

А.Н. Жуков, М.А. Крашенинникова

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОЛЯ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ВЕТРА НАД ЧЕРНЫМ МОРЕМ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Выполнен анализ пространственно-временной изменчивости скорости приповерхностного ветра над Черным морем на внутригодовых масштабах по данным спутниковых наблюдений за 1987 – 2010 гг. Выявлены особенности изменчивости скорости и направления приповерхностного ветра для различных сезонов года. Даны количественные оценки скорости ветра.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *Черное море, приповерхностный ветер, спутниковые данные, сезонная изменчивость, скорость ветра.*

Введение. Исследование пространственно-временных характеристик ветра является важным при изучении циркуляции вод и выявлении факторов, влияющих на климат Черноморского региона [1]. Имеющиеся на сегодняшний день средние оценки пространственного распределения скорости ветра над Черным морем имеют общие черты [2]: западная и северо-западная части моря отличаются наибольшими значениями (более 4 м/с), а юго-восточная и южная части моря – зона слабых ветров (менее 3 м/с). То есть, скорость ветра уменьшается, в общем, с запада на восток. Локальный максимум скорости ветра расположен в северо-восточной части моря к югу от Керченского пролива. Направления преобладающих ветров [1, 3, 4] в течение большей части года формируют циклоническую циркуляцию. Ветры северных направлений преобладают на западе и на севере моря, восточные и юго-восточные ветры характерны для востока и юго-востока моря. Весной и летом в западной части моря под влиянием Азорского максимума увеличивается повторяемость западных, юго-западных и южных ветров. Сильные (более 10 м/с) и в особенности штормовые ветры летом наблюдаются редко. Они возникают при прохождении циклонов, большая часть которых, приносящих на море плохую погоду и бури, зарождается над Атлантическим океаном.

Для описания характеристик ветра над открытым морем до развития спутниковых средств наблюдений использовались данные немногочисленных судовых наблюдений, скорректированных с учетом данных береговых станций [5]. Однако недостаточное количество данных судовых наблюдений и их невысокое качество не позволяли давать приемлемые статистические оценки ветра над акваторией Черного моря.

Поэтому в последние десятилетия характеристики ветра над морем стали оценивать расчетными методами: по данным атмосферных полей различных глобальных реанализов *NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center of Atmospheric Research)*, *ERA – 40 (40-ye European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Re-*

Analysis) и др. [1, 6, 7], региональных реанализов с повышенным пространственным разрешением [3], и по синоптическим картам [4]. С развитием спутниковых средств наблюдений появилась возможность с высоким пространственно-временным разрешением получать данные о характеристиках ветра над морской поверхностью [8].

К настоящему времени накоплен достаточно большой объем данных спутниковых измерений приповерхностного ветра, позволяющий проанализировать его пространственную изменчивость на разных временных масштабах. Вместе с тем, необходимо заметить, что оценки ветра, полученные по разным массивам данным, в том числе и спутниковым, разнятся между собой. Так, например, оценки средней скорости ветра, представленные в работе [9] по данным скаттерометрии *NASA (National Aeronautic and Space Administration)*, несколько занижены по сравнению с оценками, полученными по наблюдениям на береговых станциях и данным реанализов *NCEP/NCAR* и *ERA – 40* [1].

Имеется ряд работ, посвященных исследованию сезонной изменчивости полей ветра [6, 7]. В том числе в некоторых из них проводилось сравнение сезонного хода по различным источникам данных. Как показано в работе [1], сезонный ход, полученный по данным реанализа *NCEP/NCAR*, синоптическим картам и *ERA – 40*, имеет хорошее совпадение. А его оценки, полученные в работе [10] по данным реанализа *ERA – 40*, являются заниженными. Вместе с тем оценки внутригодовой изменчивости по данным массива *HOAPS-3 (Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and Fluxes from Satellite Data)*, основанного на спутниковых наблюдениях, превышают остальные примерно на 1 м/с.

По сложившимся к концу XX века представлениям, основные сезонные особенности погоды в Средиземноморско-Черноморском регионе, наряду с внутригодовым ходом теплового баланса, определяются взаимодействием Сибирского и Азорского максимумов, Азиатского минимума (Переднеазиатской депрессии) и Средиземноморского зимнего циклона, летом – аравийской депрессии [2, 5]. Однако механизм взаимодействия всех факторов, влияющих на изменение погодных условий в Средиземноморско-Черноморском регионе, не до конца изучен [1]. В том числе не ясна связь изменения приповерхностного ветра с различными климатообразующими факторами на всех масштабах.

