

А.Б. Полонский, И.Г. Шокурова

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь***МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЗАВИХРЕННОСТИ  
КАСАТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ТРЕНИЯ ВЕТРА  
НАД ЧЕРНЫМ МОРЕМ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА**

Проводится сравнение результатов расчета завихренности касательного напряжения трения ветра в Черном море по данным о поле ветра на высоте 10 м реанализов *NCEP/NCAR* и *ERA-40* с целью их дальнейшего использования для исследования причин долговременной изменчивости гидрологических и гидродинамических полей моря. Выделены тенденции межгодовой изменчивости завихренности касательного напряжения трения ветра в различные сезоны года. Получено хорошее согласование между пространственным распределением среднемесячной и осредненной за десятилетия завихренности, вычисленной по данным *NCEP/NCAR* и *ERA-40* для зимнего сезона, и существенные различия по данным для летнего сезона.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *Черное море, трение ветра, касательное напряжение, завихренность, синоптические карты.*

**Введение.** Изучение долговременных изменений гидрологической структуры и циркуляции вод Черного моря является актуальным, так как результаты таких исследований используются не только для диагноза современного состояния морской среды, но и для его прогноза на будущее. Важным этапом исследований является анализ причин изменчивости температуры и солености в верхнем и промежуточном слоях моря, но для большинства характеристик, таких как температура в пикноклине, соленость на поверхности моря и в пикноклине, а также интенсивность циркуляции вод, исследование причин изменений еще не завершено. Для изучения причин долговременных изменений необходимы достоверные сведения о пространственной и временной изменчивости метеорологических параметров на границе море-атмосфера. Для климатических временных масштабов регулярные по времени и по пространству данные о ветре и потоках на поверхности моря содержатся в продуктах реанализов *NCEP/NCAR* [1] и *ERA-40 ECMWF* [2].

Ветер, как известно, является одним из наиболее важных метеорологических факторов, влияющих на процессы перемешивания в верхнем слое моря и на интенсивность циркуляции. Расчеты завихренности ветра и касательного напряжения трения ветра в Черном море ранее были выполнены в [3 – 9]. В работах [4 – 7, 9] для расчетов использовались данные реанализа *NCEP/NCAR*, а в [3, 8] архивные синоптические карты. Однако долговременная пространственная и временная изменчивость завихренности касательного напряжения трения ветра в этих работах не была проанализирована. Поэтому нами были поставлены следующие задачи:

– рассчитать завихренность касательного напряжения трения ветра в Черном море по данным реанализов *NCEP/NCAR* и *ERA-40*;

© А.Б. Полонский, И.Г. Шокурова, 2011

- проанализировать ее пространственно-временную изменчивость;
- сравнить результаты, полученные по данным реанализов для внутри-годового, межгодового и десятилетнего временных масштабов.

**Описание данных и методика их обработки.** Для решения поставленных задач мы использовали данные о поле ветра на высоте 10 м над уровнем моря реанализов *NCEP/NCAR* (1948 – 2008 гг., с пространственным разрешением  $1,905^\circ \times 1,875^\circ$ ) и *ECMWF (ERA-40)* (1958 – 2002 гг., с пространственным разрешением  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ ) с интервалом 6 часов. Касательное напряжение трения ветра рассчитывалось для каждого шестичасового срока по аэродинамической формуле

$$\bar{\tau} = \rho_a C_d \bar{V}^2 \text{ (Н/м}^2\text{)},$$

где  $\rho_a$  – плотность воздуха ( $\text{кг/м}^3$ ),  $C_d$  – коэффициент сопротивления морской поверхности (безразмерная величина),  $\bar{V}$  – скорость ветра на высоте 10 м над уровнем моря ( $\text{м/с}$ ).

Расчет коэффициента  $C_d$  производился по эмпирическим формулам, приведенным в [10, 11], с учетом зависимости от скорости ветра. Величина завихренности касательного напряжения трения ветра  $rot_z \bar{\tau}$  ( $\text{Н/м}^3$ ), вычислялась в узлах сетки, являющихся центрами квадратов, к вершинам которых отнесены данные по ветру (см. рис. 1). Для вычисления среднего по морю значения завихренности проводилась интерполяция на сетку  $\sim 0,2^\circ \times 0,2^\circ$  в пределах акватории моря.

