

Формирование завихренности поля скорости ветра в атмосфере над Черным морем

© 2017 В. В. Ефимов*, А. В. Юровский

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: vefim38@mail.ru*

Поступила в редакцию 22.05.2017 г.

Рассматривается пространственная структура завихренности поля скорости ветра в Черноморском регионе для января и июля за период 1979 – 2013 гг. Показано, что в западной части моря годовой ход завихренности определяется муссонным механизмом, зависящим от температурных контрастов между морем и окружающей сушей. В восточной части моря в течение года сохраняется циклоническая завихренность поля скорости ветра, определяемая вкладом высоких гор, окружающих море. Анализируется изменение завихренности поля скорости ветра с высотой над восточной и западной частями моря. Сделан вывод, что циклонический характер завихренности в основной части тропосферы связан с глобальными особенностями циркуляции атмосферы, проходящими циклонами и антициклонами, а в нижней части тропосферы завихренность является результатом действия муссонного механизма и влияния прибрежной орографии. Дана оценка соотношения вклада глобальных и региональных факторов, формирующих завихренность поля скорости ветра в приводном слое.

Ключевые слова: завихренность поля скорости ветра, циклон, антициклон, муссонный механизм, Черное море.

DOI: 10.22449/0233-7584-2017-6-3-12

Введение. Одним из основных механизмов, влияющих на сезонную изменчивость крупномасштабной циклонической циркуляции вод Черного моря – Основного Черноморского течения (ОЧТ), – является завихренность поля скорости приводного ветра, связанная с тепловыми контрастами между морем и окружающей сушей [1]. Первые оценки годового хода завихренности, связанные с сезонным ходом солнечной радиации, в численной модели для круглого моря даны в работе [2], с использованием данных реанализа ERA-40 – в [3]. В работе [4] получены уточненные оценки сезонной изменчивости завихренности приводной скорости ветра, основанные на новых данных численного реанализа атмосферных полей с повышенным пространственным разрешением на базе модели *HadRM3P* [5]. Было показано, что контрасты потоков плавучести между морем и окружающей сушей определяют муссонный механизм сезонной изменчивости поля скорости ветра и соответственно – завихренность касательного напряжения трения ветра, а также изменчивость ОЧТ. Была также показана существенная роль гор, окружающих Черное море, в формировании циклонической завихренности в его восточной части. В недавней работе [6] детально рассмотрен сезонный цикл завихренности поля скорости ветра и показано, что она является главным фактором, определяющим динамику вод Черного моря.

Тем не менее оставался неясным принципиальный вопрос о вкладе в сезонную изменчивость крупномасштабных глобальных процессов [7]. Среди них можно выделить два вероятных источника завихренности поля скорости приводного ветра. Во-первых, это вклад синоптических процессов (циклоны и антициклоны) в формирование суммарного результирующего отклика в завихренность поля скорости ветра на сезонных масштабах [8]. Так, например, преобладание в какой-то период года приходящих в регион Черного моря циклонов над антициклонами по числу и/или интенсивности может приводить к суммарной циклонической завихренности и наоборот (хотя количественные оценки их вклада в завихренность нам не известны). Второй вероятный механизм – сезонные изменения глобальной циркуляции, такие как меридиональные смещения положения крупномасштабного субтропического антициклона, на северо-восточном фланге которого находится Черноморский регион, или смещения полярного фронта [2, 9]. Они также могут рассматриваться как причина сезонных колебаний изменчивости поля скорости приводного ветра. Таким образом, соотношение глобальных и региональных факторов в формировании завихренности поля скорости приводного ветра над Черным морем остается неясным и требует дополнительного рассмотрения.

В работе кратко рассматриваются основные черты формирования завихренности поля скорости ветра в Черноморском регионе для двух сезонов года и определяются их различия в восточной и западной частях моря. Далее анализируются вертикальные профили завихренности, позволяющие выделить их изменения по высоте. Также рассматривается соотношение глобальных и региональных механизмов формирования завихренности и дается их оценка для двух частей моря.