Целью настоящей работы является детальный анализ пространственно-временной изменчивости полей приповерхностного ветра по данным спутниковых наблюдений за 1987 – 2010 гг. над Черным морем на внутригодовых масштабах.

Материалы и методика расчета. В данной работе были использованы среднемесячные массивы спутниковых данных, сформированные в рамках проекта *Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP)* [11], на сетке с шагом $0,25^\circ$ и доступные на сайте – http://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/ccmp_measures_atlas_1-4_ow_13_5a_monthly_wind_vectors_flk. Обеспеченность этими данными измерений приповерхностного ветра для Черноморского региона в среднем за период 1987 – 2010 гг. показана на рис. 1.

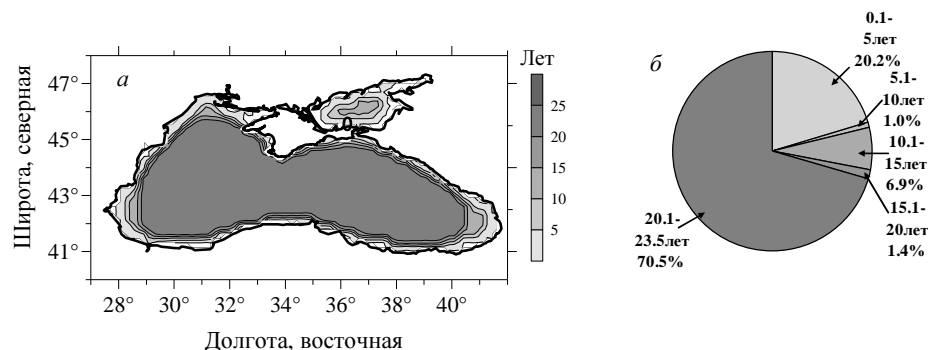


Рис. 1. Обеспеченность каждого узла сетки массива приповерхностного ветра Черного моря спутниковыми данными по числу лет наблюдений по пространству (а) и в процентах от общего числа узлов сетки в границах моря (б).

Из рис. 1 видно, что недостаток данных – менее 5 лет наблюдений в среднегодовом исчислении на каждый узел сетки за период 1987 – 2010 гг. характерен только для вдольбереговой полосы моря. Основная же часть акватории до ~78 % от общего числа узлов в границах моря имеет обеспеченность не хуже 15 – 23 лет наблюдений на каждый узел. В связи с этим, приведенные ниже результаты анализа характеристик поля приповерхностного ветра Черного моря были получены только по данным узлов с обеспеченностью измерениями не менее чем за 10 лет.

В настоящей работе для анализа внутригодового цикла поля приповерхностного ветра над Черноморским регионом рассчитывались средне-многолетние сезонные значения зональной (U) и меридиональной (V) компонент скорости ветра путем осреднения их среднемесячных значений за соответствующие периоды в отдельных узлах сетки. Для получения среднезимних, средневесенних, среднелетних и среднеосенних U и V характеристик, производилось осреднение за декабрь-февраль, март-май, июнь-август, сентябрь-ноябрь, соответственно. Отдельно исследовалась изменчивость этих характеристик в холодное и теплое полугодие. При этом осреднение среднемесячных значений зональной и меридиональной компонент скорости производилось за период октябрь-март и апрель-сентябрь, соответственно. Затем по рассчитанным U и V характеристикам строились карты результирующих векторов скорости приповерхностного ветра над Черным морем.

Кроме величин U и V , определенных для Черного моря в целом, для более подробного анализа пространственно-временных характеристик поля приповерхностного ветра, исследуемая акватория была разбита на четыре части: северо-запад (СЗ), северо-восток (СВ), юго-запад (ЮЗ) и юго-восток (ЮВ). Разделение было выполнено с границами между севером и югом по параллели 43,5° с.ш., между западом и востоком – по меридиану 34,5° в.д. Выбор границы обусловлен особенностями крупномасштабной циркуляции, отчетливо наблюдающимися в разные сезоны.