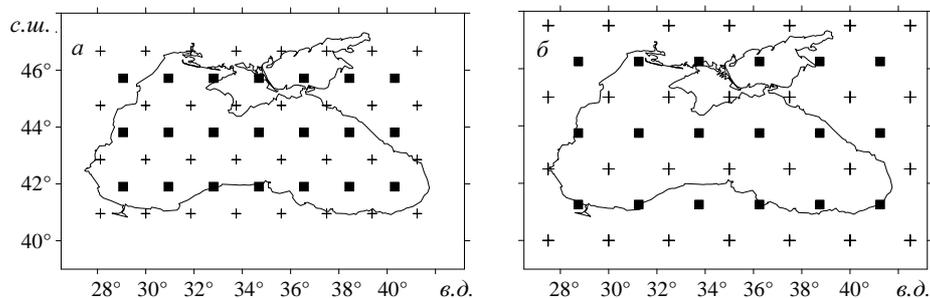


Рис. 1. Распределение данных о поле ветра (+) реанализов *NCEP/NCAR* (а) и *ERA-40* (б) и узлов, в которых вычислялась величина  $rot_z \bar{\tau}$  (■).

### Результаты.

**Внутригодовая изменчивость.** Расчеты показали, что в среднем за год завихренность касательного напряжения трения ветра над Черным морем имеет циклонический характер, что согласуется с общепринятыми представлениями. По расчетам с использованием данных *ERA-40*, циклоническая завихренность преобладает во все сезоны года. По данным *NCEP/NCAR* большую часть года отмечается циклоническая завихренность, но в летние месяцы и в сентябре в среднем по морю завихренность – антициклоническая (см. рис. 2). Амплитуда годового хода по данным *ERA-40* в два раза меньше, чем по данным *NCEP/NCAR*, что может объясняться разным пространственным разрешением данных. При этом разница между среднемесячными значениями в летний сезон наибольшая. В годовом ходе максимальное значение завихренности отмечает-

ся в феврале по данным обоих реанализов, минимальное – в июле по данным *NCEP/NCAR* и в июне по данным *ERA-40*.

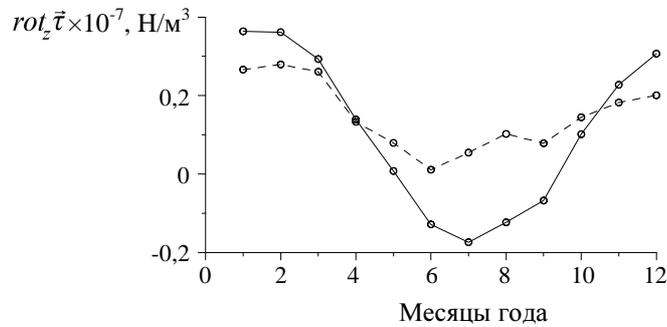


Рис. 2. Внутригодовая изменчивость среднего по акватории значения  $rot_z \bar{\tau}$  за период с 1958 по 2002 гг. по данным *NCEP/NCAR* – сплошная линия и *ERA-40* – штриховая линия.

Не смотря на существенную разницу в пространственном разрешении данных рассматриваемых реанализов, распределение завихренности касательного напряжения трения ветра по акватории моря для зимних и осенних месяцев имеет похожую пространственную структуру (см. рис. 3 а, в). При этом оно согласуется с распределением завихренности, построенной по архивным синоптическим картам [8].