Данные. Работа основана на данных нового регионального реанализа атмосферной циркуляции с повышенным разрешением с использованием численной модели *RegCM4* [10, 11] и входных данных реанализа *ERA-Interim* [12, 13]. В модели заданы 18 вертикальных σ -уровней. Пространственное разрешение модели 25×25 км, выходные данные для поверхности заданы с шагом по времени 1 ч, для σ -уровней – 6 ч. Расчеты выполнены за период 1979 – 2013 гг., наполовину перекрывающийся с реанализом [4]. Отметим, что результаты двух реанализов за общий период оказались близкими друг другу.

Результаты. На рис. 1 показаны осредненные среднемесячные поля скорости приповерхностного ветра на высоте 10 м, завихренности скорости и атмосферного давления для наиболее холодного (январь) и наиболее теплого (июль) месяцев года. Следует подчеркнуть, что показанные поля – результат осреднения за многолетний период для конкретного месяца, картина полей за отдельные сроки может значительно отличаться от приведенной. Основной особенностью осредненного поля скорости ветра для января является крупномасштабная циркуляция во всем Черноморском регионе, включая Азовское море. На море поступает поток воздуха северо-северо-западного направления. При этом во всем Черноморском регионе формируется циклоническая циркуляция, четко ограниченная акваториями Черного и Азовского морей. Крымский п-ов находится внутри области этого крупномасштабного

циклона, в целом не нарушая его общей структуры. С запада границей циклона служат очертания берега, с юга и востока эту циркуляцию ограничивают высокие Понтийские (2 – 3 км) и Кавказские (2 – 5 км) горы, являющиеся барьером для проникновения морского воздуха на прилегающую сушу в зимний период. Вдоль Кавказского побережья формируется интенсивная струя воздуха. Непосредственно в прибрежных районах образуются локальные области завихренности, связанные с влиянием неоднородностей поверхности [4]. Таким образом, над всей акваторией Черного моря наблюдаются положительные значения завихренности поля скорости ветра и циклонический кружоворот вокруг минимума атмосферного давления.

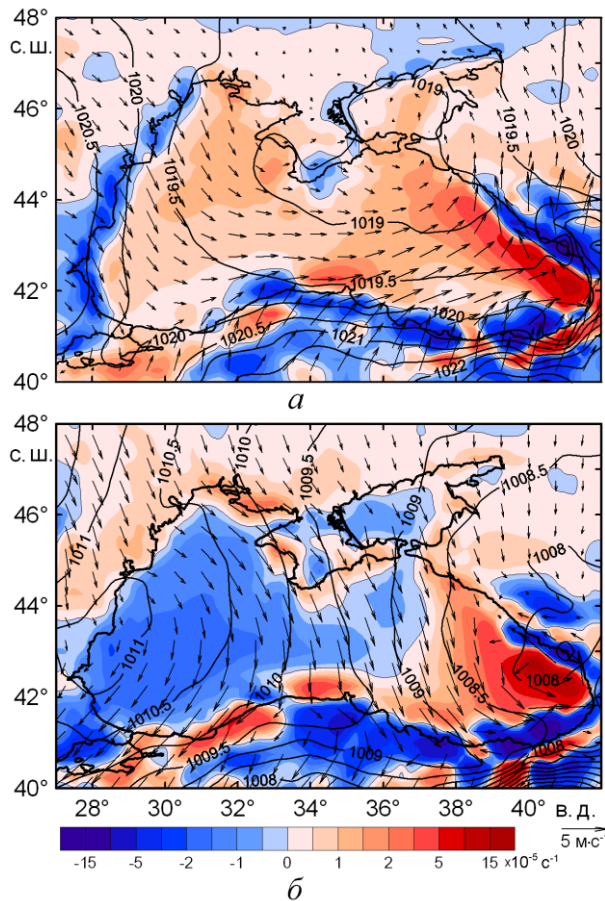


Рис. 1. Осредненные за 1979 – 2013 гг. величины завихренности поля скорости ветра (показаны цветом), векторов скорости ветра (стрелки) на уровне 10 м и атмосферного давления (изобары) на уровне моря в январе (а) и июле (б)

Атмосферная летняя циркуляция существенно отличается от зимней. По существу, акваторию моря можно разделить на две части по меридиану 34° в. д., проходящему по наиболее узкому месту моря. В восточной части сохраняется циклоническая завихренность, в западной возникает область антициклонической циркуляции. В целом воздушный поток в планетарном по-

