterranean and the Black Seas from satellite and reanalysis estimates // J. Climate. 2010. Vol. 23. P. 5268–5287.
- 12. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Черного моря. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 209 с.
- 13. Михайлова Э.Н., Полонский А.Б., Шокурова И.Г. О связи интенсивности циркуляции в Черном море с завихренностью поля ветра // Украинский гидрометеорологический журнал. 2013. № 12. С. 193–203.
- 14. Akpinar A., de León S.P. An assessment of the wind re-analyses in the modelling of an extreme sea state in the Black Sea // Dyn. Atmos. Oceans. 2016. 73. P. 61–75.
- 15. Евстигнеев В.А., Наумова В.А., Воскресенская Е.Н. и др. Ветроволновые условия прибрежной зоны Азово-Черноморского региона. Севастополь: ИПТС. 2017. 320 с.
- 16. Stommel H.M. The Gulf Stream. A Physical and Dynamical Description // Univ. Calif. Press, Berkeley. 1958. Calif. 202 p.
- 17. Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Станичный С.В., Бурдюгов В.М. Бассейновая циркуляция и мезомасштабная динамика Черного моря под ветровым воздействием / под редакцией А.В. Фролова, Ю.Д. Реснянского // Современные проблемы динамики океана и атмосферы: сб. статей, посвящ. 100-летию со дня рожд. проф. П.С. Линейкина. М.: Триада ЛТД, 2010. С. 347—368.

# ABOUT LOW-FREQUENCY CHANGE OF WIND FIELDS AND GEOSTROPHIC FLOWS OF THE BLACK SEA ON SATELLITE DATA. PART 1: SEASON CYCLE

## A.B. Polonsky<sup>1,2,3</sup>, A.N. Serebrennikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

The seasonal variability of the surface wind and its vorticity associated with the lateral shift, as well as the seasonal variability of geostrophic currents for the Black Sea were studied on the basis of daily satellite information on the surface wind for 1988–2017 and level surface anomalies for 1993–2017. It is shown that seasonal variability of the near-surface wind has maximum values in the northern part of the sea with a decrease in values in the north-west direction. In the southeast, wind variability is minimal. The cyclonic mean climatic vorticities of the near-surface wind prevail in the eastern part of the basin, anticyclonic ones in the western one. The cyclonic circulation of geostrophic currents increases in winter and weakens in summer and is largely determined by the vorticity of the wind (Ekman pumping).

**Keywords:** near-surface wind, geostrophic current, Ekman pumping, wind vorticity.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Branch of Moscow State University in Sevastopol, RF, Sevastopol, Geroyev Sevastopol St., 7

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33