Результаты. Сезонная изменчивость наглядно проявляется в значениях характеристик ветра, рассчитанных для больших участков исследуемого региона. На рис. 2 представлены внутригодовые изменения среднемесячных

значений модуля скорости приповерхностного ветра по спутниковым данным, рассчитанные для всего моря и отдельных четвертей. Видно, что значения модуля вектора скорости ветра максимальны в летние месяцы (июль-август) и примерно в 2 – 4 раза ниже в ноябре-мае, что не совпадает с данными [5]. При этом для зональной компоненты скорости ветра характерно преобладание восточного направления летом и зимой, а западного направления – осенью (сентябрь-ноябрь) и весной (апрель, май).

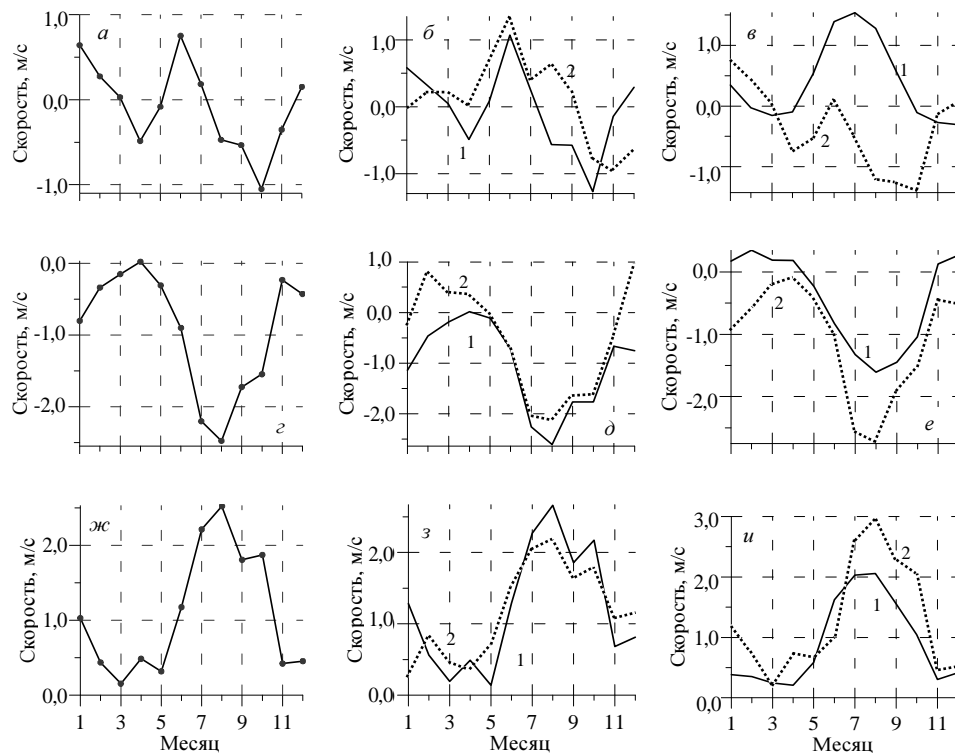


Рис. 2. Годовой ход зональной (*а, б, в*), меридиональной (*г, д, е*) составляющих и модуля (*ж, з, и*) скорости приповерхностного ветра Черного моря, осредненных за 1987 – 2010 гг. по всей его акватории (*а, г, ж*), и по четвертям – СЗ (1), СВ (2) (*б, д, з*), ЮЗ (2), ЮВ (1) (*в, е, и*).

Меридиональная компонента вектора скорости приповерхностного ветра Черного моря в течение всего года (исключение – апрель) направлена на юг. Летом и меньше зимой она усиливается, весной и осенью – ослабевает.

Характеристики зональной и меридиональной компонент скорости приповерхностного ветра в разных четвертях акватории Черного моря, представленные на рис. 2, имеют ряд своих особенностей.

Кривые U внутригодового хода СЗ и СВ четвертей в целом во все сезоны имеют схожий характер (рис. 2, *а, б, в*). Зональная компонента скорости приповерхностного ветра имеет противоположную направленность в ЮВ и ЮЗ четвертях в период с мая по сентябрь, то есть направлена на восток и на запад, соответственно. Причем максимальное значение U на ЮВ достигается в июле, а на ЮЗ – в октябре.

Для всех четвертей акватории Черного моря формы кривых внутригодового хода меридиональной компоненты скорости приповерхностного ветра, напротив, похожи друг на друга (рис. 2, *г, д, е*). Однако, на востоке моря в декабре-апреле *V* компонента направлена на север, хотя на СВ январь месяц, в этом отношении, является исключением.