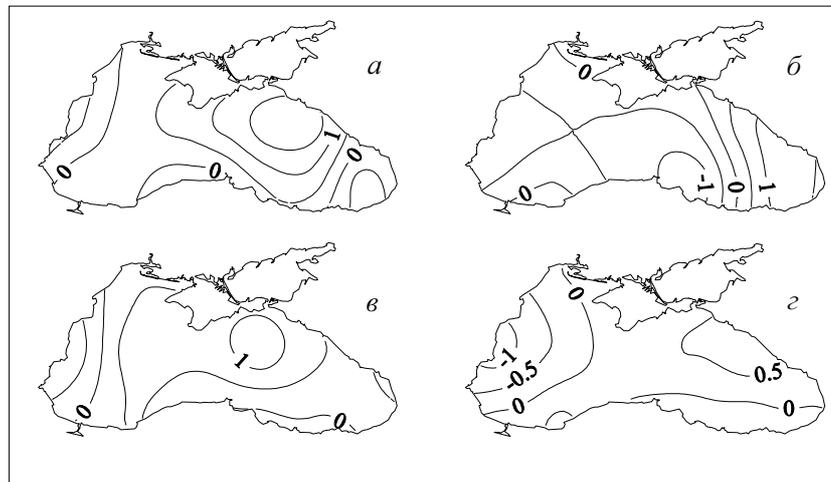


Рис. 3. Пространственное распределение по акватории Черного моря среднемесячной завихренности касательного напряжения трения ветра  $rot_z \bar{\tau} \times 10^{-7} \text{ Н/м}^3$ , рассчитанной по данным реанализа *NCEP/NCAR* (а, б) и *ERA-40* (в, г) для января (а, в) и июля (б, г).

Для летних месяцев в пространственном распределении завихренности касательного напряжения ветра, рассчитанном по данным двух реанализов, имеются существенные различия. По данным *NCEP/NCAR* область с антициклонической завихренностью занимает большую часть территории моря, за исключением восточной части (см. рис. 3, б). По реанализу *ERA-40* распределение завихренности касательного напряжения трения ветра характе-

ризуется квадрупольной структурой [5] – с циклонической завихренностью в северо-восточной и юго-западной частях моря и антициклонической завихренностью в северо-западной и юго-восточной частях (см. рис. 3, *з*). Аналогичное этому распределение завихренности касательного напряжения трения ветра получено в [5] при расчетах с использованием данных *NCEP/NCAR* с одноградусным разрешением.

Межгодовая изменчивость. Данные о межгодовых колебаниях средней над морем завихренности касательного напряжения трения ветра показаны на рис. 4. Сведения о статистических характеристиках рядов средних по акватории значений  $rot_z \bar{\tau}$  ( $\text{Н/м}^3$ ), вычисленных по реанализам *NCEP/NCAR* и *ERA-40* в период с 1958 по 2002 гг. приведены в таблице. Там же приведены и величины коэффициентов корреляции между рядами реанализов.