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ № 6 2017 5

граничном слое всего Черноморского региона направлен на юг. С восточной стороны моря он по-прежнему не преодолевает, а огибает Кавказские горы, а на южном побережье Черного моря начинает переваливать через более низкие Понтийские горы. Область циклонической завихренности в восточной части моря в летне-осенний период является частью большого циклонического круговорота, в центре которого находятся Кавказские горы. Как можно видеть из данных исходного реанализа *ERA-40*, этот круговорот – часть более крупномасштабной циркуляции, включающей Каспийское море и в целом Кавказские и Понтийские горы. Как и для зимнего периода, здесь выделяются локальные области антициклонической завихренности, непосредственно примыкающие к высокогорным восточным и южным границам моря.

Различие в завихренности поля скорости ветра в восточной и западной частях моря, условно разделенного по 34° в. д., объясняется преобладающим влиянием высоких Кавказских гор в восточной части. Сезонный ход завихренности в западной части моря в отсутствие высоких окружающих гор почти целиком определяется муссонным эффектом, имеющим годичную периодичность. В восточной части вклад высоких гор в завихренность в зимний период усиливает муссонный эффект, в летний период он преобладает над муссонным эффектом и в результате создает в течение всего года циклоническую циркуляцию. Отметим, что влияние Кавказских гор на развитие циклонической циркуляции в восточной части моря в летний период определяется особенностями взаимодействия бароклинного потока воздуха с горами, который при обтекании северо-западного края Кавказских гор способствует развитию циклонической циркуляции над морем [14].

Более детальное обсуждение всех особенностей завихренности поля скорости ветра над Черным морем, связанных с локальными региональными проявлениями муссонного механизма, прибрежных неоднородностей подстилающей поверхности и влияния окружающих высоких гор, было представлено ранее в работе [4], основанной на данных другого, хотя и близкого по качеству и разрешению реанализа – *PRECIS*, относящегося к периоду 1958 – 2001 гг. В частности, там был рассмотрен численный эксперимент, наглядно иллюстрирующий вклад циклонической либо антициклонической завихренности при учете дополнительных температурных контрастов разного знака между морем и окружающей сушей. Результаты этих двух региональных реанализов оказались близкими. Поэтому далее особенности полей приводной скорости ветра, показанные на рис. 1, рассматривать не будем, а остановимся на сезонном цикле завихренности и ее изменении по высоте.

Годовой ход осредненной по вышеупомянутым районам Черного моря завихренности ветра на поверхности и высоте 5 км показан на рис. 2. Для западной части моря, где невелико влияние гор и преобладает хорошо выраженная цикличность тепловых контрастов между морем и окружающей сушей, завихренность поля скорости приводного ветра также имеет периодический характер со сменой знака в течение года. Для восточной части моря величина завихренности остается положительной в течение всего года вследствие преобладающего вклада высоких Кавказских и Понтийских гор. Характер годового хода завихренности на высоте 5 км другой: в течение всего года сохраняется циклоническая завихренность $\sim(0,5 - 1) \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$.