Кривые внутригодового хода модуля скорости ветра по четвертям и по морю в целом отличаются мало (рис. 2, *ж, з, и*). Можно обратить внимание на то, что на СВ значения модуля в январе ниже, чем в декабре и феврале (рис. 2, *з*). То же самое наблюдается в сентябре в сравнении с августом и октябрем и на СВ, и на СЗ.

Кроме того, на западе Черного моря в апреле наблюдается локальный максимум модуля скорости приповерхностного ветра. Наибольшие летние значения модуля за период 1987 – 2010 гг. соответствуют ЮЗ четверти моря (рис. 3), однако, и они в 2,0 – 2,5 раза ниже аналогичных значений, указанных в [2, 5, 12, 13] и другой литературе 70 – 80-х годов.

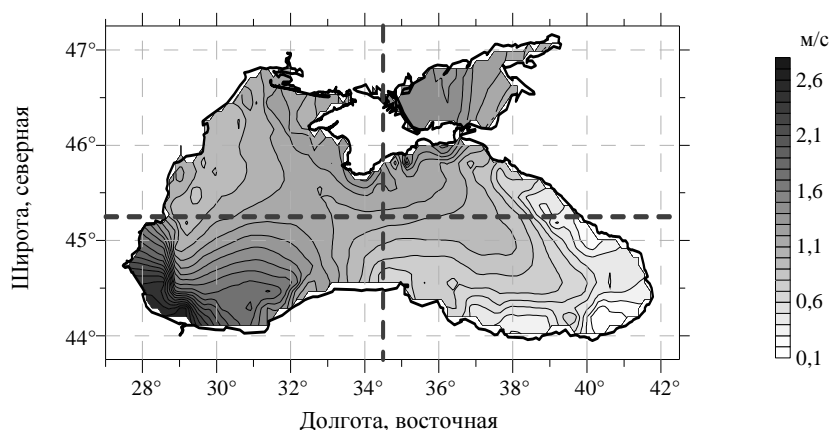


Рис. 3. Среднегодовые (за 1988 – 2010 гг.) значения модуля вектора скорости приповерхностного ветра Черного моря, осредненные по каждому узлу сетки спутниковых данных, обеспеченному наблюдениями не менее чем за 10 лет. Жирной пунктирной линией показаны границы четвертей акватории, использованных при анализе.

Среднегодовое поле векторов скорости приповерхностного ветра над Черным морем для разных сезонов года, а также теплого и холодного полугодий по спутниковым данным представлены на рис. 4 и рис. 5, соответственно.

Сезонная изменчивость наглядно проявляется в значениях характеристик приповерхностного ветра, рассчитанных для всего Черноморского региона (см. рис. 4). Зимой интенсивно формируется преимущественно циклоническая циркуляция над всем Черноморским регионом, включая Азовское море (см. рис. 4, *а*). В весенний период в западной части Черного моря выражена антициклоническая завихренность, а в восточной части – циклоническая (см. рис. 4, *в*).