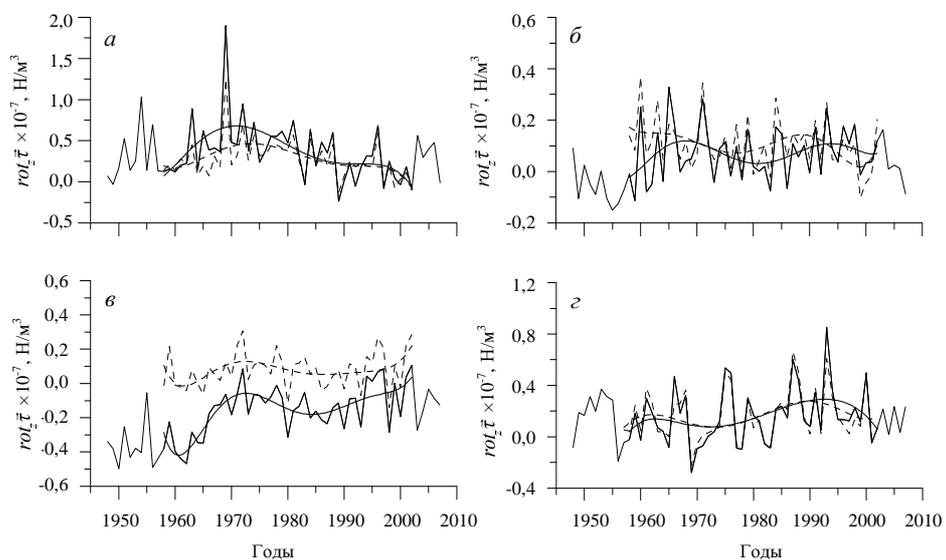


Рис. 4. Межгодовые колебания средней над морем завихренности касательного напряжения трения ветра  $rot_z \bar{\tau}$  ( $\times 10^{-7}$   $\text{Н/м}^3$ ) по данным за январь-февраль (*а*), апрель-май (*б*), июль-август (*в*) и октябрь-ноябрь (*з*) (сплошная линия – *NCEP/NCAR*, штриховая – *ERA-40*) и их аппроксимация (для периода 1958 – 2002 гг.) полиномиальной функцией 6-го градуса.

Межгодовая изменчивость средней по морю завихренности касательного напряжения трения ветра анализировалась отдельно для каждого сезона по данным, объединенным за два месяца: январь-февраль, апрель-май, июль-август, октябрь-ноябрь.

В зимний сезон (январь-февраль) усиление завихренности происходило в начале 1950-х гг. (по *NCEP/NCAR*) и в конце 1960-х – начале 1970-х гг. с максимумом в 1969 году (см. рис. 4, *а*). В последующие годы завихренность в среднем ослабевала. Характер межгодовой изменчивости средних по акватории значений завихренности касательного напряжения трения ветра  $rot_z \bar{\tau}$  по данным двух реанализов хорошо согласуется между собой для этого сезона. Коэффициент корреляции между рядами средних за январь-февраль значений  $rot_z \bar{\tau}$  составляет 0,94.

Таблица. Статистические характеристики рядов средних по акватории  $rot_z \bar{\tau}$  ( $\text{Н/м}^3$ ), вычисленных по реанализам *NCEP/NCAR* и *ERA-40* с 1958 по 2002 гг. и коэффициенты корреляции между рядами реанализов.

Месяцы	Январь-февраль	Апрель-май	Июль-август	Октябрь-ноябрь
Среднее значение $\times 10^{-7} \text{ Н/м}^3$ <i>NCEP/NCAR</i>	0,362	0,072	-0,148	0,163
То же – <i>ERA-40</i>	0,272	0,106	0,078	0,163
Модуль разницы средних значений	0,090	0,034	0,226	0,000
Среднеквадратическое отклонение $\times 10^{-7} \text{ Н/м}^3$ <i>NCEP/NCAR</i>	0,357	0,102	0,143	0,222
То же – <i>ERA-40</i>	0,239	0,101	0,105	0,202
Коэффициент корреляции	0,940	0,730	0,810	0,950

Модуль разницы средних значений  $rot_z \bar{\tau}$  составляет  $0,090 \times 10^{-7} \text{ Н/м}^3$  (см. таблицу). Такое же хорошее согласование отмечается для осеннего сезона, для которого коэффициент корреляции составляет 0,95, а средние значения совпадают. Наибольшие величины касательного напряжения трения ветра в октябре-ноябре отмечаются в конце 1980-х – начале 1990-х гг. (см. рис. 4, з).

Весной (апрель-май) согласование между значениями  $rot_z \bar{\tau}$  рассматриваемых реанализов уменьшается – коэффициент корреляции составляет 0,73. Модуль разности средних значений при этом невелик и равен  $0,034 \times 10^{-7} \text{ Н/м}^3$  (см. таблицу). В летние месяцы отмечается наибольшая разница между средними значениями  $rot_z \bar{\tau}$ :  $0,226 \times 10^{-7} \text{ Н/м}^3$  (см. таблицу).

Для летнего сезона в 1950-е годы и в начале 1960-х гг. отмечаются высокие по модулю значения антициклонической завихренности, вычисленной по данным *NCEP/NCAR* (см. рис. 4, в). Это приводит к наличию положительной тенденции в ходе межгодовой изменчивости по этому реанализу (см. рис. 4, в), и отражается на годовом ходе, что проявляется в увеличении его амплитуды (см. рис. 2). При этом межгодовые вариации значения завихренности по рассматриваемым реанализам происходят синхронно, что обеспечивает достаточно высокое значение коэффициента корреляции 0,81.