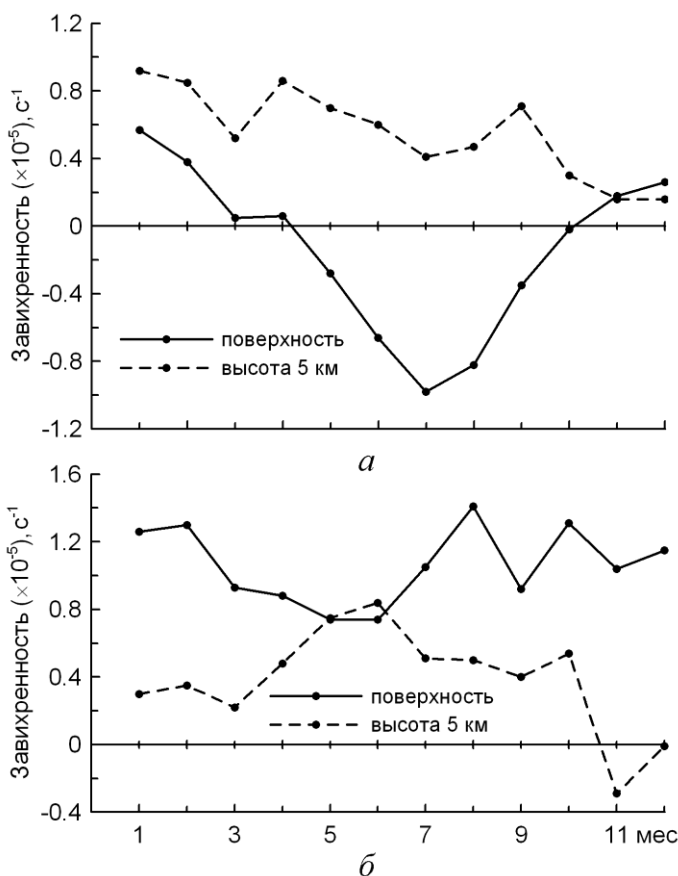


Рис. 2. Осредненный годовой ход завихренности поля скорости ветра на поверхности и высоте 5 км в западной (а) и восточной (б) частях Черного моря

На рис. 3 показано распределение по высоте значений завихренности ветра, осредненных отдельно для западной и восточной частей Черного моря. Сезонная изменчивость завихренности в приводном слое атмосферы наиболее выражена в западной части моря. Как указывалось, для этого района влияние орографии незначительно и муссонный эффект должен проявляться в более чистом виде. Действительно, в нижней части тропосферы на высотах до 2 – 3 км хорошо выражена положительная (циклоническая) завихренность для января и отрицательная (антициклоническая) – для июля. В восточной части моря завихренность ветра в течение года остается циклонической.

На высотах более 3 – 4 км в обеих частях моря поведение вертикальных профилей завихренности изменяется: величина завихренности вновь увеличивается и достигает максимума на высотах ~12 – 13 км. Можно полагать, что в этом диапазоне высот влияние локальных причин, связанных с неоднородностями поверхности (контраст температур, орография и др.), становится малым и основную роль играют отмеченные ранее глобальные факторы. На этих высотах профили завихренности в обеих половинах моря в целом изменяются с высотой одинаково, хотя некоторые различия между ними сохраняются.

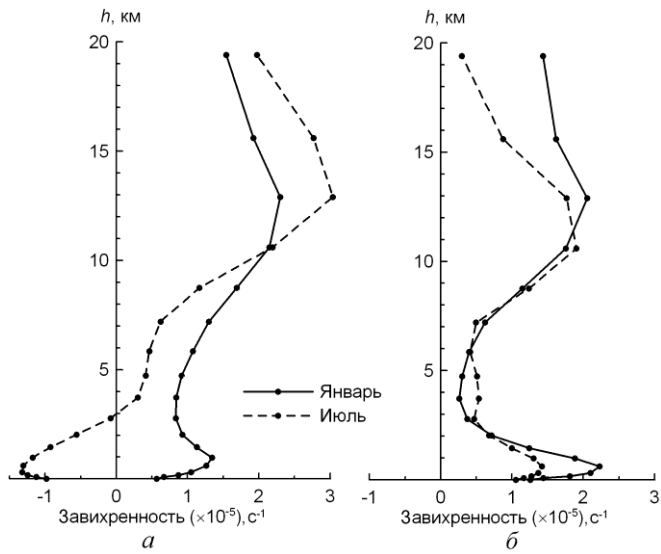


Рис. 3. Осредненное распределение с высотой завихренности поля скорости ветра в январе и июле для западной (а) и восточной (б) частей Черного моря