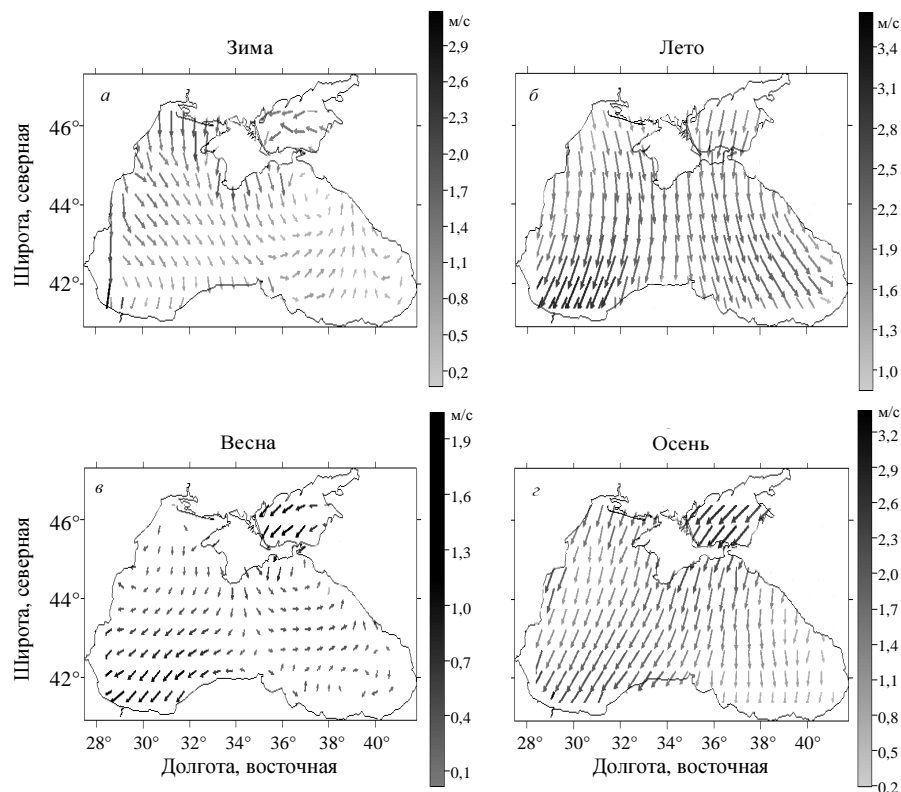


Рис. 4. Среднеголетние поля векторов скорости приповерхностного ветра над Черным морем (по спутниковым данным) в разные сезоны года: *а* – зима (декабрь-февраль); *в* – весна (март-май); *б* – лето (июнь-август); *з* – осень (сентябрь-ноябрь).

Крупномасштабная циркуляция летом существенно отличается от зимней (см. рис. 4, *б*). Строго по центру акватория Черного моря поделилась на две части: в восточной наблюдается циклоническая завихренность, а в западной – антициклоническая. В целом воздушный поток в планетарном пограничном слое всего Черного моря направлен на юг. Область циклонической завихренности в восточной части акватории Черного моря в летне-осенний период является частью большого циклонического круговорота, в центре которого находятся Кавказские горы, восточная часть которого выходит за пределы района, показанного на рис. 4.

Среднелетние и среднезимние поля имеют те же характерные особенности, которые были описаны в работе [3] в экстремальные месяцы январь и июнь, на основании использования регионального реанализа с высоким пространственным разрешением (25 × 25 км). Аналогичные результаты получаются при рассмотрении отдельно теплого и холодного полугодий (см. рис. 5). Незначительно отличаются лишь количественные оценки скорости ветра. По спутниковым данным значения модуля скорости приповерхностного ветра в настоящей работе несколько завышены, в сравнении с результатами, полученными по региональному реанализу в [3]. Особенно это видно в летний сезон, где над западной частью Черного моря модуль скорости

ветра ~ на 1 м/с превышает рассчитанную скорость по реанализу [3], над восточной ~ на 0,5 м/с. Вместе с тем, в настоящей работе значения модуля приповерхностного ветра над Черным морем в западной части примерно на 2 м/с, в восточной – примерно на 1 м/с меньше значений, полученных по данным синоптических карт, прибрежных станций и по данным реанализов *NCEP/NCAR*, *ERA – 40* в работах [1, 2, 5 и др.].

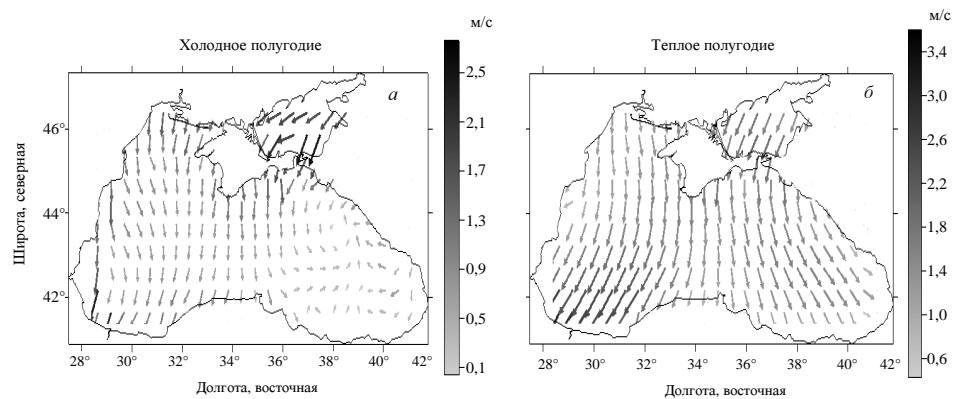


Рис. 5. Среднеголетние поля векторов скорости приповерхностного ветра над Черным морем: *а* – в холодное (октябрь-март) полугодие; *б* – в теплое (апрель-сентябрь) полугодие.