Значение среднеквадратического отклонения характеризует величину межгодовой изменчивости. По двум реанализам межгодовая изменчивость завихренности касательного напряжения трения ветра высокая для зимы и осени и относительно небольшая для весны и лета (см. данные, приведенные в таблице).

Десятилетия изменчивость. На десятилетних временных масштабах анализ изменчивости пространственного распределения завихренности касательного напряжения трения ветра проводился для зимнего сезона. Поля строились по осредненным значениям завихренности за десятилетние периоды времени с пятилетним сдвигом (1951 – 1960, 1956 – 1965, 1961 – 1970 гг. и т.д.).

Получено, что в зимние месяцы центр положительной (циклонической) завихренности касательного напряжения трения ветра по данным обоих реанализов находится в восточной части Черного моря (рис. 5 и рис. 6) во все десятилетия. По реанализу *ERA-40* величина  $rot_z \bar{\tau}$  в центре области положительной завихренности меньше, чем по реанализу *NCEP/NCAR*, но в целом пространственное распределение поля завихренности по данным двух реанализов принципиально не меняется. Можно отметить, что положение центра положительной завихренности касательного напряжения трения ветра по данным реанализа *ERA-40* (см. рис. 6) совпадает с центром восточного циклонического круговорота, являющегося составной частью крупномасштабной структуры течений моря [9]. По данным реанализа *NCEP/NCAR* во все десятилетние периоды кроме 1980-х гг. и начала текущего столетия положение центра смещено к востоку (приблизительно на  $2^\circ$ ) по сравнению с данными *ERA-40* (см. рис. 5 и рис. 6).

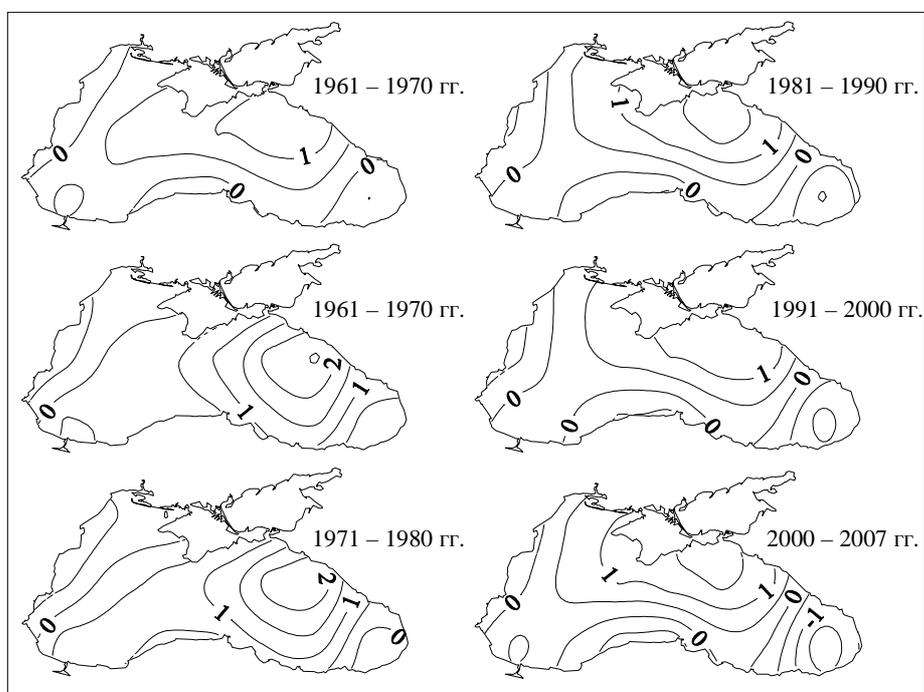


Рис. 5. Пространственное распределение по акватории моря средней за десятилетия завихренности ветра  $rot_z \bar{\tau}$  ( $\times 10^{-7}$  Н/м<sup>3</sup>), рассчитанной по данным реанализа *NCEP/NCAR* для января-февраля.