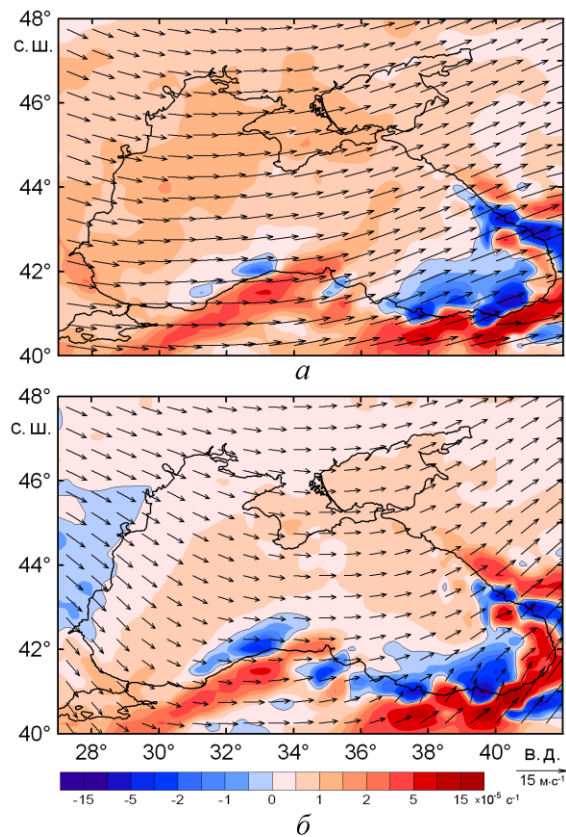


Рис. 4. Осредненные величины завихренности поля скорости ветра (показаны цветом) и векторы скорости ветра на высоте 5 км в январе (а) и июле (б)

Структуру поля ветра в тропосфере над Черным морем на высотах более 3 – 4 км поясняет рис. 4. На нем показаны векторы скорости ветра и величины завихренности на высоте 5 км. Величины градиентов зональной скорости, характеризующие меридиональную неоднородность зонального потока, и градиентов меридиональной скорости, описывающие искривление зонального потока, являются двумя слагаемыми завихренности. Они хорошо представлены на рис. 4: выражены западный зональный перенос в средней тропосфере, изменения его меридиональных градиентов в сезонном цикле, а также искривление зонального потока. Детальный анализ полей скорости ветра в тропосфере, причин появления различий между профилями завихренности в разных частях моря выходит за рамки настоящей работы и требует более общего рассмотрения особенностей глобальной циркуляции во всем регионе. Можно лишь заключить, что, вероятно, основной причиной небольших различий в профилях завихренности для обеих половин моря является влияние высоких Кавказских и Понтийских гор, возмущения от которых прослеживаются на высоте 5 км и хорошо видны на рис. 4.

Таким образом, резкое различие в вертикальных профилях завихренности в нижней части атмосферы и на высотах свыше 2 – 3 км непосредственно свидетельствует о том, что завихренность в приводном слое является результатом региональных процессов – муссонного и орографического. На больших высотах завихренность в основном имеет глобальную природу, связанную с особенностями крупномасштабной циркуляции [15]. Здесь циклоническая завихренность сохраняется в течение всего года.

Следует отметить, что все же остается неясным вопрос о непосредственном вкладе интенсивных синоптических структур – циклонов и антициклонов в суммарную среднемесячную величину завихренности поля скорости приводного ветра. При этом отметим также, что для западной части моря в области минимума профиля завихренности на высотах ~ 5 км в зимний период сохраняется положительная завихренность $\sim 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Это, вообще говоря, указывает на связанность процессов формирования завихренности в верхней и нижней частях тропосферы в это время года. Причиной такой связанности могут быть синоптические вихри, которые обеспечивают дополнительный вклад в суммарную величину завихренности поля скорости ветра на поверхности.

Физическую природу этого поясняет рис. 5, на котором приведены гистограммы 6-часовых значений атмосферного давления на поверхности для одной из точек в середине западной части моря. Как видно, для летнего периода среднеквадратическая величина пульсаций давления составляет 4,16 гПа, а асимметрия мала, $\sim -0,19$. Для зимнего же периода и среднеквадратическое отклонение, и асимметрия в 2 раза больше. Это свидетельствует об относительно малом вкладе летом по сравнению с зимой синоптических циклонов и антициклонов в суммарное значение давления. В зимний период ситуация изменяется: большее по модулю отрицательное значение асимметрии указывает, что вклад циклонов по сравнению с антициклонами преобладает.