Заключение. Проанализирована изменчивость скорости и направления приповерхностного ветра над Черным морем на внутригодовых масштабах по данным спутниковых наблюдений за 1987 – 2010 гг. Подтверждено, что воздушный поток в планетарном пограничном слое всего Черного моря направлен на юг.

Направление приповерхностного ветра в Черном море имеет сезонную изменчивость. Зимой интенсивно формируется преимущественно циклоническая циркуляция над всем Черноморским регионом. В весенний период в западной части Черного моря выражена антициклоническая завихренность, а в восточной части – циклоническая. Летом и осенью акватория Черного моря условно разделяется на две части: в восточной наблюдается циклоническая циркуляция воздушного потока, а в западной – антициклоническая. Аналогичная ситуация сохраняется при рассмотрении изменчивости приповерхностного ветра в холодное и теплое полугодия.

Характерные особенности полей векторов скорости приповерхностного ветра над Черным морем, по-видимому, связаны с орографией Черноморского региона [3]. Значения модуля скорости приповерхностного ветра в настоящей работе выше, по сравнению с результатами, полученными по региональному реанализу [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011. – 209 с.
2. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. – М.: Изд-во МГУ, 1982. – 192 с.

3. *Ефимов В.В., Анисимов А.Е.* Климатические характеристики изменчивости поля ветра в Черноморском регионе – численный ре-анализ региональной атмосферной циркуляции // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2011. – Том 47, № 3. – С. 1-13.
4. *Белокопытов В.Н., Кудрявцева Г.Ф., Липченко М.М.* Атмосферное давление и ветер над Черным море (1961–1990 гг.) // Тр. УкрНИГМИ. – 1998. – Вып. 246. – С. 174-181.
5. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Ред. Симонов А.И., Альтман Э.Н.* – СПб.: Гидрометеиздат, 1991. – 430 с.
6. *Uppala S.M., Kallberg P.W., Simmons A.J. et al.* The ERA-40 re-analysis // Quart. Journ. Roual. Meteorol. Soc. – 2005. – Vol. 131, iss. 612. – P. 2961-3012.
7. *Kalnay E. and Coauthors.* The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 1996. – Vol. 77. – P. 437-471.
8. *Коротаев Г.К., Еремеев В.Н.* Введение в оперативную океанографию Черного моря. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2006. – 382 с.
9. *Kara A.B., Hurlburt H.E., Wallcraft A.J., Bourassa M.A.* Black Sea mixed layer sensitivity to various wind and thermal forcing products on climatological time scales // J. Climate. – 2005. – Vol. 18, № 24. – P. 5266-5293.
10. *Romanou A., Tselioudis G., Zerefos G.S., Clayson C.A., Curry, J.A., Andersson A.* Evaporation-precipitation variability over the Mediterranean and the Black Seas from satellite and reanalysis estimates // J. Climate. – 2010. – Vol. 23, № 19. – P. 5268-5287.
11. *Hoffman R. N., Ardizzone J., Leidner S. M., Jusem J. C., Smith D. K., Gombos D.* A cross-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 2011. – Vol. 92. – P. 157-174.
12. *Чорно море / Сборник.* – Варна: изд-во «Георги Бакалов», 1978. – 636 с.
13. *Океанографическая энциклопедия.* – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 631 с.

Материал поступил в редакцию 28.11.2012 г.

АНОТАЦІЯ Виконано аналіз просторово-часової мінливості швидкості приповерхневого вітру над Чорним морем на внутрішньорічних масштабах за даними супутникових спостережень за 1987 – 2010 рр. Виявлено особливості мінливості швидкості і напрямку приповерхневого вітру для різних сезонів року. Дано кількісні оцінки швидкості вітру.

ABSTRACT Spatial and temporal variability of the surface wind speed over the Black Sea on the seasonal scale, obtained by satellite observations data of the 1987 – 2010 yy., is analised. Features of the variability of surface wind speed and direction for the different seasons of the year, are detected. The quantitative estimates of the wind speed are received.