По реанализу *NCEP/NCAR* максимальная величина в центре области положительной завихренности возрастает от  $\sim 1,0 \times 10^{-7}$  Н/м<sup>3</sup> в 1950-е гг. до  $\sim 2,5 \times 10^{-7}$  Н/м<sup>3</sup> в 1960–1970-е гг., то есть более чем в два раза. Максимум ( $\sim 3,0 \times 10^{-7}$  Н/м<sup>3</sup>) приходится на промежуточный период 1966–1975 гг. (рисунки для промежуточных периодов не приведены). Затем происходит убывание величины завихренности до  $\sim 1,0 \times 10^{-7}$  (Н/м<sup>3</sup>) в 1990-е гг. (см. рис. 5). В начале текущего столетия положительная завихренность в восточной части моря снова усиливается. В 1960-е и начале 1970-х гг. область высоких значений завихренности более  $1 \times 10^{-7}$  (Н/м<sup>3</sup>) занимает всю восточ-

ную часть моря, что объясняет усиление геострофической циркуляции, отмечаемое в это время [9]. В остальные периоды эта область расположена в северо-восточной части моря. По реанализу *ERA-40* наибольшее значение в центре области положительной завихренности в восточной части моря отмечается в промежуточный период 1966 – 1975 гг. и в 1970-е гг. (см. рис. 6).

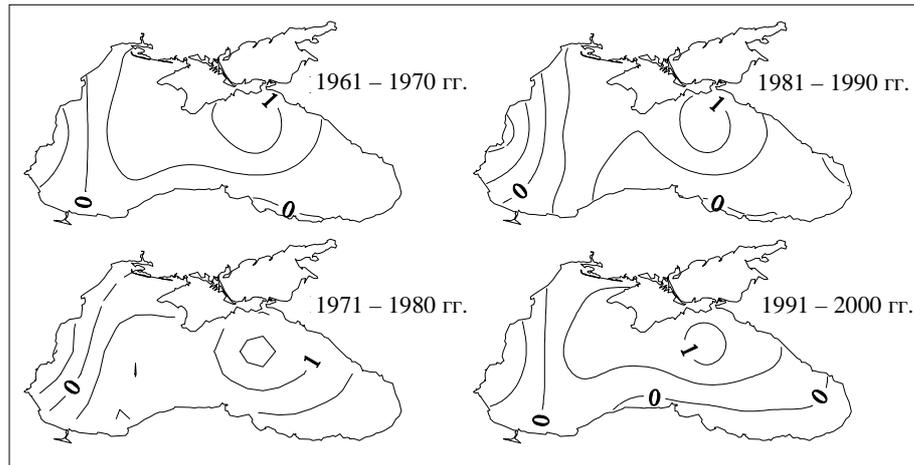


Рис. 6. Пространственное распределение по акватории моря средней за десятилетия завихренности ветра  $rot_z \bar{\tau}$  ( $\times 10^{-7}$  Н/м<sup>3</sup>), рассчитанной по данным реанализа *ERA-40* для января-февраля.

Таким образом, пространственное распределение завихренности касательного напряжения трения ветра в зимний сезон для двух рассматриваемых реанализов качественно согласуется между собой и имеет отличия только в деталях и величине завихренности.

**Выводы.** По данным реанализов *NCEP/NCAR* (на сетке  $1,905^\circ \times 1,875^\circ$ ) и *ERA-40* (на сетке  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ ) в среднем за год завихренность касательного напряжения трения ветра в Черном море имеет циклонический характер, что не противоречит существующим представлениям. Амплитуда годового хода по *ERA-40* в два раза меньше, чем по *NCEP/NCAR*, что может объясняться разным пространственным разрешением данных. Пространственная структура среднемесячных полей завихренности, вычисленная по данным этих реанализов, качественно согласуется между собой для зимнего и осеннего сезонов. Для летнего сезона в пространственной структуре указанных полей имеются существенные различия.