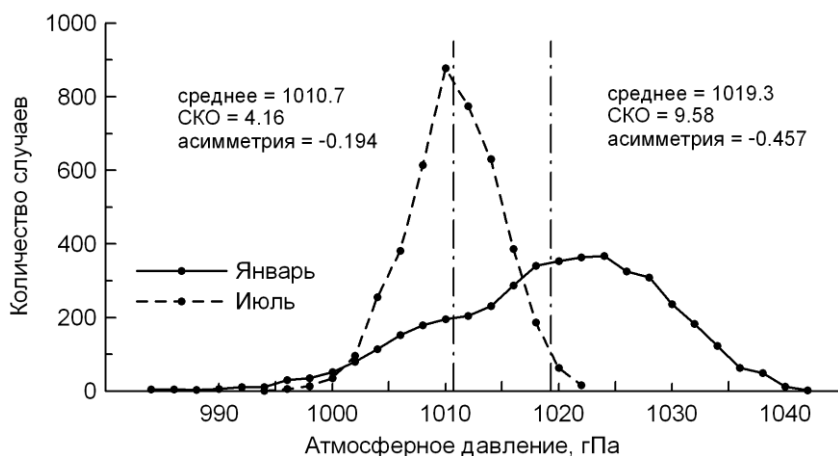


Рис. 5. Гистограммы распределения 6-часовых значений атмосферного давления на поверхности в январе и июле 1979 – 2013 гг. в западной части Черного моря (44° с. ш., 31° в. д.)

Однако по-прежнему трудно разделить вклад в завихренность синоптических вихрей и крупномасштабной циркуляции. Грубую оценку суммарного вклада этих двух глобальных механизмов в формирование завихренности приводного ветра можно получить на основании данных рис. 1, 2, 4. Для января осредненные величины скорости и завихренности по мере приближения к поверхности уменьшаются от 10 – 15 м·с⁻¹ на высоте 5 км до значений приземной скорости 3 – 5 м·с⁻¹, т. е. приблизительно в три раза. В результате в первом приближении можно принять, что и глобальная завихренность на высоте 5 км ($\sim 0,9 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$) уменьшится пропорционально скорости и будет равна для приводного ветра $\sim 0,3 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, что составляет около половины от суммарной величины завихренности приводного ветра ($0,6 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$), показанной на рис. 2. Таким образом, $\sim 50\%$ циклонической завихренности в зимний период для западной части моря можно связать с непосредственным вкладом осредненной глобальной циркуляции и проходящих циклонов над акваторией Черного моря. Для восточной половины моря этот вклад в суммарную величину завихренности составляет $\sim 25\%$.

Для других сезонов это соотношение меняется. Весной и осенью температурные контрасты между морем и сушей и соответственно – величины завихренности приводного ветра в западной части моря, как видно на рис. 2, невелики. В летний же период синоптические антициклоны, также как и глобальная циркуляция, не могут внести вклад в суммарную антициклоническую завихренность: для него асимметрия распределения отрицательна и мала. В основной части тропосферы завихренность над Черным морем сохраняет циклонический характер в течение всего года. Поэтому антициклоническая завихренность приводного ветра в западной части моря целиком обусловлена муссонным эффектом.

Заключение. Рассмотрена пространственная структура полей скорости приводного ветра и атмосферного давления для января и июля. Показано различие сезонной изменчивости завихренности поля скорости ветра в западной

и восточной частях Черного моря. В западной части завихренность определяется муссонным механизмом, зависящим от циклического годового хода температурных контрастов между морем и окружающей суши. В восточной части в течение года сохраняется циклоническая завихренность поля скорости ветра, контролируемая вкладом высоких окружающих море гор.

Рассмотрено изменение по высоте завихренности поля скорости ветра над восточной и западной частями моря. Показано, что профили завихренности в нижней части атмосферы – до высоты 2 – 3 км и выше – имеют различный вид, что указывает на различие физических механизмов формирования завихренности в этих слоях. В основной части тропосферы завихренность в течение всего года имеет циклонический характер, связанный с глобальными особенностями циркуляции атмосферы и проходящими синоптическими циклонами и антициклонами. В нижней части на высотах менее 2 – 3 км завихренность является результатом действия муссонного механизма и влияния прибрежной орографии.

Дана оценка соотношения вклада глобальных и региональных факторов, формирующих завихренность поля скорости ветра в приводном слое. В зимний месяц вклад глобальных причин может составлять для западной части моря до половины суммарной величины приводной завихренности, для восточной – около четверти. Летом антициклоническая завихренность в западной части полностью определяется муссонным механизмом. На формирование завихренности в восточной части в течение всего года в основном влияют высокие окружающие море горы, в результате чего и в летний период завихренность сохраняет циклонический характер.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2015-0001 «Фундаментальные исследования процессов в системе океан – атмосфера – литосфера, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды и климата глобального и регионального масштабов» (шифр «Климат»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А. и др. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 240 с.
2. Кортаев Г.К. О причине сезонного хода циркуляции Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2001. – № 6. – С. 14 – 20.
3. Ефимов В.В., Шокуров М.В., Барабанов В.С. Физические механизмы возбуждения ветровой циркуляции внутренних морей // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2002. – 38, № 2. – С. 247 – 258.
4. Ефимов В.В., Анисимов А.Е. Климатические характеристики изменчивости поля ветра в Черноморском регионе – численный реанализ региональной атмосферной циркуляции // Там же. – 2011. – 47, № 3. – С. 380 – 392.
5. Jones R.G., Noguer M., Hassel D.C. et al. Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. – Exeter: Met Office Hadley Centre, 2004. – 40 p.
6. Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G. et al. Long-term variations of the Black Sea dynamics and their impact on the marine ecosystem // J. Mar. Syst. – 2016. – 163. – P. 80 – 94. – doi:10.1016/j.jmarsys.2016.06.006

7. *Stanev E.V.* Understanding Black Sea Dynamics: Overview of Recent Numerical Modeling // *Oceanogr.* – 2005. – 18, No. 2. – P. 56 – 75. – doi:10.5670/oceanog.2005.42
8. *Артамонов Ю.В., Белокопытов В.Н., Скрипалева Е.А.* Сезонная динамика крупномасштабных циклонических круговоротов Черного моря // *Системы контроля окружающей среды.* – Севастополь: НИЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – С. 268 – 270.
9. *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 / Отв. ред. А.Г. Зацепин, М.В. Флинт.* – М.: Наука, 2002. – С. 91 – 105.
10. *Giorgi F., Ayrault R.O.* The road toward RegCM4 // *Clim. Res.* – 2012. – 52. – P. 3 – 6. – doi:10.3354/cr01089
11. *Анисимов А.Е., Яровая Д.А., Барабанов В.С.* Реанализ атмосферной циркуляции для Черноморско-Каспийского региона // *Морской гидрофизический журнал.* – 2015. – № 4. – С. 14 – 28. – doi:10.22449/0233-7584-2015-4-14-28
12. *Uppala S.M., Kållberg P.W., Simmons A.J. et al.* The ERA-40 re-analysis // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* – 2005. – 131, Iss. 612. – P. 2961 – 3012. – doi:10.1256/qj.04.176
13. *Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J. et al.* The Era-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Ibid.* – 2011. – 137, Iss. 656. – P. 553 – 597. – doi:10.1002/qj.828
14. *Ефимов В.В., Михайлова Н.В.* Мезомасштабный атмосферный вихрь как проявление Новороссийской боры // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2017. – 53, № 4. – С. 512 – 522. – doi:10.7868/S0003351517040092
15. *Пальмен Э., Ньютон Ч.* Циркуляционные системы атмосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1973. – 615 с.

Formation of vorticity of the wind speed field in the atmosphere over the Black Sea

V. V. Efimov*, A. V. Yurovsky

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

**e-mail: vefim38@mail.ru*

Spatial structure of the wind speed vorticity in the Black Sea region is considered for January and July, 1979 – 2013. It is shown that in the western part of the sea the vorticity annual variation is conditioned by the monsoon mechanism dependent on the temperature contrasts between the sea and the surrounding land. In the eastern part of the sea, cyclonic vorticity of the wind speed field is conditioned by the effect of high mountains surrounding the sea in this region and preserved in course of the whole year. Variation of the wind speed field vorticity with height over the eastern and western parts of the sea is analyzed. The drawn conclusion shows that the cyclonic character of vorticity in the troposphere main part is related both to the global features of the atmospheric circulation and the passing cyclones and anticyclones; whereas in the lower part of the troposphere, vorticity is a result both of the monsoon mechanism and the coastal orography effects. The contributions of the global and regional factors forming the wind speed field vorticity in the atmosphere surface layer are estimated.

Keywords: vorticity of wind speed field, cyclone, anticyclone, monsoon mechanism, Black Sea.