Характер межгодовой изменчивости средних по акватории величин завихренности касательного напряжения трения ветра по данным *NCEP/NCAR* соответствует ходу изменчивости по данным *ERA-40* с коэффициентами корреляции более 0,9 в зимний и осенний сезоны и более 0,7 в весенний и летний сезоны. Наибольшее отличие средних значений завихренности отмечается в летний сезон, наименьшее – в осенний сезон. Максимальная разница средних величин завихренности между двумя реанализами для летнего сезона отмечается в начале 1960-х гг. Анализ и сравнение пространственной структуры десятилетних полей завихренности касательного напряжения трения ветра показал их хорошее согласование для зимнего сезона.

Таким образом, данные о завихренности касательного напряжения трения ветра в зимние месяцы могут быть использованы для анализа изменчивости гидрологических и динамических характеристик вод Черного моря. Различия в ходе межгодовой изменчивости и в пространственной структуре полей завихренности в летний сезон, приводят к необходимости проведения дальнейших исследований по выявлению наиболее достоверных сведений о долговременной пространственно-временной изменчивости завихренности касательного напряжения трения ветра в этот сезон.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler at al. The NMC/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 1996. – v. 77. – P. 437-471.
2. Uppala S.M., KÅllberg P.W., Simmons A.J. Andrae U., V. da Costa Bechtold, Fiorino M., Gibson J.K., Haseler J., Hernandez A., Kelly G.A, Li X., Onogi K., Saarinen S., Sokka N., Allan R.P., Andersson E., Arpe K., Balmaseda M.A., Beljaars A.C.M., van D. Berg L., Bidlot J., Bormann N., Caires S., Chevallier F., Dethof A., Dragosavac M., Fisher M., Fuentes M., Hagemann S., Holm E., Hoskins B.J., Isaksen L., Janssen P.A.E.M., Jenne R., Mcnally A.P., Mahfouf J-F., Morcrette J-J., Rayner N.A., Saunders R.W., Simon P., Sterl A., Trenberth K.E., Untch A., Vasiljevic D., Viterbo P., Woollen J. The ERA-40 re-analysis // Q. J. R. Meteorol. Soc. – 2005. – v. 131, iss. 612. – P. 2961-3012.
3. Rachev N.H., Roussenov V.M., Stanev E.V. The Black Sea climatological wind stress // Bulg. J. Meteor. Hydrol. – 1991. – v. 2, № 3-4. – P. 72-79.
4. Ефимов В.В., Шокуров М.В. Пространственно-временная структура приводного поля ветра над Черным морем // Известия РАН: Физика атмосферы и океана. – 2002. – вып. 38, №4. – С. 476-485
5. Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Поярков С.Г. и др. Влияние поля ветра на динамику вод Черного моря // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / Отв. ред. А.Г. Зацепин, М.В. Флинт. – М.: Наука, 2002. – С. 91-105.
6. Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Станичный С.В, Бурдюгов В.М. Бассейновая циркуляция и мезомасштабная динамика Черного моря под ветровым воздействием // Современные проблемы динамики океана и атмосферы / Под ред. А.В. Фролова, Ю.Д. Реснянского. – М.: Триада ЛТД, 2010. – С. 347-368.
7. Kara A. B., H.E. Hurlburt, A.J. Wallcraft Black Sea Mixed Layer Sensitivity to Various Wind and Thermal Forcing Products on Climatological Time Scales // J. Climate. – 2005. – v. 18. – P. 5266-5293.
8. Белокопытов В.Н. Сезонная и межгодовая изменчивость завихренности поля ветра над Черным морем по данным архивных синоптических карт / Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: НПЦ«ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2007. – С. 176-178.
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. Hellerman S., Roserstein M. Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates // J. Phys. Oceanogr. – 1983. – v. 13, № 7. – P. 1093-1104.
11. Large W.G., Pond S. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds // J. Phys. Oceanogr. – 1981. – v. 11, № 3. – P. 324-336.

Материал поступил в редакцию 25.10.2010 г.

После доработки 27.12.2010 г.